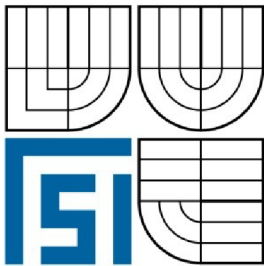


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VÝVOJ METODY VIZUALIZACE A MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ VE VZDUCHU POMOCÍ TERMORIZE

THE DEVELOPMENT OF METHOD FOR VIZUALIZATION AND MEASUREMENT
OF TEMPERATURE FIELDS IN AIR USING THERMOGRAPHY

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN PEŠEK

ŠKOLITEL
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN PAVELEK, CSc.

BRNO 2013

Abstrakt:

Tato práce pojednává o měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize. V úvodu práce jsou uvedeny možnosti měření teplotních polí ve vzduchu a popis vyvinuté měřicí metody. Dále jsou uvedeny počátky termovizního zobrazování a oblast použití termovizního měření, na kterou navazují teoretické základy pro měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery. V teoretických základech je uveden rozbor vedení tepla v pomocném materiálu, stanovení dynamických vlastností metody a rozbor záření, který ovlivňuje termovizní snímání. Metoda měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize vyžaduje vložit do neizotermního proudu vzduchu pomocný materiál, na kterém lze sledovat rozložení teplot vzduchu. Pro efektivní vizualizaci teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery je výběr vhodného pomocného materiálu, na kterém je zobrazována měřená teplota, zcela zásadní.

V další části jsou stanoveny statické vlastnosti pomocných materiálů. Ze zjištěných údajů jsou následně definovány hranice použitelnosti této metody. V práci jsou uvedena zařízení pro měření teplotních polí ve dvojrozměrných (2D) a ve třírozměrných (3D) vzduchových proudech, s rozšířením o měření teplotních polí v malých uzavřených prostorách s využitím průzoru. Pro běžné využití této metody je vypracována podrobná metodika měření teplotních polí ve vzduchu termovizní kamerou a její aplikovatelnost je demonstrována na konkrétních příkladech. Vyvinutá měřicí metoda může být využita v mnoha oblastech výzkumu i v praxi.

Klíčová slova:

Termovizní kamera, teplotní pole, vzduchový proud, průzor

Abstract:

This work deals with the measurement of temperature fields in the air using an infrared camera. The dissertation describes the opportunity of measuring the temperature field in the air and the characterization of the developed measuring method. In the next part there are introduced the beginning of thermography imaging and the field of usability of the new infrared measuring method. Further, the theoretical foundations of the thermography measuring method in the temperature fields in the air are described. In the theoretic background there are described the analysis of heat conduction in an auxiliary material, the determination of dynamic properties of the method and the analysis of radiation, which has an influence on infrared imaging. This method requires an insertion of the auxiliary material into the non-isothermal air flow, which can allow for the study of the temperature distribution in air. For effective visualization of temperature fields in the air using an infrared camera, the selection of the appropriate auxiliary material, on which the air temperature displays, is crucial.

In the next part of the doctoral thesis, there is a description of static measuring properties of auxiliary materials. The usability range of the measuring method is determined from these properties. In the thesis there are presented the description of the device for the measurement of 2D temperature fields in the air and the description of the measuring device for 3D measurements of temperature fields in the air using an infrared camera, which can also be used for measurements of temperature fields in small enclosed spaces through a viewing window. For the practical use of the method, the detailed methodology of measuring temperature fields in the air by an infrared camera was developed and its applicability was demonstrated on practice examples. The developed measuring method can be used in many areas of research and in practice.

Keywords:

Infrared camera, temperature field, airstream, visor

PEŠEK, M. *Vývoj metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 137 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.

Prohlašuji, že jsem dizertační práci *Vývoj metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize* vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Milana Pavelka, CSc. s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Ing. Martin Pešek

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Milanu Pavelkovi, CSc. za odborné vedení a zejména za trpělivost, kterou se mnou měl po dobu mého studia zobrazovacích metod. Můj dík patří také mým kolegům za odborné rady, konzultace a pomoc s vytvářením jak experimentů, tak jejich následného vyhodnocování. Jmenovitě Ing. Tomáši Mauderovi, Ph.D., Ing. Lubomíru Klimešovi, Ing. Ondřejovi Pechovi a Ing. Jakubovi Elcnerovi.

Práce vznikla při řešení výzkumného projektu GAČR 101/05/H018 – Výzkum efektivních systémů pro zlepšení kvality životního prostředí, výzkumného projektu GAČR 101/09/H050 – Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení kvality vnitřního prostředí, dále projektu FSI-J-12-25 – Experimentální výzkum proudových polí před zesíleným sacím nástavcem situovaným nad pracovním stolem a projektu FSI-S-11-6 – Komplexní modelování interakce člověka a prostředí v kabinách dopravních prostředků a obytných prostorách a návrhové nástroje (tzv. Human Centered Design).

Na závěr, nikoli však v poslední řadě, bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině, která mi byla morální oporou během studia.

Ing. Martin Pešek

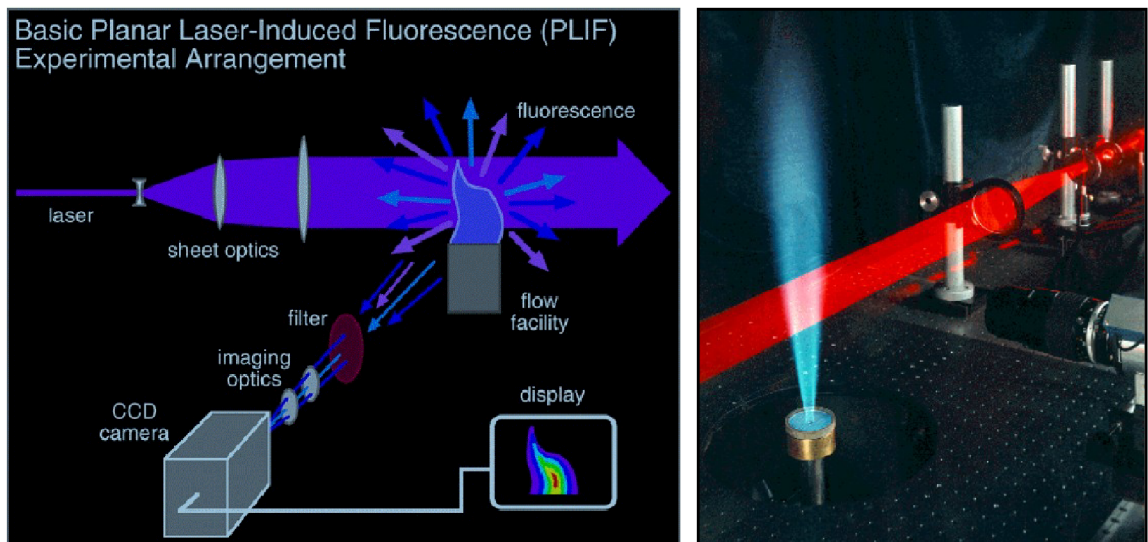
Obsah

1	Úvod	9
2	Vymezení cílů dizertační práce	11
3	Počátky termovizního zobrazování	12
4	Teoretické základy	18
4.1	Přenos tepla vedením	18
4.2	Přenos tepla prouděním	19
4.3	Přenos tepla zářením	21
4.4	Termovizní měření	23
4.5	Emisivita	29
4.6	Radiační teplota	33
4.7	Transmitance	36
5	Měření parametrů vyvíjené metody	40
5.1	Měření emisivity	41
5.2	Měření časové konstanty	48
5.3	Měření transmitance	52
5.4	Měření rozptylu teplotního pole	57
5.5	Stanovení oblasti použitelnosti metody	61
6	Zařízení pro metodu měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery	63
6.1	Zařízení pro měření 2D vzduchového proudu	63
6.2	Zařízení pro měření 3D vzduchového proudu	65
6.3	Zařízení pro měření teplotního pole uvnitř malých uzavřených prostorů	69
7	Metodika měření teplotních polí termovizní kamerou	73
8	Měření teplotních polí v mikroklimatu	75
8.1	Měření teplotních polí v místnosti	75
8.2	Vyhodnocení měření teplotních polí v místnosti	77
8.3	Měření teplotních polí v automobilu	79
8.4	Vyhodnocení měření teplotních polí v automobilu	81
9	Závěr	85
10	Literatura	89
11	Vlastní publikace	93
12	Seznam použitých veličin	94
13	Seznam obrázků	98
14	Seznam použitých tabulek	101
15	Příloha - Metodika měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery	102

1 Úvod

Termovizní kamera je velice efektivní zařízení pro bezdotykové měření teplotních polí v různých odvětvích vědních oborů. Tento způsob měření poskytuje názorné obrazové záznamy, umožňující získat kvalitativní i kvantitativní informace pro hlubší poznání tepelných stavů a termodynamických dějů u zkoumaných zařízení. O co je vlastní práce s termovizí jednodušší, o to je těžší její správné používání a nastavení, které vychází z teoretických znalostí z oboru termomechaniky a přenosu tepla. Termografie se používá zejména pro určování teplot povrchů, ale předložená práce se snaží rozšířit tyto možnosti o sledování a měření teplotních polí ve vzduchu. Okamžitá znalost rozložení teplotního pole v proudu neizotermního vzduchu může vést k rychlé identifikaci problému například při návrhu klimatizace nebo teplovzdušného vytápění. Vizualizace teplotních polí ve vzduchu může rovněž odhalit prostorové a časové souvislosti sledovaných dějů.

Měření teplotních polí pomocí termovizní kamery je jedním z možných způsobů zjišťování teplot vzduchu [52]. Teplotu vzduchu nelze měřit přímo pomocí termokamery, protože vzduch je průteplivý materiál. Z tohoto důvodu je třeba použít jiný pomocný materiál, na kterém budou teplotní vzduchová pole zobrazena. K dalším metodám měření teplot vzduchu patří například proměření teplotních polí pomocí soustavy termočlánků, odporových senzorů, interferometrie nebo systému PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence - obr. 1.1) [47, 55]. Teplotní pole ve vzduchu lze získat i s využitím numerické simulace. Proměřování teplot vzduchu pomocí soustavy termočlánků nedává názorný obraz o teplotních polích a má také vyšší časovou prodlevu. Samotné termočlánky zároveň narušují proud neizotermního vzduchu a měření s větším počtem termočlánků je náročné na zručnost obsluhy a také na dobu instalace termočlánků. Jedná se ovšem o nejlevnější metodu z výše uvedených. Odporové snímače teploty se používají k dálkovému měření teploty skrz snímač, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Materiál snímače mění svůj elektrický odpor v závislosti na změně své teploty. Nevýhodou je poměrně velká časová konstanta a tedy problém s měřením dynamických změn. Interferometrie je optická zobrazovací metoda umožňující zviditelnění teplotních polí a je založená na principu posuvu fází paprsků. Tato metoda umožňuje podobně jako termografie téměř okamžitě zaznamenávat dynamické děje a nenarušuje pozorovanou oblast snímači či senzory, avšak její využití je převážně vhodné pouze do laboratorních podmínek z důvodu citlivosti a stability optické soustavy. Jednou z dalších možností umožňující měření teplot v tekutinách je metoda PLIF [20], která je založena na použití fluorescenčního barviva, které je přidáno do měřené tekutiny. Tato metoda je jednou z možných, avšak při praktickém měření teplot z výustek klimatizačních zařízení není příliš vhodná vzhledem ke své komplikovanosti [37]. Využití numerické simulace pro modelování teplotních profilů při známých okrajových podmínkách je velice názorné a umožňuje velkou variabilitu při změně podmínek měření. Ovšem správné stanovení okrajových podmínek pro využití jakékoliv simulace je značně náročné a citlivé na přesné stanovení jejich hodnot a v neposlední řadě také na rozhodnutí, co lze v numerické simulaci zanedbat a co nikoliv. Numerická simulace je náročná na čas potřebný k namodelování situace a době výpočtu, která je závislá na výkonu použité výpočetní techniky [41]. Oproti výše uvedeným metodám přináší měření teplotních polí pomocí termovizní kamery výsledky v reálném čase, protože teplotní pole je zobrazováno přímo na displeji kamery (nebo monitoru PC) a výsledky měření (termogramy a termovizní videosekvence) jsou názorné a srozumitelné i neoborné veřejnosti [27].



Obr. 1.1 Systém PLIF [72]

Důležitým úkolem předložené práce je definování nejvhodnějších materiálů, které mohou být využity při sledování rozložení teplot ve vzduchu pomocí termovizní kamery, a to metodou vložení archu papíru či jiného pomocného materiálu do neizotermního proudu vzduchu. Tento materiál musí mít vhodné statické vlastnosti pro měření, především vysokou emisivitu, nízkou tepelnou kapacitu, minimální tloušťku, apod. Pro praktické používání uvedené metody měření teplotních polí je nutná také znalost dynamických vlastností, ke kterým patří zejména časová konstanta. Při měření teplotních polí v malých uzavřených prostorách je nezbytné stanovit vlastnosti průzoru, přes který je snímání prováděno. Pro minimalizaci nejistot měření teplot vzduchu je nutné pracovat s materiály, u kterých známe jejich vlivy na samotné měření.

Metoda měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize je tedy založena na měření teploty průteplivého média – vzduchu, a to jako povrchové teploty vložení pomocného materiálu [59]. Neizotermní proud vzduchu předává tepelný tok konvekcí do povrchu pomocného materiálu (papírový arch či jiný vhodný materiál), změni jeho teplotu, která je měřena termovizí jako teplota povrchu. Zobrazování teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize na celistvý arch pomocného materiálu je vhodné pro dvojrozměrný proud teplého vzduchu (2D). Pro trojrozměrný proud vzduchu (3D) je možno použít měřicí síť s využitím pomocných terčů o známých vlastnostech.

Znalost rozložení teplotního pole nebo konkrétní teploty povrchu materiálu je jedním z rozhodujících parametrů, který ovlivňuje v technice prostředí tepelnou pohodu [50] nebo v jiných oblastech jakost výrobku vč. ekonomických a energetických aspektů jeho výroby [92]. Použití termovize je oproti jiným možným uvedeným způsobům nejnázornější a nejrychlejší a při správném stanovení podmínek měření a po kalibraci metody také přesné. V současné době jsou pořizovací ceny termovizních kamer v přijatelnější cenové relaci (většinou levnější, než nákup licence sofistikovaného simulačního programu). Možnost měření teploty vzduchu s využitím pomocného materiálu je všeobecně v povědomí, avšak její přesná specifika doposud nebyla stanovena, zejména oblasti použitelnosti této metody. Zařízení je možné využít při návrhu vytápění a chlazení, rozložení teplot v obytných místnostech, při výzkumu problematiky proudění, přenosu tepla konvekcí apod.

2 Vymezení cílů dizertační práce

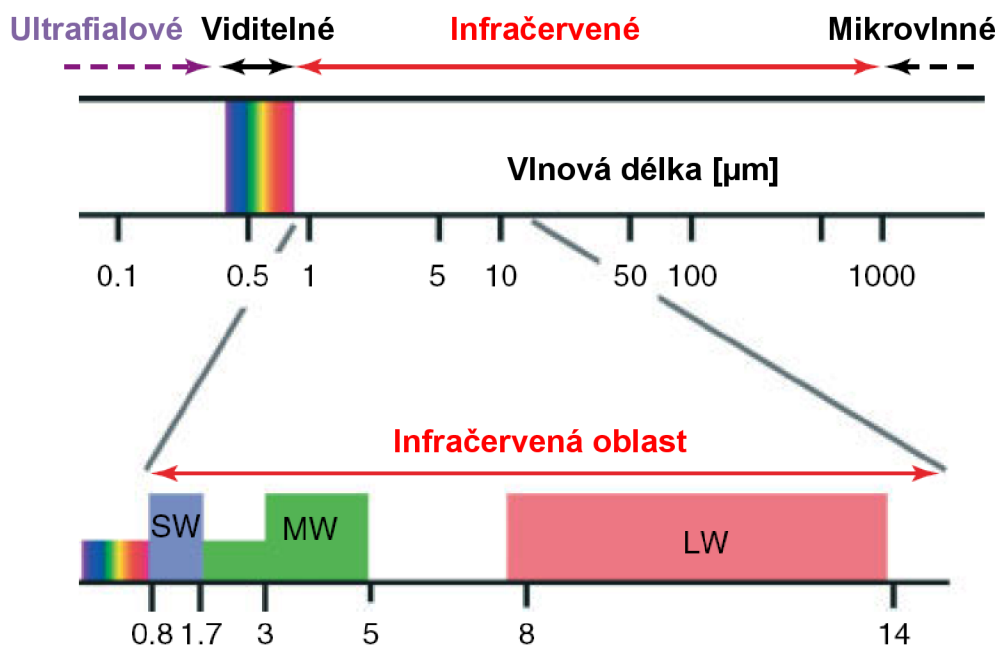
Práce má vytvořit ucelený náhled na problematiku měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery. Tato metoda je relativně nová a prakticky bez znalostí její oblasti použití a přesnosti měření. Cílem práce a jejím hlavním přínosem je ve vypracování podrobné metodiky měření teplotních polí ve 2D a 3D proudu vzduchu vč. měření teplotních polí v malém uzavřeném prostoru skrz průzor (vhodné pro kabiny dopravních prostředků, zejména pro kabiny automobilů). V rámci práce je třeba zhotovit experimentální zařízení pro použití metody v laboratorních i provozních podmínkách a ověřit toto zařízení na konkrétních měřeních. Cíle dizertační práce lze rozepsat do následujících úkolů.

- Rešerše problematiky termografie a měření teplotních polí ve vzduchu.
- Proměření statických vlastností pomocných materiálů a stanovení dynamických vlastností metody.
- Stanovení oblasti použitelnosti metody měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize.
- Návrh zařízení pro měření 2D a 3D teplotních polí. Návrh zařízení pro měření teplotních polí v malých uzavřených prostorech.
- Ověření výsledků měřicí metody v praktických aplikacích.
- Vypracování metodiky měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize.

3 Počátky termovizního zobrazování

Důkaz o možnosti měření teploty bezkontaktním způsobem byl poprvé předložen britským astronomem sirem Frederickem Williamem Herschelem (1738-1822) v „The Royal Society of London for Improving Natural Knowledge“ v roce 1800, kdy provedl experiment s použitím rtuťových teploměrů a skleněných hranolů, které rozkládaly sluneční světlo na jeho jednotlivé oblasti viditelného spektra [86]. Do jednotlivých částí spektra byly vloženy rtuťové teploměry a bylo zjištěno, že směrem od fialového k červenému spektru byla teplota vyšší. Teplota však byla nejvyšší v místech za červenou částí spektra, kde již nebylo viditelné záření. Byla tak objevena oblast záření, která je okem nepozorovatelná a původně byla nazvána „Calorific Rays“ (tepelné záření) [84]. Toto označení se již dnes nepoužívá a později dostalo název infračervené záření (IR – infrared, z anglického překladu „pod červenou“).

Oblast viditelného záření v oblasti vlnových délek zaujímá velice malou výseč o vlnové délce $\lambda = 380$ až $780 \mu\text{m}$, na kterou navazuje oblast infračerveného záření. Infračervené záření je elektromagnetické záření o vlnové délce $\lambda = 1 \cdot 10^{-4}$ až $7,8 \cdot 10^{-7}$ m, obr. 3.1. Tuto oblast můžeme typicky pro termografii rozdělit do tří skupin infračerveného záření. Dlouhovlnná infračervená oblast (LWIR – long-wave infra red) 7 až $14 \mu\text{m}$, oblast středně dlouhých vln (MWIR – midwave IR) 3 až $5 \mu\text{m}$ a oblast krátkých vln (SWIR – shortwave IR) 0,9 až $1,7 \mu\text{m}$ [10].

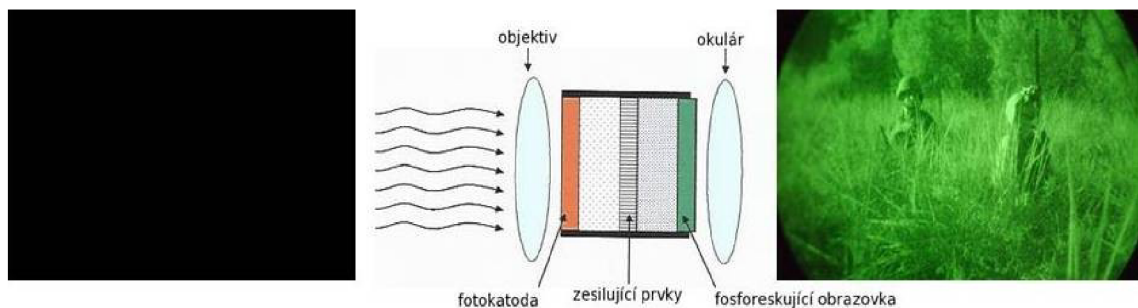


Obr. 3.1 Spektrum elektromagnetického záření [22]

Pomocí infračerveného záření se šíří tepelná energie i ve vakuu a zdrojem tohoto záření je každý předmět, který má teplotu vyšší než teplota označovaná jako „absolutní nula“, tj. 0 K [42]. Po objevení (pro lidské oko) neviditelného infračerveného záření vznikly přístroje, které se toto spektrum záření snažili zviditelnit. Byly založeny na znalosti tepelného účinku tohoto záření. Jednalo se například o list papíru pokrytého sazemi, který byl navlhčený v lihu nebo využitím fotografických emulzí, které byly citlivé na příslušné spektrum záření. Když byly takové jednoduché zviditelňovací zařízení vystaveny slunečnímu svitu, tak bylo patrné místo,

kde se zařízení nejvíce zahřívalo [84]. Do roku 1829 byl hlavním přístrojem jak detekovat záření rtuťový teploměr vynalezený v roce 1714 německým fyzikem Gabrielem Fahrenheitem (1686-1736). V roce 1829 italský fyzik Leopoldo Nobilli vynalezl primitivní termočlánek, který se začal používat pro svoji rychlou odezvu a v roce 1835 italský fyzik Macedonio Melloni (1798-1854) vyrobil první termoelektrický IR detektor, což vedlo k postupnému rozvoji zobrazovacích zařízení.

Noční vidění bylo patentováno v roce 1926 [43] skotským inženýrem Johnem Logie Bairdem (1888-1946). Ve vývoji nočního vidění pokračoval sovětský doktor Vladimir Kosma Zworykin (1909-1982), který v roce 1933 vynalezl první elektronicko-optický převodník obrazu. Zařízení bylo nazváno noktovizor (NVD – Night Vision Device) [83]. Od roku 1941 se datuje první využití brýlí pro noční vidění v německé armádě. Jejich masivní využití přišlo až v Korejské a ve Vietnamské válce [65]. V současné době jsou využívány noktovizory páté generace. Jejich princip je založen na zesílení slabého viditelného záření (měsíc, hvězdy nebo jiné zdroje) a výsledný obraz měl jen jednu barvu podle typu fosforeskujícího barviva, obvykle zelenou, protože na zelenou barvu je lidské oko nejcitlivější [30]. Tento systém zobrazení se nazývá noktovize a zjednodušený princip noktovizoru je uveden na obr. 3.2.

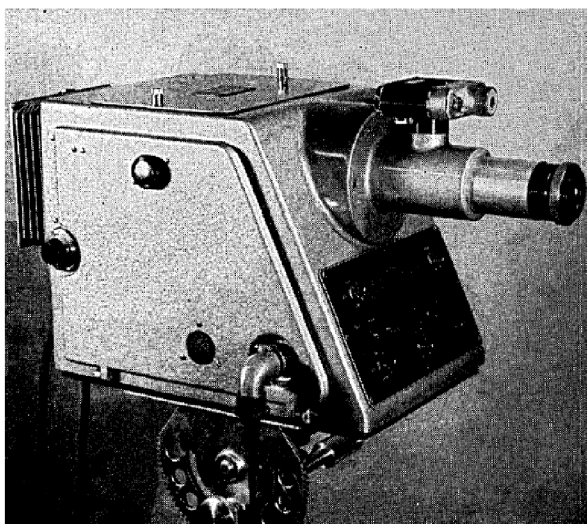


Obr. 3.2 Princip zobrazení noktovizorem [31]

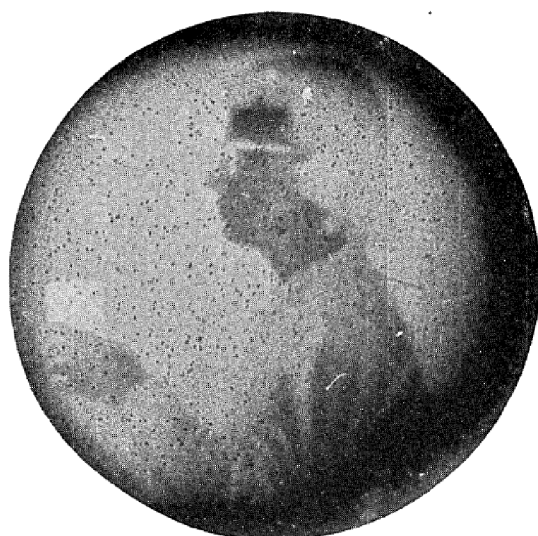
Noktovizory pracují v infračerveném pásmu blízkém viditelnému světlu. Noktovizor zesiluje světelný tok (až 25 000 krát) a umožňuje získat obrazový vjem i za velmi špatných světelných podmínek [1]. Noktovize využívá vlnových délek 700 až 1000 nm, proto nezobrazuje tepelné záření jako termovizní kamera.

V roce 1929 si maďarský fyzik Kálmán Tihanyi (1897-1947) nechal patentovat citlivou infračervenou elektronickou kameru pro protiletadlovou obranu Velké Británie, což bylo velice primitivní zařízení založené na principu dnešních termovizních kamer [44]. Termovize se po druhé světové válce stala do jisté míry nástupcem noktovize, i když oba principy se navzájem dobře doplňují, a obdobně jako noktovize se nejprve uplatnila ve vojenském průmyslu. Termovize oproti noktovizi zachycuje tepelné záření objektu i v absolutní tmě, tj. bez zbytkového světla ve viditelném spektru záření. První termovizní kamera s názvem Evaporograph (obr. 3.3) byla odtajněna v roce 1956 a byl to počátek využívání termografie mimo vojenské účely [54, 57]. Výsledný obraz byl zobrazen v černobílé stupnici, které odpovídají povrchové teplotě měřeného objektu, obr. 3.4.

Po odtajnění se nejčastěji uplatňovala termovize pro bezdotykové měření teplot v průmyslu, kde bylo zapotřebí měřit vysoké teploty, teploty v malém prostoru nebo teploty v agresivním prostředí. Jednalo se o měření při zpracování kovů, v chemickém průmyslu a v průmyslu silikátovém [6]. Během následujících let se rozvinula oblast použití bezdotykového měření teplot i v oblasti nižších teplot. Jednalo se o potravinářství, elektrotechniku, papírenství, farmacii, při zpracování plastů apod.



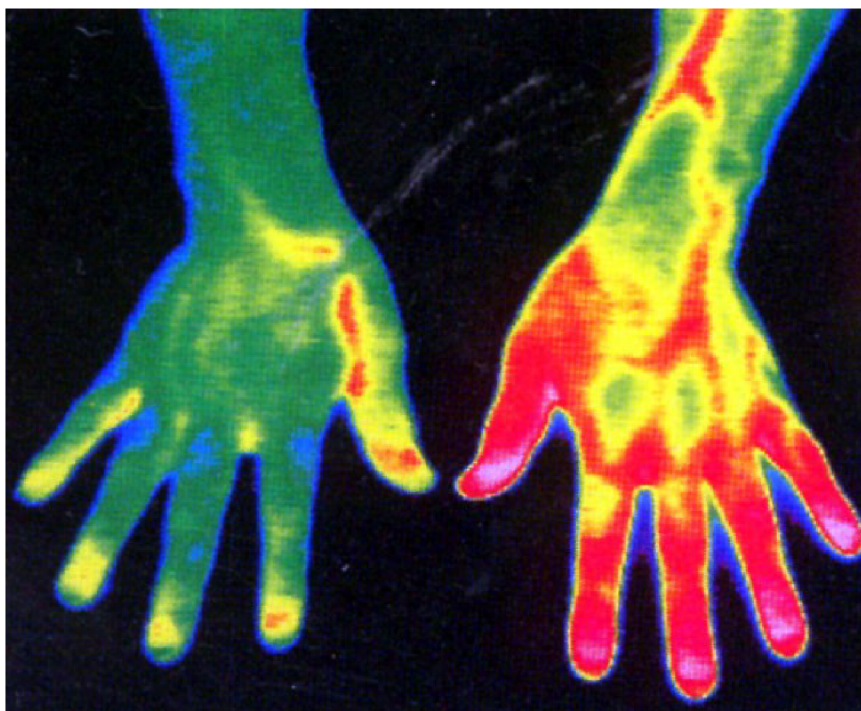
Obr. 3.3 Model KR-1 Evaporograph [57]



Obr. 3.4 Termogram dívky držící sklenici se studenou vodou z přístroje Evaporograph [57]

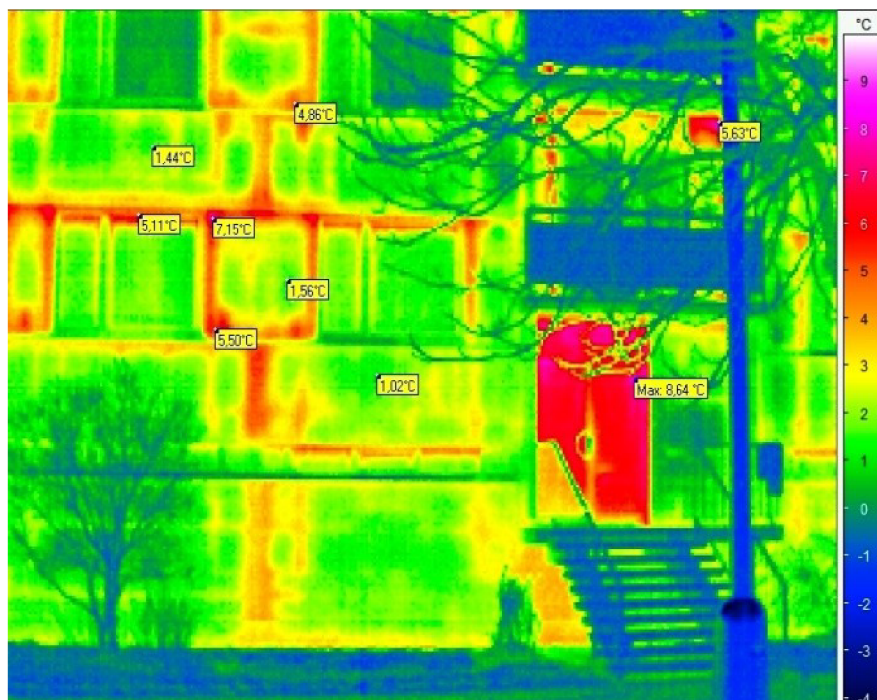
Termovizní systémy se v současnosti využívají napříč vědními obory a průmyslovými aplikacemi. To je způsobeno jednak příznivější cenou za tyto zobrazovací systémy a také faktem, že ve vojenském průmyslu nahradila možnost odhalení nepřátelských aktivit ve snížených světelných podmínkách jiná důmyslnější zařízení, která mají dosah na mnohem větší vzdálenost. Využití termovize je obsáhlé a má zastoupení ve všech oblastech, kde se sleduje konkrétní hodnota teploty, teplotního pole nebo rozdíl teplot. Termovizní přístroje jsou schopny detekovat rozdílnou teplotu až na setiny Kelvina a při známých podmínkách měření a při dostatečném teplotním rozdílu [78] je měření velmi přesné.

Termografie je nejčastěji využívána pro lékařské účely a jako nástroj kontroly v průmyslových aplikacích. Měření teploty a tepelných projevů na lidském těle má v termografii široké zastoupení. Již malá diference teploty v lidském organismu (například 0,5 K) může indikovat onemocnění nebo jiné závažné poruchy organismu. Termovize tyto diference teplot rychle a názorně zobrazí a pomůže lékařům stanovit správnou diagnózu. Ve vědních oborech lékařství je termovize nejčastěji využívána v onkologii při patologickém procesu – diagnostice nádorových onemocnění, zejména nádoru prsu a při metastázních nádorech kůže (melanoblastom). V onkologii je vysoká spolehlivost diagnózy, protože rozdíl teplot je vysoký, obvykle 1,5 až 7,0 K. V další oblasti interního lékařství, v revmatologii, se jedná o úspěšné odhalování onemocnění vaziva a šlach v pohybovém aparátu člověka, obr. 3.5. S teplotní diferencí až 5 K je také zde vysoká úspěšnost odhalení poruchy. Při snímání orgánů, které se vyskytují v lidském těle dvakrát (končetiny, oči, vnitřní orgány), se používají zdravé části jako referenční a porovnávají se s potenciálně nemocnými. Dále se jedná o nádory štítné žlázy a ostatních slinných žláz, nádory plic, snímání v oblasti neurologie a snímání gynekologických nádorů. V těchto ostatních případech již ale není úspěšnost detekce v tak vysoké míře. Význam využití termografie v lékařství je zejména v detekci poruchy a její plošnému vymezení. Využití je zejména při nádorových onemocněních, ale také při detekci spálenin a omrzlin a také při kontrole úspěšnosti plastické chirurgie – prokrvení tkání [71].



Obr. 3.5 Zánět šlachově vazivového aparátu [76]

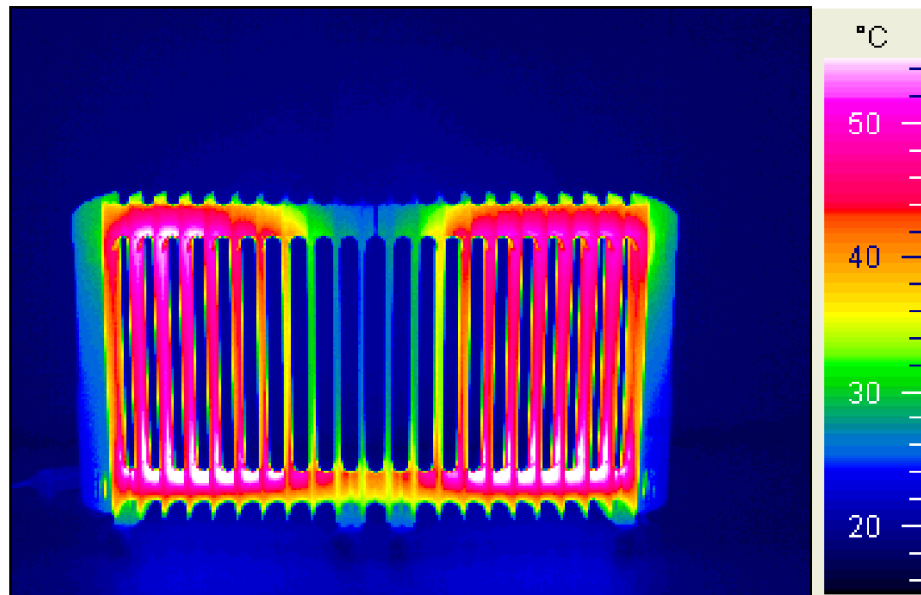
Další odvětví, kde je hojně využíván termovizní systém, jsou rozličné průmyslové aplikace, nejčastěji stavební, strojní a chemický průmysl. Ve stavebnictví jsou nejčastěji používány termovizní kamery pro detekci tepelných mostů (obr. 3.6), detekci plísní a ostatních tepelných úniků ve stavebních a v průmyslových konstrukcích.



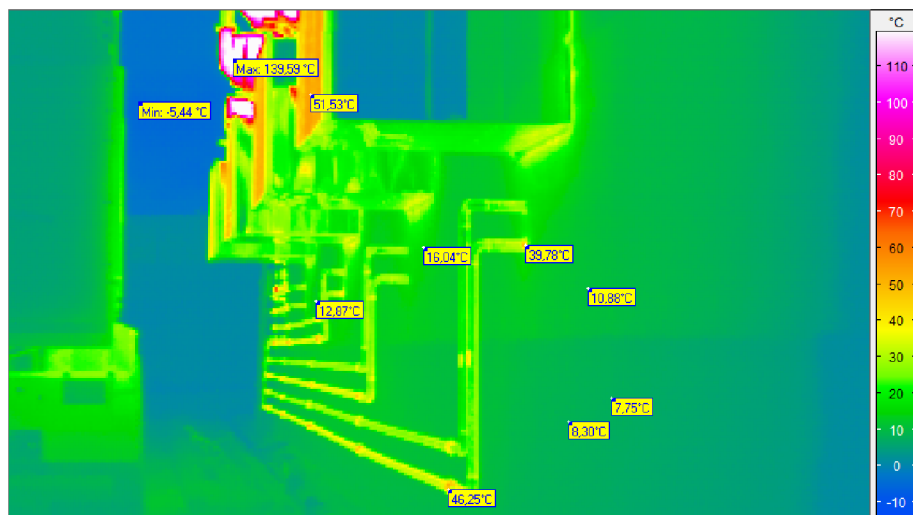
Obr. 3.6 Kontrola tepelných úniků panelového domu

Jedná se o plošné a liniové tepelné mosty vlivem použití materiálů s jinými tepelně-technickými vlastnostmi či nekvalitním provedením prací. Jedná se tedy

o měření kontroly kvality stavby a prací [85]. Tyto kontroly kvality je možné provádět pouze za specifických podmínek měření, zejména s dostatečným teplotním rozdílem teplot uvnitř a vně objektu. Mezi další podmínky měření patří homogenní radiální teplota okolí (zatažená obloha) s odstíněním nežádoucích tepelných zdrojů. Dále musí být měřený objekt v setrvalém stavu po určitou dobu (při měření kvality okenních otvorů je nevhodné je otevírat před měřením) a venkovní prostředí by mělo být vhodné pro měření termovizí (nedeštivo). Při dodržení těchto podmínek je měření věrohodné.

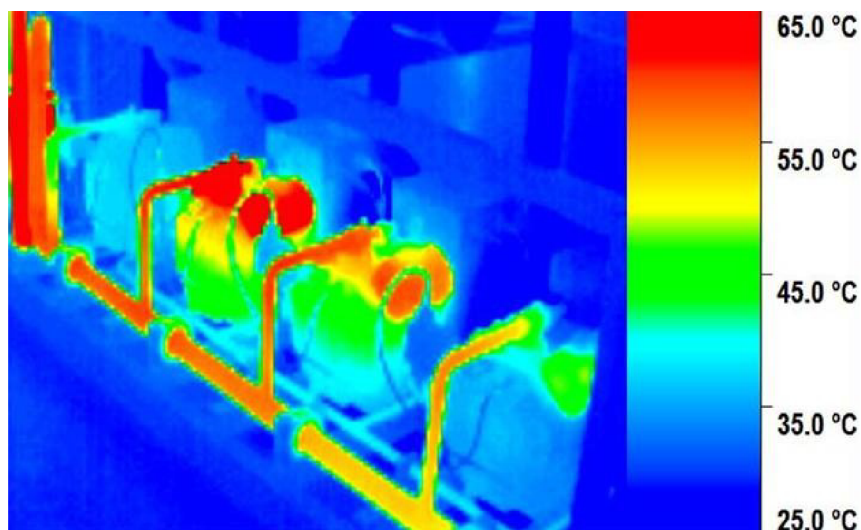


Obr. 3.7 Termogram dvou radiátorů během začátku vytápění [70]



Obr. 3.8 Kontrola povrchových teplot v bioplynové stanici Litomyšl

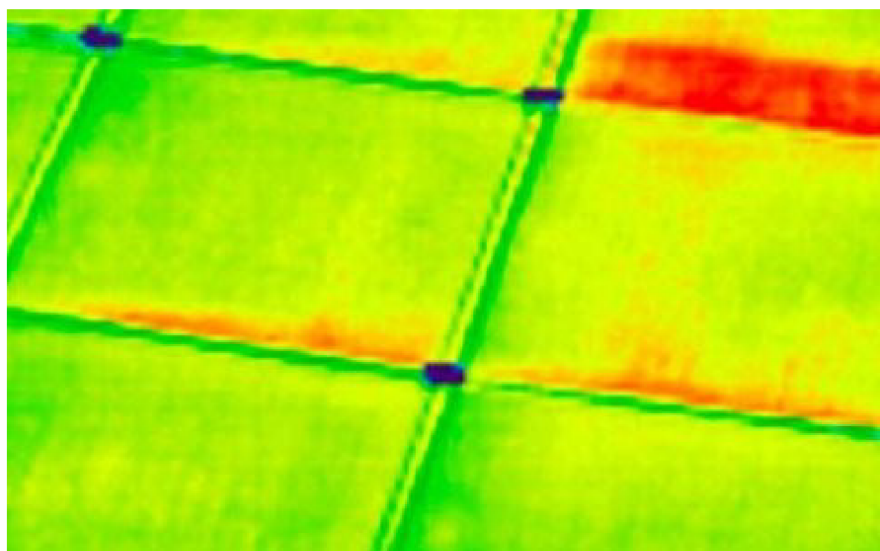
Termovizní měření ve stavebnictví neznačí jen měření tepelných mostů na obálce budov, ale také měření vnitřního prostředí ve stavebních objektech. Termovize se využívá v oborech technické zařízení budov, v technice prostředí nebo v elektrotechnice. V těchto odvětvích je možné použít termovizní kameru jako nástroj kontroly v oblasti vytápění a chlazení (obr. 3.7), za účelem detekce přehřátých spojů, detekce médií v rozvodech médií (obr. 3.8). Termovizní kameru je možné využít dále při návrhu a kontrole technických zařízení (obr. 3.9) apod.



Obr. 3.9 Kontrola činnosti soustavy kompresorů chladicího zařízení [51]

V chemickém průmyslu se termografie využívá při kontrole stavů výrobních zařízení a při sledování chemických [104] a biochemických procesů [32]. Využívá se zde zejména spektra blízkého infračerveného záření. Lze také detekovat koncentraci chemických látek v roztocích, např. koncentraci kyseliny adipové ve vápencových suspenzích v recirkulačním okruhu absorbérů v uhelných elektrárnách.

Termovize má své uplatnění také v zemědělství. Zde se využívá při optimalizaci chovných a pěstitelských podmínek, např. kontrole stavu zralosti obilných lánů (obr. 3.10) anebo následné kontrole stavu uskladněného obilí v sýpkách.



Obr. 3.10 Letecký snímek kontroly stavu zralosti obilných lánů [100]

V současnosti se využívá termografie zejména v oblastech kontroly kvality a procesů v průmyslu a pro sledování průběhů ve vytápění a v chlazení. Další široké využití je v oborech lékařství, v zemědělství a také v astronomii. Termovize našla svá uplatnění také při detekci požárů a při vyhledávání osob. Mezi další oblasti použití patří kontrola povrchových teplot veškerých zařízení [16], jako například venkovní rozvodny napětí, výměňkové stanice, průmyslové provozy, apod.

4 Teoretické základy

Znalost teoretických fyzikálních základů je nutná pro kvalitní vyhotovení termogramů, termovizních videosekvencí a souvisejících měření a jejich následné přesné vyhodnocení. Práce s termovizní kamerou vyžaduje zejména znalosti z oblasti přenosu tepla. Přenos tepla je vědní obor, který se zabývá problematikou distribuce tepelné energie mezi termodynamickou soustavou a jejím okolím. K základním mechanismům přenosu tepelné energie patří přenos tepla vedením, prouděním a přenos tepla zářením [13].

Teoretickým základem pro vývoj metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu termovizní kamery je přenos tepla vedením v pomocném materiálu, přenos tepla prouděním ze vzduchu do pomocného materiálu a přenos tepla zářením mezi pomocným materiálem a termovizní kamerou. Bez těchto teoretických znalostí a následně praktických zkušeností není možné tento progresivní měřicí nástroj využívat jako efektivní a přesný způsob měření teploty a teplotních polí ve vzduchu.

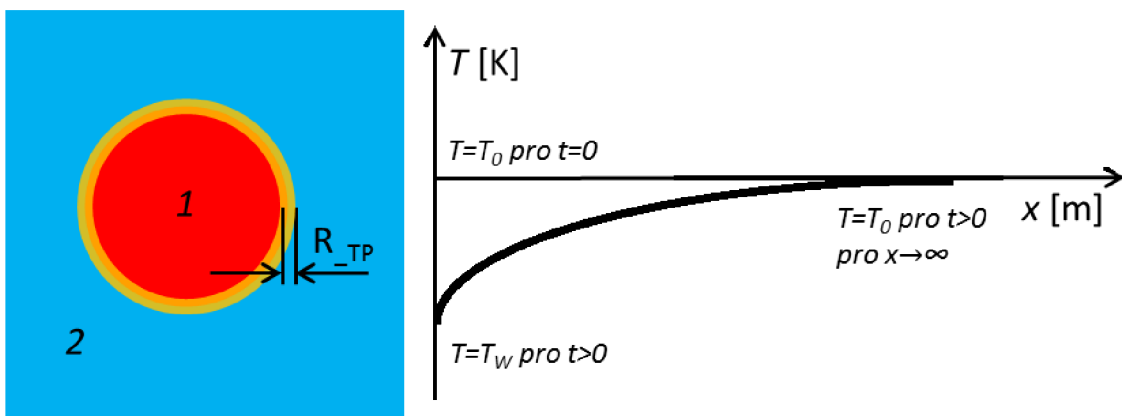
4.1 Přenos tepla vedením

Při zobrazování vzduchového teplotního pole na pomocném materiálu dochází v archu materiálu k vedení tepla a tím k rozptylu teplotního pole. Přenos tepla vedením je definován Fourierovým zákonem ve tvaru

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T, \quad (4.1)$$

kde \dot{q} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je hustota tepelného toku, λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je tepelná vodivost a $\text{grad } T$ [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$] je největší změna teploty.

Rozptyl teplotního pole má za následek rozšíření oblasti zobrazeného proudu vzduchu a tím k posunutí hranice proudu. Vedení tepla v pomocném materiálu je tedy nechtěné a je snaha ho eliminovat tím, že pomocný materiál bude mít nízkou hodnotu tepelné vodivosti. Zároveň by ovšem nízká tepelná vodivost znamenala obtížný přenos tepla prouděním a tedy k problémům zobrazování dynamických jevů (kap. 4.2).



Obr. 4.1 Šíření tepelného toku vedením v archu pomocného materiálu
1 – počáteční teplota, 2 – teplota okolí, R_{TP} – rozptyl teplotního pole

Rozšiřování hranice neizotermního proudu vzduchu je možné určit jako vedení tepla v polonekonečném tělese. Polonekonečné těleso symbolizuje takový stav tělesa, v němž je ve vzdálenosti x a v čase $t > 0$ stejná teplota jako na počátku tělesa ($x = 0$,

$t = 0$), i když na povrchu tělesa došlo ke změně teploty [42]. To znamená, že do vzdálenosti x je oblast ovlivněná vstupním skokem teploty, obr. 4.1.

Řešení modelu polonekonečného tělesa obnáší řešení teplotního průběhu $T(x, t)$ v oblasti změny teploty a platí rovnice

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4.2)$$

kde počáteční podmínka je $T = T_0$ pro všechna x a čas $t = 0$ a okrajová podmínka je $T = T_w$ pro $x = 0$ a čas $t > 0$.

S modelem polonekonečného tělesa se lze setkat také i u menších těles konečných rozměrů. Čas, za který se teplotní změna projeví v určité vzdálenosti je závislý zejména na součiniteli přestupu tepla na povrchu polonekonečného tělesa α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] a součiniteli teplotní vodivosti a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]. Součinitel přestupu tepla udává míru přestupu tepla z okolí do povrchu polonekonečného tělesa a součinitel teplotní vodivosti charakterizuje rychlost změny teploty a je vyjádřen

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \quad (4.3)$$

kde λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel teplotní vodivosti materiálu, c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná tepelná kapacita materiálu (při stálém tlaku) a ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota materiálu.

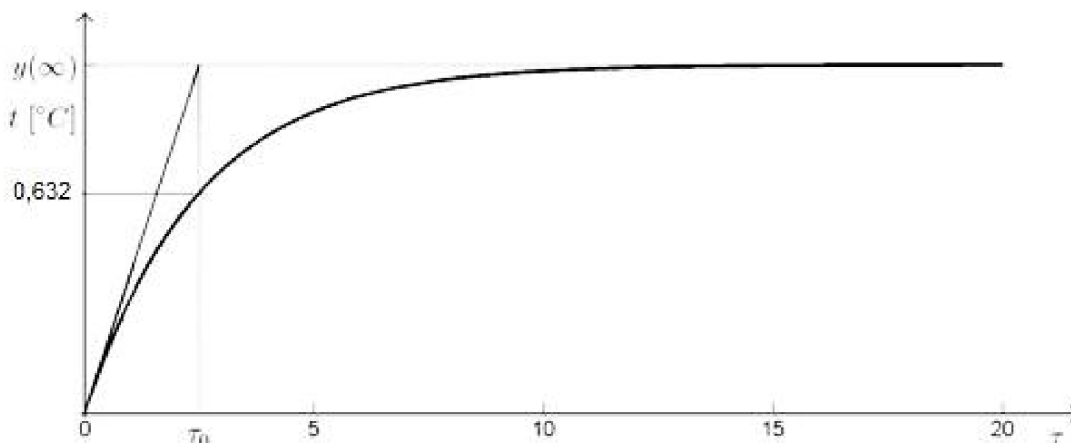
Vedení tepla v pomocném materiálu má zásadní vliv na velikost časové konstanty metody.

4.2 Přenos tepla prouděním

Pro stanovení tepelného toku z proudu vzduchu do materiálu je třeba určit přenos tepla prouděním, ke kterému dochází při obtékání tělesa tekutinou. Hustota tepelného toku \dot{q} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] se stanoví z Newtonova ochlazovacího zákona vztahem

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T - T_\infty), \quad (4.4)$$

kde α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla, T [K] je teplota povrchu a T_∞ [K] značí teplotu tekutiny.



Obr. 4.2 Aproximace proporcionální soustavou 1. řádu [3]

Časová konstanta τ_0 [s] je veličina charakterizující čas, s jakou vzniká či zaniká přechodový děj, který je způsobený vstupním impulzem (skokem). Časová konstanta je označována jako doba, za kterou je dosaženo 63,2 % celkového nárůstu či poklesu hodnoty sledované veličiny (obr. 4.2) [3].

Teoretické stanovení časové konstanty lze provést následovně [42]. Vedení tepla do stěny pomocného materiálu je uvažováno jako nestacionární vedení a je možné ho vyjádřit z Fourierova zákona (rov. 4.1), přičemž je uvažováno, že se jedná o relativně malé těleso (úzké, málo objemné), což je dáno podmínkou

$$T_m \doteq T_{stř}, \quad (4.5)$$

kde T_m je teplota na povrchu tělesa a $T_{stř}$ je teplota uvnitř tělesa. Takovou situaci lze popsat také pomocí Biotova čísla, které je velmi malé

$$Bi \ll 1 \gg \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda}, \quad (4.6)$$

kde α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] je součinitel přestupu tepla a L_c [m] je zde charakteristický rozměr tělesa, který vyjadřuje poměr objemu tělesa V [m^3] k povrchu S [m^2] kolmému k tepelnému toku \dot{Q} [W]

$$L_c = \frac{V}{S}. \quad (4.7)$$

Biotovo číslo je bezrozměrný parametr, který určuje, zdali se teplota uvnitř tělesa značně liší od teploty povrchu tělesa který je chlazen nebo ohříván. Z rovnice 4.6 je také patrné, že biotovo kritérium je poměr konvekce ke kondukcii. Udává tedy poměr velikosti konvekce na povrchu ke kondukcii do tělesa. Malé biotovo číslo tedy značí malý teplotní odpor k vedení tepla do vnitřku materiálu.

Energetická bilance vychází z 1. zákona termomechaniky pro kontrolní objem

$$-\dot{Q} = \frac{dU}{d\tau}, \quad (4.8)$$

kteřou můžeme rozepsat pomocí následujících rovnic

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T - T_\infty), \quad (4.9)$$

$$dU = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot dT, \quad (4.10)$$

kde T_∞ [K] je teplota okolí, T [K] je teplota objektu ρ [$kg \cdot m^{-3}$] je hustota látky, c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku, do tvaru

$$-\alpha \cdot S \cdot (T - T_\infty) = \rho \cdot V \cdot c_p \frac{dT}{d\tau}, \quad (4.11)$$

kde po matematických úpravách

$$-\int_0^\tau \alpha \cdot S \cdot d\tau = \int_{T_0 - T_\infty}^{T - T_\infty} \rho \cdot V \cdot c_p \frac{d(T - T_\infty)}{T - T_\infty}, \quad (4.12)$$

$$-\alpha \cdot S \cdot (\tau - 0) = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \ln \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}, \quad (4.13)$$

je výsledný tvar rovnice následující

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right), \quad (4.14)$$

$$\tau_0 = \left(\frac{\rho \cdot c_p \cdot L_c}{\alpha}\right), \quad (4.15)$$

kde τ_0 [s] představuje časovou konstantu. Čas potřebný na změnu teploty tělesa z teploty T_0 na teplotu T vypočteme dle vztahu

$$\tau = \frac{c_p \cdot \rho \cdot L_c}{\alpha} \ln \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}. \quad (4.16)$$

Z rovnic (4.14) a (4.15) je patrné, že rozložení teploty v čase při $Bi \ll 1$ závisí zejména na přenosu tepla prouděním vyjádřeným součinitelem přestupu tepla α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]. V praxi se při práci se soustavou s jednou časovou konstantou předpokládá, že ustálený stav nastane přibližně v čase $\tau = 4 \cdot \tau_0$.

4.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením je základní mechanismus využívaný v termovizním snímání. Přenos tepla zářením (sáláním, radiací) probíhá v průteplivém prostředí, kdy povrchy objektů o teplotě $T > 0$ K vyzařují fotony, které jsou nositeli energie a šíří se rychlostí světla ($c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) [35]. Přenos tepla zářením probíhá i ve vakuu [69].

Přenos tepla zářením lze vyjádřit pomocí zákona, který byl publikován roku 1879 Ludwigem Boltzmannem (1844-1906) a Josefem Stefanem (1835-1893) a popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa a lze ho vyjádřit následujícím vztahem

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4, \quad (4.17)$$

kde E_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je hustota zářivého toku absolutně černého tělesa, σ_0 je Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), T [K] je termodynamická teplota povrchu objektu [4]. Pro záření těles šedých platí

$$E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4, \quad (4.18)$$

kde E [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je hustota zářivého toku šedého tělesa a ε [-] je emisivita (poměrná zářivost) objektu. Zářivý tok \dot{Q} [W] z povrchu objektu o ploše S [m^2] je dán vztahem

$$\dot{Q} = E \cdot S. \quad (4.19)$$

Při dopadu zářivého toku na povrch objektu může dojít k odrazu zářivého toku \dot{Q}_r [W], k pohlcení zářivého toku \dot{Q}_a [W], anebo k průchodu zářivého toku objektem \dot{Q}_t [W] a platí

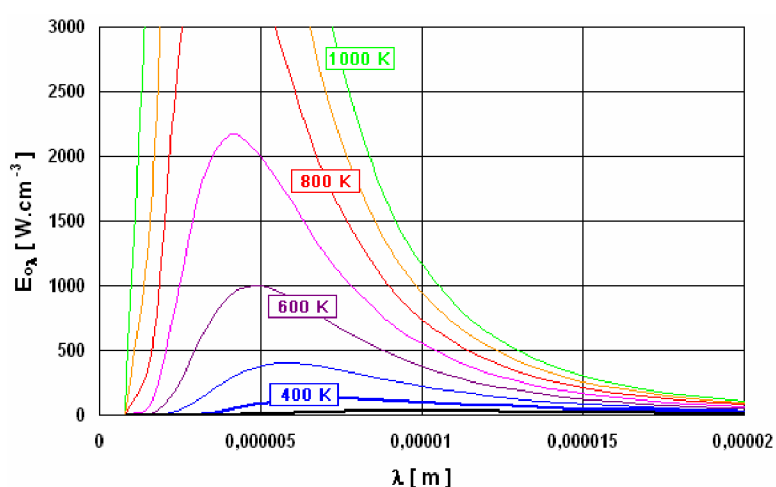
$$\dot{Q} = \dot{Q}_r + \dot{Q}_a + \dot{Q}_t, \quad (4.20)$$

nebo-li

$$a + r + t = 1, \quad (4.21)$$

kde r [-] je reflektance, a [-] je absorbtance a t [-] je transmitance uvažovaného objektu. Tato rovnice je označována jako I. Kirchoffův zákon. Dle II. Kirchoffova zákona se ve stavu tepelné rovnováhy schopnost povrchu pohlcovat teplo rovná jeho schopnosti jej vyzařovat a platí

$$a = \varepsilon. \quad (4.22)$$



Obr. 4.3 Planckův vyzařovací zákon [69]

Max Planck (1858-1947) v roce 1900 uvedl zákon, který uvádí závislost spektrální hustoty zářivého toku černého tělesa $E_{0\lambda}$ [8] na teplotě T [K] a vlnové délce λ [m] (obr. 4.3).

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1}, \quad (4.23)$$

kde $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ a $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}$.

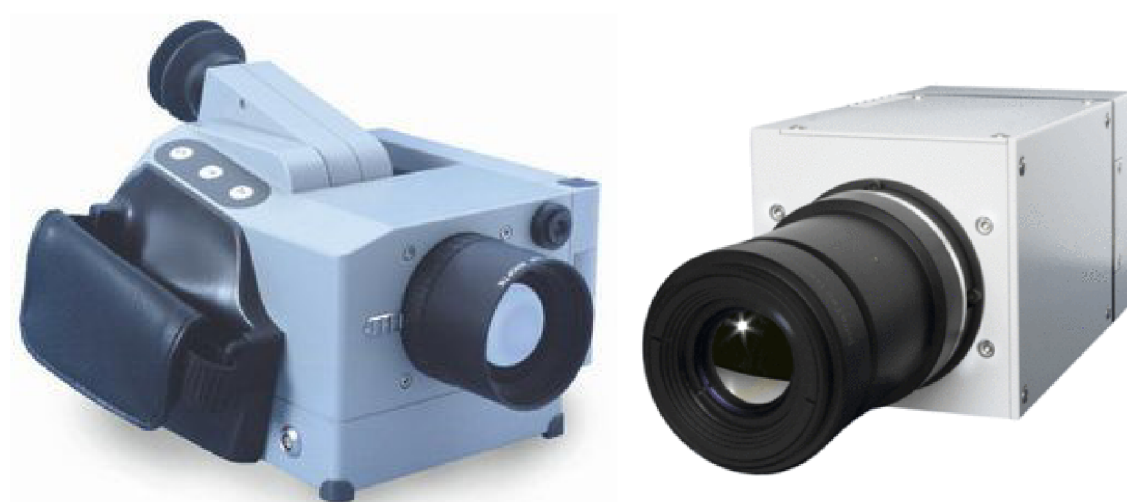
Wienův posunovací zákon říká, že s rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku černého tělesa ke kratším vlnovým délkám. Lze jej získat z rovnice (4.23) derivací spektrální hustoty zářivého toku černého tělesa dle vlnové délky a lze jej vyjádřit vztahem

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3}, \quad (4.24)$$

kde λ_{max} [m] je vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku maximální při dané teplotě T [K] [52].

4.4 Termovizní měření

Existují různé typy termovizních kamer, které se od sebe liší druhem využití a technickými parametry. Při konkrétní aplikaci je nutné zvolit vhodnou termovizní kameru. Kamery můžeme rozdělit podle různých kritérií. Mezi nejzákladnější dělení patří rozdělení dle způsobu chlazení detektoru, dle způsobu zpracování obrazu, dle vhodného rozsahu měření teplot a zejména dle počtu obrazových bodů (volba rozlišení termovizní kamery).

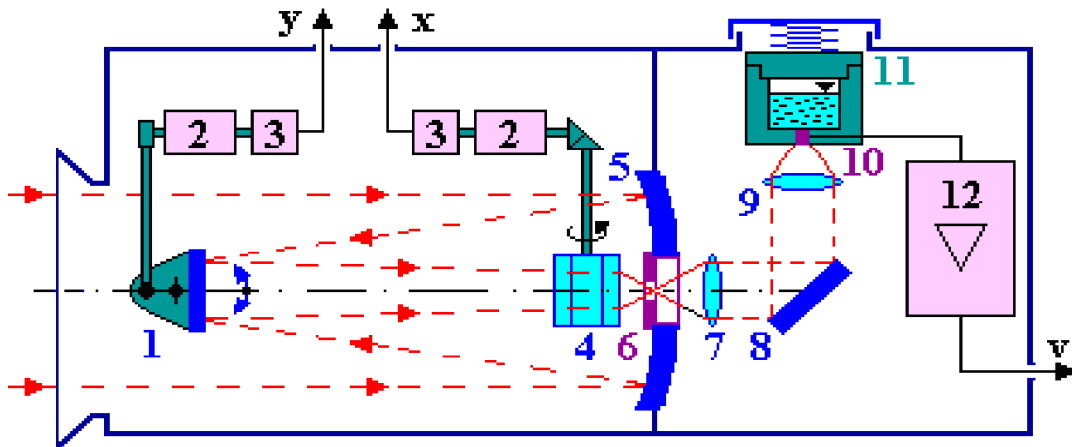


Obr. 4.4 Termovizní kamera VarioCAM rozlišením 320 x 240 obrazových bodů s rozsahem vlnových délek 8 až 13 μm (vlevo) [40] a termovizní kamera VarioTHERM s rozlišením 640 x 512 obrazových bodů a s rozsahem vlnových délek 2 až 5 μm (vpravo) [99]

Termovizní kamery mohou být buď s chlazeným detektorem, nebo s tzv. nechlazeným detektorem (pouze s interním chlazením). Starší druhy termovizních kamer měly detektor chlazený externím chladičem, nejčastěji byly opatřeny nádobkou s kapalným dusíkem. Oproti termovizním kamerám se strojním interním chlazením měly vyšší citlivost a byly velmi stabilní s použitím jak pro krátkovlnné pásmo, tak pro pásmo dlouhovlnné. V moderních přístrojích je nádobka s kapalným dusíkem nahrazena Stirlingovým motorem, nebo je zařízení chlazené na principu Peltierova jevu.

Dle způsobu zpracování obrazu můžeme rozdělit měřicí techniku na zobrazování s rozkladem obrazu (scannery) nebo bez rozkladu obrazu (maticové detektory). Dle vhodného rozsahu měření teplot se termovizní kamery dělí na krátkovlnné a dlouhovlnné. Příklad termovizních kamer je znázorněn na obr. 4.4.

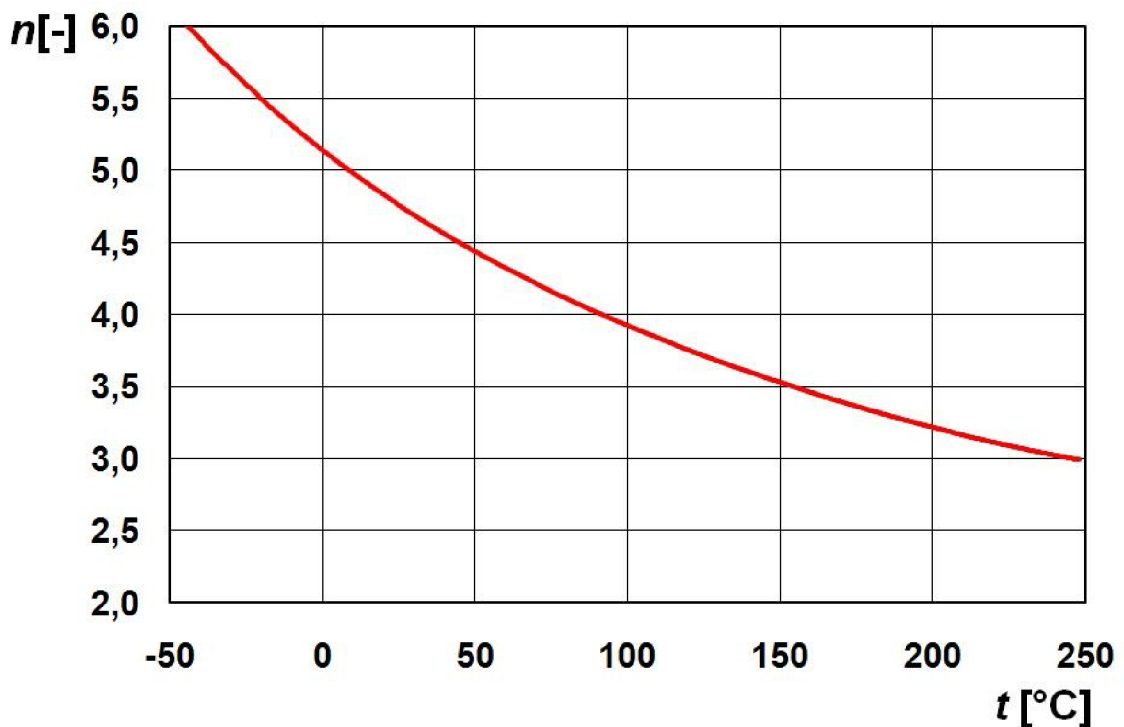
Dále je možné použít rozdělení termovizních kamer podle spektrální citlivosti, dle počtu komponent anebo podle rychlosti zápisu. Na obr. 4.5 je znázorněno schéma termovizní kamery s rozkladem obrazu a s chlazeným detektorem.



Obr. 4.5 Schéma termovizní kamery s rozkladem obrazu a s externě chlazeným detektorem [68]

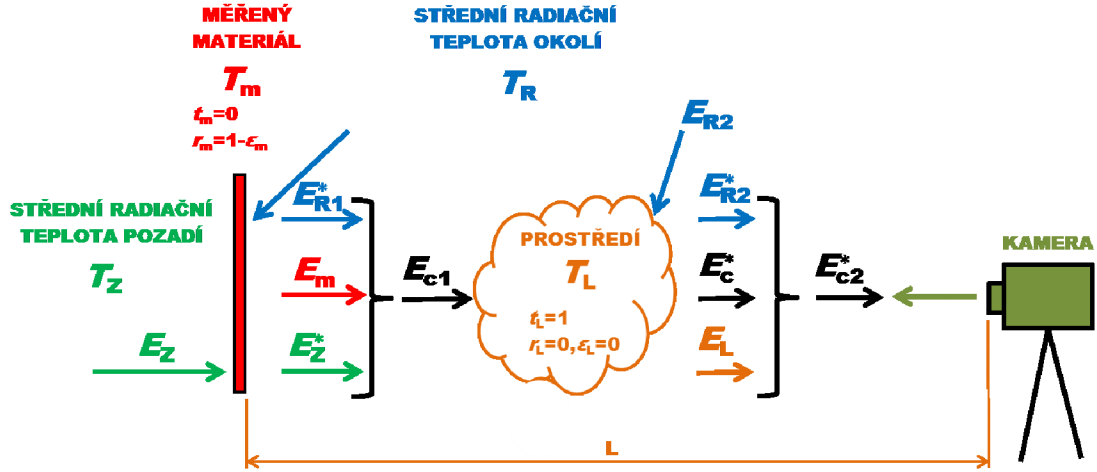
(1-rozmítací zrcadlo; 2,3-motorky a vysílače polohy; 4-osmiboký křemenný hranol; 5-duté zrcadlo; 6-clona; 7,8,9-optická soustava; 10-detektor; 11-nádržka s chladivem; 12-předzesilovač s video výstupem)

Jelikož termovizní kamery nepracují v celém rozsahu vlnových délek, ale pouze v užším rozsahu vlnových délek s vymezením spektrální citlivosti měření λ_1, λ_2 a pro vymezený rozsah teplot T_1, T_2 , je nutné upravit teplotní exponent z rovnice 4.17. Pro termovizní kameru VarioCAM s rozsahem vlnových délek 8 až 13 μm a s rozsahem teplot $-40\text{ }^\circ\text{C}$ až $1200\text{ }^\circ\text{C}$ se teplotní exponent n [-] mění z konstantní hodnoty 4 na hodnotu odpovídající těmto parametrům dle obr. 4.6 a Stefanovu-Boltzmannovu konstantu σ_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$], je třeba nahradit jinou konstantou.



Obr. 4.6 Závislost exponentu na teplotě v rozsahu vlnových délek 8 až 13 μm [67]

Při měření termovizní kamerou dochází k ovlivnění měření vlivem záření okolních zářivých ploch [108]. V následujícím textu je uveden rozbor parametrů ovlivňující měření termovizní kamerou pro nejčastější případ měření neprůteplivého tělesa v dokonale průteplivém prostředí (obr. 4.7), tj. transmittance prostředí $t_L = 1$ a emisivita prostředí $\varepsilon_L = 0$.



Obr. 4.7 Uspořádání objektů při termovizním měření neprůteplivého tělesa v dokonale průteplivém prostředí [68]

Vlastní hustota zářivého toku měřeného materiálu E_m [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] lze vyjádřit

$$E_m = \varepsilon_m \cdot k \cdot T_m^n, \quad (4.25)$$

kde ε_m [-] je emisivita povrchu měřeného materiálu, k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] je konstanta odpovídající rozsahu vlnových délek pro termovizní kameru Jenoptik VarioCAM, T_m [K] je teplota povrchu měřeného objektu a n [-] je teplotní exponent stanovený dle obr. 4.6.

Hustota zářivého toku odraženého z okolí E_{R1}^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je formulována s pomocí rovnic (4.21) a (4.22) vztahem

$$E_{R1}^* = (1 - \varepsilon_m) \cdot k \cdot T_R^n, \quad (4.26)$$

kde T_R [K] je radiční teplota okolního prostředí. Jelikož měřený materiál je uvažovaný jako neprůteplivý předmět, tj. jeho transmittance $t_m = 0$, tak hustota zářivého toku procházející skrz měřený materiál z pozadí E_Z^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] o teplotě pozadí T_Z [K] je dána vztahem

$$E_Z^* = t_m \cdot k \cdot T_Z^n = 0. \quad (4.27)$$

Součet hustot zářivého toku od měřeného materiálu E_{c1} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je tedy dáno vlastní hodnotou zářivého toku měřeného materiálu E_m [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], hustotou zářivého toku procházející skrz měřený materiál z pozadí E_Z^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a hustotou zářivého toku odraženého od okolí E_{R1}^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a je dáno vztahem

$$E_{c1} = E_m + E_Z^* + E_{R1}^* = k \cdot [\varepsilon_m \cdot T_m^n + (1 - \varepsilon_m) \cdot T_R^n]. \quad (4.28)$$

Hustota zářivého toku prostředím mezi měřeným materiálem a termovizní kamerou E_L [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] při teplotě prostředí T_L [K] a vzdáleností mezi měřeným objektem a termovizní kamerou L [m] je dána vztahem je dána vztahem

$$E_L = \varepsilon_L \cdot k \cdot T_L^n = 0. \quad (4.29)$$

Jelikož je prostředí dokonale průteplivé ($t_L = 1$), je hustota zářivého toku od prostředí E_L [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] rovna 0, protože emisivita prostředí $\varepsilon_L = 0$. Shodně je možné také tvrdit, že reflektance prostředí $r_L = 0$ a tedy hustota zářivého toku odraženého od okolí E_{R2}^* [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je dána vztahem

$$E_{R2}^* = r_L \cdot k \cdot T_L^n = 0 \quad (4.30)$$

Hustota zářivého toku od měřeného materiálu po průchodu prostředím mezi materiálem a kamerou E_c^* [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je dána

$$E_c^* = E_{c1} \cdot t_L = t_L \cdot k \cdot [\varepsilon_m \cdot T_m^n + (1 - \varepsilon_m) \cdot T_R^n]. \quad (4.31)$$

Součet hustot zářivého toku od měřeného materiálu po průchodu prostředím E_{c2}^* [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je tedy dáno vlastní hodnotou zářivého toku měřeného materiálu po průchodu prostředím E_c^* [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], hustotou zářivého toku prostředí mezi měřeným materiálem a termovizní kamerou E_L [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] a hustotou zářivého toku odraženého od okolí E_{R2}^* [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

$$E_{c2} = E_c^* + E_L + E_{R2}^* = k \cdot [\varepsilon_m \cdot T_m^n + (1 - \varepsilon_m) \cdot T_R^n]. \quad (4.32)$$

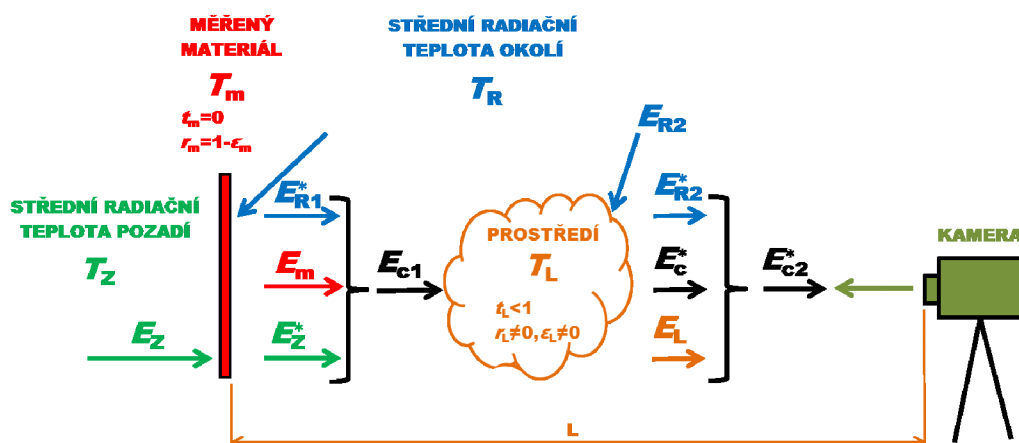
Úpravou této rovnice lze získat výslednou teplota povrchu měřeného materiálu T_m [K]

$$T_m = \sqrt[n]{\frac{E_{c2} - k \cdot (1 - \varepsilon_m) \cdot T_R^n}{k \cdot \varepsilon_m}}, \quad (4.33)$$

Termovizní kamera detekuje záření pouze ve svém omezeném rozsahu vlnových délek a také detektor termovizní kamery reaguje na dopadající záření s určitou účinností. Pro měření teplot povrchů pomocí termovizní kamery je možné nahradit hustotu zářivého toku E [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] hustotou tepelného toku zářením \dot{q} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] dle následujícího vztahu, kdy se v oblasti tepelného záření energie zářivého toku přemění na tepelný tok

$$E \approx \dot{q}. \quad (4.34)$$

Při měřeních teplot povrchů termovizní kamerou je někdy nevyhnutelné provést měření v částečně průteplivém prostředí, kdy je záření postupně zeslabováno průchodem prostředím. Pro případ měření neprůteplivého tělesa v částečně průteplivém prostředí (obr. 4.8) je transmitance prostředí $t_L < 1$ a také emisivita prostředí $\varepsilon_L \neq 0$. Transmitanci vzduchu snižují páry H_2O , plyny CO_2 , CO , aerosoly a jiné. S tímto typem termovizního měření je možné se setkat např. v horkých provozech (hutě, slévárny, pekárný, vápenky, a jiné), při měření v exteriérech za deštivého počasí, mlze nebo při sněžení anebo v jiných případech měření, kde je vznik plynů a par.



Obr. 4.8 Uspořádání objektů při termovizním měření neprůteplivého tělesa v částečně průteplivém prostředí [68]

Dle vyjádření Beerova zákona (obr. 4.9) je možné vyjádřit spektrální intenzitu záření E_λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], která prochází částečně průteplivým prostředím o vzdálenosti L [m] vztahem

$$dE_\lambda(x) = -\kappa_\lambda E_\lambda(x) dx, \quad (4.35)$$

kde κ_λ [m^{-1}] je koeficient spektrální absorptance v homogenním prostředí, který je funkcí zejména vlnové délky, teploty, tlaku a typu částečně průteplivého prostředí [13]. Po provedení integrace dle neznámé x je získána závislost spektrálních intenzit vstupujícího $E_{\lambda 0}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a vystupujícího záření $E_{\lambda L}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] ve vzdálenosti L [m] dle následující rovnice

$$\frac{E_{\lambda L}}{E_{\lambda 0}} = e^{-\kappa_\lambda L}, \quad (4.36)$$

Hustota zářivého toku při průchodu částečně průteplivým prostředím, které nereflektuje vstupující záření, je absorbována nebo transmitována dle rovnice 4.20. Spektrální transmitance částečně průteplivého prostředí t_λ [-] o tloušťce L [m] je dána

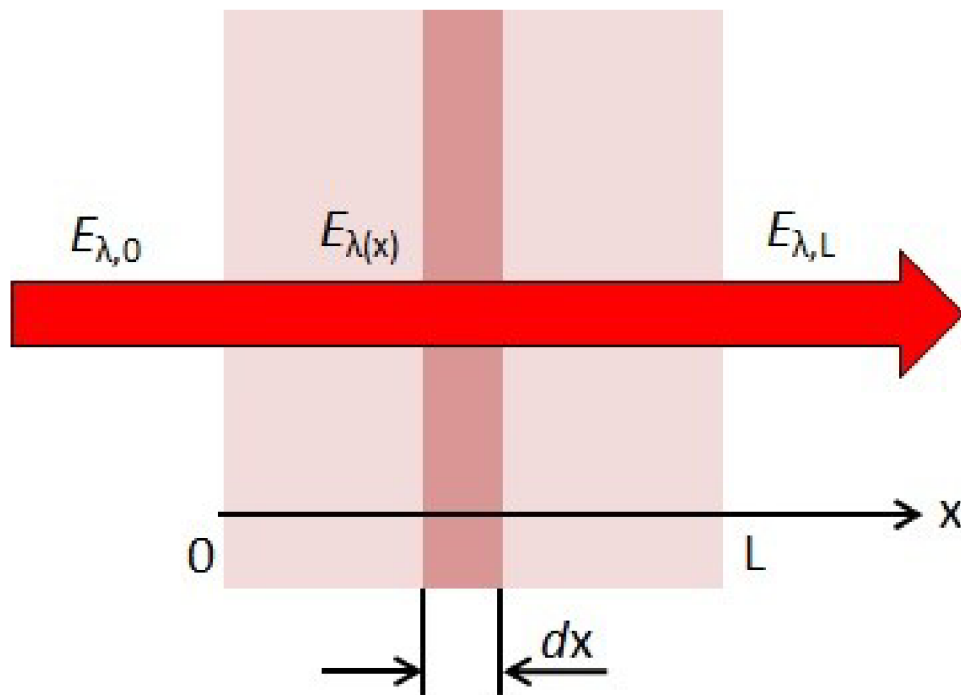
$$t_\lambda = 1 - a_\lambda = 1 - e^{-\kappa_\lambda L} \quad (4.37)$$

a dle rovnice 4.21 můžeme tvrdit

$$t_\lambda = 1 - \epsilon_\lambda = 1 - e^{-\kappa_\lambda L}, \quad (4.38)$$

kde ϵ_λ [-] je spektrální emisivita částečně průteplivého média.

Při měření částečně průteplivých objektů (například snímání teplotních polí v uzavřeném prostoru přes částečně propustnou látku, např. polypropylen) nebo při měření v částečně neprůteplivém prostředí (prostředí s vysokou vlhkostí nebo koncentrací plynů) je třeba znát parametry prostředí a pozadí, tj. transmitanci prostředí t_L [-], teplotu prostředí T_L [K], vzdálenost měřeného objektu od kamery L [m] (vzdálenost měření v částečně průteplivém prostředí), transmitanci objektu t_m [-] a teplotu pozadí T_Z [K].

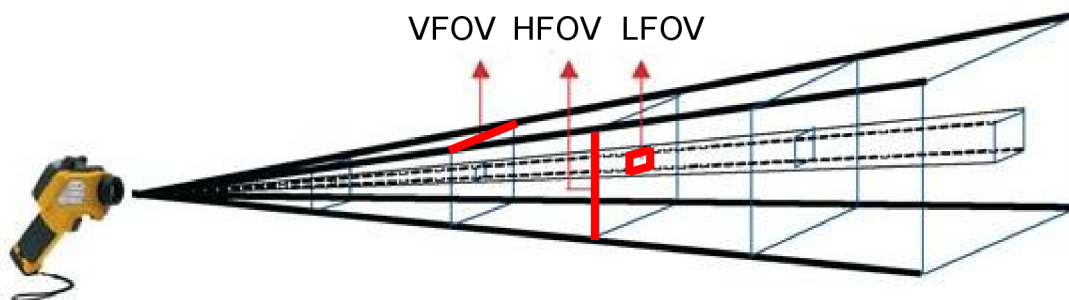


Obr. 4.9 Grafické znázornění Beerova zákona pro zeslabení spektrální intenzity vstupujícího záření průchodem skrze částečně průteplivé prostředí o tloušťce L [13]

Ve výše uvedeném textu byl proveden teoretický rozbor měření neprůteplivých objektů v průteplivém prostředí a měření neprůteplivých objektů v částečně průteplivém prostředí. Ve specifickém druhu měření je ještě možné se setkat s měřením částečně průteplivých objektů, tj. objekt, na který působí záření z pozadí. Při tomto druhu měření je třeba znát transmitanci měřeného objektu v rozsahu vlnových délek termovizní kamery a teplotu pozadí.

Z uvedeného teoretického rozboru je zřejmé, že zásadní vliv při měření pomocí termovizní kamery má její rozsah, tj. spektrum vlnových délek, ve kterých termovizní kamera detekuje zářivý tok. V dalším textu již nebude používán index vlnové délky „ λ “, protože teoretický rozbor vč. praktické části práce je proveden v omezeném rozsahu vlnových délek vhodné pro vybranou termovizní kameru.

Jelikož existuje mnoho druhů termovizních kamer, je nejdůležitější pro konkrétní aplikaci vybrat vhodnou termovizní kameru, zejména kameru s vhodným obrazovým rozlišením a konstrukčním uspořádáním. Měřený objekt by měl být v zorném poli termovizní kamery co největší, protože rozlišení termovizních kamer je například oproti fotografickým přístrojům značně malé. Proto je nutné se k měřenému objektu přiblížit tak, aby měřený objekt vyplňoval celý záběr termovizní kamery, použít vhodného objektivu nebo telekonvektorů (předsádek). Měřený objekt by měl zaujímat minimálně 3×3 obrazových bodů, tj. jeden obrazový bod (LFOV – lowest field of view) obklopený ze všech směrů následujícím bodem [68]. Ze snímacích úhlů (HFOV - Horizontal field of view, VFOV - Vertical field of view), známém obrazovém rozlišení a vzdálenosti kamery od snímaného objektu lze určit minimální velikost snímaného objektu, obr. 4.10.



Obr. 4.10 Stanovení minimální velikosti měřeného objektu

Z teorie dále vyplývá, že pro termovizní měření je nezbytné znát zejména emisivitu povrchu měřeného materiálu ε_m [-] a radiační teplotu okolních ploch T_R [K].

4.5 Emisivita

Emisivita ε [-] je při termovizních měřeních teplotních polí ve vzduchu základní statickou vlastností pomocného materiálu. Z rovnic 4.17 a 4.18 lze vyjádřit:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (4.39)$$

Emisivita materiálu je jeho fyzikální vlastnost a udává podíl intenzity vyzařování energie zkoumaného objektu E [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] k intenzitě vyzařování dokonalého zářiče E_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a nabývá hodnot $\varepsilon \in (0; 1)$, přičemž $\varepsilon = 1$ je hodnota absolutně černého tělesa (dokonalý zářič) a $\varepsilon = 0$ dokonalý reflektor. Ostatní tělesa se nazývají šedá, $\varepsilon \in (0; 1)$. Emisivita závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech materiálu, zejména na teplotě, úpravě povrchu (stupeň oxidace či hrubost povrchu), na směru vyzařování a na vlnové délce [88].

Při bezdotykovém snímání teplot je nejdůležitější správné nastavení emisivity povrchu materiálu a radiační teploty okolních předmětů působících na měřený materiál. Tyto parametry mají zcela zásadní vliv na správné určení povrchové teploty zkoumaného materiálu. Možností, jak stanovit emisivitu daného materiálu (nebo ji zohlednit jiným způsobem v měření) je hned několik [23, 45, 77]:

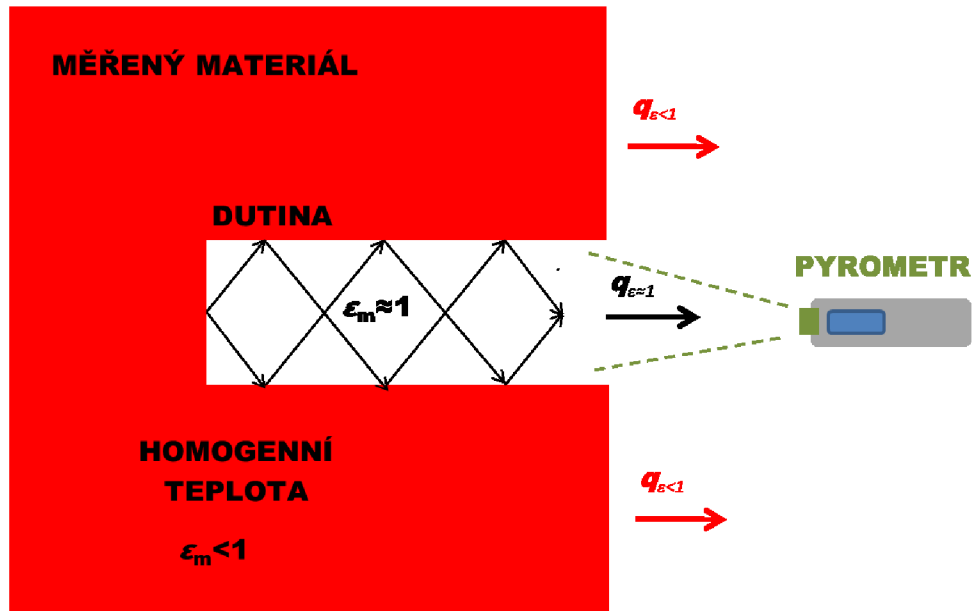
- 1) *Vyhledání emisivity zkoumaného materiálu v literatuře.* Tento způsob je vhodný jako orientační a slouží spíše informativně. Při tabulkovém stanovení emisivity jsou zanedbány vlivy, jako například konkrétní typ materiálu nebo jeho způsob zpracování [91].
- 2) *Měření teploty pyrometrem bez přesně stanovené hodnoty emisivity.* V praktickém měření není vždy nutné znát přesně emisivitu měřeného povrchu materiálu. Pro určité aplikace je postačující, že vhodně zaměřený pyrometr, ukazuje „určitou“ hodnotu teploty. Pokud se technologická operace opakuje při té samé měřené teplotě a proces proběhne opět bez problému, tak operace proběhla v pořádku. Způsob měření je tedy vyhovující, i když měřená teplota neodpovídá skutečné teplotě (zejména kvůli chybnému nastavení emisivity materiálu). V tomto případě se jedná o tzv. „technologickou hodnotu teploty“, u níž není podstatné, jak dalece se blíží

skutečné teplotě. Měření bez přesně stanovené hodnoty emisivity bývá možné pro vysokoteplotní aplikace, pokud měření probíhá na krátkých vlnových délkách (0,65 nebo 0,9 m) a emisivita měřeného povrchu je blízká 1 [91].

- 3) *Kombinací termovizní kamery a dotykové sondy.* Ohřátím či ochlazením vzorku materiálu na požadovanou teplotu a její přesné stanovení pomocí kalibrovaného termočlánku umožňuje zkoumo nastavování hodnoty emisivity na termovizní kameře (nebo na pyrometru), až nastane shoda mezi teplotou měřenou přístrojem s teplotou měřenou termočlánkem. Jiná varianta tohoto měření je použit pro stanovení emisivity vzorku materiálu výpočtový vztah, který obsahuje teploty získané termovizí a termočlánkem. Tato metoda v praxi často představuje jedinou možnost správného nastavení a objektivizace měření, protože postihuje skutečně reálnou situaci při měření. Je nutné zajistit, aby měl termočlánek s měřeným povrchem dobrý kontakt (dobrý přenos tepla [91]), jím odvedené teplo bylo minimální, a aby byl schopen dostatečně rychle reagovat na změny měřené teploty.
- 4) *Zvýšení emisivity povrchu materiálu.* Pokud to měřené materiály umožňují, lze jim uměle zvýšit hodnotu emisivity měřeného povrchu [69]. To je možné udělat lokálně a porovnat, jak se změnila hodnota teploty před a po zvýšení hodnoty emisivity nebo jak se mění materiál se zvýšenou hodnotou emisivity vůči materiálu bez zvýšené hodnoty emisivity ve shodný čas. Obvykle je použito speciálních nálepek nebo nástřiků [34]. Termovizní kamerou nebo pyrometrem se změří teplota samolepky (nátěru) při jeho známé emisivitě a emisivita zkoumaného materiálu (a skutečná teplota povrchu zkoumaného materiálu) se stanoví ze získané teploty pomocného materiálu při shodě s teplotou měřeného vzorku. Pro teploty přibližně do 250 °C lze použít tyto speciální nálepky se známou emisivitou s tím, že musí být mezi nimi zajištěn dobrý kontakt (dokonalý přenos tepla). Povrch materiálu je možné také nastříkat černým sprejem v měřeném místě. Tak se dosáhne lokálního zvýšení emisivity materiálu na hodnotu blízkou hodnotě 1 [91]. Tato metoda je vhodná i pro vyšší teploty (do 700 °C).
- 5) *Stanovení emisivity výpočtem* [91]. V případě některých materiálů (např.: keramik, sklo, specifické druhy kovových materiálů), lze získat hodnoty emisivity, reflexivity a transmitance (v případě průteplivých materiálů) výpočtem na základě dobré znalosti chování indexu lomu v závislosti na vlnové délce a teplotě. Pro stanovení emisivity je využito vztahů pro výpočet Fresnelovy odrazivosti a vztahu pro výpočet transmitance optické vrstvy se znalostí reálné a imaginární části indexu lomu. Tyto indexy lomu lze stanovit pomocí hodnot komplexní permitivity, z elipsometrických měření nebo s pomocí vzorců odvozených z Maxwellovy telegrafní rovnice.

Stanovení hodnot emisivity pomocí těchto výpočtů bývá pro praxi velice obtížné, z důvodu odvození přesných vztahů pro výpočet reálné a imaginární části indexu lomu v závislosti na vlnové délce a teplotu pro konkrétní látku.
- 6) *Stanovení emisivity pyrometrem vytvořením dutiny v měřeném materiálu* [5]. Další metodou, jak zvýšit hodnotu emisivity, je vytvořit v materiálu dutinu. Poté se materiál rovnoměrně prohřeje a porovnává se měření pyrometrem

v dutině a na jeho povrchu. Velikost dutiny musí být mírně větší, než zorné pole pyrometru v dané vzdálenosti, aby bylo možno pyrometr plně zaměřit dovnitř dutiny, obr. 4.11 [91]. V dutině je emisivita dna většinou 0,98 až 0,995. Tvar dutiny může být kulový, válcový a kuželový. Pro válcovou dutinu se doporučuje poměr hloubky k průměru 3:1.



Obr. 4.11 Černé těleso realizované formou dutiny v materiálu [91]

- 7) *Stanovení emisivity měřením teploty přechodu* [9, 91]. Speciálním případem je stanovení emisivity materiálu na rozhraní pevné a kapalně fáze, která bývá obvykle dobře známá teplotou přechodu. Na základě měření v této oblasti je možné provést nastavení termovizní kamery takovým způsobem, aby zobrazovala skutečnou hodnotu teploty. Emisivita těchto materiálů se na tomto rozhraní fází rychle mění a je zcela jiná pro pevnou a kapalnou fázi. Z tohoto důvodu stanovení emisivity tímto způsobem není příliš časté a ani přesné.
- 8) *Stanovení emisivity z měření teploty poměrovým pyrometrem* [6, 14]. Poměrové pyrometry měří intenzitu záření ve dvou spektrálních pásmech s vlnovými délkami [46, 56]. Přesnost této měřicí metody je závislá na tom, do jaké míry se chová měřený materiál jako šedé těleso. Pro tento typ měření se používají blízké vlnové délky λ_1 a λ_2 a platí

$$E_1 = E_{01}(\lambda_1, T) \cdot \epsilon_1(\lambda_1, T), \quad (4.40)$$

$$E_2 = E_{02}(\lambda_2, T) \cdot \epsilon_2(\lambda_2, T). \quad (4.41)$$

Pokud uvažujeme měřený povrch jako šedé těleso (emisivita jeho povrchu není funkcí vlnové délky), platí

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (4.42)$$

a poměrový signál z poměrového pyrometru je dán vztahem

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{E_{01}}{E_{02}}. \quad (4.43)$$

Skutečnou teplotu materiálu T_B [K], která se při měření pomocí poměrového pyrometru (někdy též nazývaný vícebarevný, dvoubarevný) nazývá „barevná“ je dána vztahem

$$T_B = T_1 \cdot T_2 \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 \cdot T_2 - \lambda_1 \cdot T_1}, \quad (4.44)$$

kde T_1 a T_2 [K] jsou radiační teploty určené z daných kanálů pyrometru. Stanovení emisivity materiálu by pak probíhalo dle bodu 3. Použití poměrového pyrometru ke stanovení emisivity je zatíženo vyšší chybou, než například dle bodu 3. To je dáno dvoukanalovým měřením, z nichž každý kanál je zatížen vlastní chybou a celková chyba je tedy vyšší. Tyto chyby lze eliminovat pomocí matematických operací, jako například využitím klouzavého průměru nebo filtrací signálů [15].

- 9) *Stanovení emisivity z měření teploty pomocí pyrometru s laserovým měřením* [6]. Při tomto druhu stanovení emisivity (pro neprůteplivý objekt) se využívá laserový paprsek o určité vlnové délce. Paprsek je vyslán z pyrometru kolmo k měřenému povrchu s neznámou hodnotou emisivity. Energie paprsku je částečně pohlcena měřeným materiálem a částečně odražena zpět do přístroje. Ze ztráty intenzity paprsku je poté vyhodnocena emisivita povrchu měřeného materiálu.
- 10) *Multispektrální termometrie*. Touto metodou lze získat skutečnou hodnotu teploty povrchu zpracováním dat tepelného záření od měřeného objektu v několika vlnových délkách [2]. Existují dva způsoby jak stanovit emisivitu měřeného objektu a následně pak určit přesně teplotu měřeného objektu. První způsob spočívá ve využití matematického modelu [107] a druhý využívá neutronové sítě [15]. Využití matematického modelu je založené na pevném vztahu mezi vlnovou délkou a emisivitou materiálu a mezi emisivitou materiálu a radiační teplotou [33, 89]. Vzhledem k proměnlivosti emisivity v tomto případě nebývá stanovený model moc přesný a vykazuje zvýšené nejistoty při stanovení povrchové teploty měřeného materiálu.
- Při využití neutronové sítě, tj. nelineární mapování mezi výstupním signálem a skutečnou teplotou povrchu, je potřeba vyřešit, která data ze vztahu mezi skutečnou teplotou povrchu a výstupním signálem napětí odpovídají skutečným hodnotám. Čím více se liší prvotně předpokládaný model (the single parameter dynamic search - SPDS) od upraveného modelu pomocí neutronové sítě (combined neural network emissivity model - CNNE model), tím větší je nejistota měření [11, 28].
- 11) *Stanovení emisivity pomocí spektrometru z intenzity záření*. Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračerveně spektrum, které je grafickým zobrazením funkční

závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmittance nebo absorbance na vlnové délce dopadajícího záření [36]. Jedním z možných zařízení je například spektrometr Nicolet 380 od firmy Thermo Electron, obr. 4.12. Jedná se o spektrometr typu FTIR (Fourier transform infrared). Tento spektrometr dokáže měřit v rozsahu vlnových délek od 7800 až 350 cm^{-1} .



Obr. 4.12 Spektrometr Nicolet 380 [63]

4.6 Radiační teplota

Mezi nejjednodušší systémy pro bezkontaktní měření teplot, jsou spektrální pyrometry (také nazývány radiační teploměry), obr. 4.13. Jsou to jednobodové bezkontaktní teploměry, které měřenou úroveň záření přepočítávají na měřenou teplotu povrchu. Výstupem je jedna hodnota teploty, protože používají pouze jednobodový detektor. To je zásadní rozdíl radiačních teploměrů oproti termovizní kameře, která zobrazuje teplotní pole. Tyto systémy vzhledem ke svému použití nemají korekci na teplotu prostředí T_L [-], protože druh měření, ke kterému jsou určeny, to nevyžadují. Některé spektrální pyrometry mají možnost nastavení emisivity přímo v přístroji [48].

Výhodou radiačních teploměrů je jejich nízká cena. Nevýhodou je pouze zobrazení jedné teploty (nelze zobrazit teplotní rozložení) a nižší přesnost měření (obvykle ± 2 K). Uplatňují se zejména ve stacionárních aplikacích trvalého bodového sledování teploty či jako snadno přenosné přístroje pro snadné a rychlé určení teploty konkrétních měřicích bodů. Dále se používají pro stanovení radiační teploty okolních ploch jako součást měření při práci s termovizní kamerou.

Měření pomocí radiačních teploměrů je prakticky nezávislé na vzdálenosti mezi radiačním teploměrem a měřeným objektem, pokud měříme v dokonale průhledném prostředí, rov. 4.28 [2]. Pro termovizní měření je nutná znalost střední radiační teploty okolí, která ovlivňuje samotné měření. Střední radiační teplota okolních ploch je povrchová teplota imaginárního šedého povrchu obklopujícího daný bod, která má stejné sálavé účinky jako skutečné okolí posuzovaného bodu [19]. Radiační teploměry měří teploty povrchů v jistém prostorovém úhlu (většinou 30°), pomocí termovize je možné určit radiační teplotu z poloprostoru [69].



Obr. 4.13 Radiční teploměr Testo 830-T1 [79]

Mezi další metody, jak přímo změřit radiální teplotu patří proměření prostoru pomocí termovizní kamery anebo s využitím difúzního povrchu, Lambertova zdroje. Proměření prostoru pomocí termovizní kamery je velice rychlé. Stačí zmapovat poloprostor a stanovit střední radiální teplotu buď na místě rozostřením kamery (výsledný termogram bude mít pouze jednu barvu), nebo ve vyhodnocovacím programu stanovit výběrem vhodného příkazu průměrnou radiální teplotu. Dále je možné využít pro stanovení radiální teploty Lambertova zdroje záření, kdy se dopadající záření odráží rovnoměrně do všech směrů. Radiální teplotu lze orientačně zjistit s využitím termovize a pomačkané hliníkové fólie.

Jedním z dalších způsobů, jak určit radiální teplotu okolních ploch, působících na měřený objekt, je použití manuálního výpočtu. Množství tepla, sdíleného zářením mezi měřeným objektem a jednotlivými obklopujícími plochami v prostoru, se výpočtem stanovuje obtížně. K usnadnění výpočtu a k posouzení sálavého účinku všech okolních ploch jedinou veličinou, byla zavedena tzv. střední radiální teplota T_r [K]. Střední radiální teplota je definována jako společná teplota všech okolních ploch, při které by bylo celkové množství tepla sdílené sáláním mezi měřeným objektem a okolními plochami stejné jako ve skutečnosti. Pro obecný případ platí [60, 69]

$$T_r = \sqrt[4]{F_{r1} \cdot T_1^4 + F_{r2} \cdot T_2^4 + \dots + F_m \cdot T_n^4}, \quad (4.45)$$

kde T_1, T_2 až T_n [K] značí absolutní teploty povrchů okolních ploch S_1, S_2 až S_n [m²] a F_{r1}, F_{r2} až F_m [-] značí poměry osálení jednotlivých okolních ploch S_n plochou S_r (plocha měřeného objektu). Přesný výpočet střední radiální teploty spočívá ve stanovení poměrů osálení v libovolně definovaném bodě na základě geometrických poměrů vzájemné polohy mezi sálající plochou a měřeným objektem. Obecně poměr osálení závisí na vzájemné poloze sálající plochy a plochy osálané, dále pak na velikosti a vzdálenosti těchto ploch [25].

Střední radiální teplotu lze také měřit přímo přístroji, které umožňují integrovat celkově nerovnoměrnou radiaci z povrchů okolních ploch [101]. Nejčastěji se používá černý kulový teploměr (obr. 4.14) o průměru 100 mm nebo 150 mm (Vernon-Joklův), který je tvořen černou polyuretanovou koulí, v jejímž středu je čidlo teploty. Kulový teploměr se umístí do prostoru, kde se bude měřit střední radiální teplota. Koule

se ustálí v tepelné rovnováze dané účinkem výměny tepla radiací a prouděním během asi 15 až 20 minut. Střední radiální teplota \bar{t}_r [°C] je dána vztahem [39]

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{T_g^4 + k \cdot w^{0,6}(T_g - T_a)} - 273,15, \quad (4.46)$$

kde T_g [K] je teplota kulového teploměru s průměrem d , T_a [K] značí absolutní teplotu vzduchu, k [-] je konstanta kulového teploměru ($2,9 \cdot 10^8$ pro průměr kulového teploměru $d = 150$ mm a $2,5 \cdot 10^8$ pro průměr kulového teploměru $d = 100$ mm) a w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost proudění vzduchu.



Obr. 4.14 Kulový teploměr [49]

K dalším přístrojům k určení střední radiální teploty prostředí patří dvoukulový radiometr a čidlo konstantní teploty. Dvoukulový radiometr obsahuje dvě koule, z nichž jedna je leštěná a druhá je matná. Koule mají různé hodnoty emisivity povrchu. Zařízení je elektricky vyhříváno na shodnou teplotu. Tepelné ztráty konvekcí jsou u obou koulí shodné, ale koule s matným povrchem více vyzařuje energii. Z rozdílu příkonů obou koulí lze stanovit hodnotu střední radiální teploty [94]

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{T_w^4 - \frac{P_2 - P_1}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot \sigma_0 \cdot S}} \quad (4.47)$$

kde \bar{T}_r [K] je hodnota střední radiální teploty, T_w [K] je teplota povrchu (shodná u obou koulí), P_1, P_2 [W] jsou příkony koule s matným povrchem a s leštěným povrchem, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ [-] jsou emisivity povrchu koule s matným povrchem a s leštěným povrchem, σ_0 je Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]) a S [m^2] je povrch koule (u obou koulí shodný).

Čidlo konstantní teploty funguje na principu nulových ztrát konvekcí do okolí, což je způsobeno vyhříváním objemu čidla na teplotu okolního vzduchu. Tvar čidla je většinou koule nebo elipsoid. Příkon, kterým je čidlo vyhříváno nebo chlazeno, je funkcí pouze radiální teploty. Pro stanovení střední radiální teploty platí

$$\bar{T}_r = \sqrt[4]{T_w^4 - \frac{P}{\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S}} \quad (4.48)$$

Vypočtená hodnota střední radiační teploty se vloží do softwaru kamery přímo při provádění termovizního snímkování (spolu s hodnotou emisivity měřeného materiálu), nebo se tyto parametry zadají při vyhodnocování naměřených termogramů do softwaru na PC, který lze získat s termovizní kamerou.

V praxi, především ve velkých průmyslových halách, na člověka působí velmi nehomogenní pole tepelného záření. Pro takové případy je zavedena veličina asymetrie radiační teploty. Asymetrie nastává v případech, kdy střední radiační teplota nevystihuje radiační teplotu v prostoru, např. při velkých rozdílech protilehlých či sousedních stěn. Asymetrie radiační teploty Δt_{pr} [K] je tedy definována jako rozdíl mezi radiační teplotou dvou sousedních ploch t_{pr1}, t_{pr2} [K] a odpovídá rozdílu intenzit dopadajícího záření z těchto ploch [29] a popisuje ji norma ČSN EN ISO 7726 Ergonomie tepelného prostředí – přístroje pro měření fyzikálních veličin [18]. Stanovuje se z hodnoty radiační teploty dvou rozhodujících ploch (měřením nebo výpočtem) dle následující rovnice

$$\Delta t_{pr} = t_{pr1} - t_{pr2}. \quad (4.49)$$

Pro měření asymetrie radiační teploty norma [19] nařizuje použití směrového radiometru, dále radiometru s leštěným a s absorpčním kotoučem, aj. Z hlediska tepelné pohody způsobuje asymetrie radiačního prostředí diskomfort. Použití asymetrie radiačních teplot, tedy použití směrových radiačních teplot, lépe vystihuje dominantní tepelné ovlivnění při termovizním měření.

Střední radiační teplota \bar{t}_r [°C] se využívá při stanovení operativní teploty, která je jedním z kritérií při stanovení tepelné pohody. Další kritéria jsou např. index PMV a PPD, obtěžování průvanem a také veličiny jako jsou efektivní či ekvivalentní teplota. Operativní teplota t_o [°C] je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo konvekci i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí a je dána vztahem [39]

$$t_o = \bar{t}_r + A \cdot (t_a - \bar{t}_r), \quad (4.50)$$

kde

$$A = 0,75 \cdot w^{0,16}, \quad (4.51)$$

kde w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost proudění vzduchu v prostoru.

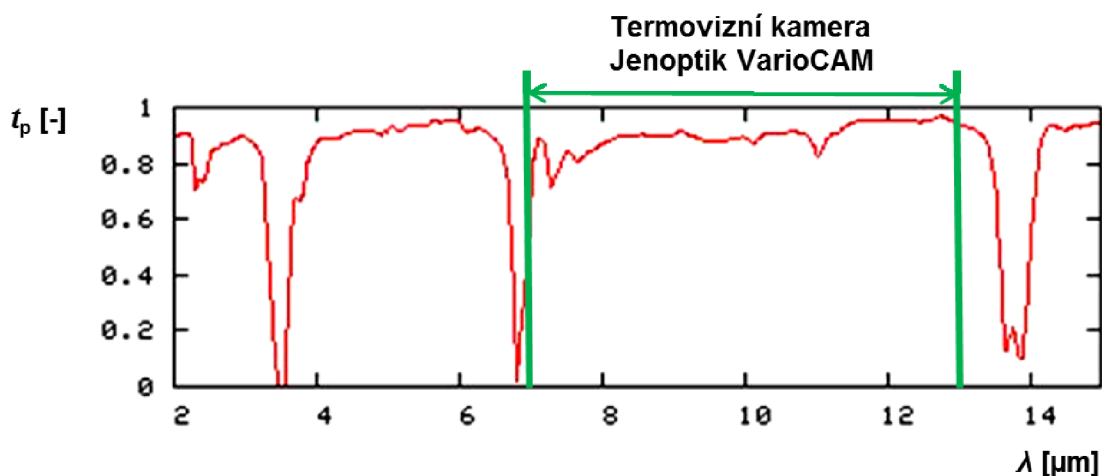
4.7 Transmittance

Při mnohých termovizních měřeních není možné umístit termovizní kameru přímo do prostoru, v němž se nachází oblast či objekt zájmu, který má být měřen. To může být způsobeno mnoha okolnostmi. Jedním z důvodů může být agresivní prostředí v měřeném prostoru, které by mohlo ohrozit obsluhu nebo poškodit měřicí zařízení. Dalším vlivem může být velikost termovizní kamery s příslušenstvím a z hlediska možného ovlivnění podmínek měření uvnitř měřeného prostoru samotnou termovizní technikou nebo její obsluhou [103]. Z těchto a dalších důvodů se provádí v mnoha aplikacích práce skrz ochranný či dělicí průzor, obr. 4.15. Průzor odděluje měřený prostor od vnějšího prostředí, kde je umístěna kamera s příslušenstvím, nebo obsluha.



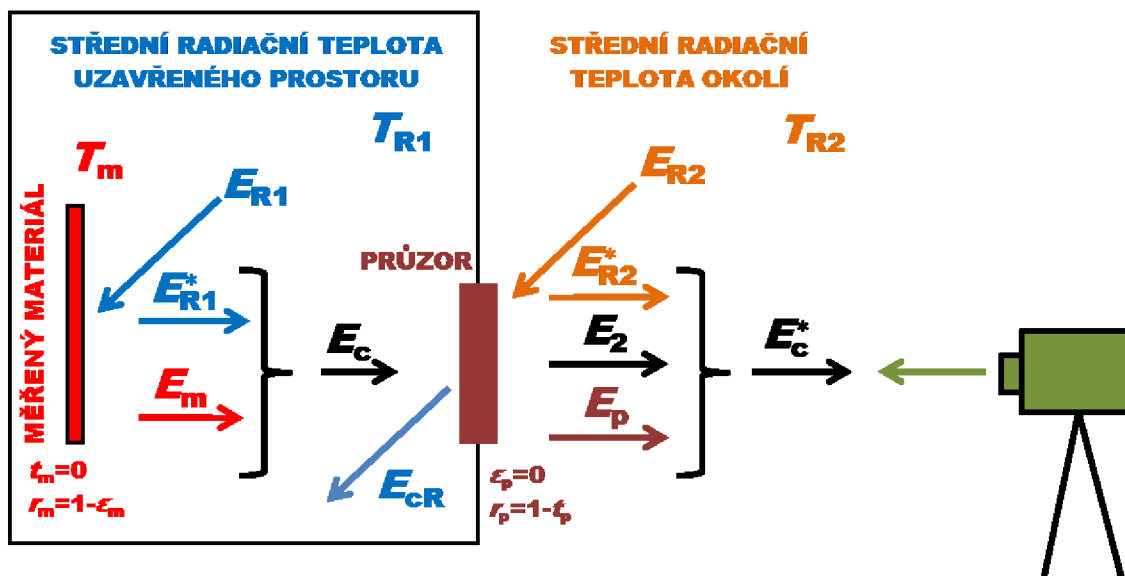
Obr. 4.15 Využití ochranného průzoru při lékařském vyšetření [82]

Pro termovizní měření musí být zvolen materiál průzoru tak, aby minimálně ovlivňoval samotné měření uvnitř měřeného prostoru, tj. měl by mít co možná nejvyšší hodnotu transmitance a tedy minimální hodnotu emisivity a reflektance, viz rovnice (4.21). Pro termovizní měření neizotermních proudů vzduchu v malých uzavřených prostorách je nutné použít jako pomocný materiál vhodný druh polyetylenových či polypropylenových průzorů, které by měly vhodné statické vlastnosti pro tyto měření v žádaném spektru vlnových délek [53, 66]. Hodnoty transmitance závisí především na materiálovém složení průzoru (snížení hodnoty reflexe), dále na její hustotě a tloušťce (snížení vlivu absorpce), obr. 4.16.



Obr. 4.16 Hodnoty transmitance polyetylenové HDPE (high density polyetylen) fólie tloušťky 0,05 mm s vyznačením rozsahu vlnových délek termovizní kamery Jenoptik typ VarioCAM [73]

Při měření termovizní kamerou skrz průzor dochází k ovlivnění měření vlivem průzoru (pokud transmitance průzoru t_p [-] není 100 %, tj. $t_p < 1$), obr. 4.17. V dalším textu je uveden rozbor parametrů ovlivňující měření termovizní kamerou skrz průzor.



Obr. 4.17 Uspořádání objektů při termovizním měření skrz průzor

Hustota zářivého toku v uzavřeném prostoru před průzorem E_c [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je dána součtem vlastní hustoty zářivého toku měřeného objektu E_m [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a hustoty odraženého zářivého toku okolních ploch z malého uzavřeného prostoru E_{R1}^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], který vychází z rovnic (4.18) a (4.27) a má tvar

$$E_c = \epsilon_m \cdot k \cdot T_m^n + r_m \cdot k \cdot T_{R1}^n, \quad (4.52)$$

kde r_m [-] je reflektance pomocného materiálu, k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] je konstanta odpovídající rozsahu vlnových délek pro termovizní kameru Jenoptik typ VarioCAM, T_m [K] je teplota povrchu měřeného materiálu, T_{R1} [K] je střední radiční teplota v malém uzavřeném prostoru působící na povrch pomocného materiálu, T_{R2} [K] je střední radiční teplota okolí a n [-] je teplotní exponent ve zvoleném rozsahu vlnových délek. Měřený materiál není ovlivňován hustotou tepelného toku pozadí, viz obr. 4.7 a rovnice 4.27, tj. $E_z^* = 0$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]. Transmittance měřeného materiálu t_m [-] je tedy rovna 0, tj. $t_m = 0$. Potom tedy platí

$$r_m = 1 - \epsilon_m, \quad (4.53)$$

kde ϵ_m [-] je emisivita pomocného materiálu. Hustota zářivého toku E_c je ovlivňována hustotou odraženého zářivého toku od průzoru E_{cR} dle vztahu

$$E_{cR} = E_c \cdot r_p, \quad (4.54)$$

kde r_p [-] je reflektance průzoru. Pro velice malé ovlivnění měření při vysoké hodnotě transmittance průzoru je možné zanedbat emisivitu průzoru ϵ_p [-], tedy hustota zářivého toku průzoru $E_p = 0$ [66, 103]. S emisivitou průzoru a také s teplotou průzoru neuvažují ani programy, které jsou součástí příslušenství termovizní kamery [40]. Z rovnice (4.21) je možné psát následující vztahy pro průzor

$$\epsilon_p = 0, \quad (4.55)$$

$$1 = t_p + r_p, \quad (4.56)$$

kde r_p [-] je reflexe radiační teploty z vnějšího prostředí. Při průchodu průzorem o transmitanci t_p [-] má hustota zářivého toku E_2 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] tvar

$$E_2 = E_c \cdot t_p. \quad (4.57)$$

V následujícím vztahu je zahrnut vliv střední radiační teploty vně uzavřeného prostoru T_{R2} [K], která působí na průzor. Hustota odraženého zářivého toku okolních ploch z vnějšího prostředí E_{R2}^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] má velikost

$$E_{R2}^* = r_p \cdot k \cdot T_{R2}^n. \quad (4.58)$$

Výsledná hustota zářivého toku E_c^* [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], která je detekována termovizní kamerou, je tedy dána vztahem

$$E_c^* = [\varepsilon_m \cdot k \cdot T_m^n + (1 - \varepsilon_m) \cdot k \cdot T_{R1}^n] \cdot t_p + (1 - t_p) \cdot k \cdot T_{R2}^n. \quad (4.59)$$

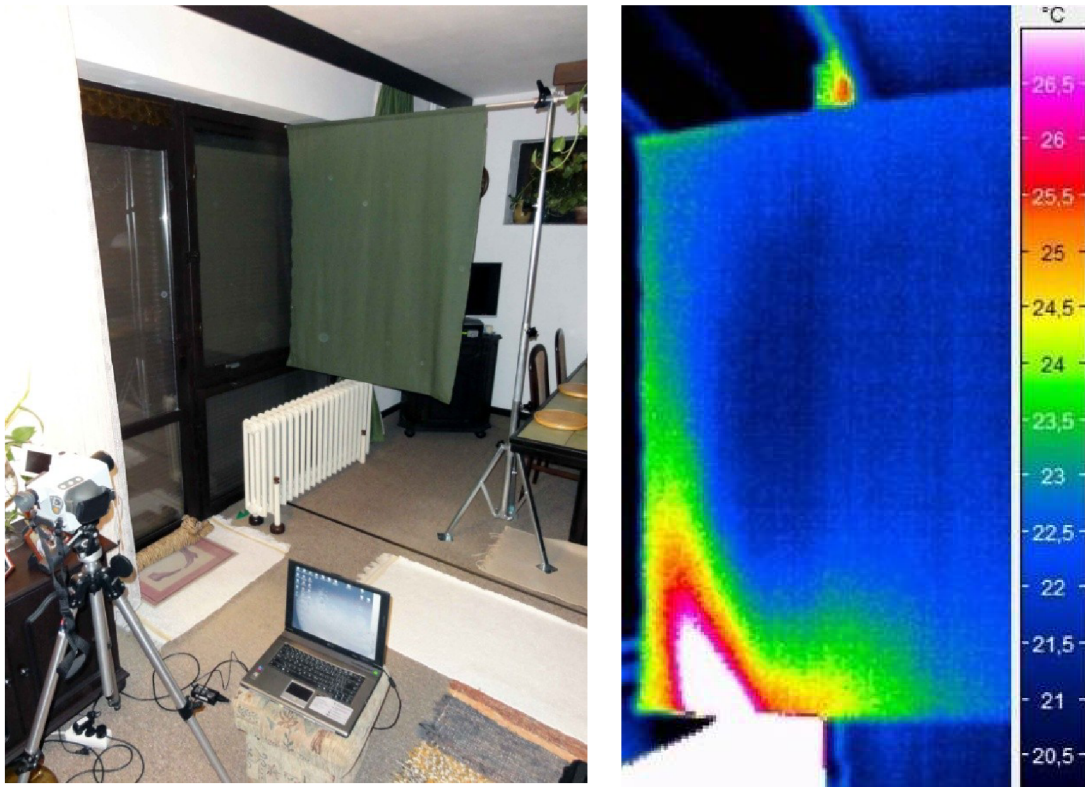
Z rovnice 6.59 je možné stanovit teplotu měřeného materiálu T_m [K] uvnitř malého uzavřeného prostoru měřeného termovizní kamerou skrze průzor.

$$T_m = \sqrt[n]{\frac{E_c^* - k \cdot (1 - \varepsilon_m) \cdot T_{R1}^n \cdot t_p - k \cdot (1 - t_p) \cdot T_{R2}^n}{k \cdot t_p \cdot \varepsilon_m \cdot r_p}}. \quad (4.60)$$

Materiály pro termovizní měření teplot vzduchu by měly mít zejména vysokou emisivitu ε [-], aby byla přesnost co největší a aby nebylo měření příliš ovlivňováno radiační teplotou okolí T_R [K]. Pro stanovení emisivity pomocného materiálu při měření teplotních polí ve vzduchu termovizní kamerou pomocí metody vložení archu do neizotermního proudu vzduchu je nejvhodnější stanovit emisivitu archu papíru či jiné vhodné látky kombinací termovizní kamery a dotykové sondy, nebo stanovením emisivity pomocí spektrometru. K rychlým odezvám na změnu teploty je také vhodný materiál s minimální tloušťkou δ [m] a s nízkou hodnotou tepelné kapacity C [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$]. Měřené materiály by měly být neprůteplivé. Při použití průzoru by měl mít materiál průzoru co největší hodnotu transmitance, aby měření bylo minimálně ovlivňováno okolím. Tyto statické vlastnosti materiálu mají zásadní vliv také na stanovení časové konstanty měřicí metody.

5 Měření parametrů vyvíjené metody

Metoda pro měření teplotních polí v neizotermních vzduchových proudech je založena na principu využívajícím pro měření teplot vzduchu termovizní systém [88] a je odborné veřejnosti známa již poměrně dlouho [38]. Jelikož vzduch je průteplivý, je nutné zobrazovat teplotní pole na pomocném materiálu o vhodných vlastnostech, především vysoké emisivitě, viz kapitola 4.5.



Obr. 5.1 Fotografie zařízení při měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery vč. získaného termogramu z měření

Použijeme-li jako pomocný materiál celistvý arch, můžeme měřit pouze dvojrozměrné (2D) neizotermní vzduchové proudy, obr. 5.1. Dvojrozměrný vzduchový proud je takový proud, kdy proudnice jsou vedeny paralelně s pomocným materiálem. Při použití měřicích terčů, je možné měřit trojrozměrné (3D) neizotermní vzduchové proudy, obr. 5.2. Trojrozměrný vzduchový proud je takový proud, kdy proudnice nejsou rovnoběžné s pomocným materiálem. To je například rotační proud, nebo při použití více navzájem se ovlivňujících vzduchových proudů. Ať už při použití celistvého archu pomocného materiálu, nebo s využitím měřicí sítě s pomocnými terčíky, je možné tuto metodu využít také při měření skrz průzor, viz kapitola 4.7.

Při použití celistvého archu pomocného materiálu se nepředpokládá výrazné ovlivnění proudu vzduchu, který je situován podélně s pomocným materiálem (2D proudění). Mezi zkoumané materiály, které byly použity pro výzkum funkčnosti této metody lze zařadit list papíru, textilu, pevného kartonu a tabulku polystyrenu [12].

V případě použití měřicích terčů je potřeba stanovit hodnotu minimální plošné porozity měřicí sítě. Tato hodnota je dána poměrem volné plochy (průtočné) k celkové ploše měřicí sítě. Tato hodnota se obvykle v literatuře uvádí v závislosti na rychlosti proudění v rozmezích 80 až 90 % [61]. Na jiných pracovištích byly prováděny pokusy

s použitím různých druhů materiálů pro měřicí terče, například s použitím matné nerezové oceli a nylonu [62]. Za nejvhodnější materiál měřících terčů pro měření vzduchových proudů je označováno použití papíru s přesně známou hodnotou emisivity povrchu [26].



Obr. 5.2 Fotografie zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery a měřících terčů

Základními parametry pro termovizní měření jsou emisivita pomocného materiálu ε_m [-] a střední radiační teplota okolního prostředí T_R [K]. Vysoká hodnota emisivity umožní měření i malých rozdílů teplot ve vzduchových proudech, s rozlišením blízcím se rozlišovací schopnosti termovizní kamery a s minimálním ovlivněním měření radiační teplotou okolního prostředí.

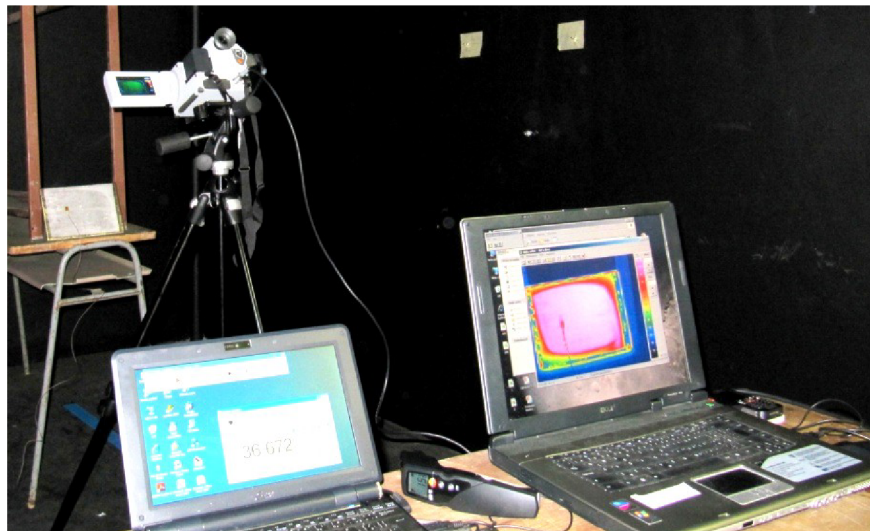
5.1 Měření emisivity

Cílem těchto měření bylo nalezení vhodného materiálu, který by měl nejlepší vlastnosti pro zkoumání teplotního pole v neizotermním proudu vzduchu. Takový materiál musí mít emisivitu ε [-] co možná největší. Při výběru takového materiálu byly porovnávány různé druhy papírů a tkanin. Tkaniny by měly být z přírodního vlákna a spolu s papíry by měly být matné (eliminace reflexe). Ostatní druhy materiálů (například polystyren, karton, dýha, apod.) nejsou vhodné pro měření teplotních polí ve vzduchu v běžných aplikacích, kvůli nižší hodnotě emisivity. Jejich případné využití může být aplikováno ve specifických případech. Příklad takové speciální aplikace je měření s vysokou (a s měnící se) výstupní rychlostí neizotermního proudu. V tomto případě by byl problém zajistit nehybnost archu papíru či tkaniny a bylo by nutné použít pomocného materiálu s vyšší tuhostí, byť s nižší hodnotou emisivity.

Měření emisivity vybraných vzorků materiálů bylo prováděno v laboratoři s homogenní radiační teplotou T_R [K]. Homogenní radiační teplota je zajištěna umístěním laboratoře v prostoru objemné haly v podzemním prostoru, čímž je docíleno předpokladu, že všechny vnější stěny laboratoře mají přibližně stejnou teplotu, jako vnitřní teplota v hale. Laboratoř je dobře tepelně izolována od haly, v níž se nachází a její vnitřní povrch je natřen materiálem s vysokou emisivitou. Střední radiační teplota okolního prostředí byla stanovena radiačním teploměrem Testo 830-T2 (obr. 4.13) jako aritmetický průměr radiačních teplot okolních ploch (obvodových stěn, stropu a podlahy).

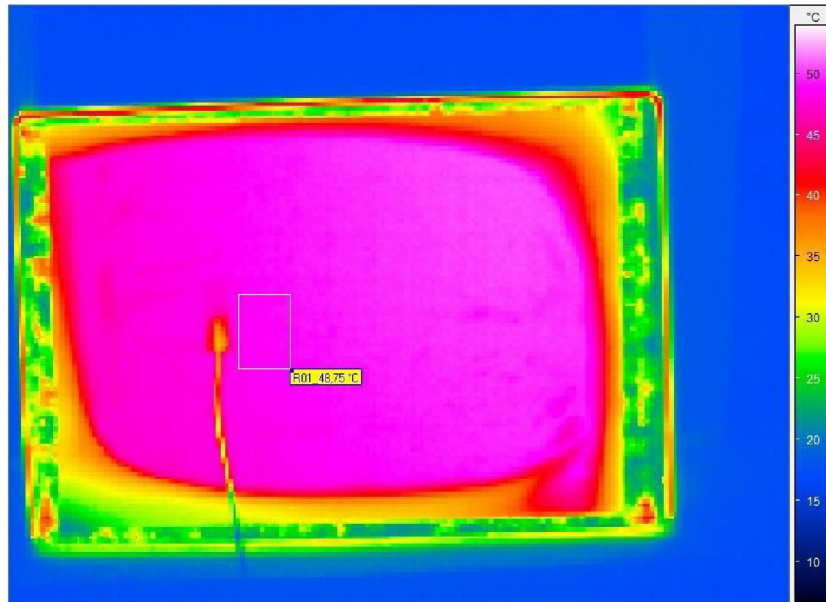
Emisivita zkoumaných materiálů byla stanovena na zahříváních vzorcích v chladnějším prostředí při chladnutí z teploty 80 °C až na teplotu 40 °C. Při zahřívání vzorků na vyšší teplotu by mohlo docházet k degradaci vlastností zkoumaného materiálu a také vysoké teploty vzduchu teplotovzdušného vytápění nekorrespondují s pohodou prostředí [19]. Naopak při zahřívání vzorku na nižší teplotu než 40 °C by nebyla zajištěna dostatečná teplotní diference mezi radiační teplotou okolního prostředí a teplotou zkoumaného materiálu, což by vedlo ke zvýšení nejistot měření. Tato teplotní diference by měla být alespoň 25 K při měření teplejších vzorků v chladnějším prostředí a při opačné variantě alespoň 15 K [67].

Měření bylo prováděno termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM, která má spektrální citlivost 8 až 13 μm s obrazovým rozlišením 320 x 240 bodů a se snímací frekvencí až 50 obr./s [40]. Zkoumaný materiál byl připevněn k silné ocelové desce pomocí lepidla, které neovlivňovalo jeho vlastnosti na povrchu, a byl na něm umístěn kalibrovaný termočlánek, který měřil jeho skutečnou teplotu. Deska se následně nahřála odporovým zdrojem na teplotu přibližně 85 °C a poté byla umístěna do stojanu před termovizní kameru tak, aby byla ustavena kolmo ke směru pozorování termovizní kamerou (obr. 5.3).



Obr. 5.3 Měření emisivity materiálu

Stanovení hodnoty emisivity probíhalo dle varianty měření emisivity č. 3, v kapitole stanovení emisivity 4.5, tj. kombinací termovizní kamery a dotykové sondy. Byla sledována teplota z termovize T_{TK} [K] při nastavené hodnotě emisivity $\epsilon_m = 1$ (obr. 5.4), teplota z termočláneku T_{TC} [K] a střední radiační teplota okolí T_R [K]. Odečty teplot probíhaly v intervalech po 10 K z teploty 80 °C až na teplotu 40 °C. Jako referenční teplota pro odečty hodnot byla brána teplota z termočláneku T_{TC} [K].



Obr. 5.4 Termogram získaný z měření emisivity

Výpočet emisivity povrchu materiálu vychází z hustoty zářivého toku E [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] registrované termovizní kamerou při snímání materiálu o emisivitě ε_m [-]

$$E = \varepsilon_m \cdot k \cdot T_{TC}^n + (1 - \varepsilon_m) \cdot k \cdot T_R^n \quad (5.1)$$

a z hustoty zářivého toku zadáním emisivity do termovizní kamery na hodnotu $\varepsilon_m = 1$

$$E = 1 \cdot k \cdot T_{TK}^n \quad (5.2)$$

Výsledná emisivita povrchu materiálu je poté dána vztahem [67]

$$\varepsilon = \frac{T_{TK}^n - T_R^n}{T_{TC}^n - T_R^n}, \quad (5.3)$$

kde n [-] je exponent ve zvoleném rozsahu vlnových délek (vhodný pro termovizní kameru Jenoptik typ VarioCAM) závislý na teplotě.

Pro každé měření bylo provedeno odečtení radiační teploty okolního prostředí radiačním teploměrem, nebo pomocí termovizní kamery a byla stanovena její střední hodnota. Velikost hodnoty exponentu byla stanovena dle obr. 4.6. Výsledná hodnota emisivity zkoumaného materiálu byla vypočtena dle vztahu (5.3) v rozsahu teplot 80 °C až 40 °C a určena jako aritmetický průměr z naměřených emisivit ε_i [-]. Zkoumané druhy materiálů jsou uvedeny v tabulce 5.1, kde jsou uvedeny posuzované materiály s nejvyšší hodnotou emisivity.

Ze zkoumaných materiálů má nejvhodnější vlastnosti pro zkoumání rozložení teplot v neizotermním proudu vzduchu obyčejný kancelářský papír. Má největší emisivitu. Ostatní druhy papírů mají sice relativně obdobné hodnoty emisivit, ale měření s nimi je obtížnější. Pauzovací papír je velice choulostivý na vlhkost a spolu s kartonem je citlivý na mechanické zacházení více, než obyčejný kancelářský papír. Tkanina je sice dobře skladovatelná a mobilní, avšak její vlastnosti pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu jsou méně vhodné z hlediska nižší emisivity (oproti kancelářskému papíru).

Tab. 5.1 Emisivity zkoumaných materiálů

Druh pomocného materiálu	T_R	T_{TC}	T_{TK}	ε_i	ε
	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[-]
Běžný kancelářský papír 80 g/m ²	15,4	80,51	78,78	0,96	0,96
	15,5	70,12	68,82	0,97	
	15,9	60,01	58,92	0,97	
	15,9	50,65	48,98	0,94	
	15,6	40,72	39,32	0,94	
Pauzovací papír 75 g/m ²	15,9	80,32	76,02	0,91	0,91
	15,9	70,06	66,12	0,91	
	16,8	59,97	56,42	0,90	
	15,7	50,61	48,10	0,91	
	15,6	40,32	38,32	0,91	
Karton kreslicí 180 g/m ²	15,8	79,78	76,57	0,93	0,93
	15,8	69,43	66,43	0,93	
	15,9	59,90	57,30	0,93	
	15,9	50,14	48,07	0,93	
	15,9	40,10	38,42	0,92	
Bavlněný textil 145 g/m ²	15,8	79,78	76,57	0,93	0,93
	15,9	69,43	66,43	0,93	
	15,9	59,90	57,30	0,93	
	15,8	50,14	48,07	0,93	
	15,8	40,10	38,42	0,92	
Ubrusovina PES 195 g/m ²	19,8	80,11	64,56	0,68	0,67
	19,8	70,45	56,32	0,67	
	19,9	59,96	48,36	0,66	
	19,7	49,78	40,78	0,66	
	20,0	40,03	33,62	0,65	

Vypočtené a zprůměrované hodnoty emisivity dle vztahu 5.3 byly konfrontovány dle literatury, aby byly případně eliminovány hrubé chyby měření. Bylo zjištěno, že naměřené hodnoty korespondují s hodnotami emisivit určených v jiných publikacích [27, 38, 48]. V rámci obecných označení bez specifických hodnot materiálů (například bavlněný textil, kancelářský papír) bylo dosaženo shody měření v odchylce přibližně $\pm 3\%$.

Při každém měření veličin je třeba brát v úvahu zatížení naměřených hodnot nejistotami měření. To je způsobené nejruznějšími nežádoucími vlivy, které se vyskytují v měřicím procesu a projevují se odchylkou mezi naměřenými a skutečnými veličinami. Míra difference správné a naměřené hodnoty závisí zejména na přesnosti měřicího přístroje a přesnosti měřicí metody. Dalšími nejistotami jsou nejistoty měřicích čidel, nejistoty měřicí techniky, nejistoty okolním prostředím, dále lze uvést chyby obsluhy, chyby zvoleným postupem měření, chyby pozorování a jiné. Chyby a nejistoty měření je nutné maximálně eliminovat, jelikož se vždy promítnou do výsledku měření.

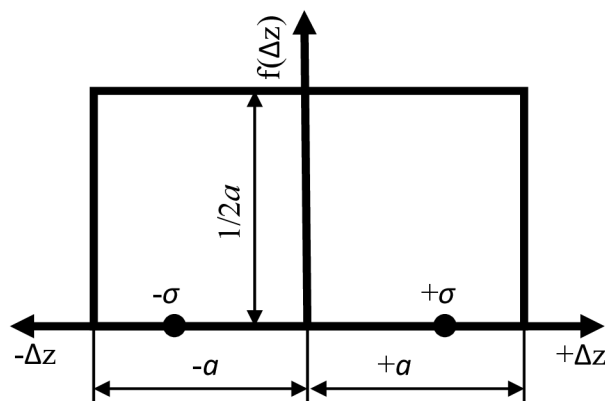
Nejistoty měření lze rozdělit jako absolutní a relativní. Absolutní nejistota měření se nazývá odchylka ε (v příslušných jednotkách měřených veličin) a je definována rozdílem naměřené hodnoty y od předpokládané správné hodnoty y^* dle vztahu

$$\varepsilon = y - y^*. \quad (5.4)$$

Jelikož určení správné hodnoty y^* je nereálné, je nahrazována většinou aritmetickým průměrem, jakožto střední hodnotou naměřených veličin. Relativní nejistotu měření η [-] lze určit vztahem

$$\eta = \frac{\varepsilon}{y^*} \quad (5.5)$$

Z hlediska klasifikace možných druhů chyb je možné rozdělit chyby na hrubé, systematické a nahodilé. Hrubé chyby jsou velmi odlišné od ostatních naměřených hodnot, a proto je lze snadno identifikovat a odstranit z výběru naměřených hodnot. Jedná se většinou o chybu měření v důsledku poškození měřicího zařízení, neznalostí měřicí metody či selháním obsluhy. Systematické chyby lze odhalit porovnáním měření s jinými měřicími metodami či opakováním měření s jinou obsluhou nebo s náhradním měřicím přístrojem. Jsou to tedy chyby zatížené špatně zvolenou metodou, nevhodně zvolenou aparaturou či dostatečně neproškolenou obsluhou. Po identifikaci těchto chyb je lze korigovat korekčními hodnotami, které se přičítají k nekorigovaným hodnotám. Oproti systematickým a hrubým chybám, které lze opravit či z měření vyseparovat, nahodilé chyby korigovat nelze a nelze jim ani zabránit, aby vznikaly, vzhledem k jejich charakteru. Mezi nahodilé chyby patří zejména chyby způsobené vnitřním a vnějším vlivům (tlak, teplota, vlhkost vzduchu, tepelný šum, apod.), průběhem měření a nekvalitní přípravou na měření. Někdy se nahodilým chybám také říká náhodné kolísání. Chyby měření jsou zatíženy tedy především chybami nahodilými.



Obr. 5.5 Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení

V případě měření teploty je uvažována nejistota měřicího přístroje $\bar{\sigma}_1$ a nejistota čtení displeje $\bar{\sigma}_2$ (někdy také chyba rozlišení či zaokrouhlení). Chyba přístroje vychází z rovnoměrného rozdělení, obr 5.5. Toto rozdělení se v praxi používá nejčastěji. Je použitelné v tom případě, kdy je stejná pravděpodobnost výskytu odchylky v celém daném intervalu. Používá se zejména pro stanovení odchylky přístrojů, kde není důvod zvyšovat pravděpodobnost některých odchylek (zvýhodňovat je) [106].

Směrodatná nejistota dílčích členů je dána součtem nejistot měření tohoto členu dle následujícího vztahu

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2}. \quad (5.6)$$

Vztahu 5.6 se také říká věta o skládání chyb.

Nejistotu přístroje můžeme stanovit z následujícího vztahu

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u, \quad (5.7)$$

kde hodnota $\frac{1}{\sqrt{3}}$ značí možnost výskytu odchylky v celém rovnoměrném pravoúhlém rozdělení (obr. 5.5). Veličina u značí chybu udávanou výrobcem použitého zařízení (uncertainty).

Nejistotu čtení displeje (chybu odečtu u analogových displejů nebo chybu zaokrouhlení u digitálních displejů) je možné stanovit z následujícího vztahu

$$\bar{\sigma}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} \cdot r_D, \quad (5.8)$$

kde hodnota $\frac{1}{\sqrt{3}}$ značí možnost výskytu odchylky v celém rovnoměrném pravoúhlém rozdělení a hodnota $\frac{1}{2}$ značí, že naměřená hodnota leží v intervalu $\pm 0,5$ dílku příslušného rozlišení přístroje r_D (resolution device). Jelikož nejistota displeje má oproti nejistotě přístroje zanedbatelnou hodnotu, je možné ji zanedbat, protože výslednou nejistotu měření téměř neovlivní [105].

Emisivita byla měřena pomocí vztahu 5.3. Byly měřeny jednotlivé veličiny v této rovnici a z ní byla následně výsledná hodnota emisivity spočítána. Jedná se tedy o stanovení nejistoty nepřímého měření, kdy je daná veličina funkcí několika veličin. V případě rovnice 5.3 se jedná o hodnotu teploty termovizní kamery T_{TK} , termočlánek T_{TC} , radiačního teploměru T_R a o odečítanou hodnotu teplotního exponentu n , tedy

$$\varepsilon = f(T_{TK}, T_{TC}, T_R, n). \quad (5.9)$$

Při nákupu termovizní kamery na pracoviště Odboru termomechaniky a techniky prostředí byly přístroje vybrány takovým způsobem, aby byla nejistota měření co možná nejnižší. Jednalo se o přiřazení vhodného radiačního teploměru k termovizní kameře Jenoptik typ VarioCAM. K termovizní kameře byl vybrán radiační teploměr Testo 830-T1.

Vztah 5.3 lze s použitím této vzájemné kalibrace přístrojů pro přibližně shodné teploty ve jmenovateli a v čitateli upravit

$$\varepsilon \approx \frac{T_S^{n-1}}{T_S^{n-1}} \cdot \frac{T_{TK} - T_R}{T_{TC} - T_R}, \quad (5.10)$$

kde T_S^{n-1} [K] je střední teplota mezi přístrojem a radiačním teploměrem, která je pro hodnotu emisivity blízká se k 1 přibližně shodná, $T_{TK} - T_R$ je rozdíl teploty termovizní kamery a radiačního teploměru a $T_{TC} - T_R$ je rozdíl teploty termočlánek a radiačního teploměru.

Odhad směrodatné nejistoty měření emisivity dle vztahu 5.6 je dán vztahem

$$\bar{\sigma}_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial T_{TK}} \cdot \bar{\sigma}_{T_{TK}-T_R}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T_{TC}} \cdot \bar{\sigma}_{T_{TC}-T_R}\right)^2}, \quad (5.11)$$

kde $\bar{\sigma}_{T_{TK}-T_R}$ je směrodatná nejistota teploty termovizní kamery a radiačního teploměru a $\bar{\sigma}_{T_{TC}-T_R}$ je směrodatná nejistota teploty termočlánku a radiačního teploměru. V tabulce 5.2 jsou znázorněny nejistoty měření použitých kalibrovaných zařízení a stanoveny výpočty dílčích nejistot měření.

Tab. 5.2 Technická data zařízení pro měření emisivity materiálu a stanovení jejich celkových směrodatných nejistot měření $\bar{\sigma}$ [40, 79, 97]

Zařízení	Nejistota měření	$\bar{\sigma}$
Střední hodnota vzájemné kalibrace termovizní kamery Jenoptik VarioCAM s radiačním teploměrem Testo 830-T1	$\pm 0,70$ K	0,41 K
Střední hodnota vzájemné kalibrace termočlánku Omega typ K s radiačním teploměrem Testo 830-T1	$\pm 0,44$ K	0,26 K

Po parciálních derivacích z rovnice 5.11 dle veličin ze vztahu 5.10 dostáváme rovnici pro stanovení celkové směrodatné nejistoty měření emisivity pro vztah 5.3

$$\bar{\sigma}_\varepsilon = \sqrt{\left(-\frac{T_{TK}-T_R}{(T_{TC}-T_R)^2} \bar{\sigma}_{T_{TK}-T_R}\right)^2 + \left(\frac{1}{T_{TC}-T_R} \bar{\sigma}_{T_{TC}-T_R}\right)^2} \quad (5.12)$$

Do rovnice 5.12 byly dosazeny hodnoty naměřené pro kancelářský papír a pro bavlněnou tkaninu v rozmezí teplot odečtu 40 °C až 80 °C. Výsledné nejistoty měření pro obyčejný kancelářský papír a pro bavlněný textil jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tab. 5.3 Vypočtené nejistoty měření pro nejvhodnější pomocné materiály pro měření teplotních polí ve vzduchu termovizní kamerou - běžný kancelářský papír a bavlněný textil

Obyčejný kancelářský papír nebělený 80g/m ²					
T_R	$T_{TČ}$	T_{TK}	ε_i	$\bar{\sigma}_{\varepsilon_i}$	$\bar{\sigma}_\varepsilon$
[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]
15,4	80,51	78,78	0,96	0,008	0,026
15,5	70,12	68,82	0,97	0,023	
15,9	60,01	58,92	0,97	0,027	
15,9	50,65	48,98	0,94	0,031	
15,6	40,72	39,32	0,94	0,040	
Bavlněný textil 145 g/m ²					
T_R	$T_{TČ}$	T_{TK}	ε_i	$\bar{\sigma}_{\varepsilon_i}$	$\bar{\sigma}_\varepsilon$
[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]

15,8	79,78	76,57	0,93	0,009	0,026
15,9	69,43	66,43	0,93	0,023	
15,9	59,90	57,30	0,93	0,026	
15,8	50,14	48,07	0,93	0,031	
15,8	40,10	38,42	0,92	0,041	

Výsledné hodnoty při měření emisivity vybraných pomocných materiálů dle rovnice 5.3 pomocí vztahu 5.12 a použitých měřicích zařízení z tab. 5.2 činí

Bavlněný textil 145 g/m² $\epsilon = 0,93 \pm 0,03$
 Běžný kancelářský papír nebělený 80 g/m² $\epsilon = 0,96 \pm 0,03$

Byly měřeny i další materiály (plastové fólie, matné kovové pásy, dýha) avšak záhy se ukázala jejich nevhodnost pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu v běžných aplikacích v technice prostředí, jako např. vysoká míra reflektance, částečná transmitance, apod.

5.2 Měření časové konstanty

Pro měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize je časová konstanta této metody stanovena experimentálně, a to sledováním teploty na povrchu pomocného materiálu při skokové změně teploty vzduchu v okolí tohoto materiálu. Pro stanovení časové konstanty metody byl vybrán obyčejný kancelářský nebělený papír a bavlněný textil z tab. 5.1.

Arch zkoumaného materiálu (bavlněný textil a papír s nejvyšší hodnotou emisivity) byl připevněn do posuvného stojanu nad zdroj tepla a byla snímána termovizní sekvence při různém nastavení teploty a otáček ventilátoru při skokové změně polohy zkoumaného archu.

Jako zdroje tepla byly vybrány různé typy teplovzdušných ventilátorů, obr. 5.6. Jako doplnění k těmto zdrojům neizotermního proudění vzduchu byly vybrány i další zdroje tepla, pro zahrnutí různých poměrů teploty neizotermního proudu vzduchu k rychlosti proudění vzduchu. Těmito doplňkovými zdroji tepla bylo topné těleso bez ventilátoru (přirozená konvekce) a různé typy přístrojů s vyšší výstupní rychlostí, ale s možností nastavení nižší teplotní difference.



Teplovzdušný ventilátor TH 500 [96]

Teplovzdušný konvektor SCF 2003 [95]

Obr. 5.6 Fotografie různých druhů teplovzdušných ventilátorů

Termovizní sekvence byly snímány termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM. Měření časové konstanty probíhalo v laboratoři s homogenní radiální teplotou na nepřenosičném měřicím zařízení. Fotografie z měření je uvedena na obr. 5.7.



Obr. 5.7 Fotografie zařízení pro měření časové konstanty

Na stanovení časové konstanty byla použita aproximace měřicího systému proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu (obr. 4.2) s tím rozdílem, že naměřené povrchové teploty byly proloženy polynomem šestého stupně, který vykazuje dobrou shodu v časovém intervalu, který je rozhodující pro stanovení časové konstanty dle rovnice 5.13.

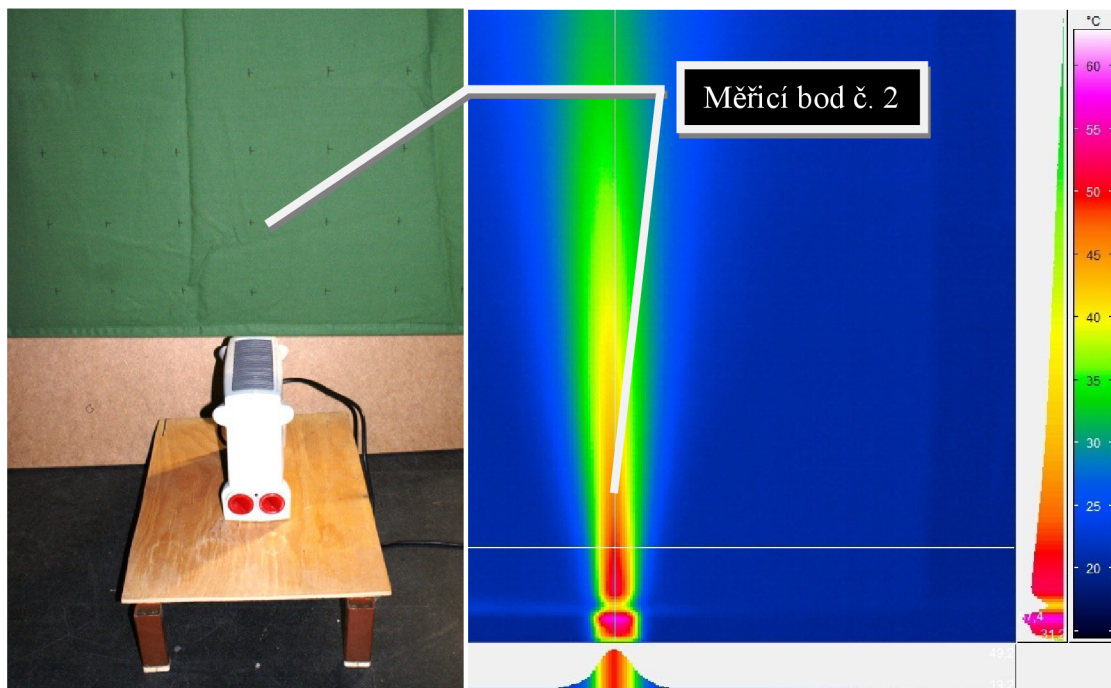
Časovou konstantu τ_0 [s] je možné určit ze vztahu [3]

$$\tau_0 = f(0,632\Delta T) \quad \text{a} \quad (5.13)$$

$$\Delta T = T_\infty - T_S, \quad (5.14)$$

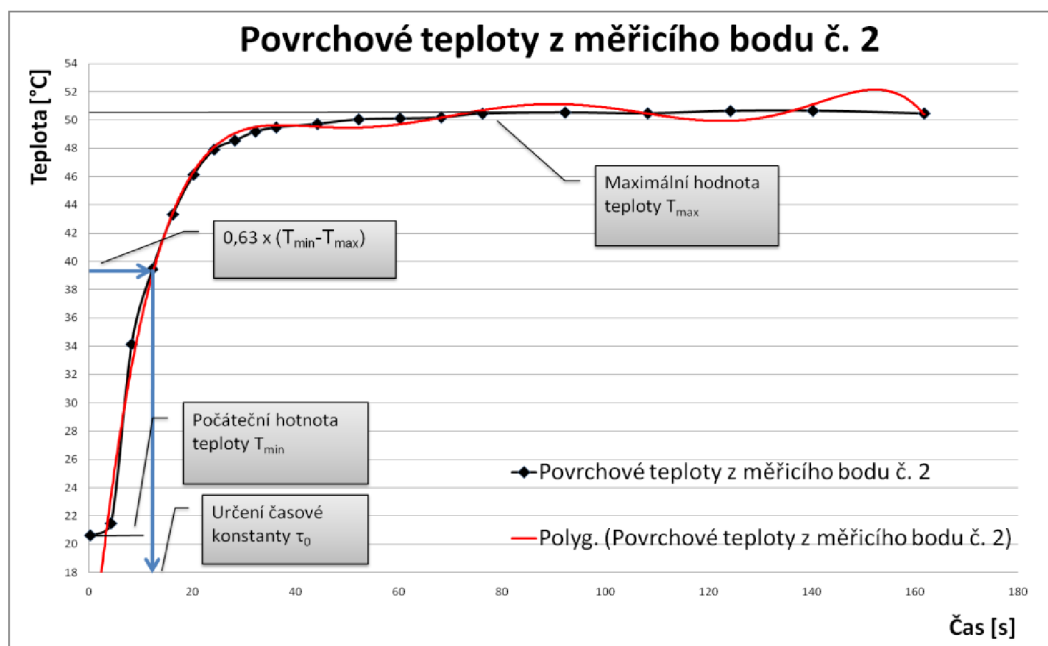
kde ΔT [K] je rozdíl teplot mezi ustálenou hodnotou teploty povrchu pomocného materiálu T_∞ [K] a teplotou okolí T_S [K]. Příklad určení časové konstanty bavlněného textilu pro měřicí bod č. 2 (obr. 5.8) je uveden na obr. 5.9.

Dále bylo nutné proměřovat rychlostní pole pomocí odporového (žárového) anemometru Testo 491, Testo 452 a jiných, aby bylo možné porovnat časovou konstantu pro různé rychlosti proudění. Jednotlivé rychlosti v měřicích bodech byly měřeny po dobu minimálně 60 sekund a poté byla vzata jejich střední hodnota. Měřicí uzly byly určeny ve čtvercích o rozměrech 10 x 10 cm. Byl zde předpoklad, že obě strany od osy teplotovzdušného ventilátoru budou symetrické, ale tento předpoklad se zcela nepotvrdil z důvodu malé ustavovací vzdálenosti při výstupu neizotermního proudu vzduchu z teplotovzdušného ventilátoru – proud se jevil jako nesymetrický (obr. 5.8). Ve vyhodnocení bylo uvažováno i s touto nesymetrií proudu. Byly proměřeny oba archy pomocných materiálů a stanoveny rychlosti proudění.

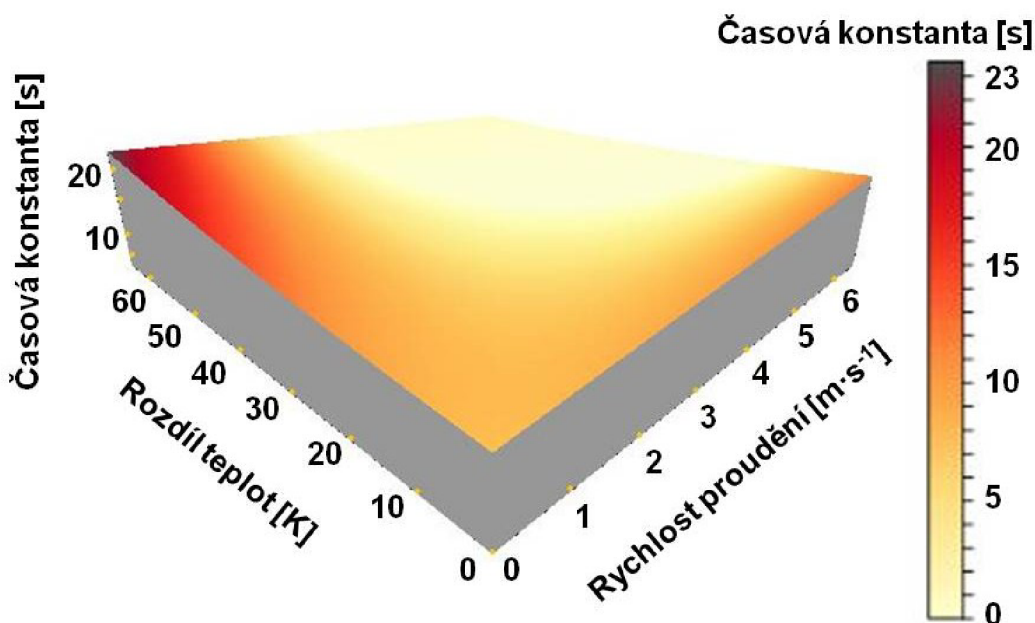


Obr. 5.8 Fotografie a termogram měřicího bodu č. 2

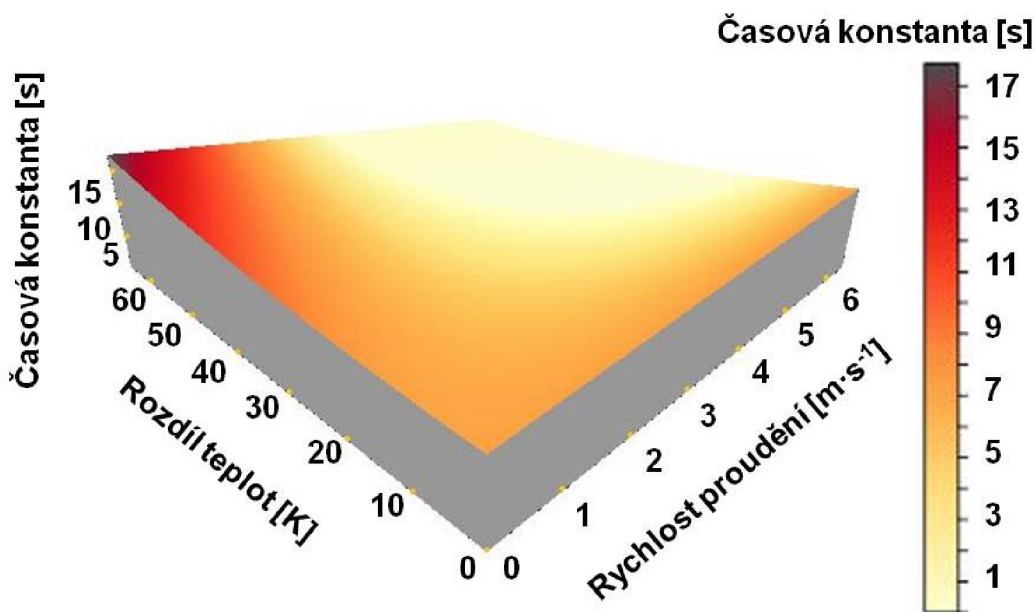
Termovizní sekvence byly vyhodnoceny v programu IRBIS Professional 2.2. Snímkování skokových změn bylo prováděno s frekvencí 25 a 50 obr./s po dobu 6 až 12 minut (až do doby ustálení povrchové teploty, obr. 5.9). Časové konstanty v jednotlivých měřicích bodech při zkoumaných podmínkách měření jednotlivých pomocných materiálů byly následně určeny podle rovnic 5.13 a 5.14. Na obrázku 5.10 je uvedena závislost časové konstanty zkoumané metody na rychlosti proudění vzduchu a rozdílu teplot pro bavlněnou tkaninu a na obrázku 5.11 pro kancelářský papír.



Obr. 5.9 Stanovení časové konstanty pro měřicí bod č. 2 pro bavlněný textil 145 g/m² a rychlost proudění vzduchu $w = 1,63$ m/s



Obr. 5.10 Závislost časové konstanty na rozdílu teplot a rychlosti proudění vzduchu pro bavlněný textil



Obr. 5.11 Závislost časové konstanty na rozdílu teplot a rychlosti proudění vzduchu pro kancelářský papír

Nejistota měření časové konstanty $\Delta\tau_0$ [s] byla stanovena dle literatury [58]. Byla určena v závislosti na nejistotě měření teploty pomocí termovizní kamery Jenoptik typ VarioCam spolu s nejistotou měření teploty radiálním teploměrem Testo 830-T1. Z nejistoty měření teploty ΔT [K] byly stanoveny dílčí nejistoty měření časové konstanty $\Delta\tau_{0i}$ [s] pro všechny měřené body (jak pro kancelářský papír, tak pro bavlněnou tkaninu) a tyto hodnoty byly následně zprůměrovány a stanovena výsledná nejistota časové konstanty pro oba pomocné materiály. Nejistota měření časové konstanty je $\pm 0,3$ s pro kancelářský papír a pro bavlněný textil je $\pm 0,4$ s.

5.3 Měření transmittance

Při měření transmittance bylo cílem nalezení takového průzoru, který by měl dobré mechanické vlastnosti pro termovizní měření vzduchu v malých uzavřených prostorech při nejvyšší možné hodnotě transmittance t_p [-].

Byly porovnávány různé druhy čirých hladkých fólií, které by byly vhodné pro takovýto druh měření. Fólie by měly být pevné a velice tenké, aby neabsorbovaly energii a neovlivňovaly termovizní měření. Při použití tenké folie byl tedy použit předpoklad, že je možné zanedbat hodnotu emisivity průzoru ε_p [-] (absorpce) [103] dle vztahu

$$t_p = 1 - r_p - \varepsilon_p , \quad (5.15)$$

kde r_p [-] je reflektance průzoru, tedy při zanedbání hodnoty emisivity průzoru ε_p [-]

$$\varepsilon_p = 0 \quad (5.16)$$

platí vztah

$$t_p = 1 - r_p . \quad (5.17)$$

Tyto předpoklady splňovaly různé druhy zahradních a krycích fólií a fólií používaných v papírenském a potravinářském průmyslu. Nejvýznamnější zástupci zkoumaných typů fólií jsou uvedeny v tabulce 5.4.

Tab. 5.4 Zkoumané typy průteplivých materiálů

<p>Fólie LDPErec A</p>	<p>Fólie vyráběná z recyklovaného polyetylénu (zbytky z výrobních linek). Nesmí se používat pro styk s potravinami (nemá potravinářské atesty). Kvůli drobným příměsím nečistot (prachové částičky) je fólie hrubší na omak a méně průhledná. Použití pro obalovou techniku [24, 64, 98].</p> <ul style="list-style-type: none"> - Typ A – kvalitou nejlepší typ recyklované fólie - LDP (Low Density Polymer) – hustota 935 kg·m⁻³ - Teplem nesmrštitelná - Tloušťka 0,09 mm - Čirá - Teplotní odolnost do 135 °C
<p>Stavební fólie zakrývací</p>	<p>Stavební fólie vyráběná z recyklované LDPE fólie. Vzhledem k účelu použití nejsou kladeny nároky na zdravotní nezávadnost a vzhled fólie, tudíž se k výrobě používá recyklát typu B nebo C [24, 64].</p> <ul style="list-style-type: none"> - LDP (Low Density Polymer) – hustota 915 kg·m⁻³ - Teplem nesmrštitelná - Tloušťka 0,05 mm - Čirá - Teplotní odolnost do 110 °C

Polypropylénová fólie	Používaná v papírenství. Polypropylénové fólie mají obecně lepší fyzikální i chemické vlastnosti než polyetylén. Zdravotně nezávadný [74, 75]. <ul style="list-style-type: none"> - hustota $905 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. - Tloušťka 0,20 mm - Čirá - Teplotní odolnost do $170 \text{ }^\circ\text{C}$
------------------------------	---

Zkoumaná fólie byla připevněna do dřevěného rámu ze tří stěn. Jedna stěna zůstala volná, aby bylo možné přesněji stanovit teplotní rozdíl při pohledu skrz materiál a bez něj v těsné blízkosti okraje. Materiál průzoru byl v rámu vypnutý takovým způsobem, aby nenastaly záhyby a přehyby, ale materiál se nedeformoval při napnutí přílišnou silou. Materiál průzoru byl vypnutý pomocí pevné hliníkové pásky.

Měření probíhalo v prostoru laboratoře v místě, které bylo obklopeno černým matným závěsem pro eliminaci reflexe okolních ploch. Transmittance měřených fólií byla měřena před zdrojem tepla. V provedeném experimentu byla zdrojem tepla (zářivým materiálem) nahřátá silnostěnná ocelová deska, obr. 5.12. Povrch desky byl opatřen speciálním nástřikem Mikron High Temp Test Paint, který má deklarovanou hodnotu emisivity 99,9 %, takže lze tvrdit

$$\varepsilon_m = 1. \quad (5.18)$$

Další možností pro stanovení přesné hodnoty hustoty zářivého toku by bylo použití kalibrovaného termočlánku upevněného přímo na ocelovou desku.



Obr. 5.12 Fotografie zařízení pro měření transmittance fólie

Výpočet hodnoty transmittance průteplivého materiálu t_p [-] vychází z hustoty zářivého toku materiálu při snímání bez průzoru a s průzorem v dokonale průteplivém prostředí. Hustota tepelného toku zářením materiálu opatřeného nástřikem Mikron High Temp Test Paint E_{CE} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] při snímání s průzorem je dána vztahem

$$E_{CE} = 1 \cdot k \cdot T_{m\varepsilon}^n, \quad (5.19)$$

kde k [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] je konstanta odpovídající rozsahu vlnových délek pro termovizní kameru Jenoptik typ VarioCAM, $T_{m\varepsilon}$ [K] je teplota povrchu měřeného materiálu

opatřeného speciálním nástřikem a n [-] je teplotní exponent ve zvoleném rozsahu teplot a vlnových délek.

Výsledná hustota zářivého toku při snímání povrchu materiálu opatřeného nástřikem skrze průzor E_c^* [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], která je detekována termovizní kamerou, je dána vztahem

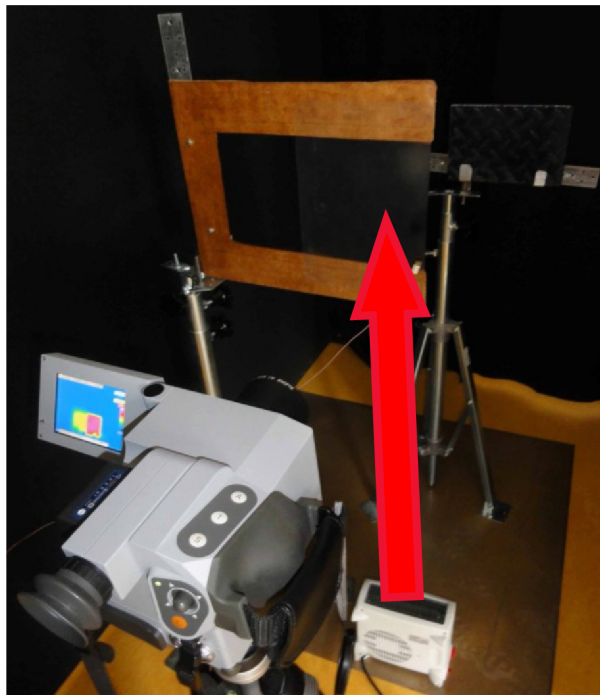
$$E_c^* = 1 \cdot k \cdot T_{m\epsilon p}^n \cdot t_p + r_p \cdot k \cdot T_R^n. \quad (5.20)$$

kde T_R [K] je střední radiační teplota okolí, $T_{m\epsilon p}$ [K] je teplota materiálu opatřeného nástřikem snímána skrze průzor a n [-] je teplotní exponent stanovený dle obr. 4.6. Transmittance průzoru je poté vyjádřena z rovnic (4.28) a (5.20)

$$t_p = \frac{T_{m\epsilon p}^n - T_R^n}{T_{m\epsilon}^n - T_R^n} \quad (5.21)$$

Při snímání materiálu s hodnotou emisivity povrchu téměř 1 není hustota zářivého toku tohoto materiálu ovlivněna střední radiační teplotou ve snímaném prostoru (rov. 4.28) a je tedy možné nastavit na termovizní kamerě hodnotu emisivity rovno jedné. Střední radiační teplota má vliv jen na transmittanci měřeného průzoru za předpokladu měření tak nehmotného tělesa, že je možné zanedbat hodnotu emisivity průzoru (rov. 5.16).

Byly provedeny dvě varianty měření. Obě varianty měly shodné geometrické uspořádání. Zdroj tepla byl upevněn na výsuvný stojan a paralelně před stojan byl umístěn rám s fólií, který částečně překrýval zdroj tepla ve směru pohledu termovizní kamery. Termovizní kamera byla ustavena kolmo k fólii, tedy i kolmo ke zdroji tepla. Rám s fólií byl ustaven ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje tepla a zároveň také 0,5 m od termovizní kamery.

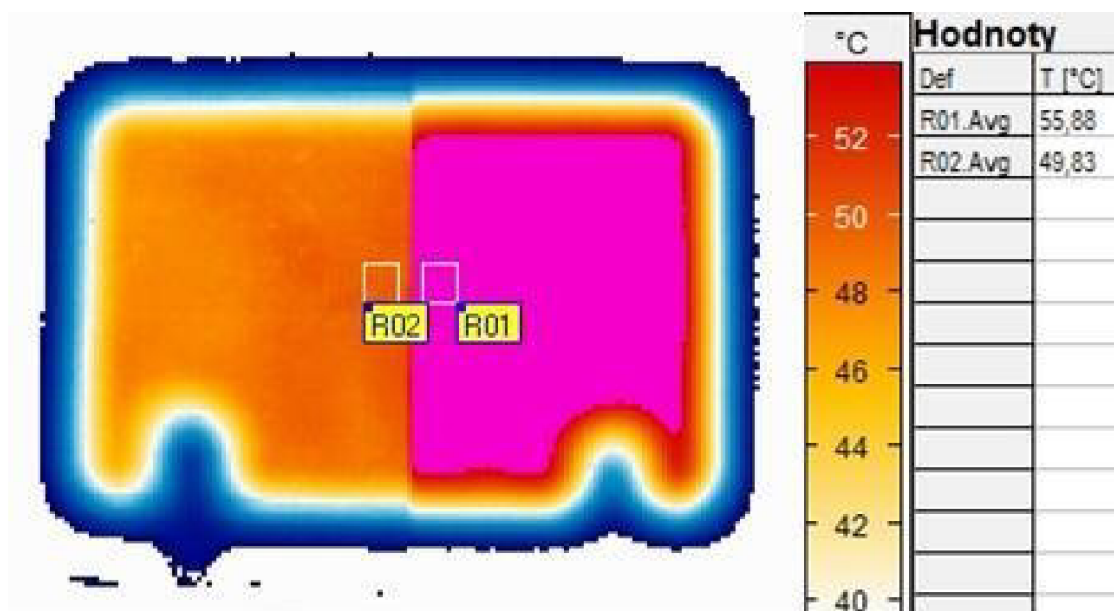


Obr. 5.13 Fotografie zařízení pro měření transmittance fólie s ovlivněním teplým proudem vzduchu (druhá varianta měření)

V první variantě měření docházelo k proměřování hodnot transmitance fólie v tomto geometrickém uspořádání, viz obr. 5.12.

Druhá varianta zkoumala měření transmitance přes fólii, kterou ovlivňoval proud teplého vzduchu z teplovzdušného ventilátoru, který byl umístěný kolmo pod rámem se zkoumanou fólií, obr. 5.13. Tato varianta měla potvrdit nezávislost teploty průteplivé fólie T_p [K] na měření skrz tuto fólii a podpořit tak předpoklad zanedbání hodnoty emisivity fólie [103], rovnice 5.16.

Střední radiální teplota prostředí obklopených matným černým závěsem byla stanovena termovizní kamerou v programu Irbis Online jako aritmetický průměr dvou poloprostorů. Pro každé měření bylo provedeno odečtení radiální teploty okolního prostředí radiálním teploměrem, nebo pomocí termovizní kamery a byla stanovena její střední hodnota. Transmitance zkoumaných radiálně propustných materiálů byla zkoumána při shodných podmínkách, jaké byly při měření emisivity pomocných materiálů. Tedy transmitance fólie byla stanovena vůči zdroji tepla, který chladl v chladnějším prostředí z teploty 80 °C na teplotu 40 °C. Měření bylo taktéž prováděno termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM při shodné spektrální citlivosti, jako při měření emisivity pomocných materiálů.



Obr. 5.14 Vyhodnocování měření transmitance pro stavební zakrývací fólii v první variantě měření při teplotě ocelové desky 55,88 °C

Teploty povrchu desky opatřené speciálním nástřikem bez ovlivnění průzorem a s ovlivněním byly stanoveny jako průměrné teploty z plochy přibližně 2 cm², které byly těsně na okraji průteplivé fólie, obr. 5.14. Při vyhodnocení z větší plochy by se mohla projevit nehomogenita teplotní pole ocelové desky. Při vyhodnocování z menší plochy by měření nebylo reprezentativní. Deska se nahřála odporovým zdrojem na teplotu přibližně 85 °C a poté byla umístěna do stojanu před termovizní kameru tak, aby byla ustavena kolmo ke směru pozorování termovizní kamerou. Při druhé variantě měření byl na fólii umístěn kalibrovaný termočlánek, který měřil její aktuální teplotu. Výsledná transmitance fólie byla stanovena jako aritmetický průměr naměřených hodnot. Výsledky měření transmitance jsou uvedeny v tabulce 5.5. Vyhodnocování termogramů se provádělo v programu IRBIS Professional 2.2.

Ze zkoumaných materiálů má nejvhodnější vlastnosti pro zkoumání rozložení teplot v malém uzavřeném prostoru stavební zakrývací fólie s tloušťkou 0,05 mm. Její průměrná transmittance byla vypočtena 0,80 a mechanická odolnost je i přes její minimální tloušťku plně postačující. Ostatní druhy měřených fólií mají také dobré mechanické vlastnosti, ale jsou vhodné méně, protože mají nižší hodnotu transmittance.

Měření transmittance ve variantě dvě (se zkoumáním možnosti ovlivnění teploty průzoru teplým vzduchem z teplovzdušného ventilátoru) bylo v případě polyethylenových fólií téměř totožné, jako bez zahřívání fólie (v první variantě). V případě polypropylenové fólie je ale patrný pokles hodnoty transmittance na úkor absorpce (emisivity), kterou při této tloušťce (při větším objemu materiálu) již nemůžeme zanedbat.

Tab. 5.5 Výsledky měření transmittance průteplivých materiálů pro první opakování (výsledná transmittance fólie t_p [-] je provedena ze všech třech opakování)

Druh fólie	Varianta měření 1					Varianta měření 2				
	T_R	T_m	T_{mF}	t_i	t_F	T_R	T_m	T_{mF}	t_i	t_F
	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[-]
Fólie LDPErec A	21,00	83,54	71,98	0,77	0,77	21,00	81,66	71,54	0,79	0,79
	21,00	76,22	66,34	0,78		21,00	76,20	66,52	0,79	
	21,50	70,61	60,93	0,76		21,50	70,87	61,48	0,77	
	21,50	66,70	57,84	0,77		21,00	65,43	57,92	0,80	
	22,00	61,01	53,02	0,76		21,00	60,03	53,45	0,80	
	22,50	54,23	47,43	0,76		21,50	56,42	49,82	0,78	
	21,50	50,30	44,72	0,78		21,50	50,48	44,72	0,78	
	21,00	45,11	39,99	0,77		21,50	45,29	40,76	0,79	
	21,50	40,48	36,12	0,75		22,00	40,16	36,74	0,80	
Stavební fólie zakrývací	22,00	80,61	70,70	0,79	0,80	22,00	81,36	72,75	0,82	0,81
	21,50	75,81	67,14	0,80		22,00	75,87	67,47	0,81	
	21,50	69,39	61,85	0,81		22,50	70,12	62,85	0,82	
	22,00	65,84	58,29	0,80		22,00	65,00	57,96	0,81	
	21,50	61,45	54,61	0,80		21,50	59,87	52,87	0,79	
	21,50	55,99	50,03	0,80		22,50	55,34	49,59	0,80	
	22,00	52,45	47,16	0,80		22,00	49,38	44,41	0,80	
	21,50	46,22	41,52	0,79		22,00	44,30	40,58	0,82	
	22,00	40,15	36,76	0,80		22,00	40,06	36,97	0,81	
Polypropylenová fólie	22,00	80,39	60,15	0,59	0,55	22,50	81,74	65,81	0,68	0,69
	22,50	74,76	55,12	0,57		22,50	75,09	59,36	0,65	
	23,00	70,13	51,84	0,56		22,50	71,31	57,29	0,66	
	22,50	64,48	46,85	0,53		23,00	67,90	55,28	0,67	
	22,00	61,86	45,32	0,53		22,50	59,83	51,02	0,73	
	22,00	55,44	42,24	0,56		23,00	54,80	46,96	0,72	
	22,50	49,87	39,56	0,59		22,50	50,99	44,37	0,74	
	22,50	44,87	35,03	0,53		22,50	45,31	39,21	0,71	
	23,00	40,23	32,60	0,53		23,00	40,09	35,01	0,68	

Byla stanovena nejistota měření transmitance folie. Výpočet vycházel z rovnice 5.21 a výsledná nejistota měření byla stanovena dle vztahu 5.6. Výpočet byl proveden pro stavební zakrývací polyetylenovou fólii o tloušťce 0,05 mm s naměřenou hodnotou transmitance 0,80. Výpočet nejistoty transmitance byl proveden obdobným způsobem jako při stanovení nejistoty měření emisivity povrchu pomocného materiálu. Výsledná hodnota transmitance činí

Stavební zakrývací fólie 0,05 mm

$t = 0,80 \pm 0,03$

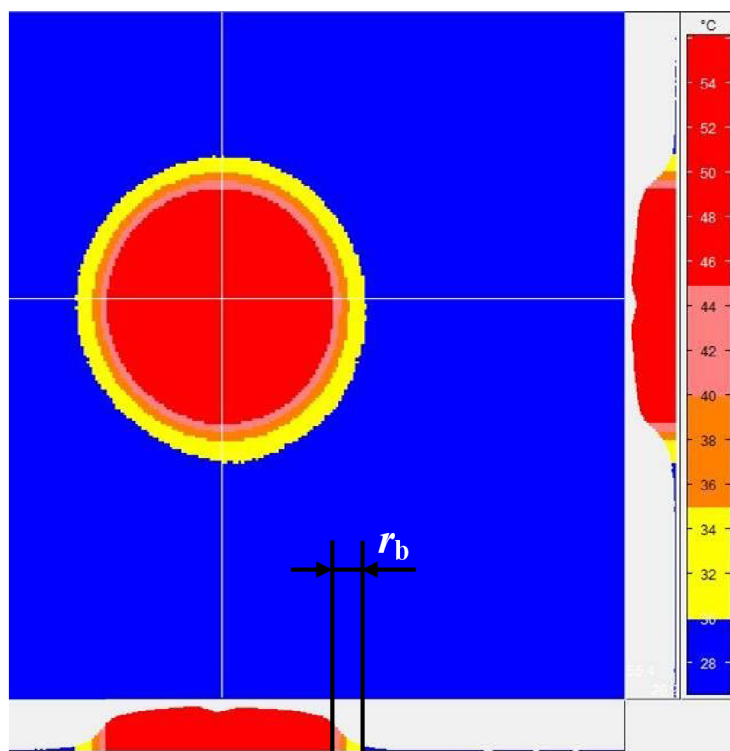
Naměřené hodnoty transmitance průzorů v uvedeném rozsahu vlnových délek korespondují s hodnotami transmitancí obdobných typů fólií uvedených v odborných literaturách [21, 66, 73, 102]. Z výsledků měření vyplývá, že polyetylenové fólie jsou minimálně citlivé při měření ve druhé variantě měření, tj. při měření s tepelným ovlivněním fólie. Polypropylenová fólie byla nezanedbatelně ovlivněna tepelným tokem z teplovzdušného ventilátoru z důvodu absorpce záření do materiálu. Polypropylenová fólie vyzářovala tepelný tok, a proto v tomto případě nelze použít vztah 5.16. Z proměřovaných materiálů je pro měření teplotních polí v malých uzavřených prostorech nejvhodnější stavební fólie zakrývací s tloušťkou 0,05 mm, s hodnotou transmitance 0,80 ve spektru vlnových délek při měření termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM. Tato fólie má dobré mechanické vlastnosti a transmitanci přibližně konstantní v rozmezí teplot 80 až 40 °C v obou zkoumaných variantách měření.

5.4 Měření rozptylu teplotního pole

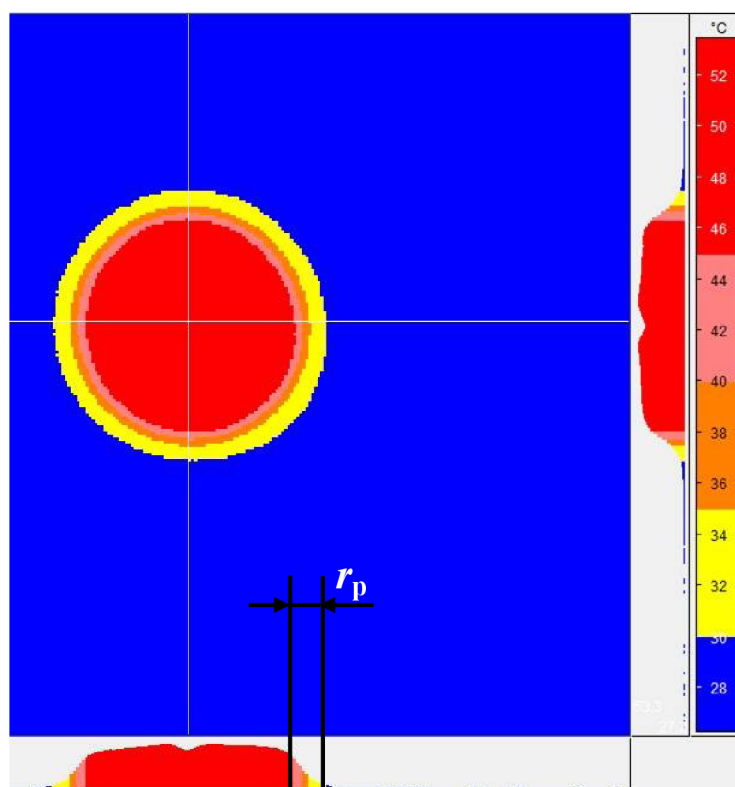
Kromě časové konstanty a závislosti na rychlosti proudění vzduchu a měřené teplotní diferencii a kromě parametrů termovize a statických vlastností bylo zkoumáno i posouzení vlivu vedení tepla v pomocném materiálu, které způsobuje rozšiřování oblasti teplotního pole v pomocném materiálu. Posouzení vlivu vedení tepla bylo provedeno experimentem a také simulací v matematickém programu STAR CCM+ pro dva nejvhodnější druhy pomocného materiálu s nejvyšší hodnotou emisivity. Bylo posuzováno vedení tepla v archu běžného kancelářského papíru s hodnotou emisivity 0,96 a v archu bavlněné tkaniny s hodnotou emisivity 0,93.

Experimentální stanovení vlivu rozptylu teplotního pole bylo provedeno přitisknutím tepelného razítka definovaných rozměrů a následně byly zaznamenány časové průběhy rozpínání teplotního pole v archu materiálu. Objekt, sloužící jako tepelné razítko, byl vybrán válec z nerezavějící oceli (stainless steel 304) o průměru $d = 50$ mm a výšce $h = 80$ mm.

Experiment byl prováděn termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM. Váleček byl upevněn do držáku a byl konduktivně zahřát na teplotu přibližně 50 °C. Poté se arch pomocného materiálu krátce přitiskl na podstavu válečku a byla zaznamenána termovizní sekvence v délce 60 s. Vyhodnocení probíhalo v programu IRBIS professional. Po kontaktu razítka s archem pomocného materiálu došlo okamžitě



Obr. 5.15 Vyhodnocení termogramu rozšíření teplotního pole v bavlněném archu pomocného materiálu v ustálené podobě po 10 vteřinách



Obr. 5.16 Vyhodnocení termogramu rozšíření teplotního pole v papírovém archu pomocného materiálu v ustálené podobě po 10 vteřinách

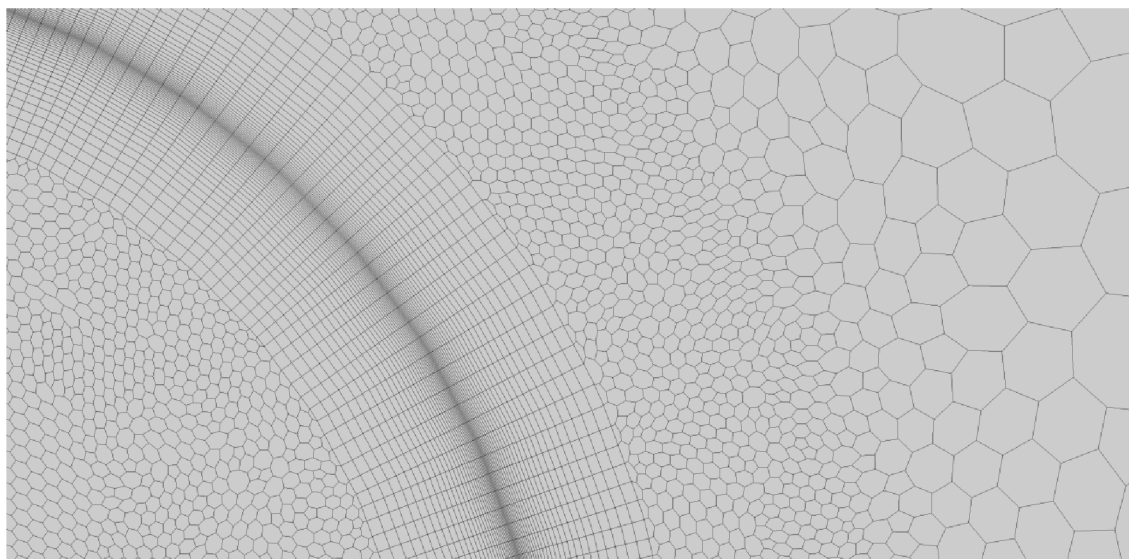
k rozšíření teplotního pole za hranice obrysu razítka o hodnotu r_b na bavlněném archu či r_p na papíru. Teplotní pole se ustálilo po cca 10 vteřinách při otisknutí

jak na bavlněný arch, tak na papírový arch. Pomocí příkazu Referenční linie v programu IRBIS professional byla stanovena velikost rozšíření teplotního pole. V případě bavlněného archu se jedná o rozptyl $r_b = 3,5$ mm a v případě papírového archu o $r_p = 3,9$ mm. Vyhodnocení archů je znázorněno na obr. 5.15 a na obr. 5.16. Velikost rozptylu oblasti byla měřena od hrany razítka do vzdálenosti, kde teplota poklesla na 5 % celkového rozdílu teplot [87].

Tab. 5.6 Tabulka statických vlastností pomocných materiálů pro stanovení rozšíření teplotního pole

Vlastnosti pomocného materiálu	Značka, jednotky	Kancelářský papír	Bavlněná tkanina	Tepelné razítko
Měrná hmotnost	$m, [\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$	80	145	-
Emisivita	$\varepsilon, [-]$	0,93	0,96	-
Hustota	$\rho, [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	750	1550	8000
Měrná tepelná kapacita	$c, [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	1330	1160	500
Tepelná vodivost	$\lambda, [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	0,050	0,029	16,2

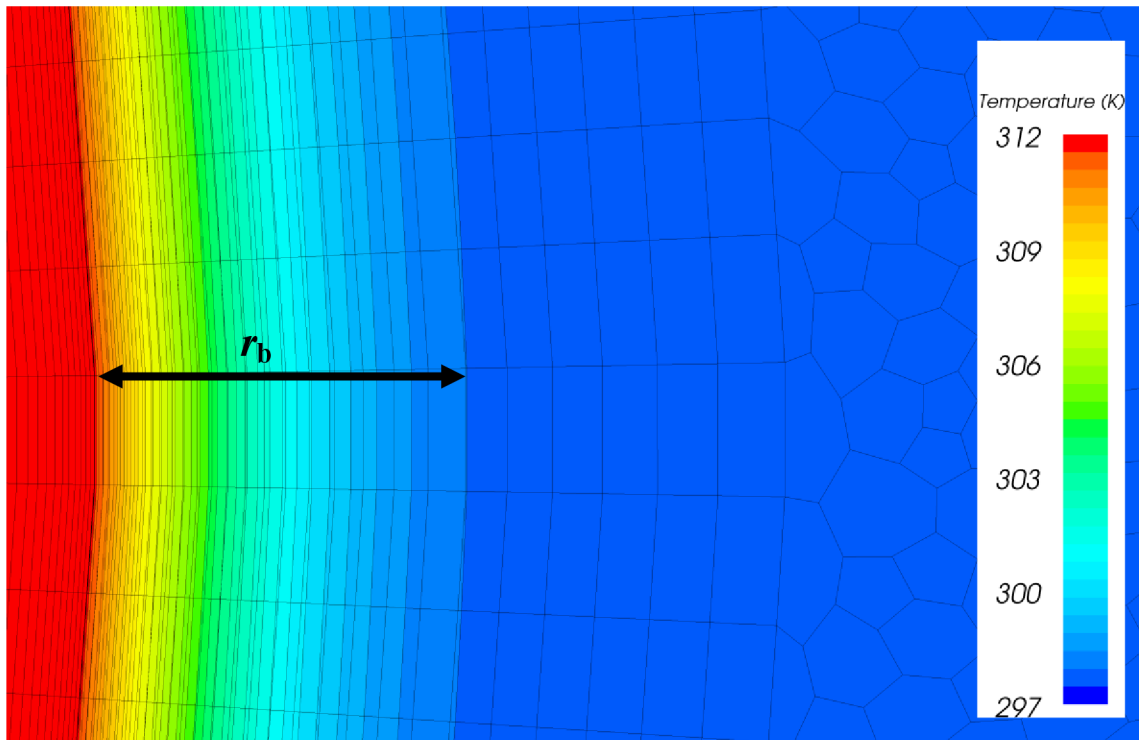
Zároveň s experimentem bylo provedeno vyhodnocení vedení tepla v pomocném materiálu pomocí simulačního programu, který je vhodný pro zkoumání problematiky přenosu tepla. Jedním z možných simulačních programů je STAR CCM+ umožňující kromě jiného i nestacionární vedení tepla. V simulačním programu se nejprve vytvoří model geometrie, na kterém jsou následně aplikovány matematické postupy a fyzikální zákony na základě zadaných okrajových a počátečních podmínek. Do programu byly zadány statické vlastnosti pomocných materiálů dle tab. 5.6, tedy shodné podmínky jako při provedení experimentu. Simulace byla provedena na zjednodušeném modelu, obr. 5.17.



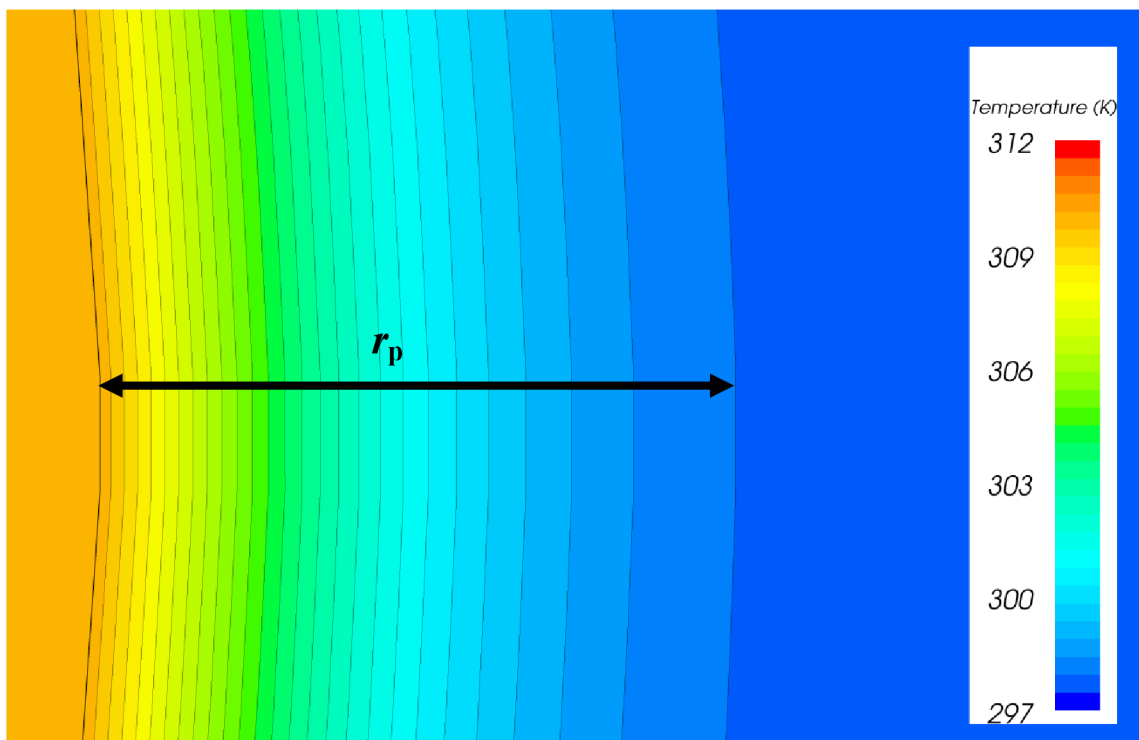
Obr. 5.17 Model zjednodušené geometrie pro stanovení rozšíření teplotního pole v archu pomocného materiálu

Byla vytvořena 2D polyhedrální výpočetní síť o hustotě 36 000 buněk. Místo otisku teplotního razítka a měřeného archu materiálu bylo z důvodů lepšího popisu přestupu tepla do archu pomocného materiálu opatřeno prizmatickou mezní vrstvou

o tloušťce 30 buněk (4 mm). Oblast, ve které byl předpoklad šíření teplotního pole na základě provedeného experimentu (10 mm od stěny válečku směrem do materiálu), byla zjemněna z důvodů dosažení přesnějšího popisu šíření tepelného toku do archu pomocného materiálu.



Obr. 5.18 Vyhodnocení matematické simulace rozšíření teplotního pole v bavlněném archu pomocného materiálu v ustáleném stavu po 10 s



Obr. 5.19 Vyhodnocení matematické simulace rozšíření teplotního pole v papírovém archu pomocného materiálu v ustáleném stavu po 10 s

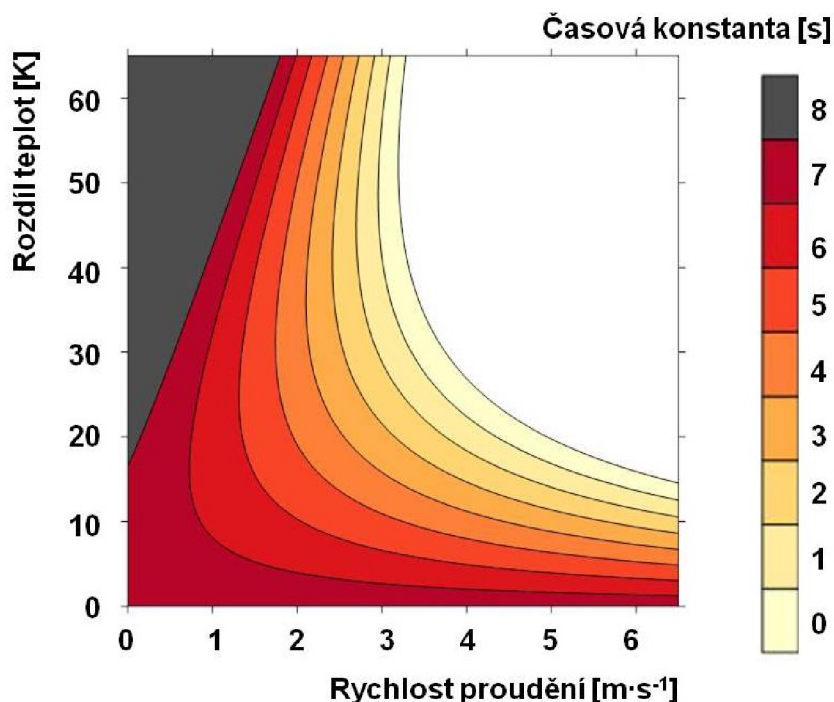
Na hranicích geometrie byla nastavena okrajová podmínka Symmetry plane, která představuje imaginární plochu zrcadlící řešení v buňkách, které jsou na tuto stěnu navazující. Okrajová podmínka Symmetry plane tedy neomezuje výpočet a nezpůsobí nechtěné tepelné ovlivnění kumulací energie na hranicích počítané geometrie. V místě styku tepelného razítka a archu zkoumaného materiálu byla zavedena okrajová podmínka In-place, která umožňuje kontakt mezi dvěma různými druhy materiálů (teplotní razítko a arch pomocného materiálu).

Simulace byla řešena jako nestacionární úloha trvající 30 vteřin, při které dochází k otisku dvou materiálů o rozdílné teplotě s konstantní hustotou. Vzhledem k nenáročnosti výpočtu byl zvolen řešič Segregated solid energy zahrnující sekundární gradienty. Během výpočtu byla sledována hladina konvergence residuí energie s ohledem na přesnost vyšší než 10^{-4} .

Výsledky matematické simulace ze simulačního programu STAR CCM+ jsou uvedeny na obr. 5.18 a 5.19 pro oba preferované pomocné materiály. Pro bavlněný arch byla vypočtena hodnota $r_b = 3,2$ mm a pro arch papíru $r_p = 3,8$ mm, což je v souladu s provedeným experimentem. Za pomoc s matematickou simulací, nastavením výpočtu a její vyhodnocení bych rád poděkoval Ing. J. Elcnerovi.

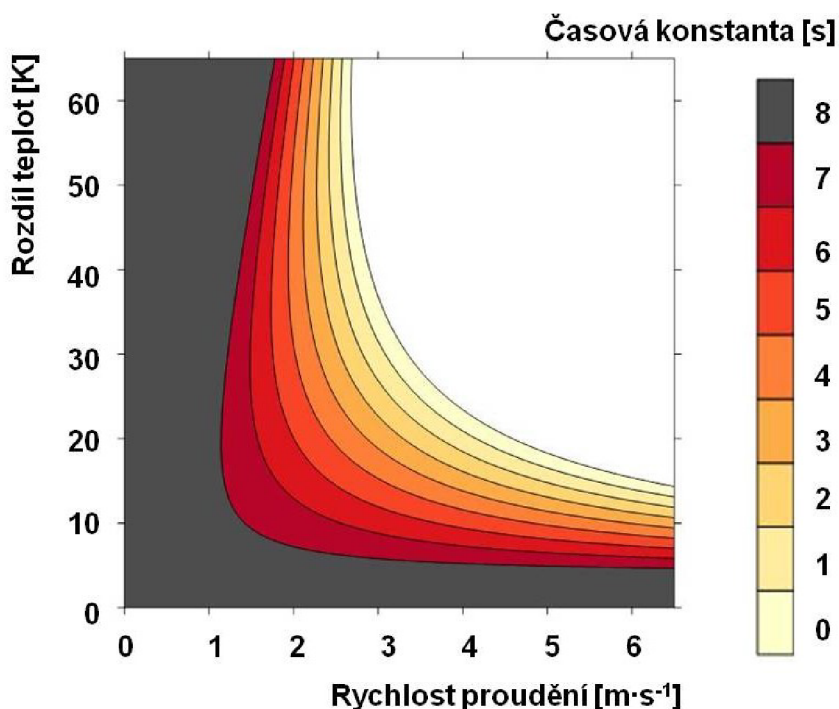
5.5 Stanovení oblasti použitelnosti metody

Měření teplotních polí ve vzduchu pomocí zkoumané metody je poměrně přesné, pokud je prováděno v oblasti použitelnosti této metody. Oblast použitelnosti metody vychází z omezení rozsahu diference teplot a rychlosti proudění neizotermního proudu vzduchu v závislosti na časové konstantě metody tak, aby přesnost měření byla co možná nejvyšší a časová konstanta přijatelná. Přesnost měření je určena pomocí nejistot měření. V oblastech, kde vznikají vysoké nejistoty měření, není vhodné měřit teplotní pole pomocí této metody.



Obr. 5.20 2D zobrazení oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize – kancelářský papír

Oblast použitelnosti metody byla stanovena ze závislosti časové konstanty na rozdílu teplot a rychlosti proudění jak pro bavlněný textil, tak pro obyčejný kancelářský papír (výběr materiálů s nejvyšší naměřenou hodnotou emisivity). V těchto závislostech (obr. 5.10 a 5.11) byla potlačena oblast s vysokou časovou konstantou, která značí, že měření teplotních polí pomocí zkoumané metody je v těchto oblastech grafu méně vhodné.



Obr. 5.21 2D zobrazení oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize – bavlněný textil

Oblast použitelnosti termovizní kamery pro měření teplotních polí ve vzduchu souvisí s nároky, jaké jsou požadovány v dané aplikaci či měření. Je-li požadováno např., aby časová konstanta metody byla menší než 8 s, lze oblast použitelnosti snadno určit z obr. 5.20 a obr. 5.21. Tyto hodnoty pro časovou konstantu metody 8 s jsou uvedeny i v tab. 5.7.

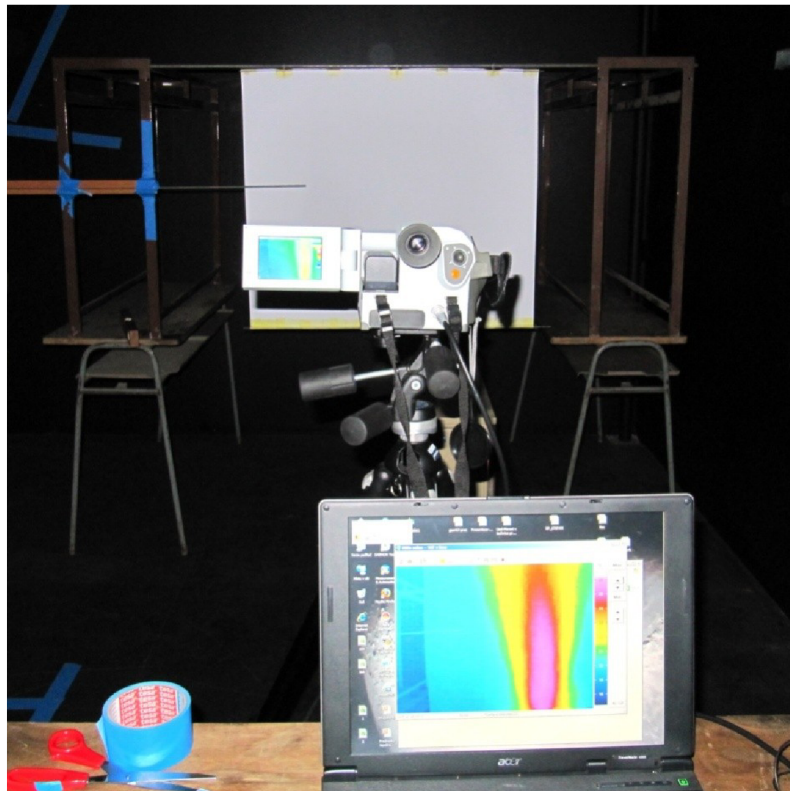
Tab. 5.7 Tabulka oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize pro časovou konstantu menší než 8 s

Pomocný materiál	Rychlost	Teplotní diference
Kancelářský papír	dle citlivosti termovize	dle citlivosti termovize
Bavlněná tkanina	od $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	od 6 K

Při posuzování použitelnosti metody je třeba mít na zřeteli i vliv vedení tepla v pomocném materiálu, viz kap. 5.4. Tento jev způsobuje jisté „rozostření“, které však není možné v neizotermních proudech obvykle identifikovat. Jev je třeba uvážit zejména v oblastech s velkými teplotními gradienty např. v tepelných mezních vrstvách.

6 Zařízení pro metodu měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery

Požadavkem na měřicí zařízení pro měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery je zejména jeho schopnost kvalitní vizualizace teplotních polí s cílem přesného měření, ale také jeho mobilita a variabilita při různých aplikacích v oblasti větrání a klimatizace [45]. V rámci výzkumu měření teplotních polí byla navržena a vyrobena měřicí zařízení, na kterých je možné zviditelňovat neizotermní proudy vzduchu pomocí termovizní kamery, obr. 6.1. Byla vyrobena zařízení pro měření teplotních polí ve 2D a ve 3D proudech vzduchu. Pro měření v místnostech byly navrženy, vyrobeny a odzkoušeny sestavy, které jsou prezentovány jako funkční vzorky. Pro měření v malých uzavřených prostorech byla následně vyrobena jiná vhodnější sestava pro měření skrze průzor, která je rovněž prezentována jako funkční vzorek.

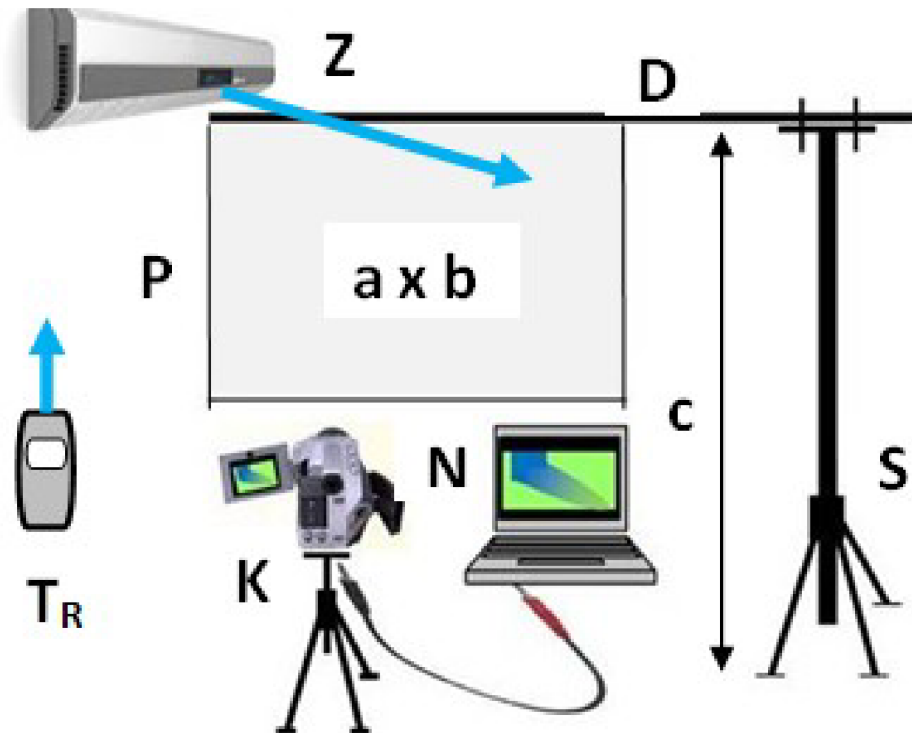


Obr. 6.1 Laboratorní sestava pro určování časové konstanty metody

6.1 Zařízení pro měření 2D vzduchového proudu

Zařízení pro měření 2D vzduchových proudů bylo navrženo na základě úspěšně odzkoušené laboratorní sestavy pro měření statických vlastností pomocného materiálu a dynamických vlastností metody (obr. 6.1). Následně po vývoji nepřenosného měřicího zařízení pro měření 2D teplotních polí ve vzduchu bylo toto zařízení modifikováno na přenosnou měřicí sestavu. Zařízení bylo navrženo zejména pro měření vzduchových teplotních polí v obytných a kancelářských prostorech pro šířku proudu až 1600 mm. Dosah zařízení je variabilní a obsáhne celou výšku klasické obytné či kancelářské místnosti.

Přenosné zařízení pro měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu se skládá z jednoho či ze dvou polohovacích stojanů, mezi kterými je zavěšen v libovolně nastavitelné výšce pomocný materiál, na kterém jsou zviditelňována teplotní pole (obr. 6.2). Součástí zařízení je stojan, na kterém je umístěna termovizní kamera. Zařízení je určeno zejména k zobrazování teplotních polí ze vzduchotechnických zařízení a nad koncovými prvky vytápěcí soustavy.



Obr. 6.2 Schéma zařízení pro měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery

K - termovizní kamera, N - notebook, P - pomocný materiál, S - stojan, D - držák, T_R - radiační teploměr, Z - zdroj neizotermního vzduchového proudu, $a \times b$ - velikost pomocného materiálu, c - rozsah nastavení výšky stojanu

Zařízení zobrazuje teplotní pole na pomocném materiálu P od různých zdrojů tepla či chladu Z pomocí termovizní kamery VarioCam K propojené s notebookem N . Současně je měřena radiační teplota v prostoru pomocí radiačního teploměru Testo T_R . Arch pomocného materiálu je upevněn do držáku D na polohovatelném stojanu S . Pomocný materiál, na kterém je nejčastěji prováděno zobrazování teplotních polí ve vzduchu, má rozměry $a \times b = 1400 \times 1200$ mm a jeho povrch musí být zcela rovný, bez přehybů, aby nedocházelo k ovlivnění měření. V dolní části pomocného materiálu je umístěno závaží (kovová tyč) pro jeho dokonalé vypnutí. Jako pomocný materiál byl z několika proměřovaných materiálů vybrán nebělený kancelářský papír (gramáž $80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) o naměřené emisivitě 0,96 a bavlněná tkanina (gramáž $145 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) s hodnotou naměřené emisivity 0,93. Kancelářský papír je vhodný pro přesná měření, ale je méně skladný, bavlněná tkanina je skladnější, a tudíž vhodnější pro mobilní zařízení. Oba pomocné materiály mají matný povrch, nízkou tepelnou kapacitu, nízkou tepelnou vodivost a minimální tloušťku. Zařízení je snadno přenosné a měření teploty vzduchu je prakticky okamžité. Parametry zařízení jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tab. 6.1 Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu

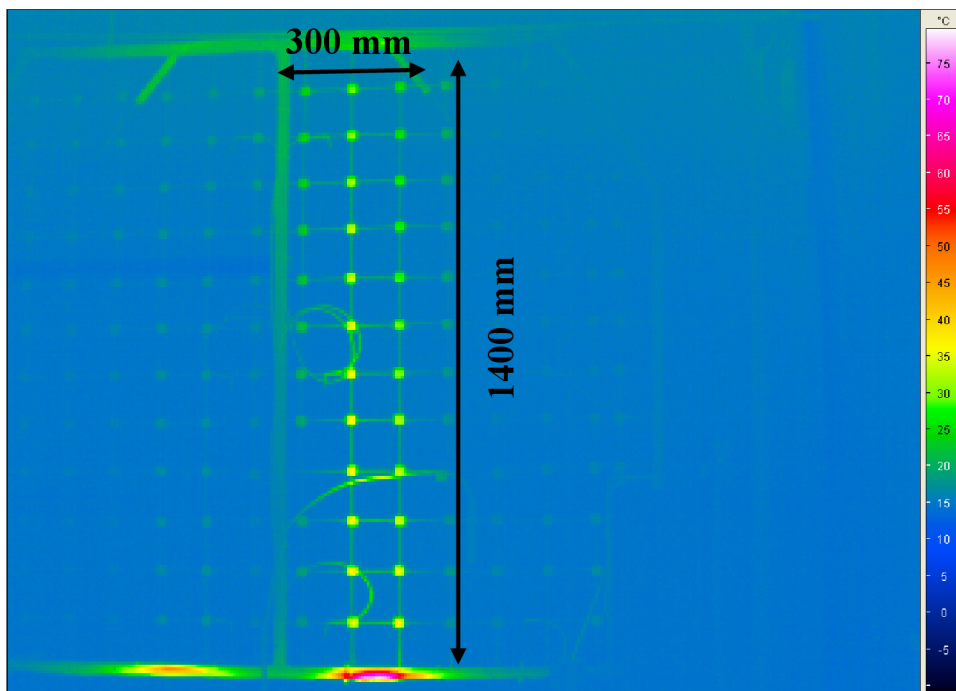
Spektrální citlivost kamery	8 až 13 μm (velice výhodné - záření mimo tuto oblast bývá výrazněji pohlcováno vlhkostí obsaženou ve vzduchu)
Minimální teplota měření vzduchu	teplota rosného bodu (aby nedocházelo ke srážení vzdušné vlhkosti na pomocném materiálu)
Minimální teplota měření vzduchu	maximální teplota omezena tepelnou odolností pomocného materiálu (pro kancelářský papír asi 150 °C, pro bavlněnou tkaninu přibližně 200 °C)
Rozlišení teplot	0,1 K
Nejistota měření absolutní teploty	2 K
Počet obrazových bodů	320 x 240
Zorné pole kamery	standardní objektiv 32° H x 25° V širokouhlý objektiv 64° H x 50° V
Obrazová frekvence	50 Hz
Velikost pomocného materiálu $a \times b$	standardní velikost 1400 x 1200 mm maximální velikost 1600 x 3000 mm
Rozsah nastavení výšky stojanu c	1400 až 3500 mm
Hmotnost zařízení	23 kg

6.2 Zařízení pro měření 3D vzduchového proudu

Požadavkem pro návrh a výrobu zařízení pro měření 3D vzduchových proudů byla motivace pro měření teplotních polí jiného, než symetrického zdroje neizotermního proudu vzduchu nebo měření od více zdrojů tepla či chladu. V tomto zařízení je nahrazen celistvý arch pomocného materiálu jednotlivými pomocnými terči v přesně definovaných souřadnicích na měřicí síti. Měření pomocí terčů minimálně deformuje proud vzduchu a úlohu lze tedy označit jako trojrozměrnou (3D).

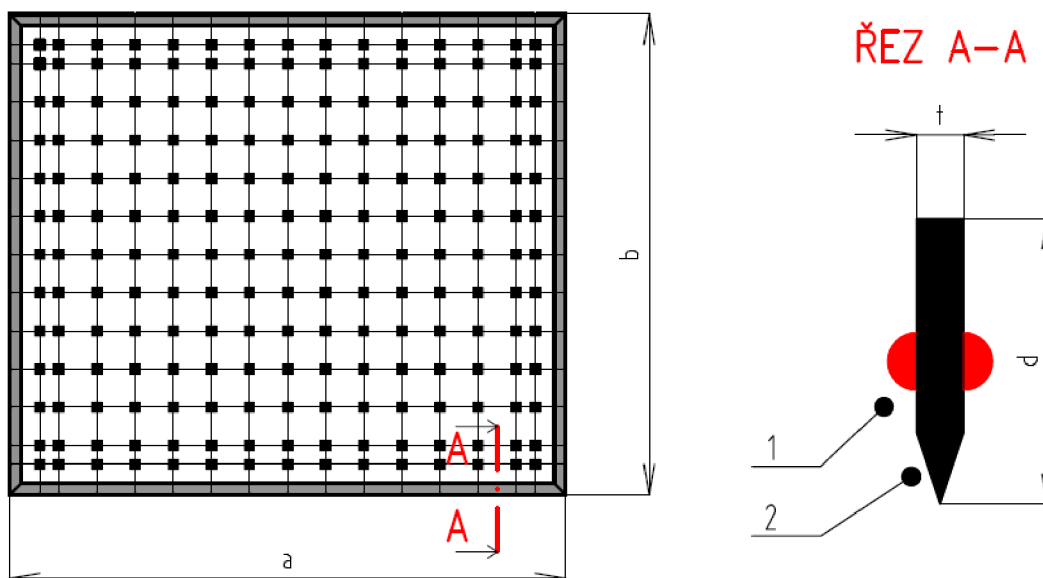
Zařízení bylo navrženo a následně vyrobeno na základě vzoru [26]. Model měřicí sítě, který byl vyroben k obdobným účelům pro maketu interiéru malého letadla EV55, reaguje velice dobře. Je vyroben z dřevěných trámů, mezi kterými je zhotovena měřicí síť pomocí tenkých lanek v přesně definovaných vzdálenostech od sebe (obr. 6.3) pro potřeby zviditelnění teplotních polí v maketě letounu. V křížení lanek jsou nalepeny terče z běžného kancelářského papíru o velikosti 10 x 10 mm. Po odzkoušení byla navržena měřicí síť pro určování teplotních profilů vzduchotechnických zařízení ve vzduchu pomocí termovize.

Nová měřicí síť byla navržena takovým způsobem, aby minimalizovala ovlivnění samotného proudu vzduchu měřicími terči a rámem konstrukce. Pro minimální ovlivnění proudu je nutné stanovit minimální velikost terče, na kterém by při určené snímané vzdálenosti byly zobrazeny minimálně 3 x 3 obrazové body (obr. 4.10). Měření je obvykle prováděno termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM s rozlišením 320 x 240 bodů s použitím standardního objektivu (32° H x 25° V). Použití širokouhlé objektivu (64° H x 50° V) je možné ve specifických případech. Obecně je vhodnější použít objektivu standardního, protože širokouhlý objektiv se většinou vyznačuje značným zkreslením obrazu v rozích (distorze obrazu).



Obr. 6.3 Vizualizace proudu pomocí měřicí sítě s terčí

Z pozorovacích úhlů objektivu lze stanovit nejmenší vzdálenost, při které je navržena měřicí síť pro zkoumání 3D proudu vzduchu zobrazena termovizní kamerou v celé velikosti. Rozměry navržené měřicí sítě jsou 1200 x 1400 mm a vychází z rozměru vzduchového proudu při měření s pomocným materiálem (2D) pro běžné druhy teplovzdušných ventilátorů a zařízení pro klimatizaci obytných a kancelářských prostor (s vhodnou výstupní rychlostí do $w = 3,0$ m/s).

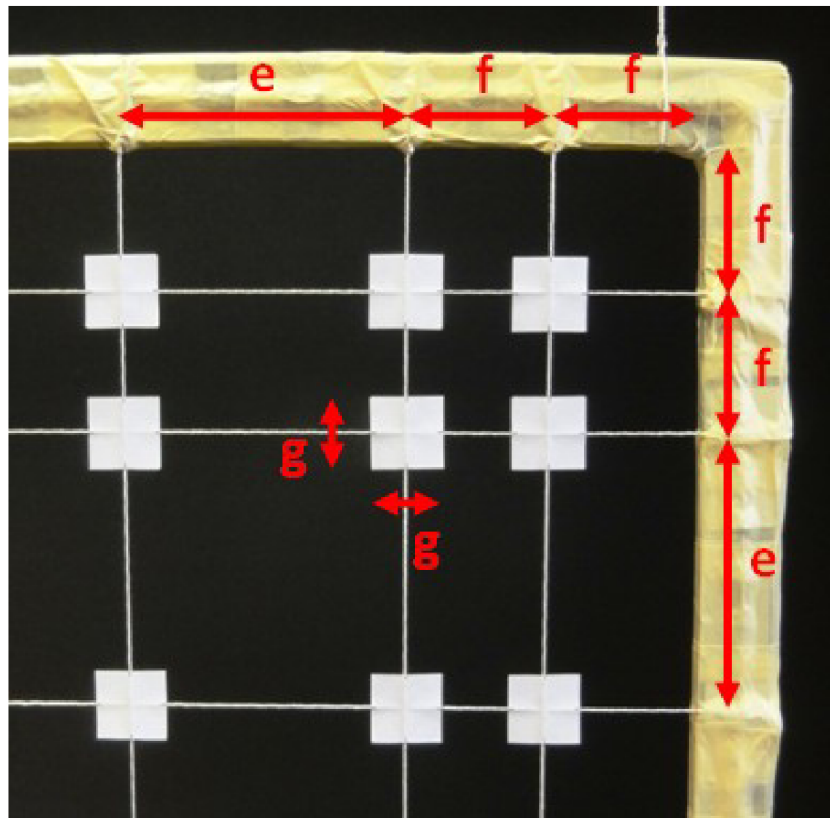


Obr. 6.4 Měřicí rám včetně jeho řezu v detailu
 1 – oboustranný liniový svár, 2 – zkosení náběžných hran

Tyto rozměry byly určeny z velikosti neizotermního proudu a z potřebné velikosti pomocného materiálu (skoková změny polohy) pro stanovení časových

konstant. Pomocí goniometrických funkcí byla následně určena vzdálenost kamery L [mm] od měřicí sítě, aby kamera s použitím standardního objektivu zabírala celou plochu měřicí sítě ($L = 2940$ mm). Minimální velikost terče pak byla stanovena dle obr. 4.8. Rozměry měřicího terče byly zvoleny tak, aby bylo zaručeno, že budou obsahovat vždy minimálně 3 celé obrazové body (rozměr byl navržen pro velikost 5 celých obrazových bodů, aby byly vždy 3 celé obrazové body na měřicím terči). Rozměr měřicího terče pro měření 3D teplotních polí ve vzduchu má rozměry 26×26 mm. Zhuštěná síť slouží pro proměření vysokých teplot, které jsou blízko zdroje tepla (maximální změny teploty u ústí zdroje tepla nebo chladu), obr. 6.4.

Měřicí rám je svarek vyrobený z tyčí o rozměrech $d \times t = 60 \times 6$ mm. Celková velikost rámu činí $a \times b = 1520 \times 1320$ mm. Materiál rámu je slitina AlMg3, která je velmi dobře svařitelná, lehká ($\rho = 2,67 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) a její pevnost je označována jako střední. Jelikož tuhost rámu po svaření nebyla postačující, byl pro zvýšení tuhosti měřicí rám opatřen liniovým svárem (návarkem) po obou stranách. Pro zlepšení aerodynamického profilu je provedeno na okraji zkosení náběžných hran. Rám je opatřen v definovaných vzdálenostech kruhovými zářezy pro přesné umístění sítě lanek, na kterých jsou připevněny měřicí terče, vyrobené ze samolepicího neběleného kancelářského papíru ($\text{gramáž } 80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) o naměřené emisivitě 0,96.

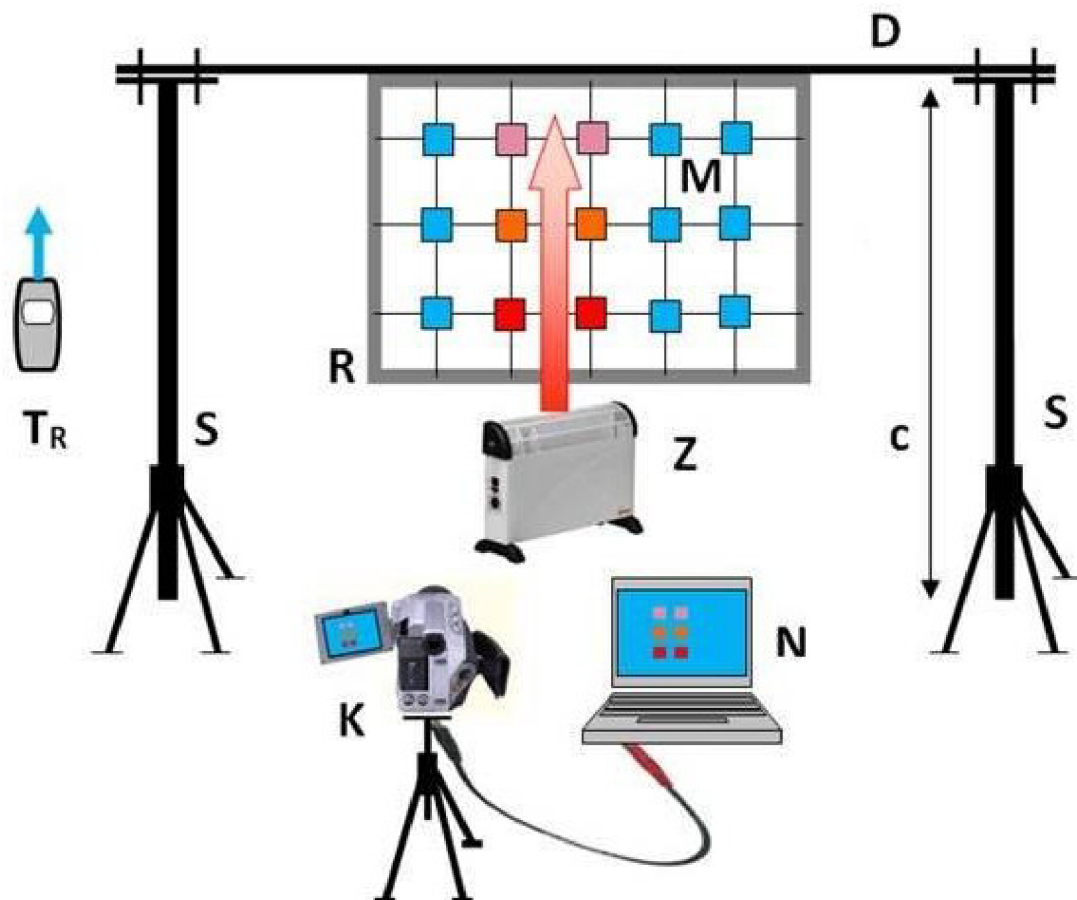


Obr. 6.5 Fotografie měřicích terčů a jejich rozmístění

Lanka jsou použita z nebarveného polypropylenu (mají lepší vlastnosti než lanka z polypropylenu barveného) o průměru $\varnothing D = 1,1$ mm s tepelnou průtažností do 19 % (při teplotách 20 až 90 °C) a jejich použití je tedy vhodné do teplot maximálně 90 °C. K rámu jsou lanka připevněna pro každou řadu zvlášť a jsou zajištěna pomocí velice pevné hliníkové pásky. Měřicí terče jsou situovány ekvidistantně od sebe ve vzdálenostech $e = 10$ cm, pouze u okraje měřicího rámu jsou dvě řady o poloviční rozteči ($f = 5$ cm), viz obr. 6.5. Terče jsou umístěny na obou stranách měřicí sítě

a jsou tedy přilepeny přes lanka k sobě. K eliminaci reflexe byl měřicí rám po sestavení opatřen matnou krycí páskou. Rozměry měřicích terčů by měly být zvoleny tak, aby na termovizním snímku zabíraly minimálně 3 x 3 obrazové body. Pro zaručení této podmínky byly velikosti terčů navrženy na 5 x 5 obrazových bodů, což odpovídá velikosti $g \times g = 26 \times 26$ mm při záběru celého rámu.

Zařízení zviditelňuje teplotní pole a měří teploty vzduchu ve zvolené rovině od různých zdrojů tepla či chladu Z , a to na terčích M umístěných v měřicím rámu R pomocí termovizní kamery Jenoptik typ VarioCAM K propojené s notebookem N . Současně je měřena radiační teplota v měřeném prostoru pomocí radiačního teploměru Testo 830-T1 T_R . Rám je upevněn do držáku D zavěšeném na polohovatelných stojanech S . Schéma celého zařízení pro měření 3D vzduchových proudů je znázorněno na obr. 6.6.



Obr. 6.6 Schéma zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery a měřicích terčů

K - termovizní kamera, N - notebook, M - měřicí terče, R - měřicí rám, S - stojan, D - držák, T_R - radiační teploměr, Z - zdroj neizotermního vzduchového proudu, c - rozsah nastavení výšky stojanu

Vyhodnocování měření se provádí na počítači v programu, který je dodávkou k termovizní kameře. Po zadání statických veličin je nutné stanovit povrchovou teplotu měřicího terče jako teplotu vzduchového proudu v daném místě. Pokud je měřen proud chladného vzduchu (chladnějšího než radiační teplota pozadí mezi terči), je nutné vyhledat lokální minimum teploty z plochy měřicího terče a naopak, jestliže je měřen proud teplého vzduchu, je nutné stanovit stejným způsobem lokální teplotní maximum. Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu jsou uvedeny v tab. 6.2.

Tab. 6.2 Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu

Spektrální citlivost kamery	8 až 13 μm
Minimální teplota měření vzduchu	teplota rosného bodu
Minimální teplota měření vzduchu	maximální teplota omezena tepelnou odolností lanek (cca 90 °C)
Rozlišení teplot	0,1 K
Nejistota měření absolutní teploty	2 K
Počet obrazových bodů	320 x 240
Zorné pole kamery	standardní objektiv 32° H x 25° V širokoúhlý objektiv 64° H x 50° V
Obrazová frekvence	50 Hz
Velikost měřicího rámu	$a \times b = 1520 \times 1320 \text{ mm}$
Rozměr tyčových profilů	$d \times t = 60 \times 6 \text{ mm}$
Rozteč měřících terčů	$e = 10 \text{ cm}, f = 5 \text{ cm}$
Velikost měřících terčů	$g \times g = 26 \times 26 \text{ mm}$
Vnitřní plocha měřicího rámu	$A = 1,68 \text{ m}^2$
Plocha měřících terčů a lanek	$B = 0,16 \text{ m}^2$, tj. 9,6 % z plochy A
Rozsah nastavení výšky stojanu	$c = 1400 \text{ až } 3500 \text{ mm}$
Hmotnost zařízení	25 kg

6.3 Zařízení pro měření teplotního pole uvnitř malých uzavřených prostorů

Zařízení pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchových proudech uvnitř malých uzavřených prostorů, jakými jsou např. kabiny automobilů, je založeno na principu využívajícím vhodný pomocný materiál, na kterém jsou teplotní pole měřena. Jelikož není možné vzhledem k rozměrům umístit termovizní kameru přímo do malého prostoru a navíc by termovizní kamera mohla ovlivňovat proudění uvnitř měřeného prostoru, jsou teplotní pole měřena skrz průzor.

Je vhodné, aby průzor, skrz který se bude snímat teplotní pole uvnitř malého prostoru na pomocném materiálu (2D proudění) nebo na měřicí síti (3D proudění), měl vysokou hodnotu transmitance t_p [-], a minimálně tak ovlivňoval vizualizaci proudění v jím uzavřeném prostoru [7]. Materiál bude upevněn buď v měřicím rámu, nebo bude instalován přímo na měřený objekt, například místo bočního okénka kabiny automobilu, obr. 6.7.

Zařízení měří teplotu vzduchu jako povrchovou teplotu vhodného pomocného materiálu, vloženého do tohoto vzduchu. Při použití pomocného materiálu jako celistvého kompaktního archu je možné měřit 2D neizotermní vzduchové proudy, při použití sítě měřících terčů je možné měřit 3D vzduchové proudy. Vysoká hodnota emisivity pomocného materiálu umožní měření i malých rozdílů teplot v proudech, s rozlišením blízkým se rozlišovací schopnosti termovizní kamery (0,01 K) a s minimálním ovlivněním měření radiční teplotou uvnitř kabiny automobilu a vně automobilu. Pro oddělení měřeného prostoru s venkovním prostředím je instalován průzor o vhodných vlastnostech, především vysoké transmitanci.

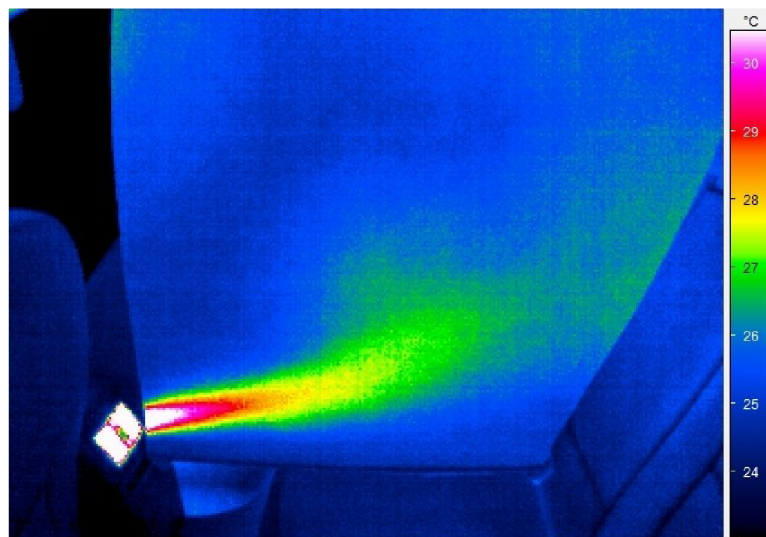


Obr. 6.7 Fotografie zařízení pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu v kabině automobilu skrz průzor

Zařízení se skládá z termovizní kamery s příslušenstvím, celistvého archu pomocného materiálu, měřicí sítě a průzoru. Pro měření 2D vzduchových proudů se používá jako pomocný materiál celistvý arch obyčejného kancelářského papíru o gramáži $80 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ s naměřenou hodnotou emisivity 0,96. Arch má geometrické rozměry dle velikosti konkrétního místa měření. Příklad aplikace kompaktního archu pomocného materiálu je uveden na obr. 6.8. Jedná se o měření teplotního pole na zadních sedadlech automobilu Škoda Octavia II Combi v ose středové vyústky s 2D prouděním vzduchu. Papírový arch měl zde rozměry pravoúhlého lichoběžníku o délce základen 80 cm a 60 cm a výšce 80 cm. Výsledný termogram z měření 2D neizotermního proudu vzduchu v zadní části automobilu je uveden na obr. 6.9

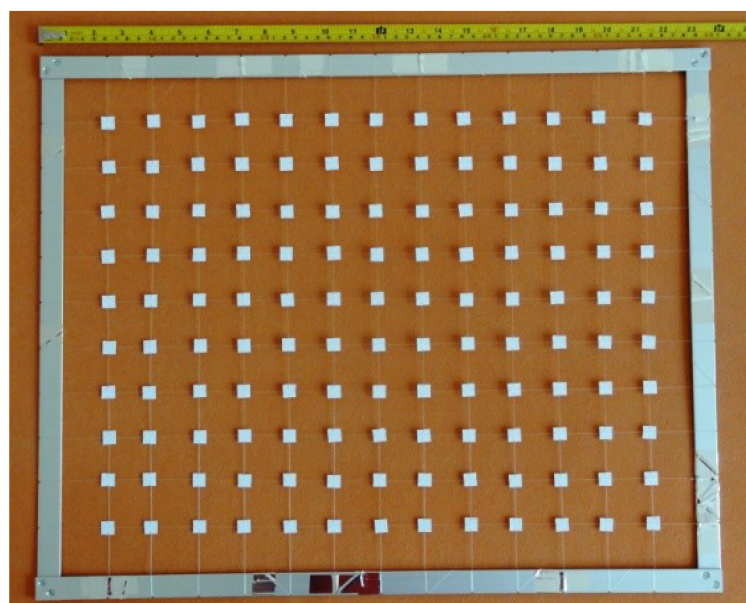


Obr. 6.8 Fotografie umístění celistvého pomocného materiálu při měření 2D neizotermního vzduchového proudu



Obr. 6.9 Termogram z měření 2D neizotermního proudu vzduchu v zadní části automobilu

Pro měření 3D vzduchových proudů v malých prostorech se používá měřicí síť. Při měření v kabinách dopravních prostředků lze použít měřicí síť o velikosti 600 x 480 mm. Rám měřicí sítě je sestaven z hliníkových profilů o rozměrech 20 x 2 mm. V síti je umístěno 130 měřicích terčů o rozměrech 12 x 12 mm, obr. 6.10. Velikost měřicího terče byla zvolena dle velikosti kabiny osobního automobilu a zorného úhlu objektivu termovizní kamery (32° H x 25° V). Terče jsou vyrobeny z obyčejného kancelářského papíru s emisivitou 0,96. Terče jsou umístěny na lankách z obou stran pomocí lepidla, které neovlivňuje jeho vlastnosti na povrchu. Počet terčů byl zvolen s ohledem na to, aby spolu s lanky zabíraly méně než 10 % celkové vnitřní plochy měřicí sítě. Měřicí síť je používána pro měření vzduchových proudů v kabině automobilu zejména v oblasti předních sedadel, kde dochází ke vzájemnému ovlivňování jednotlivých vzduchových proudů z většího množství vyústek. V kabině automobilu je měřicí síť zavěšena pomocí nylonových lanek a hliníkové pásky.



Obr. 6.10 Fotografie vyrobené měřicí sítě pro měření 3D vzduchových proudů v kabinách automobilů

Instalaci průzoru je zajištěno uzavření vnitřního měřeného prostoru od vnějšího prostředí. Materiál průzoru musí mít vysokou hodnotu transmitance. Jako materiál průzoru je použita polyethylenová fólie o tloušťce 0,05 mm a transmitanci 0,80. Průzor kompletně uzavírá vnitřní prostředí od vnějšího okolí a musí být vždy dokonale vypnut pomocí pevné pásky.

Vyhodnocování termogramů probíhá stejným postupem, jako při měření 3D vzduchových proudů v místnostech s tím, že je třeba zadat korekci transmitanci průzoru. Transmitance voleného průzoru se zadává v programu Irbis Professional 2.2 po provedení měření. Při měření 2D vzduchových proudů jsou termogramy přímo patrné. Při měření 3D vzduchových proudů jsou teploty zobrazeny jen na síti terčů, a proto je vhodné provést interpolaci teplot například v programu Surfer.

Měření teplot vzduchu je snadné a rychlé. Zařízení je možné využít při návrhu vytápění a chlazení v kabinách automobilů i jiných dopravních prostředků a při sledování rozložení teplot v různých jiných malých uzavřených prostorech, kde vnitřní tlak je stejný, jako tlak v okolí a teploty nenaruší průzor a pomocné materiály. Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí v malých uzavřených prostorech jsou uvedeny v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí v malých uzavřených prostorech

Spektrální citlivost kamery	8 až 13 μm
Minimální teplota měření vzduchu	teplota rosného bodu
Minimální teplota měření vzduchu	maximální teplota omezena tepelnou odolností lanek (cca 90 °C)
Rozlišení teplot	0,01 K
Nejistota měření absolutní teploty	2 K
Počet obrazových bodů	320 x 240
Zorné pole kamery	standardní objektiv 32° H x 25° V širokoúhlý objektiv 64° H x 50° V
Obrazová frekvence	50 Hz
Velikost měřicího rámu	$a \times b = 640 \times 480 \text{ mm}$
Rozměr tyčových profilů	$d \times t = 20 \times 2 \text{ mm}$
Rozteč měřicích terčů	$e = 4 \text{ cm}$
Velikost měřicích terčů	$g \times g = 12 \times 12 \text{ mm}$
Vnitřní plocha měřicího rámu	$A = 0,245 \text{ m}^2$
Plocha měřicích terčů a lanek	$B = 0,023 \text{ m}^2$, tj. 9,2 % z plochy A
Velikost celistvého archu pomocného materiálu	pravoúhlý lichoběžník o základnách 80 a 60 cm a výšce 80 cm
Hmotnost zařízení	7 kg

7 Metodika měření teplotních polí termovizní kamerou

V předešlých kapitolách byl představen vývoj metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery. Pro praktické využívání této metody je nezbytné vypracování podrobného návodu, aby jí bylo možné běžně využívat. Metodika měření obsahuje:

- Výběr vhodné měřicí aparatury pro konkrétní zvolenou aplikaci.
- Výběr vhodného typu pomocného materiálu pro zviditelňování teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery.
- Popis měření radiační teploty při měření.
- Popis měření s termovizní kamerou.
- Popis zhotovení termogramů.
- Vyhodnocení získaných termogramů v počítačovém programu.
- Export termogramů a videosekvencí do využívaných formátů.
- Aplikace výsledků do závěrečného hodnocení.

Detailně je metodika měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize uvedena v příloze.

Metodický návod pro měření teplotních polí ve vzduchu termovizní kamerou obsahuje seznámení s měřicími zařízeními, tj. s termovizní kamerou Jenoptik typ VarioCAM a s radiačním teploměrem Testo 830-T1. Dále je uvedeno základní seznámení s programy IRBIS online, IRBIS professional a Surfer. Jsou vysvětleny příkazy a funkce programu pro měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize navrženými zařízeními. Metodika dále obsahuje přípravu měření a návod při měření na třech zhotovených zařízeních, tj. zařízení pro měření 2D a 3D teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize a na zařízení při měření teplotních polí ve vzduchu v malých uzavřených prostorách. V každém příkladu měření na uvedeném typu zařízení je uvedena příprava měření, samotné měření a vyhodnocení měření.

Pro praktické využití vyvinuté metody je nezbytné znát také přesnost měření metody na uvedeném zařízení. Přesnost měření vychází z přesnosti měření termovizní kamery, z přesnosti radiačního teploměru a z přesnosti stanovení korekčních faktorů, tj. z přesnosti stanovení emisivity povrchu pomocného materiálu a případně z přesnosti stanovení transmitance průzoru. Směrodatná nejistota měřicí metody $\overline{\sigma}_M$ [K] je dána součtem nejistot měření jednotlivých členů dle vztahu

$$\overline{\sigma}_M = \sqrt{\overline{\sigma}_{TK-TR}^2 + \overline{\sigma}_\varepsilon^2 + \overline{\sigma}_t^2}, \quad (5.21)$$

kde $\overline{\sigma}_{TK-TR}$ je směrodatná nejistota měření termovizní kamerou a radiačním teploměrem, $\overline{\sigma}_\varepsilon$ [-] je nejistota stanovení emisivity pomocného materiálu a $\overline{\sigma}_t$ [-] je nejistota stanovení transmitance průzoru. Stanovení výsledné nejistoty měření bylo provedeno aritmetickým průměrem ze stanovení dílčích nejistot měření. Dílčí nejistoty měření byly určeny v rozmezí teplot 40 až 80 °C (v intervalu 10 K). Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tab. 7.1 Určení nejistoty měření metody měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize

Nejistota měření metody bez průzoru					Nejistota měření metody s průzorem				
ΔT	$\overline{\sigma}_{T_{TK}-T_R}$	$\overline{\sigma}_\varepsilon$	$\overline{\sigma}_{M_l}$	$\overline{\sigma}_M$	$\overline{\sigma}_{T_{TK}-T_R}$	$\overline{\sigma}_\varepsilon$	$\overline{\sigma}_t$	$\overline{\sigma}_{M_l}$	$\overline{\sigma}_M$
[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]	[K]
20	1,043	1,96	1,431	1,872	1,043	0,980	0,860	1,72	3,429
30	0,905	1,88	1,305		0,905	0,940	0,880	1,76	
40	0,784	1,76	1,179		0,784	0,880	0,820	1,64	
50	0,647	1,56	1,013		0,647	0,780	1,290	2,58	
60	0,527	1,34	0,852		0,527	0,670	2,910	5,82	

Výsledná nejistota měření metody měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery Jenoptik typ VarioCam s použitím průzoru je 3,43 K a při snímání bez průzoru je 1,87 K.

8 Měření teplotních polí v mikroklimatu

Vyvinutá metoda měření teplotních polí ve vzduchu má uplatnění zejména v oblasti návrhu vytápění, chlazení a klimatizace. V těchto aplikacích je zviditelňován neizotermní proud (nebo více proudů) vzduchu na pomocném materiálu pomocí termovizní kamery. Z výsledků je zřetelně patrná velikost proudu a jeho směr. Dále je možné stanovit teplotu proudu vzduchu v daném místě [93]. Při využití doplňujících měřidel je možné stanovit tepelnou pohodu prostředí v daném místě měření [19].

V následujícím textu jsou uvedeny příklady, na kterých byla ověřena funkčnost metody, a které přispěly k řešení praktických problémů.

8.1 Měření teplotních polí v místnosti

Zejména v letních měsících je využíváno klimatizačních zařízení v obytných i v kancelářských prostorách, aby se docílila potřebná pohoda v místnostech pro práci i odpočinek. Pro chlazení jednotlivých prostor se většinou využívají chladicí jednotky s oběhem chladiva typu split. Nejdůležitějším technickým parametrem (hned po výkonu jednotky) je vhodná distribuce proudu chladného vzduchu do prostoru. Vystupující proud vzduchu z jednotky má poměrně vysokou výstupní rychlost (většinou 2 až $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a nízkou teplotu (většinou od 14 až $16 \text{ }^\circ\text{C}$) a vzniká riziko průvanu a tepelného diskomfortu. Tyto jednotky také většinou dokáží pracovat v obráceném režimu a tedy přispívat k vytápění objektu do určité venkovní teploty. Příklad instalace takové jednotky je znázorněna na obr. 8.1. Jedná se o kancelářský prostor v posledním nadzemním podlaží o půdorysných rozměrech místnosti $2,5 \text{ m} \times 4,5 \text{ m}$. Klimatizační jednotka Sinclair model ASH-69AK PT typu split je umístěna na delší straně místnosti ve výšce $2,5 \text{ m}$ (spodní hrana).



Obr. 8.1 Fotografie zasedací místnosti s instalovanou chladicí jednotkou Sinclair

Pro zobrazení neizotermního proudu chladného vzduchu z klimatizační vyústky bylo použito zařízení pro měření 2D teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery. Z vyústky vystupuje proud vzduchu, který můžeme označit jako dvojrozměrný, a proto bylo možné použít celistvý arch pomocného materiálu pro jeho zviditelnění. Pomocným materiálem byl v tomto případě arch bavlněné tkaniny s naměřenou hodnotou emisivity $0,93$. V místnosti nebyl jiný zdroj záření, který by bylo nutné odstínit. Prostor neovlivňovalo sluneční záření a místnost byla uzavřena od okolních

místností z důvodu eliminaci průvanu. Fotografie instalace zařízení pro měření 2D teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery je uvedena na obr. 8.2.



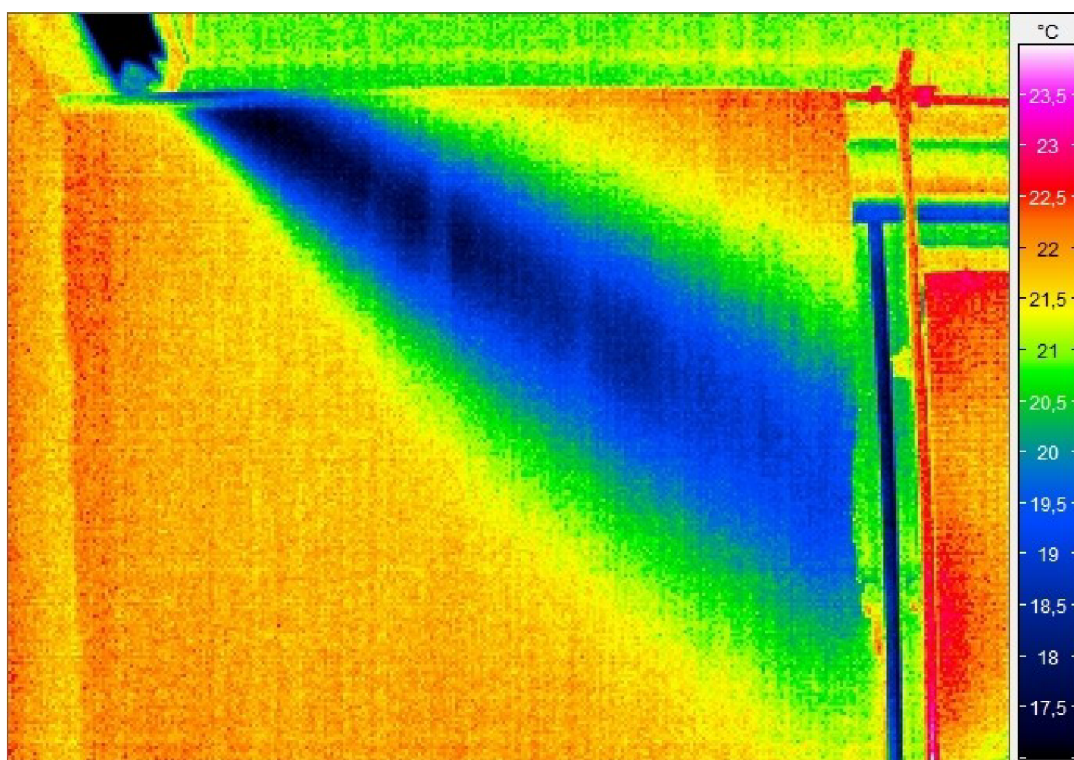
Obr. 8.2 Fotografie sestavy pro měření 2D teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery od vzduchotechnické výústky v kancelářských prostorech

Pro měření teplotního pole od klimatizační jednotky byla použita termovizní kamera Jenoptik typ VarioCAM s obrazovým rozlišením 320 x 240 bodů se standardním objektivem a arch bavlněné tkaniny o rozměrech 1400 x 1200 mm. Radiační teplota v místnosti byla stanovena radiačním teploměrem Testo 830-T1. Součástí zařízení byl dále stojan s držákem, na kterém byl uchycen pomocný materiál, stativ pro bezpečné umístění termovize do požadované polohy a notebook pro on-line nastavení hodnot v programu Irbis Online za účelem přesného nastavení měření (slouží pro usnadnění práce s termovizní kamerou a usnadnění následného vyhodnocování měření v programu IRBIS Professional 2.2).

8.2 Vyhodnocení měření teplotních polí v místnosti

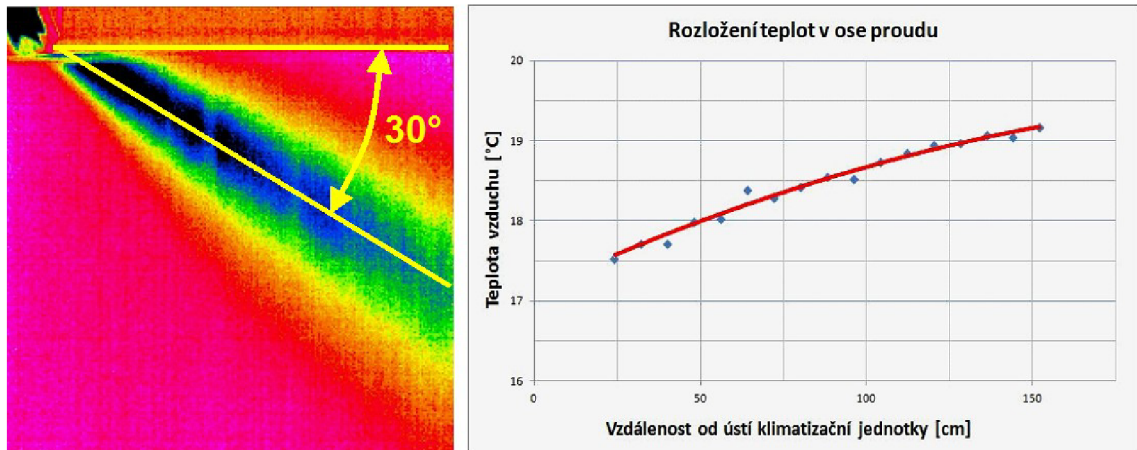
Během měření bylo provedeno přibližně deset termogramů ve dvou sériích. Tímto opatřením se dá zabránit hrubým chybám, jako je např. špatné nastavení kamery nebo špatné zaostření na cílený objekt. Pro provedení měření byly termogramy nahrány do programu Irbis Professional 2.2, který slouží pro důkladné zkoumání pořízených termogramů. Po zvolení reprezentativního termogramu, který byl nejlépe zaostřen, bylo provedeno zadání emisivity pomocného materiálu a střední radiální teploty okolí do softwarového programu. Tyto hodnoty je možné vložit přímo do kamery v průběhu měření. Je to výhodné při zadávání emisivity, protože je zde předpoklad, že ta se měnit v průběhu měření nebude. Radiální teplota se odečítá při každém měření a je tedy snazší ji pak zadat pro konkrétní termogram při jeho zkoumání, než při každém měření ji měnit v termovizní kameře. Střední radiální teplota okolních ploch byla stanovena prostým aritmetickým průměrem z dominantních ploch v místnosti (stěny, podlaha a strop).

Po zadání statických hodnot bylo vybráno vhodné nastavení obrazové stupnice tak, aby bylo nejnázornější, pro analýzu proudění chladného vzduchu. Originální termogram se zadáním hodnoty emisivity pomocného materiálu a střední radiální teploty v místnosti je uveden na obr. 8.3. Teplotní stupnice není v přímkové závislosti, byl použit stupeň nelinearity pro zvýraznění chladného proudu (Linearita -1).



Obr. 8.3 Originální termogram z měření teplotního pole ve vzduchu pomocí termovizní kamery od klimatizační jednotky v kancelářském prostoru

Klimatizační jednotka Sinclair model ASH-69AK PT typu split s chladicím (i tepelným) výkonem 2850 W nemá možnost nastavení směru vyústky. Sklon směru neizotermního proudu je 30° od horizontální polohy. Z uvedeného termogramu na obr. 8.4 lze toto tvrzení potvrdit. Na obr. 8.4 je znázorněno vyhodnocení rozložení teploty v ose proudu výstupu chladného vzduchu.



Obr. 8.4 Vyhodnocení rozložení teploty v ose proudu a stanovení úhlu výstupu chladného vzduchu

Následně bylo provedeno vyhodnocení tepelného stavu prostředí v místě pobytu pracovníka. Tepelný stav prostředí vyhodnocen dle operativní teploty t_o [°C] dle ČSN EN ISO 7730 [19]. Požadavkem bylo vyhodnocení, zda je pracovník v tepelné pohodě či nikoliv. Vzdálenost sedícího pracovníka v malé zasedací místnosti, který sedí naproti klimatizační jednotce, je 2,8 m. Rychlost proudu w [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] v tomto místě byla změřena pomocí žárového anemometru a její hodnota v místě hlavy sedícího člověka (ve výši 110 cm) dosahovala $0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Teplota proudu v tomto místě (při opakovaném měření) byla změřena na $21,32 \text{ }^\circ\text{C}$. Střední radiální teplota v místnosti byla stanovena radiálním teploměrem jako aritmetický průměr ploch a má hodnotu $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Vnitřní teplota vzduchu v místnosti byla určena termovizí jako $t_a = 22,44 \text{ }^\circ\text{C}$. Operativní teplota byla stanovena dle rovnic 4.50 a 4.51 a její hodnota činí $t_o = 21,62 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pro vyjádření předpokládaného tepelného pocitu lze využít ukazatel PMV (Predicted Mean Vote). Používá se k předpovědi středního tepelného pocitu velké skupiny osob. Stanovuje se na základě odhadu energetického výdeje člověka (činnosti), hodnoty tepelného odporu člověka a ostatních faktorů prostředí [19]. Výsledný střední tepelný pocit je dán stupnicí předpokládaného tepelného pocitu dle tab. 8.1.

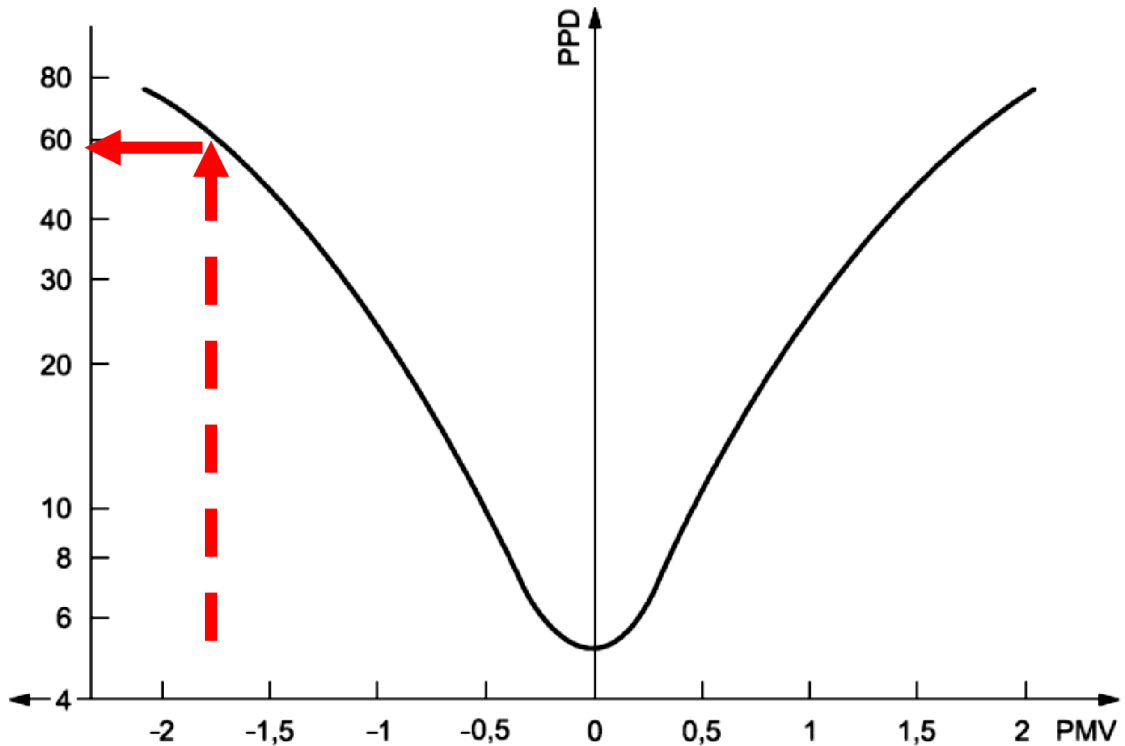
Tab. 8.1 Stupnice hodnocení předpokládaného tepelného pocitu dle [19]

3	2	1	0	-1	-2	-3
horko	teplo	Mírně teplo	neutrálně	Mírně chladno	chladno	zima

Pro stanovení hodnoty indexu PMV je nutné stanovit činnost pracovníka a tepelný odpor jeho oděvu. Pracovník je oblečen běžným denním oblečením s tepelným odporem oděvu $0,5 \text{ clo}$, což odpovídá izolační vrstvě oblečení s tepelným odporem $R_{cl} = 0,08 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Izolační hodnota $0,5 \text{ clo}$ odpovídá tričce s krátkým rukávem, lehkými kalhotami v kombinaci s bavlněným prádlem, tenkými ponožkami, a běžnou obuví. Hodnoty tepelného stavu oděvu pracovníka je možné stanovit dle [19] v tabulce C.1. Dále je třeba určit energetický výdej pracovníka [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, met (Metabolic rate)]. Ten se určuje taktéž z normy [19] v tabulce B.1. Pracovník v malé zasedací místnosti má lehkou činnost při sezení a jeho energetický výdej je stanoven na $1,2 \text{ met}$ ($70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Dle přílohy E je následně stanoven index PMV, který činí $\text{PMV} = -1,69$, což značí chladno. Pracovník se tedy nachází v tepelné nepohodě a z charakteristiky

tabulkových hodnot je zřejmé, že pocit chladu ovlivňuje zejména vysoká rychlost proudění.

Dále byl zaveden index PPD, který zohledňuje individuální odchylky fyziologie člověka, kvůli kterým není možné zajistit pocit tepelné pohody veškerým lidem v daném prostoru. Vždy bude část lidí pociťovat diskomfort (tepelnou nepohodu). Procentuální podíl nespokojených je možné stanovit buď výpočtem dle normy [19], nebo graficky taktéž z normy [19], obr. 8.5. Pro daný případ je index PPD = 58 %.



Obr. 8.5 Vyhodnocení procentuálního podílu nespokojených lidí

V případě stanovení hodnoty veličiny místní intenzity turbulence T_u [%] by bylo možné určit stupeň obtěžování průvanem (PDR) dle normy [19]. Stupeň obtěžování průvanem vyjadřuje procentuální podíl osob, u kterých převládá pocit obtěžování průvanem a je možné jej určit dle vztahu

$$PDR = (34 - t_a)(w - 0,05)0,62(0,37wT_u + 3,14).$$

8.3 Měření teplotních polí v automobilu

Malé uzavřené prostory, jaké jsou například kabiny dopravních prostředků, jsou vysoce náročné na řešení vhodného tepelného stavu prostředí. Tyto prostory jsou specifické tím, že se v malém prostoru může nacházet velké množství osob a prostředí je vysoce tepelně heterogenní. Vytvoření tepelného komfortu pro řidiče i pasažéry je v takovém prostředí náročné. Pro hodnocení tepelného stavu prostředí v kabinách automobilů se dle ČSN ISO 7726 může měřit také teplota vzduchu a střední radiační teplota, dále rychlost proudění vzduchu nebo i jeho vlhkost [19]. Při vysokých požadavcích na tepelnou pohodu prostředí se navíc měří a vyhodnocuje asymetrie radiační teploty Δt_{pr} [K] a intenzita turbulence T_u [-]. Tyto veličiny se z hlediska tepelné

pohody měří v místech výskytu osob, a to vždy v úrovni hlavy, v úrovni břicha a v úrovni kotníků sedícího člověka, tj. úroveň hlavy 110 cm, úroveň břicha 60 cm a pro oblast kotníků 10 cm. V případě měření tepelné pohody v automobilu se však tyto hodnoty mohou lišit vzhledem k umístění sedadel. Výsledkem měření v automobilu bylo stanovení rozložení tepelného pole v automobilu ve dvou místech a stanovení tepelné pohody spolujezdce v místě hlavy. Pro hodnocení tepelného stavu prostředí v kabinách automobilů se používá i norma ČSN EN ISO 14505-2 - Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech – Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty [17]. Pro měření teplotního rozložení vzduchu v kabině automobilu je možné využít zařízení pro měření teplotních polí ve 2D a ve 3D proudu vzduchu, kdy je měřicí síť či kompaktní arch pomocného materiálu snímán skrz průzor, obr. 8.6. Měření probíhalo v kabině automobilu značky Škoda, model Octavia Combi druhé generace s motorem 2.0 TDi. Vůz je ve výbavovém provedení Elegance, což značí důmyslný systém klimatizace (duální elektronicky řízená).



Obr. 8.6 Fotografie zařízení pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu v kabině automobilu skrz průzor

Pro měření 3D vzduchových proudů v malých prostorách se používá měřicí síť. Při měření v kabinách dopravních prostředků lze použít měřicí síť o velikosti 600 x 480 mm. Rám měřicí sítě je sestaven z hliníkových profilů o rozměrech 20 x 2 mm. V síti je umístěno 130 měřících terčů o rozměrech 12 x 12 mm. Velikost měřícího terče byla zvolena dle velikosti kabiny osobního automobilu a zorného úhlu objektivu termovizní kamery (32° H x 25° V). Terče jsou vyrobeny z obyčejného kancelářského papíru s emisivitou 0,96. Terče jsou umístěny na lankách z obou stran pomocí lepidla, které neovlivňuje jeho vlastnosti na povrchu. Počet terčů byl zvolen s ohledem na to, aby spolu s lanky zabíraly méně než 10 % celkové vnitřní plochy měřicí sítě. Měřicí síť je používána pro měření vzduchových proudů v kabině automobilu zejména v oblasti předních sedadel, kde dochází ke vzájemnému

ovlivňování jednotlivých vzduchových proudů z většího množství vyústek. V kabině automobilu je měřicí síť zavěšena pomocí nylonových lanek a hliníkové pásky, obr. 8.7. Instalaci průzoru je zajištěno uzavření vnitřního měřeného prostoru od vnějšího prostředí. Materiál průzoru musí mít vysokou hodnotu transmitance. Jako materiál průzoru je použita polyethylenová fólie o tloušťce 0,05 mm a transmitanci 0,80. Průzor kompletně uzavírá vnitřní prostředí od vnějšího okolí a musí být vždy dokonale vypnut pomocí pevné pásky.

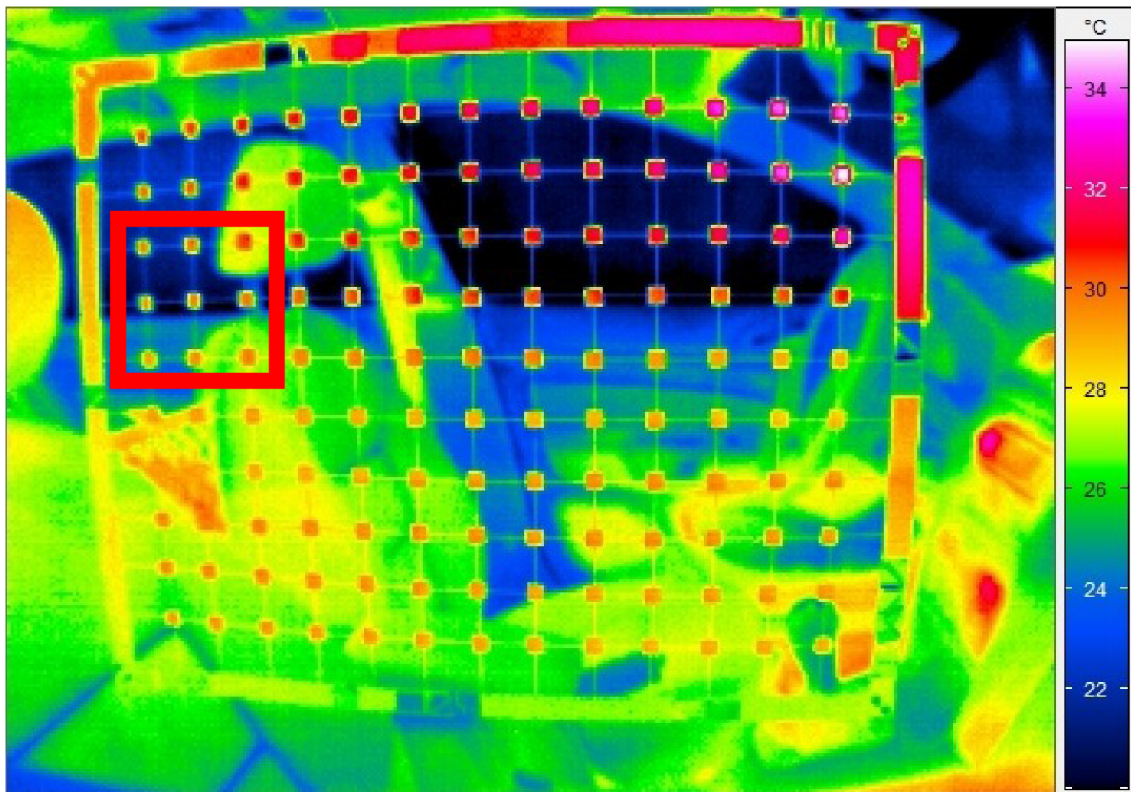
Měřicí síť byla instalována v přední části automobilu v místě osy sedadla spolujezdce a následně v místě osy automobilu. Měření bylo prováděno skrz fólii, kterou je v případě kabiny automobilu nahrazeno sklo v bočních dveřích. Byla použita termovizní kamera Jenoptik typ VarioCAM. Měření bylo prováděno ze stativu nebo měřením z ruky, a to přitisknutím objektivu na transparentní fólii. Během měření byla měřena radiální teplota uvnitř automobilu a vně automobilu radiálním teploměrem Testo 830-T1. Při měření bylo využito různého nastavení vyústek v přední části automobilu (sklon lamel, intenzita a teplota proudění).



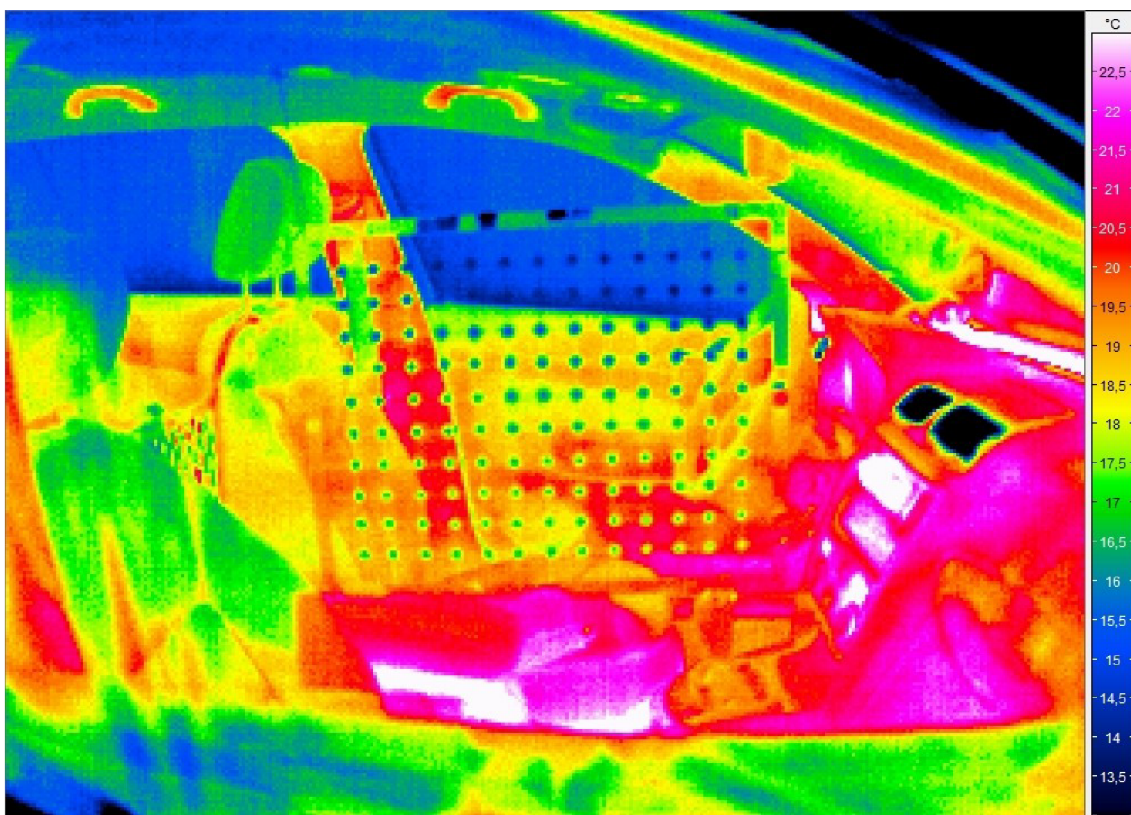
Obr. 8.7 Umístění měřicí sítě pro měření 3D neizotermních vzduchových proudů v kabině automobilu na předním sedadle spolujezdce

8.4 Vyhodnocení měření teplotních polí v automobilu

Při vyhodnocování měření je třeba provést zadání emisivity měřících terčů, transmitanci průzoru a střední radiální teploty uvnitř kabiny dopravního prostředku a okolního prostředí do programu Irbis Professional 2.2, který slouží pro podrobné zkoumání termogramů a vyhodnocování teplot. V programu Irbis Professional 2.2 je pro tento druh snímání vytvořena speciální aplikace, do které je možné zadat obě radiální teploty a transmitanci průzoru. V programu se tedy vyhodnocuje povrchová



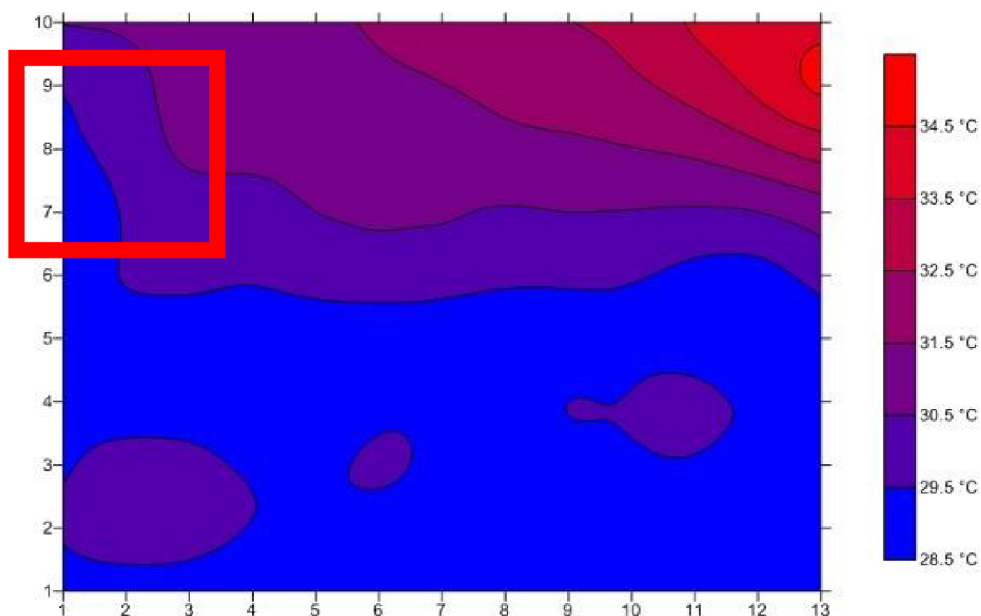
Obr. 8.8 Termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy sedadla spolujezdce s vyznačením oblasti hlavy spolujezdce



Obr. 8.9 Termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy automobilu

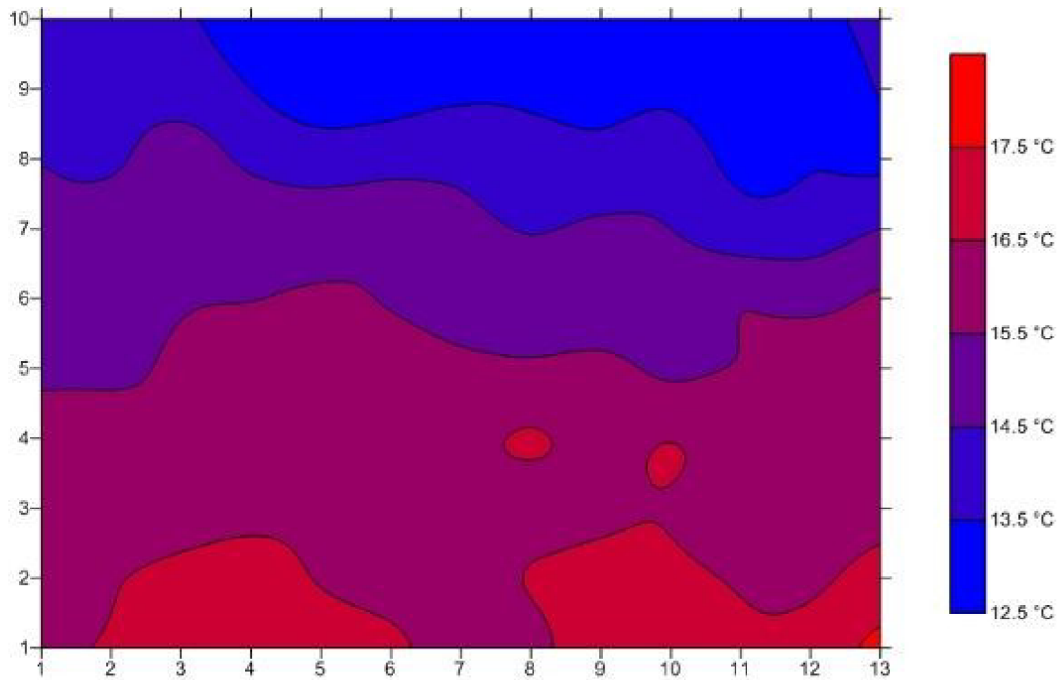
teplota pomocného materiálu jako teplota vzduchového proudu znázorněná na měřicím terči. Pro vyhodnocení získaných termogramů byl vybrán termogram chladného proudu vzduchu v ose automobilu (obr. 8.8) a proud teplého proudu vzduchu v ose spolujezdce, obr. 8.9. Termogram z měření v oblasti osy spolujezdce byl pořízen přitisknutím objektivu kamery na průzor. Tímto způsobem je eliminována nerovnoměrná reflexe okolního prostředí na fólii (radiální teplota okolního prostředí je pak teplota objektivu kamery). Měření chladného proudu vzduchu v oblasti osy automobilu (nad loketní opěrkou) byla měřena ze stativu umístěného před bočními dveřmi automobilu.

Pokud je měřen proud chladného vzduchu (chladnějšího než radiální teplota pozadí mezi terči), je nutné vyhledat lokální minimum teploty z plochy měřicího terče a naopak, jestliže je měřen proud teplého vzduchu, je nutné stanovit stejným způsobem lokální teplotní maximum. Jelikož z výsledných termogramů není zcela zřetelné teplotní pole, je třeba s využitím programu Surfer získat výsledné rozložení teplotního pole, viz obr. 8.10 a 8.11. Do programu se vloží teploty vzduchu v souřadnicích jednotlivých terčů a pomocí matematického proložení [79, 80] se získá výsledný upravený termogram.



Obr. 8.10 Upravený termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy sedadla spolujezdce s vyznačením umístění hlavy spolujezdce

Systém vytápění v automobilu využívá teplotně nosného média pro distribuci upraveného čerstvého vzduchu do prostředí kabiny automobilu. Cílem systému úpravy vzduchu je dosáhnout optimální pohody prostředí, ve kterém by se řidič a posádka vozu cítili dobře. Metoda měření teplotních polí v kabině automobilu zjistila vysoké teplotní diference na velmi malé ploše (až 6 K). Získané termogramy jsou velice názorné. Doplněním této měřicí sestavy o anemometr lze hodnotit pohodu prostředí v automobilu. Následně byla stanovena operativní teplota t_0 [°C] dle rovnic 4.50 a 4.51. V místě hlavy spolujezdce byla anemometrem změřena rychlost proudění v hodnotě $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Střední radiální teplota byla stanovena radiálním teploměrem jako aritmetický průměr z naměřených hodnot a její hodnota činí $t_r = 21,5 \text{ °C}$. Teplota vzduchu v místě hlavy spolujezdce v ose předního sedadla v kabině automobilu byla stanovena jako průměrná teplota z čtverce $30 \times 30 \text{ cm}$ z obr. 8.10.



Obr. 8.11 Upravený termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy automobilu

Hodnota operativní teploty činí $t_o = 26,81 \text{ °C}$. V normě [19] v příloze B.1 byl stanoven energetický vývoj spolujezdce. Spolujezdec sedí, je v klidu a relaxuje a hodnota energetického vývoje činí 1,0 met. Spolujezdec má tepelný odpor oděvu 0,7 clo, což odpovídá typovému oblečení ve složení košile, kalhoty, ponožky, spodní prádlo a obuv. V příloze E byl stanoven index PMV a činí 0,36, což je neutrální tepelný stav (tepelná pohoda). Index PPD byl stanoven podobným způsobem dle obr. 8.5, jako v případě měření teplotních polí v místnosti, a jeho hodnota činí 8 %.

9 Závěr

V rámci doktorského studia byla provedena analýza poznatků z výzkumu vztahující se k metodě měření a vizualizace teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery. Tyto poznatky se staly podkladem pro vlastní práci při vývoji metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize. Předložená dizertační práce je celkovým souhrnem výsledků ze zjištěných publikovaných prací, poznatků z měření a vlastním experimentálním výzkumem autora při zobrazování neizotermních proudů vzduchu na pomocném materiálu termovizní kamerou. Obsah dizertační práce lze rozčlenit do pěti částí:

V první části dizertační práce jsou uvedeny počátky termovizního zobrazování a popis metody měření vyvinutou metodou. Je zde i uveden vývoj metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize. Tato metoda vyžaduje vložit do neizotermního proudu vzduchu pomocný materiál (jelikož vzduch je průteplivé médium), na kterém jsou teplotní pole zobrazována. K ostatním metodám, jak měřit teplotní pole ve vzduchu, patří proměření teplotních polí pomocí soustavy termočlánků, odporových senzorů, interferometrie nebo systému PLIF. Měřicí metoda s využitím termovize je všeobecně v povědomí technické veřejnosti, avšak její využitelnost v praxi není rozšířena zejména z důvodů ceny zařízení, nutnosti výroby přípravků, neznámých hranic použitelnosti metody a nejistot měření. K úspěšné aplikaci této metody jsou nezbytné teoretické znalosti a následně také praktické zkušenosti z měření.

Ve druhé (teoretické) části práce jsou postupně uvedeny základní vztahy, které mají vliv na měření teplotních polí ve vzduchu pomocí této metody. K zásadním vlivům patří přenos tepla, a to ve všech třech formách, tj. přenos tepla vedením, prouděním i zářením. Přenos tepla vedením má zásadní vliv pro šíření teplotního pole v archu pomocného materiálu. Rozšíření zobrazeného teplotního pole v archu pomocného materiálu je nežádoucí jev, který posouvá hranice zobrazovaného neizotermního proudu vzduchu. Dále byly stanoveny teoretické vztahy pro určení časové konstanty metody, kdy neizotermní proud vzduchu předává tepelný tok konvekcí do povrchu pomocného materiálu a změní tak jeho teplotu, která je zobrazena termovizí jako teplota vzduchu na povrchu pomocného materiálu.

Nejvýznamnějším přenosem tepla v oblasti termovizního snímání je přenos tepla zářením. Známé vztahy pro přenos tepla zářením byly modifikovány pro potřeby termovizní kamery Jenoptik typ VarioCAM se spektrální citlivostí 8 až 13 μm a teplotním rozsahem -40 až 1200 $^{\circ}\text{C}$. Byly stanoveny základní vztahy pro měření neprůteplivého tělesa v dokonale průteplivém prostředí, což je základní druh snímání objektu (nejčastější případ). Dále byl proveden rozbor měření neprůteplivého tělesa v částečně průteplivém prostředí.

V další části práce jsou uvedeny možnosti stanovení emisivity povrchu pomocného materiálu a stanovení střední radiační teploty okolí. Tyto dvě veličiny mají zcela zásadní význam pro stanovení správné teploty povrchu měřeného objektu. Poslední částí teoretického rozboru je rozbor měření při snímání neprůteplivého objektu v dokonale průteplivém prostředí přes průzor. Tento typ měření má uplatnění např. při měření teplotních polí v kabinách automobilů.

Třetí část je věnována experimentálnímu měření parametrů vyvinuté metody, konkrétně měření emisivity povrchu pomocného materiálu, stanovení časové konstanty vyvinuté metody a měření transmitance průzorů. Z měření těchto veličin je poté stanovena oblast použitelnosti metody s určením nejistot měření. Měření emisivity zkoumaných archů materiálů probíhalo v laboratoři s homogenní teplotou, kde byl arch zkoumaného materiálu připevněn na silný zahřátý ocelový plát,

který byl ustaven do stojanu před termovizní kameru. Na povrch zkoumaného materiálu byl připevněn kalibrovaný termočlánek, který ukazoval hodnotu skutečné teploty materiálu. Zároveň byla měřena teplota povrchu materiálu termovizní kamerou při nastavení emisivity $\varepsilon = 1$ a z odvozených teoretických vztahů byla vypočtena emisivita povrchu zkoumaného materiálu. Stanovení střední radiační teploty bylo provedeno radiačním teploměrem Testo 830-T1 jako aritmetický průměr z měřených ploch v laboratoři. Bylo porovnáno přibližně 15 druhů materiálů, zejména papírovin a tkanin. Pro další experimenty byly vybrány materiály s nejvyšší hodnotou emisivity pro papírovinu i tkaninu, konkrétně byl vybrán běžný kancelářský papír nebělený o gramáži 80 g/m^2 s vypočtenou průměrnou hodnotou emisivity 0,96 a bavlněná tkanina o gramáži 145 g/m^2 s průměrnou vypočtenou hodnotou emisivity 0,93. Z měření emisivity pomocných materiálů byly stanoveny nejistoty měření. Hodnota emisivity pomocného materiálu se stanovením nejistoty měření činí $0,96 \pm 0,03$ pro kancelářský papír a $0,93 \pm 0,03$ pro bavlněnou tkaninu. Hodnota emisivity pomocného materiálu má vliv na stanovení časové konstanty vyvinuté metody měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize.

Časová konstanta byla stanovena sledováním teploty povrchu pomocného materiálu při skokové změně teploty vzduchu v okolí tohoto materiálu. Pro stanovení časové konstanty metody byl vybrán kancelářský papír a bavlněný textil s nejvyšší hodnotou emisivity. Arch pomocného materiálu byl připevněn do posuvného stojanu nad různé druhy zdrojů tepla a byla snímána termovizní sekvence při skokové změně polohy zkoumaného archu. Byly vytvořeny závislosti časové konstanty na rozdílu teplot a na rychlosti proudění pro oba preferované druhy pomocného materiálu. Obvyčejný kancelářský papír reaguje na skokovou změnu polohy rychleji než bavlněná tkanina z důvodu lepších statických vlastností materiálu, zejména emisivity, měrné hmotnosti a měrné tepelné kapacity. Nejistota měření časové konstanty byla stanovena na hodnotu $\pm 0,3$ s pro kancelářský papír a na hodnotu $\pm 0,4$ s pro bavlněnou tkaninu.

Dalším měřeným parametrem vyvinuté metody bylo měření transmitance průzoru, přes který je možné snímat teplotní pole uvnitř malého uzavřeného prostoru. Byly vybrány různé druhy polyethylenových a polypropylenových fólií. Měřené fólie byly upevněny do rámu a bylo prováděno snímání částečně skrz fólii směrem ke zdroji tepla. Vyhodnocení transmitance bylo provedeno skrze odvozený vztah v teoretické části práce. Bylo také testováno měření transmitance fólie při zahřátí, aby bylo zjištěno, zda fólie emituje vlastní záření. Z různých typů fólií byla vybrána jako nejvhodnější stavební zakrývací fólie s tloušťkou 0,05 mm, z důvodu nejvyšší hodnoty transmitance 0,80. Rovněž bylo experimentálně ověřeno, že množství energie, kterou vybraná fólie sama emituje, je zanedbatelné. Nejistota měření transmitance fólie byla stanovena výpočtem z teoretického vztahu obdobně jako při měření emisivity pomocného materiálu. Hodnota transmitance stavební zakrývací fólie s vyjádřením nejistoty měření činí $0,80 \pm 0,03$.

Po stanovení základních vlastností vybraného pomocného materiálu byl proveden experiment pomocí tepelného otisku snímaného termovizní kamerou a následně také provedena simulace v programu STAR CCM+ s podporou Ing. Jakuba Elcnera z Odboru termomechaniky a techniky prostředí. Bylo zjištěno, že teplotní pole se ustálí po 10 vteřinách v závislosti na teplotě tepelného razítka a dále již nepokračuje jeho šíření. Rozšíření teplotního pole v archu bavlněného materiálu mělo hodnotu 3,5 mm a v případě archu papíru 3,9 mm dle experimentu. Simulací v programu STAR CCM+ vyšly obdobné hodnoty rozšíření teplotního pole. Ze statických a z dynamických vlastností byla následně stanovena oblast použití metody měření a vizualizace teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize. Oblast použití této metody

vychází ze závislosti rychlosti proudění a z rozdílu teplot na časové konstantě a z přesnosti měření termovize s daným pomocným materiálem. Eliminací oblastí s příliš vysokou hodnotou časové konstanty byla určena oblast použití vyvinuté metody.

Ve čtvrté části práce jsou představena vyrobená zařízení pro měření a vizualizaci teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery. Tato zařízení jsou prezentována jako funkční vzorky. Jedná se o zařízení pro měření 2D vzduchového proudu, dále o zařízení pro měření 3D vzduchového proudu a o zařízení pro měření teplotního pole uvnitř malých uzavřených prostorů. Zařízení pro měření 2D vzduchového proudu se skládá z přenosných stojanů s držákem pomocného materiálu a ostatní vybavením, archy pomocných materiálů, termovizní kamery s příslušenstvím, radiačním teploměrem a případně s notebookem. Zařízení je vhodné pro měření 2D vzduchových proudů zejména z klimatizačních a jiných vytápěcích zařízeních, například v obytných a kancelářských prostorech.

Zařízení pro měření 3D vzduchových proudů zobrazuje teplotu vzduchu na měřicích terčích situovaných v rámu na tenkých lankách. Měřicí rám s terčí nahradil celistvý arch pomocného materiálu (2D). Rám s terčí je vhodný pro měření i jiných vzduchových proudů, než těch, kdy jsou proudnice situovány paralelně s archem pomocného materiálu (2D). Velikost terče byla stanovena způsobem, aby bylo zaručeno, že při zobrazování termovizní kamerou bude obsahovat vždy minimálně 3 celé obrazové body. Terče zabírají 9,6 % z celkové plochy rámu. Měřicí terče jsou vyrobeny z kancelářského papíru o emisivitě $0,96 \pm 0,03$. Lanka jsou z polypropylenu a použití této sítě v proudu teplého vzduchu je vhodné do teplot $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měřicí terče jsou situovány ekvidistantně od sebe ve vzdálenostech 10 cm, pouze u okraje měřicího rámu jsou dvě řady o poloviční rozteči, kde zhuštěná síť po okraji rámu slouží pro proměření vysokých teplot v blízkosti zdroje tepla.

Zařízení pro měření teplotního pole uvnitř malých uzavřených prostorů je založeno na vizualizaci teplotních polí ve vzduchu skrze průzor, který odděluje malý uzavřený prostor od okolního prostředí. V malém uzavřeném prostoru může docházet jak ke 2D proudění, tak ke 3D proudění. Zařízení se skládá z termovizní kamery s příslušenstvím, radiačního teploměru, celistvého archu pomocného materiálu, měřicí sítě a průzoru. Jako materiál průzoru je použita polyethylenová fólie o tloušťce 0,05 mm s transmitancí $0,80 \pm 0,03$. Pro měření 2D vzduchových proudů se používá jako pomocný materiál celistvý arch obyčejného kancelářského papíru s hodnotou emisivity $0,96 \pm 0,03$. Arch má rozměry dle geometrie konkrétního místa měření.

Pro měření 3D vzduchových proudů v malých uzavřených prostorech se používá měřicí síť. Při měření v kabinách dopravních prostředků lze použít měřicí síť o velikosti 600 x 480 mm. Rám měřicí sítě je sestaven z hliníkových profilů. V síti je umístěno 130 měřicích terčů o stanovených rozměrech 12 x 12 mm. Terče jsou vyrobeny z kancelářského papíru s emisivitou $0,96 \pm 0,03$. Počet terčů byl zvolen s ohledem na to, aby spolu s lanky zabíraly méně než 10 % celkové vnitřní plochy měřicí sítě (9,2 %). Měřicí síť je používána pro měření vzduchových proudů v kabině automobilu zejména v oblasti předních sedadel, kde dochází ke vzájemnému ovlivňování jednotlivých vzduchových proudů z většího množství vyústek.

V závěrečné části práce je uvedena metodika měření a příklady vizualizace teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize. Metodický návod je podrobně uveden v příloze a obsahuje kompletní postup, jak pracovat s třemi vyvinutými zařízeními a počítačovými programy pro jejich podrobné zkoumání teplotních polí. V samotném závěru práce je uvedeno vyhodnocení dvou typových termogramů získaných z měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize v rámci výzkumů na pracovišti.

V metodickém návodu je uveden popis měřících zařízení s návodem k použití, ve vztahu k měření a vizualizaci teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize. Jedná se o termovizní kameru Jenoptik typ VarioCAM a radiální teploměr Testo 830-T1. Dále jsou popsány možnosti počítačových programů, které jsou součástí příslušenství k termovizní kameře. Jedná se o program IRBIS online a IRBIS professional. Program IRBIS online slouží pro aktuální zkoumání termogramů a k nastavování korekčních hodnot v průběhu měření. IRBIS online je nainstalován na notebooku a během měření je na něm zobrazováno teplotní pole termovizní kamerou, se kterou může být propojen. Program IRBIS professional slouží pro podrobné zkoumání termogramů a termovizních videosekvencí po skončení měření. Při měření 3D vzduchových proudů je nutné využít vhodný matematický program pro interpolaci teplotního pole z teplot získaných z povrchu měřících terčů. K tomu slouží program Surfer s pomocí tabulkového programu Microsoft Office Excel. Dále je v návodu vysvětlena příprava měření a je zpracován postup měření. Metodický návod obsahuje příklady měření ke všem třem vyvinutým zařízením pro měření a vizualizaci teplotních polí pomocí termovizní kamery.

V závěru práce jsou uvedeny dva příklady měření s jejich vyhodnocením ve vztahu k normě ČSN EN ISO 7730 [19]. Jedná se o vyhodnocení teplotního pole v malé zasedací místnosti a v přední části kabiny automobilu. Ve vyhodnocení je poukázáno, zda je pracovník v tepelné pohodě nebo nikoliv pomocí indexu PMV a PPD.

Cílem dizertační práce bylo vyvinout metodu měření a vizualizaci teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize, která umožní efektivní vizualizaci a přispěje k hlubšímu poznání sledovaných jevů a jejich souvislostí, a která může být aplikována v oblasti výzkumu proudění vzduchu z vyústek a sledování teplotních polí v místnostech. Podrobně vypracovaná metodika měření teplotních polí pomocí termovize slouží k rozšíření této metody mezi veřejnost, případně při vývoji této metody na konkrétní aplikaci v průmyslu či výzkumu.

10 Literatura

- [1] DANO, R. *Night Vision*. Amazon Digital Services, Inc., 28 s.
- [2] ADAM, M., RYSZARD, H., MALGORZATA, J. *Modeling of noncontact temperature system using multiwavelength pyrometry*. In SPIE, vol. 4516. 2001, 120–124.
- [3] Aproximace proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma1
- [4] BAEHR, H., STEPHAN, K. *Heat and mass transfer*. 3rd rev. ed. New York: Springer, c2011, xxiv, 737 p. ISBN 978-364-2200-205.
- [5] BALLICO, M. A simple technique for measuring the infrared emissivity of black-body radiators. *METROLOGIA Volume: 37: Issue: 4*. 2000, s. 295-300. DOI: 10.1088/0026-1394/37/4/5.
- [6] Bezdotykové teploměry. [online]. [cit. 2013-01-14]. Dostupné z: http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt_fpbt/laboratore/Bezdotykov_e_teplo_mery.pdf
- [7] BOCHNÍČEK Z., STRUMIENSKÝ J. Pokusy s termocitlivými fóliemi. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 12, sborník z konference*, Praha: MFF UK, Praha, JČMF, Prometheus, 2007, s. 16 -20, ISBN 978-80-7196-352-3
- [8] BORN, M. *Max Karl Ernst Ludwig Planck: 1858–1947*. Obituary Notices of Fellows of the Royal Society 6.
- [9] BOSLOUGH, P. B. *A sensitive time-resolved radiation pyrometer for shock-temperature measurements above 1500 K*. Rev. Sci. Instr., vol.60, no. 12. 1989, 3711–3717.
- [10] BYRNES, J. *Unexploded ordnance detection and mitigation*. London: Springer in cooperation with NATO Public Diplomacy Division, c2009, x, 286 p. ISBN 978-140-2092-527.
- [11] CARROLL, S. M., DICKINSON, W. *Construction of neuralnets using random transform*. IJCNN, vol. 1. 1989, 607–611.
- [12] CEHLIN, M., MOSHFEGH, B., SANDBERG, M. Measurements of Air Temperatures Close to a Low-Velocity Diffuser in Displacement Ventilation Using an Infrared Camera. *Energy and Buildings*, 34. 2002, 687–698.
- [13] ÇENGEL, Y. A. *Heat transfer: a practical approach*. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, c2003, xxvii, 932 p. ISBN 00-724-5893-3.
- [14] COATES, P. B. *The least-squares approach to multi-wavelength pyrometry*. High Temp.-High Pressures, vol. 20. 1988, 433–441.
- [15] CONG, D., DAI, J., SUN, X., ZHE, Z. *Study of the application of RBF network to multi-spectral thermometry*. Infrared Millim.Waves, vol. 20, no. 2. 2001, 97–101.
- [16] ČSN 07 0620. *Konstrukce a výstroj parních a horkovodních kotlů*. Praha, 1994.
- [17] ČSN EN ISO 14505-2. *Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech: Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty*.
- [18] ČSN EN ISO 7726. *Ergonomie tepelného prostředí – přístroje pro měření fyzikálních veličin*. Praha: Český normalizační institut.
- [19] ČSN EN ISO 7730. *Mírné tepelné prostředí. Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [20] DANTEC DYNAMICS. *Planar-LIF Liquid Applications*. Skovlunde, Denmark, 2001.
- [21] *Devices for Lowering the Temperature of a Body by Heat Radiation Therefrom* [patent]. Uděleno 1967. Dostupné z: <http://patimg1.uspto.gov/piw?Docid=03310102&idkey=NONE>
- [22] DEWITT, D. P., NUTTER, G. D. *Theory and practice of radiation thermometry*. New York: Wiley, c1988, xii, 1138 p. ISBN 04-716-1018-6.
- [23] DOEBELIN, By Ernest. *Measurement systems: application and design*. 5. ed. Boston, Mass. [u.a.]: McGraw-Hill Higher Education, 2003. ISBN 978-007-1194-655.
- [24] Textilní vlákna. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/vlakna/index.php?page=14>
- [25] FANGER, P. O. *Thermal comfort: Analysis and applications in enviromental engineering*. Kingsport Press, Inc., 1972. ISBN 07-019915-9.
- [26] FIŠER, J. et al. Measurements of Temperature Patterns in Ventilated Spaces by Novel Measurement Method. *Experimental Fluid Mechanics 2008*. Liberec: TUL, 2008, 36–41.
- [27] HASSANI, V., STETZ, M. Application of infrared thermography to room air temperature measurements. *Proceedings of the ASHRAE Transactions: Part 2*. 1994, 1238–1247.
- [28] HORNIK, K. *Approximation capabilities of multilayer feedback network*. Neural Netw., vol. 4. 1991, 251–257.
- [29] HRUŠKA, F. *Bezdotykové měření střední radiční teploty*. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au010336.pdf>

- [30] HUGNES, J. *Velká obrazová všeobecná encyklopedie*. 1. vyd. Praha: Svojtka and Co., 1999, 792 s. ISBN 80-723-7256-4.
- [31] Hydrosens Instruments. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.hydrosens.com/en/home.html>
- [32] Chemical Imaging: Potential New Crime Busting Tool. [online]. Journal of Analytical Chemistry, 2007 [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/08/070802103435.htm>
- [33] CHRZANOWSKI, K., SZULIM, M. *Measure of the influence of detector noise on temperature-measurement accuracy for multiband infrared systems*. *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 22. 1998, 5051–5057.
- [34] CHUDÝ, V. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [35] INCROPERA, F. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: Wiley, 1996, xxiii, 886 s. ISBN 04-713-0460-3.
- [36] Infračervená spektroskopie. [online]. Praha: Vysoká škola Chemicko – technologická v Praze [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>
- [37] JALBERT, A. M. *A Study of Quantitative Concentrations of Hydroxyl (OH) in Laminar Flat Flames Using Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)*. ProQuest. UMI Dissertation Publishing, 42 s. ISBN 978-1249084198.
- [38] JANČÍK, L., BAŠTA, J. Termovizní vizualizace teplotního pole neizotermního vzdušného proudu. FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/vetrani-a-klimatizace/termovizni-vizualizace-teplotniho-pole-neizotermniho-vzdušneho-proudu-2710.html>
- [39] JANEČKA, J. Hodnocení tepelného stavu prostředí. *AUTOMA* [online]. 2008 [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38112.pdf>
- [40] JENOPTIK. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.jenoptik-los.de/>
- [41] JÍCHA, M. *Počítačové modelování úloh vedení tepla a proudění*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1991, 121 s. ISBN 80-214-0364-0.
- [42] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [43] John Logie Baird. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: http://wikipedia.infostar.cz/j/jo/john_logie_baird.html
- [44] Kalman Tihanyi. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/tihanyi.html>
- [45] KAPLAN, H. *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. 3rd ed. Bellingham, Wash.: SPIE Press, c2007, xxiii, 166 p. ISBN 08-194-6723-5.
- [46] KAPLINSKY, M., LI, J., MCCAFFREY, N., KOSONOCKY, W., HOU, E., RAVINDRA, N. Multi-wavelength Imaging Pyrometer for non-contact temperature monitoring. *1st Meeting on Transient Thermal Processing Techniques in Electronic Materials at the 1996 TMS Annual Meeting Location*. Anaheim, 1996, s. 125-132.
- [47] KHAN, M. A. *Noncontact temperature measurement*.: I. Interpolation based techniques. *Rev. Sci. Instr.*, vol. 62, no. 2. 1991, 392–402.
- [48] KISEL', D. Bezdotykové meranie teploty: IR teplomery Testo 830 (2). [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2004-09-41_42.pdf
- [49] Kvalita vnitřního prostředí a měření jejích parametrů. STIEBEL ELTRON. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/vetrani-a-klimatizace/kvalita-vnitřniho-prostredi-a-mereni-jejich-parametru-2920.html>
- [50] LANDSKILDE, G., ALEXANDERSEN, K., WYON, D., FANGER, P. O. Mental performance during slight cool or warm discomfort. *Archives of Science and Physiology* 27 (4). 1973, 511–518.
- [51] MALÁSEK, L. *Výzkum zesíleného štěrbínového odsávacího systému*. Brno. Dizertační. VUT v Brně.
- [52] MALDAGUE, X. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: Wiley, 2001, xix, 684 p. ISBN 04-711-8190-0.
- [53] MALPASS, D. B. *Introduction to industrial polyethylene: properties, catalysts, processes*. Hoboken, N. J. Wiley, c2010, xvii, 133 p. ISBN 04-706-2598-8.
- [54] MANDELL, M. Thermographic camera. [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: http://www.amdjournal.com/wiki/pedia.aspx?u=Imaging_infrared
- [55] MARTINEC, T. *Měření teplotních polí pomocí kontaktních metod měření*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. 146 s. Dizertační práce. Technická univerzita Liberec.

- [56] MAZIKOWSKI, A., CHRZANOWSKI, K. *Non-contact multiband method for emissivity measurement*. *Infrared Phys. Technol.*, no. 44. 2003, 91–99.
- [57] MCDANIEL, G. W., ROBINSON, D. Z. *Thermal Imaging by Means of the Evaporograph*. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-1-3-311>
- [58] MELOUN, M., MILITKÝ, J. *Statistické zpracování experimentálních dat: sbírka úloh (s disketou)*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1996, 308 s. ISBN 80-7194-075-5.
- [59] MOSHFEGH, B., SANDBERG, M. Visualization and measuring of air temperatures using infrared thermography. *Proceedings of the ROOMVENT: Vol. 1*. Elsevier: Oxford, 2000, 339–347.
- [60] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. In: *361/2007 Sb.* 2007. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-vlady-c-361-2007-sb-kterym-se-stanovi-podminky-ochrany-zdravi-pri-praci>
- [61] NEELY, A. J., YOUNG, J. Upstream Influence of a Porous Screen on the Flow Field of a Free Jet. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference*. 2007, 174–179.
- [62] NEELY, A. J. Mapping temperature distributions in flows using radiating high-porosity meshes. *Exp Fluids*, 45. 2008, 423–433.
- [63] Nicolet 380 FTIR. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://ssuscience.com/ftir/ftir.html>
- [64] Nízko hustotní polyethylen (LDPE). PETROLEUM. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/ldpe.aspx>
- [65] *Noktovize* [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Noktovizor>
- [66] PAINTER, L. R., ARAKAWA, E. T., WILLIAMS, M., ASHLEY, W. Optical Properties of Polyethylene: Measurement and Applications. *Radiation Research*, Vol. 83, No. 1. 1980, s. 1-18.
- [67] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E. Rozbor parametrů ovlivňujících změny povrchových teplot stavebních konstrukcí budov. *Strojárstvo/Strojirenství*. 2009, No.mimoriadne, s. 197-200, ISSN 1335-2938
- [68] PAVELEK, M., JANOTKOVÁ, E. *Teorie a praxe termovizních měření*. Brno: Testo, 2008. 49 s.
- [69] PAVELEK, M. *Termomechanika*. Vyd. 3. přeprac. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-2409-5.
- [70] PAVELEK, M. Termomechanika: Přenos tepla zářením. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19_Zareni.pdf
- [71] PEŠEK, M. Využití termografie v lékařství. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brno/prezentace-doktorandu/ing-martin-pesek-vyuziti-termografie-v-lekarstvi>
- [72] PLIF - Planar Laser- induced fluorescence. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: http://www.velocimetry.net/plif_principles.htm
- [73] Polyethylene. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://people.csail.mit.edu/jaffer/FreeSnell/polyethylene.html>
- [74] Polypropylén. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Polypropyl%C3%A9n>
- [75] Polypropylen. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.reisenthel.cz/polypropylen.php>
- [76] Poor Circulation Images Infrared Heat. [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://www.warm-mouse-heated-keyboard.com/poor-circulation-images-infrared-heat-pg-143.htm>
- [77] PRATT AND WHITNEY AIRCRAFT GROUP EAST HARTFORD CT. *Determination of the Emissivity of Materials*. PN, 1962.
- [78] Prorevize. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.prorevize.cz/termodiagnostika> 16
- [79] Radiační teploměr Testo 830-T1: Návod k použití. [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: http://marcomplet.cz/docs/Testo/testo_830_T1_T2_n%C3%A1vod.pdf
- [80] Radial basis function. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Radial_basis_function
- [81] Radial Basis Functions: Theory and Implementations. [online]. University of Gessien. 2003, s. 1-14 [cit. 2013-07-07]. ISBN: 0 521 63338 9. Dostupné z: <http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam033/2002034983.pdf>
- [82] Radiation shielding viewing window for hospital and laboratory (lead glass). *MedicalExpo* [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.medicalexpo.com/prod/a-fabco-inc/radiation-shielding-viewing-windows-for-hospitals-and-laboratories-lead-glass-78066-475872.html>
- [83] ROGALSKI, A. *Infrared detectors*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor, c2011, xxi, 876 p. ISBN 978-142-0076-714.

- [84] RUMFORD, B. *An enquiry concerning the nature of heat, and the mode of its communication*. London: Royal Society of London, 1804.
- [85] SHAM, J. *INFRARED FLASH THERMOGRAPHY (FT) FOR BUILDING DIAGNOSIS Detection of surface cracks, subsurface defects and water-paths in building concrete structures*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. ISBN 978-363-9189-636.
- [86] SCHMALZ, H., THERMAL SURVEYS, Inc. *Methods of infrared visualization of air flow* [patent]. US5127264 A, 07/702,409. Uděleno 7. červenec 1992. Zapsáno 1991. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US5127264>
- [87] SIMPSON, R. L. *Aspekt of turbulent boundary layer separation*. USA, 1995
- [88] SPRAT, T. *The History of the Royal-Society of London: for the Improving of Natural Knowledge*. London: HardPress Publishing, 2012, 472 s. ISBN 978-1290376686.
- [89] SUN, X., DAI, J., CONG, D., ZHE, Z. *Study of multi-wavelength thermometry based on neural network model*. *Infrared Millim. Waves*, vol. 20, no. 2. 2001, 151–153.
- [90] SZERUDA, R. Bezdotykové měření teploty ve válcovnách oceli. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.szeruda.cz/attachments/article/87/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20teploty%20ve%20v%C3%A1lcovn%C3%A1ch.pdf>
- [91] SZERUDA, R. Možnosti stanovení koeficientu emisivity materiálu. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://www.szeruda.cz/index.php/pyrometrie/zaklady-pyrometrie/82-vztahy-provypocet-emisivity>
- [92] SZERUDA, R. Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiačním pyrometrem. [online]. [cit. 2013-06-30]. Dostupné z: <http://pyrometrie.sweb.cz/Zaklady.htm#219>
- [93] Tepelný stav prostředí. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/vozidla/Ka05-01.htm>
- [94] Tepelný stav prostředí. *Vysoké učení technické v Brně: Odbor termomechaniky a techniky prostředí* [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/vozidla/Ka05-01>
- [95] Teplovzdušný konvektor: SCF 2003. [online]. [cit. 2013-07-01]. Dostupné z: <http://www.sencor.sk/teplovzduzny-konvektor/scf-2003>
- [96] Teplovzdušný ventilátor: Cata Empire TH 5000. [online]. [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: <http://teplovzduzne-ventilatory.heureka.cz/cata-empire-th-5000/specifikace/#section>
- [97] Termočlánky OMEGA. [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/literature/>
- [98] Textilní vlákna. [online]. [cit. 2013-07-03]. Dostupné z: <http://www.skolertextilu.cz/vlakna/index.php?page=14>
- [99] Thermography. *InfraTec* [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://www.infratec.de/en/thermography/infrared-camera/industrial-thermal-cameras.html>
- [100] Thermography. *Mensuro: Flying machines* [online]. [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://mensuro-aero.com/thermography>
- [101] TRUKSA, L. *Měření střední radiační teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, 43 s.
- [102] TSILINGIRIS, P. T. Comparative evaluation of the infrared transmission of polymer films. *Energy Conversion and Management: Volume 44, Issue 18*. 2003, s. 2839-2990.
- [103] TUBBS, L., GASPAROVIC, R. F., EMMONS, G. Measured spatial variations of transmittance and emissivity of infrared windows. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA Volume: 65: Issue: 10*. 1975, s. 1162-1169.
- [104] TURNER, J. F. *Chemical imaging and spectroscopy using tunable filters: Instrumentation, methodology, and multivariate analysis*. USA, 1999. 286 s. Doctoral thesis. UNIVERSITY OF PITTSBURGH.
- [105] VDOLČEK, F. Nejistoty nepřímých měření. *Měřicí technika* [online]. Automa. 2001 [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120128.pdf>
- [106] VDOLČEK, F. Zdroje nejistot a chyb při měření v provozech. *Měřicí technika* [online]. Automa. 2003 [cit. 2013-07-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au010354.pdf>
- [107] YANG, C., YU, Y., ZHAO, D., ZHAO, G. *Study on modeling of multispectral emissivity and optimization algorithm*. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Volume 17. 2006, s. 238-242.
- [108] YUNG, R. M., GOODY, Y. L. *Atmospheric radiation: theoretical basis*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1995. ISBN 978-019-5102-918.

11 Vlastní publikace

PEŠEK, M., PECH, O. The determination of field usability of method measuring temperature fields in the air using an infrared camera. In *Experimental fluid mechanics* 2013. Kutná Hora: Technical University of Liberec, 2013. Přijato k publikování.

PEŠEK, M. The temperature fields measurement of air in the car cabin by infrared camera. In *Experimental fluid mechanics* 2012. Hradec Králové: Technical University of Liberec, 2012. s. 566-571. ISBN: 978-80-7372-912- 7.

PEŠEK, M., PAVELEK, M. *The temperature fields measurement method in the air in small closed spaces using an infrared camera*. ICCCS 2012 International symposium on contamination control. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich, 2012. s. 43-43.

PEŠEK, M., PAVELEK, M. *The measuring of temperature fields in two and three dimensional airflows using an infrared camera*. Journal of QIRT. Naples, Italy: University of Naples, 2012. s. 1085-1091. ISBN: 9788890648441.

PEŠEK, M., PAVELEK, M. Measurement of temperature fields in 3D airflows using an infrared camera. In *31. setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 181-184. ISBN: 978-80-214-4529- 1.

PEŠEK, M., PAVELEK, M. Determination of needed parameters for measuring temperature fields in air by thermography. In *Experimental fluid mechanics* 2011. Jičín: Technical University of Liberec, 2011. s. 888-892. ISBN: 978-80-7372-784- 0.

PEŠEK, M., PAVELEK, M. Určování statických a dynamických vlastností metody pro měření teplot vzduchu pomocí termovize. In *Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky* 2010. s. 227-230. ISBN: 978-80-248-2244- 0.

JAROŠ, M., PEŠEK, M. Energetická a ekonomická efektivita vytápění rodinného domu tepelným čerpadlem. *Strojárstvo/ Strojirenství*, 2009, roč. 2009, č. mim. júnové, s. 201-203. ISSN: 1335- 2938.

PEŠEK, M., PAVELEK, M. uzavřené prostory; *Zařízení pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu uvnitř malých prostorů*. FSI VUT v Brně Technická 2, Brno, A2/ 301. URL: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/vysledky-vyzkumu>. (funkční vzorek)

PEŠEK, M., PAVELEK, M., FIŠER, J., MLČÁK, R. Měření 3D teplotních polí; *Zařízení pro měření teplotních polí ve 3D neizotermních vzduchových proudech pomocí termovize*. FSI VUT v Brně Technická 2, Brno, A2/ 301. URL: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vysledkyvyzkumu/>. (funkční vzorek)

PEŠEK, M., PAVELEK, M. Měření 2D teplotních polí; *Zařízení pro měření teplotních polí ve 2D neizotermních vzduchových proudech pomocí termovize*. FSI VUT v Brně Technická 2, Brno, A2/ 301. URL: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vysledkyvyzkumu/>. (funkční vzorek)

12 Seznam použitých veličin

a_λ	[-]	Spektrální absorbtance
a	[-]	Absorbtance
a	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Součinitel teplotní vodivosti
A	$[m \cdot s^{-1}]$	Konstanta při výpočtu operativní teploty
A	$[m^2]$	Vnitřní plocha měřicího rámu
$a \times b$	$[m \times m]$	Velikost archu pomocného materiálu, velikost rámu měřicí sítě
B	$[m^2]$	Plocha měřicích terčů a lanek
Bi	[-]	Biotovo číslo
c_1	$[W \cdot m^2]$	Planckova konstanta c_1
c_2	$[K \cdot m]$	Planckova konstanta c_2
c	$[m]$	Rozsah výšky stojanu
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost světla
C	$[J \cdot K^{-1}]$	Tepelná kapacita
c_p	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
d	$[m]$	Průměr
$d \times t$	$[m \times m]$	Rozměry tyčí v měřicím rámu
e, f	$[m]$	Rozteč měřicích terčů
E	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku šedého tělesa
E_c^*	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku od měřeného materiálu po průchodu prostředím mezi materiálem a kamerou, hustota zářivého toku při snímání povrchu materiálu opatřeného nástřikem skrze průzor
E_{c2}^*	$[W \cdot m^{-2}]$	Součet hustot zářivého toku od měřeného materiálu po průchod prostředím
E_{c2K}^*	$[W \cdot m^{-2}]$	Výsledná hustota zářivého toku mezi měřeným objektem a kamerou
E_{R1}^*	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku odraženého z okolí
E_{R2}^*	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota odraženého zářivého toku okolních ploch z vnějšího prostředí
E_z^*	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota zářivého toku procházející skrz měřený materiál z pozadí
$E_{0\lambda}$	$[W \cdot m^{-3}]$	Spektrální hustota zářivého toku černého tělesa
E_1	$[W \cdot m^{-2}]$	Vlastní hustota zářivého toku měřeného objektu
E_2	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku po průchodu průzorem
E_c	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku v uzavřeném prostoru před průzorem
E_{c1}	$[W \cdot m^{-2}]$	Součet hustot zářivého toku od měřeného materiálu
E_{CR}	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku odražené od průzoru
E_{cs}	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota tepelného toku materiálu opatřeného nástřikem Mikron High Temp Test Paint
E_L	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota zářivého toku mezi měřeným materiálem a termovizní kamerou
E_m	$[W \cdot m^{-2}]$	Vlastní hustota zářivého toku měřeného materiálu
E_0	$[W \cdot m^{-2}]$	Intenzita vyzařování dokonalého zářiče, hustota záření dokonalá černého tělesa
E_λ	$[W \cdot m^{-2}]$	Spektrální intenzita záření
$E_{\lambda 0}$	$[W \cdot m^{-2}]$	Spektrální intenzita vystupujícího záření
$E_{\lambda L}$	$[W \cdot m^{-2}]$	Spektrální intenzita vstupujícího záření

$F_{r1} \dots F_m$	[-]	Poměry osálení okolních ploch
g	[m]	Rozměr měřicího terče
$\text{grad}T$	[K·m ⁻¹]	Největší změna teploty
h	[m]	Výška
k	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]	Konstanta odpovídající rozsahu vlnových délek pro termovizní kameru Jenoptik VarioCAM
k	[-]	Konstanta kulového teploměru
L	[m]	Vzdálenost mezi měřeným objektem a termovizní kamerou, tloušťka
L_c	[m]	Vzdálenost, charakteristický rozměr tělesa
n	[-]	Teplotní exponent ve zvoleném rozsahu vlnových délek
P_1, P_2	[W]	Příkon
\vec{q}, \dot{q}	[W·m ⁻²]	Hustota tepelného toku
\dot{Q}	[W]	Tepelný tok, zářivý tok
\dot{Q}_a	[W]	Pohlčený zářivý tok
\dot{Q}_r	[W]	Odražený zářivý tok
\dot{Q}_t	[W]	Průchozí zářivý tok
r	[-]	Reflektance
r_b	[m]	Rozptyl teplotního pole v archu pomocného materiálu (bavlna)
R_{cl}	[m ² ·K·W ⁻¹]	Tepelný odpor oblečení
r_m	[-]	Reflektance povrchu pomocného materiálu
R_{TP}	[m]	Rozptyl teplotního pole
r_D	[-]	Rozlišení přístroje
r_L	[-]	Reflektance prostředí
r_P	[-]	Reflexe radiační teploty z vnějšího prostředí, reflektance průzoru
r_P	[m]	Rozptyl teplotního pole v archu pomocného materiálu (papír)
S	[m ²]	Povrch tělesa, plocha
$S_1 \dots S_n$	[m ²]	Okolní plochy
t	[K], [s]	Transmitance, čas
T	[K]	Teplota objektu
T_0	[K]	Počáteční teplota v čase t_0
T_1, T_2	[K]	Radiační teploty
$T_1 \dots T_n$	[K]	Absolutní teploty povrchů okolních ploch
T_∞	[K]	Teplota tekutiny, teplota okolí, teplota povrchu pomocného materiálu
T_a	[K]	Absolutní teplota vzduchu
T_B	[K]	Skutečná teplota materiálu
T_L	[K]	Teplota prostředí
T_g	[K]	Teplota kulového teploměru s průměrem d
t_L	[-]	Transmitance prostředí
$T_{m\epsilon}$	[-]	Teplota povrchu měřeného materiálu opatřeného speciálním nástřikem
$T_{m\epsilon p}$	[-]	Teplota materiálu opatřeného nástřikem snímána skrze průzor
t_m	[-]	Transmitance materiálu
T_m	[K]	Teplota na povrchu tělesa, referenční teplota, teplota povrchu měřeného materiálu

T_{mF}	[K]	Teplota materiálu snímána skrz průzor
t_o	[°C]	Operativní teplota
t_p	[-]	Transmitance průzoru
T_p	[K]	Teplota průzoru
t_{pr1}, t_{pr2}	[K]	Radiační teploty sousedních ploch
T_R, T_r	[K]	Střední radiační teplota okolního prostředí
\bar{t}_r		
T_{R1}	[K]	Střední radiační teplota v malém uzavřeném prostoru
T_{R2}	[K]	Střední radiační teplota vně uzavřeného prostoru
T_S	[K]	Teplota okolí
$T_{stř}$	[K]	Teplota uvnitř tělesa
T_S^{n-1}	[K]	Střední teplota mezi přístrojem a radiačním teploměrem
T_{TC}	[K]	Teplota z termočláčku
T_{TK}	[K]	Teplota termovize
T_u	[%]	Intenzita turbolence
T_w	[K]	Počáteční teplota v čase $t > 0$
T_z	[K]	Teplota pozadí
t_λ	[-]	Spektrální transmitance částečně průteplivého prostředí
u	[-]	Chyba udávána výrobcem použitého zařízení
V	[m ³]	Objem tělesa
w	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění vzduchu
x	[m]	Vzdálenost
y^*	[-]	Předpokládaná správná hodnota
y	[-]	Naměřená hodnota
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
δ	[m]	Tloušťka materiálu
ε	[-]	Emisivita
ε	[-]	Absolutní nejistota měření
ε_λ	[-]	Spektrální emisivita částečně průteplivého média
ε_i	[-]	Aritmetický průměr naměřených emisivit
ε_L	[-]	Emisivita prostředí
ε_m	[-]	Emisivita povrchu měřeného materiálu
ε_p	[-]	Emisivita průzoru
$\Delta\tau_0$	[s]	Výsledná nejistoty měření časové konstanty
$\Delta\tau_{0i}$	[s]	Dílčí nejistoty měření časové konstanty
ΔT	[K]	Rozdíl teplot
Δt_{pr}	[K]	Asymetrie radiační teploty
η	[-]	Relativní nejistota měření
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost
λ	[m]	Vlnová délka
λ_{max}	[m]	Vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku maximální při dané teplotě
ρ	[kg·m ³]	Hustota materiálu
σ, σ_0	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmannova konstanta
$\bar{\sigma}_\varepsilon$	[-]	Nejistota stanovení emivity pomocného materiálu
$\bar{\sigma}_1$	[-]	Nejistota měřicího přístroje
$\bar{\sigma}_2$	[-]	Nejistota čtení displeje (nejistota zaokrouhlení)
$\bar{\sigma}$	[-]	Směrodatná nejistota

$\overline{\sigma}_m$	[-]	Směrodatná nejistota měřicí metody
$\overline{\sigma}_t$	[-]	Nejistota stanovení transmittance průzoru
$\overline{\sigma}_{T_{TC}-T_R}$	[K]	Směrodatná chyba měření termočlánkem a radiačním teploměrem
$\overline{\sigma}_{T_{TK}-T_R}$	[K]	Směrodatná chyba měření termovizní kamerou a radiačním teploměrem
τ_0	[s]	Časová konstanta
κ_λ	[m ⁻¹]	Koeficient spektrální absorpce v homogenním prostředí

13 Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Systém PLIF [73]
Obr. 3.1 Spektrum elektromagnetického záření [22]
Obr. 3.2 Princip zobrazení noktovizorem [31]
Obr. 3.3 Model KR-1 Evaporograph [57]
Obr. 3.4 Termogram dívky držící sklenici se studenou vodou z přístroje Evaporograph [57]
Obr. 3.5 Zánět šlachově vazivového aparátu [76]
Obr. 3.6 Kontrola tepelných úniků panelového domu
Obr. 3.7 Termogram dvou radiátorů během začátku vytápění [70]
Obr. 3.8 Kontrola povrchových teplot v bioplynové stanici Litomyšl
Obr. 3.9 Kontrola činnosti soustavy kompresorů chladicího zařízení [51]
Obr. 3.10 Letecký snímek kontroly stavu zralosti obilných lánů [100]
Obr. 4.1 Šíření tepelného toku vedením v archu pomocného materiálu
Obr. 4.2 Aproximace proporcionální soustavou 1. řádu [69]
Obr. 4.3 Planckův vyzařovací zákon [68]
Obr. 4.4 Termovizní kamera VarioCAM rozlišením 320 x 240 obrazových bodů s rozsahem vlnových délek 8 až 13 μm (vlevo) [40] a termovizní kamera VarioTHERM s rozlišením 640 x 512 obrazových bodů a s rozsahem vlnových délek 2 až 5 μm (vpravo) [99]
Obr. 4.5 Schéma termovizní kamery s rozkladem obrazu a s externě chlazeným detektorem [68]
Obr. 4.6 Závislost exponentu na teplotě v rozsahu vlnových délek 8 až 13 μm [67]
Obr. 4.7 Uspořádání objektů při termovizním měření neprůteplivého tělesa v dokonale průteplivém prostředí [68]
Obr. 4.8 Uspořádání objektů při termovizním měření neprůteplivého tělesa v částečně průteplivém prostředí [68]
Obr. 4.9 Grafické znázornění Beerova zákona pro zeslabení spektrální intenzity vstupujícího záření průchodem skrze částečně průteplivé prostředí o tloušťce L [13]
Obr. 4.10 Stanovení minimální velikosti měřeného objektu
Obr. 4.11 Černé těleso realizované formou dutiny v materiálu [91]
Obr. 4.12 Spektrometr Nicolet 380 [63]
Obr. 4.13 Radiační teploměr Testo 830-T1 [80]
Obr. 4.14 Kulový teploměr [49]
Obr. 4.15 Využití ochranného průzoru při lékařském vyšetření [82]
Obr. 4.16 Hodnoty transmitance polyethylenové HDPE (high density polyetylen) fólie tloušťky 0,05 mm s vyznačením rozsahu vlnových délek pro termovizní kameru Jenoptik VarioCAM [73]
Obr. 4.17 Uspořádání objektů při termovizním měření skrz průzor
Obr. 5.1 Fotografie zařízení při měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery vč. získaného termogramu z měření
Obr. 5.2 Fotografie zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery a měřicích terčů
Obr. 5.3 Měření emisivity materiálu
Obr. 5.4 Termogram získaný z měření emisivity
Obr. 5.5 Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení
Obr. 5.6 Fotografie různých druhů teplovzdušných ventilátorů
Obr. 5.7 Fotografie zařízení pro měření časové konstanty

- Obr. 5.8 Fotografie a termogram měřicího bodu č. 2
- Obr. 5.9 Stanovení časové konstanty pro měřicí bod č. 2 pro bavlněný textil 145 g/m² a rychlost proudění vzduchu $w = 2,63$ m/s
- Obr. 5.10 Závislost časové konstanty na rozdílu teplot a rychlosti proudění vzduchu pro bavlněný textil
- Obr. 5.11 Závislost časové konstanty na rozdílu teplot a rychlosti proudění vzduchu pro kancelářský papír
- Obr. 5.12 Fotografie zařízení pro měření transmitance fólie
- Obr. 5.13 Fotografie zařízení pro měření transmitance fólie s ovlivněním teplým proudem vzduchu (druhá varianta měření)
- Obr. 5.14 Vyhodnocování měření transmitance pro stavební zakrývací fólii v první variantě měření při teplotě ocelové desky 55,88 °C
- Obr. 5.15 Vyhodnocení termogramu rozšíření teplotního pole v bavlněném archu pomocného materiálu v ustálené podobě po 10 vteřinách
- Obr. 5.16 Vyhodnocení termogramu rozšíření teplotního pole v papírovém archu pomocného materiálu v ustálené podobě po 10 vteřinách
- Obr. 5.17 Model zjednodušené geometrie pro stanovení rozšíření teplotního pole v archu pomocného materiálu
- Obr. 5.18 Vyhodnocení matematické simulace rozšíření teplotního pole r_b v bavlněném archu pomocného materiálu v ustáleném stavu po 10 s
- Obr. 5.19 Vyhodnocení matematické simulace rozšíření teplotního pole r_p v papírovém archu pomocného materiálu v ustáleném stavu po 10 s
- Obr. 5.20 2D zobrazení oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize – kancelářský papír
- Obr. 5.21 2D zobrazení oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize – bavlněný textil
- Obr. 6.1 Laboratorní sestava pro určování časové konstanty metody
- Obr. 6.2 Schéma zařízení pro měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery
- Obr. 6.3 Vizualizace proudu pomocí měřicí sítě s terči
- Obr. 6.4 Měřicí rám včetně jeho řezu v detailu
- Obr. 6.5 Fotografie měřicích terčů a jejich rozmístění
- Obr. 6.6 Schéma zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu pomocí termovizní kamery a měřicích terčů
- Obr. 6.7 Fotografie zařízení pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu v kabině automobilu skrz průzor
- Obr. 6.8 Fotografie umístění celistvého pomocného materiálu při měření 2D neizotermního vzduchového proudu
- Obr. 6.9 Termogram z měření 2D neizotermního proudu vzduchu v zadní části automobilu
- Obr. 6.10 Fotografie vyrobené měřicí sítě pro měření 3D vzduchových proudů v kabinách automobilů
- Obr. 8.1 Fotografie zasedací místnosti s instalovanou chladicí jednotkou Sinclair
- Obr. 8.2 Fotografie sestavy pro měření 2D teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery od vzduchotechnické vyústky v kancelářských prostorech
- Obr. 8.3 Originální termogram z měření teplotního pole ve vzduchu pomocí termovizní kamery od klimatizační jednotky v kancelářském prostoru
- Obr. 8.4 Vyhodnocení rozložení teploty v ose proudu a stanovení úhlu výstupu chladného vzduchu

- Obr. 8.5 Vyhodnocení procentuálního podílu nespokojených lidí
- Obr. 8.6 Fotografie zařízení pro termovizní měření teplotních polí ve vzduchu v kabině automobilu skrz průzor
- Obr. 8.7 Umístění měřicí sítě pro měření 3D neizotermních vzduchových proudů v kabině automobilu na předním sedadle spolujezdce
- Obr. 8.8 Termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy sedadla spolujezdce s vyznačením oblasti hlavy spolujezdce
- Obr. 8.9 Termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy automobilu
- Obr. 8.10 Upravený termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy sedadla spolujezdce s vyznačením umístění hlavy spolujezdce
- Obr. 8.11 Upravený termogram z měření 3D neizotermních proudů vzduchu v přední části automobilu v místě osy automobilu

14 Seznam použitých tabulek

- Tab. 5.1 Emisivity zkoumaných materiálů
- Tab. 5.2 Technická data zařízení pro měření emisivity materiálu a stanovení jejich celkových směrodatných nejistot měření $\bar{\sigma}$ [40, 78, 95]
- Tab. 5.3 Vypočtené nejistoty měření pro nejvhodnější pomocné materiály pro měření teplotních polí ve vzduchu termovizní kamerou - běžný kancelářský papír a bavlněný textil
- Tab. 5.4 Zkoumané typy průteplivých materiálů
- Tab. 5.5 Výsledky měření transmitance průteplivých materiálů pro první opakování (výsledná transmitance folie t_p je provedena ze všech třech opakování)
- Tab. 5.6 Tabulka statických vlastností pomocných materiálů pro stanovení rozšíření teplotního pole
- Tab. 5.7 Tabulka oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize pro časovou konstantu menší než 8 s
- Tab. 6.1 Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí ve 2D proudu vzduchu
- Tab. 6.2 Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí ve 3D proudu vzduchu
- Tab. 6.3 Parametry vyrobeného mobilního zařízení pro měření teplotních polí v malých uzavřených prostorech
- Tab. 7.1 2D zobrazení oblasti použití metody vizualizace a měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovize – bavlněný textil
- Tab. 8.1 Stupnice hodnocení předpokládaného tepelného pocitu dle [19]

15 Příloha - Metodika měření teplotních polí ve vzduchu pomocí termovizní kamery