

TERMOGRAFICKÉ ZJIŠŤOVÁNÍ TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ BUDOV IN SITU (ZJIŠŤOVÁNÍ EMISIVIT A TEPELNÝCH TOKŮ PO- MOCÍ TERMOKAMERY)

Jan Hollan

Ústav technologie stavebních hmot a dílců, FAST, VUT v Brně

Abstract: *Thermography can be used for quantitative assessment of emissivities of different surfaces and of thermal fluxes through the building envelope. Emissivities are easily obtained by imaging surfaces, in which areas of quite different temperatures are reflected, mirror-like or lambertian-like. Relative fluxes from various parts of the building envelope are proportional to the temperature difference from the comparable non-heated surfaces, which are in thermal equilibrium with the surroundings. E.g., window U-values have been compared this way. Absolute fluxes (and U-values, knowing the interior and exterior temperatures) may be obtained by using a further comparison surface which is heated electrically to match the building envelope temperature; this is a method which is yet to be demonstrated.*

Co zobrazuje termokamera

Rychlá odpověď „přece teploty“ je správná jen skoro. Často jde jen o odhady teplot, které se od skutečnosti mohou dost lišit. Veličinou, na niž kamera reaguje, totiž není teplota, ale spíše zář (měřenou ve wattech na metr čtvereční a steradián), a to ještě zář nikoli jako integrál spektrální záře přes všechny vlnové délky, ale jen přes nějaký „filtr“ daný propustností optiky a spektrální citlivostí jednotlivých mikročidel v obrazové rovině. Je to tedy obdoba jasu, kde je „filtr“ daný průběhem citlivosti zraku při denním vidění, tzv. fotopickém. Ve skutečnosti je to ještě komplikovanější, neb na čidla dopadá mnohem více záření ze stěn dutiny, kde jsou umístěna, než přes čočku zvnějšku (nejde-li o kameru, jejíž dutina je chlazená alespoň tekutým dusíkem). Měřenou veličinou je proto vlastně změna ozáření mikročidel oproti stavu, kdy je objektiv zevnitř zakrytý a uplatňuje se jen záření dutiny. Problémem je, že dutina či krytka používaná pro „temný snímek“ se zakrytým objektivem, který se od snímku s objektivem odkrytým nějak odečítá (bez odhadnutého příspěvku krytky) nemá celá stejnou a stálou teplotu; je proto nutno „temné snímky“ (pojem z běžné zobrazovací fotometrie) často opakovat a pro účely s vyššími nároky na přesnost **používat jen snímky pořízené těsně po snímku temném**. Nevyhovující „temný snímek“ se nápadně projeví tím, že teploty objektů na displeji kamery se mění dle toho, kam kameru namíříme (jsou-li uprostřed či na okraji scény). U kamery, již jsem užíval (**FLIR E4** z ústavu, kde jsem doktorandem) se pořizování temného snímku naštěstí pozná akusticky, je slyšet pohyb vnitřní krytky či clony objektivu, kromě toho, že na tu chvíli kamera nesleduje vnější svět. (Výše uvedené vysvětlení ohledně temných snímků je jen mou domněnkou, nikde jsem to nečetl, ale jinak to být asi nemůže.)

Kamery používané pro teploty budov registrují obvykle jen jednu „oktávu elektromagnetického spektra“, v maximálním rozsahu od sedmi do čtrnácti mikrometrů. Je velmi pravděpodobné, že spektrální citlivost v tomto rozsahu není konstantní, ale přinejmenším na jeho okrajích se mění spojitě k nule. Zrovna tato oktáva je volena proto, že v ní je spektrální zář nejvyšší pro veškeré předměty kolem nás, až na ty opravdu horké (a až na bezmračné ovzduší). O jakou oktávu jde, si lze snadno odvodit použitím Wienova posunovacího zákona: Slunce o absolutní teplotě (tzv. efektivní, takové, jako by mělo absolutně černé těleso, kdyby zářilo stejně silně) 5,7 kK září nejvíce v oblasti kolem půl mikrometru, věci s absolutní teplotou dvacetkrát nižší (tj. takovou, jako mají interiéry a exteriéry budov) září nejvíce na vlnových délkách kolem deseti mikrometrů. Takovému budeme říkat **dlohovlnné infračervené záření**.

Výrobci průběh citlivosti kamer buď znají, nebo kamery kalibrují na záření černého tělesa (malého otvoru v mnohem větší dutině známé teploty). V obou případech pak dokáží registrovaný signál udávat v nejjednodušším případě jako tzv. **černou či jasovou teplotu**, tedy takovou, jakou by mělo absolutně černé těleso, které by dávalo stejný signál. Tím „v nejjednodušším případě“ myslím situaci, kdy je v menu kamery nastavena tzv. emisivita rovna jedné. V jiných případech kamery (i dálkové infračervené teploměry) umí udávat i odhad teploty povrchů s emisivitou menší než jedna, které samy září méně, zato se na nich odráží záření z okolí. Rozumné údaje se tak dají získat tehdy, když má celé okolí předmětu konstantní teplotu, kterou do kamery napíšeme (teploměry ji někdy kladou prostě rovnou teplotě sebe samých). Pro vědecké účely je vhodné mít na kameře či teploměru nastavenou vždy emisivitu jednotkovou a černé teploty dodatečně přepočítat na odhad skutečných s uvážením reálných, změřených teplot okolí a jejich rozložení.

Emisivity

materiálů jednotkové nejsou. Naštěstí jsou pro valnou většinu z nich kolem 0,9 – snímek proto vyjadřuje hlavně jejich teplotu, odražené záření z okolí se uplatňuje jen deseti procenty. Výjimky jsou ve stavební praxi jen dvě. Tou hlavní jsou čisté kovové povrchy s emisivitami naopak kolem deseti procent (a odrazivostmi devadesátiprocentními, součet emisivity a odrazivosti je jednička). Podobně se chovají i speciální vrstvy s obsahem kovů, nanášené na sklo či na absorbéry solárních kolektorů. **Běžné přírodní materiály**, ať již dielektrika nebo kovy, mají společnou vlastnost, že **jsou pro dlohovlnné infračervené záření neprostupné**. Jinou výjimkou jsou různé plasty, především čisté uhlovodíky, které jsou dosti prostupné, hlavně v malých tloušťkách. U takových vrstev je třeba brát v úvahu vztah, že až **součet emisivity, odrazivosti a propustnosti je roven jedné** (emisivita je z termodynamických důvodů totožná s absorptivitou, čili pohltivostí).

Nejjednodušší odchylkou od absolutně černého tělesa je **těleso šedé, jehož odrazivost je pro všechny vlnové délky stejná**. Reálné materiály jsou šedé vždy jen přibližně, i když např. dobře vodivé kovy s čistým povrchem mají v celém oboru dlohovlnného infračerveného záření odrazivost vysokou, přes devadesát procent. Jednotlivé minerály mají ale průběh pohltivosti v této oktávě hrbatý, s hodnotami od 0,65 do 0,95. To platí jen pro hladké plochy krystalů, nikoliv písek, ten tak nízké pohltivosti nemá, neb se uplatňují vícenásobné odrazy. Reálné povrchy tak bývají dosti temně šedé; čím hrbatější a poréznější, tím tmavší.

Emisivity povrchů lze zjišťovat IR kamerami a teploměry, i když samozřejmě jen v onom omezeném oboru, v němž měří. Stačí znát skutečnou teplotu povrchů a nechat v nich odrážet povrchy jiné, s teplotou odlišnou.

U lesklých povrchů je to snadné: co se v nich odráží, přímo vidíme (a můžeme to vyfotografovat kamerou obyčejnou i infračervenou). Stačí např. naklonit zkoumanou plochu tak, aby se v ní zrcadlilo vzdálené okno. Když pak okno otevřeme, lesklá plocha zobrazuje exte-

riér jiné teploty. Tu „jinou teplotu“ máme k dispozici v horkém létě (pohledem ze sklepního okénka na sluncem rozpálenou protější zeď), snáze pak v zimě. Vždy pak, když je zataženo tlustou vrstvou oblačnosti, ta je studenější než interiér i krajina venku (kontrolou, je-li oblačnost dost tlustá, je její snímek, na němž nesmí být patrná místa s jinou černou teplotou). Některé povrchy můžeme snadno zahřát na teplotu velmi odlišnou od okolí, nejsnazší je to u nádob, v nichž prostě necháme vřít vodu. (Možností, která je k dispozici téměř vždy, je zobrazit ve zkoumané ploše dostatečně izotermickou část vlastního těla.)

V matných, nezrcadlových površích se ale „zrcadlí“ celý poloprostor. Jediný způsob, jak jednoduše měřit jejich emisivity, je přenést do prostředí s odlišnou teplotou (nejlépe v polystyrénovém obalu) a hned po jejich odkrytí pořídít jejich snímek. Snímek může být i série, aby bylo možné ji extrapolovat k teplotě, kterou měl předmět na počátku.

Problém je, kde najít prostředí s odlišnou, ale všude stejnou teplotou. Vhodný je exteriér se silnou vrstvou oblačnosti a s osvětleností pod sto luxů (jeden lux slunečního záření odpovídá asi setině wattu na metr čtvereční), ještě lepší je vydatná mlha (ale ne tak extrémně hustá, že by hrála roli mezi objektivem kamery a snímanou scénou). Samozřejmě hluboké sklepy a jeskyně, ty ovšem nejsou tak chladné jako zimní krajina. Dobrý by mohl být hustý les.

Snadnou kontrolou konstantnosti černých teplot v celém poloprostoru je pořízení snímku, kdy je celý náraz vidět ve vypuklém zrcadle (např. pokoveném kondenzoru). **Při užití kovové či pokovené koule lze na jediném snímku zobrazit dokonce celý prostor.** Je-li kulové zrcadlo v tepelné rovnováze s okolím, jsou zobrazené teploty dosti věrné, málo ovlivněné nejednotkovou odrazivostí zrcadla (zhruba řečeno, má-li zrcadlo odrazivost 0,90, jsou teplotní rozdíly odražené scény oproti teplotě zrcadla samého jen o desetinu zmenšeny).

Kdybychom registrovali celé spektrum elektromagnetického záření, platil by pro šedá tělesa následující jednoduchý vztah, zobecňující základní podobu Stefanova-Boltzmannova zákona:

$$T_{\text{černá}} = e T_{\text{objektu}}^4 + (1-e) T_{\text{okolí}}^4, \quad (1)$$

e je tzv. emisivita povrchu ($1-e$ je pak jeho odrazivost).

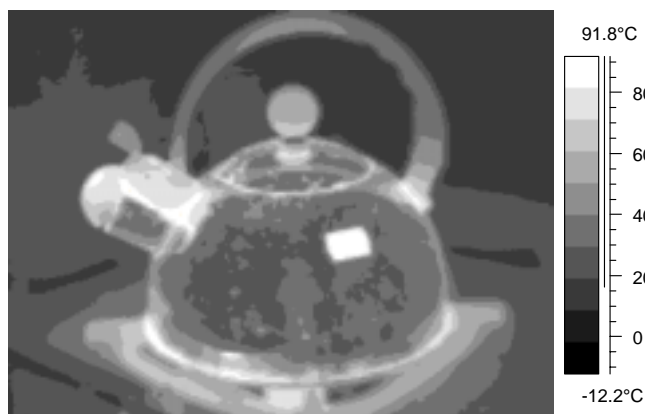
Ve skutečnosti ale registrujeme jen jednu oktávu, a to ještě s neznámým průběhem citlivosti uvnitř ní. Tam už **neplatí, že zaznamenávaný signál je úměrný čtvrté mocnině absolutní teploty.** Na druhé straně je ale možné, že kamery počítají černé teploty s tímto zjednodušujícím, ač neplatným předpokladem, a že tedy emisivity takto vypočtené mohou dobře odpovídat skutečnosti. Kontrolou může být srovnání emisivit zjištěných při různých rozdílech teplot předmětu a zrcadleného okolí – měly by být stejné.

Přesnější měření emisivit kamerou je možné, pokud **zjistíme její spektrální citlivost.** Na to by měl stačit zahřívání keramický váleček a hliníková difrakční mřížka s roztečí vrypů kolem pěti setin milimetru. Tím jsem se zatím v praxi nezabýval, je to ale obdoba měření, kterým jsem kalibroval běžné digitální fotoaparáty (spektrální citlivosti jejich R, G a B pixelů).

Orientační měření jsem provedl pro nerezovou konvici s vroucí vodou, opatřenou v jednom místě papírovou nálepkou. Část povrchu konvice je ještě čistá, lesklá kovová. Na snímku je patrná nízká černá teplota takových částí. Nálepka má naopak černou teplotu blízkou sto stupňům. V konvici se leskne uprostřed má postava, teplejší než okolí, a vlevo od ní pak okno, které je naopak chladnější (v černobílém zobrazení pro tisk toho moc vidět není, pro analýzu se užívá barevné škály roztažené v relevantním rozmezí teplot).

Pro výpočet emisivit jsem použil upravený vztah 1, platný zhruba pro pokojové teploty a deset mikrometrů, kdy místo čtvrté mocniny vystupuje pátá (to je aproximace vyplývající z Planckova vyzařovacího zákona):

$$e = (T_{\text{černá}}^5 - T_{\text{okolí}}^5) / (T_{\text{objektu}}^5 - T_{\text{okolí}}^5) \quad (2)$$



Obr. 1: snímek konvice s vroucí vodou, zobrazeny jsou černé teploty

Nálepka má efektivní teplotu 92.7 °C, konvice u ní 29 °C, odrážející se okolí 17.5 °C. Bereme-li teplotu povrchů 98 °C, pak pro nálepku vyplývá emisivita 0,90 a pro čistý nerez 0,09. (Teplotu povrchů by bylo možné počítat přesněji, dle tepelných odporů na obou stranách rozhraní, tím jsem se nezabýval, zde jde jen o demonstraci metody.)

Dále jsem orientačně měřil emisivitu skla a tzv. tvrdé nízkoemisivní vrstvy na jedné jeho straně. Sklo jsem odnesl ven, což není ideální situace, neb rychle chladlo. S rozumnými předpoklady o chladnutí jsou ale výsledky ve shodě s očekáváním: při teplotě nebe 0.5 °C vychází pro sklo emisivita 0,84 (při jeho odhadnuté skutečné teplotě 16.5 °C a měřené černé teplotě 14,2 °C), pro tvrdou vrstvu nízké emisivity pak 0,09 (při její odhadnuté skutečné teplotě 16.0 °C a měřené černé teplotě 3.6 °C). Takové emisivity jsou ve shodě s očekáváním.

Tepelné toky pláštěm budovy

se na snímcích projeví tím, že plášť se zobrazí jako teplejší než exteriér. Měření není vhodné dělat přes den, není-li opravdu hustě zataženo (osvětlenost zdí by neměla být ani tisíc luxů, plné slunce dává přitom až sto tisíc luxů). Ideální je série hustě zatažených, krátkých podzimních či zimních dnů, kdy se venkovní teplota téměř nemění (může kolísat třeba jen o dva stupně). V okamžiku, kdy je zhruba průměrná, je dobrá chvíle ke snímkování. Velmi vhodné je také bezvětří.

Nalézat na snímcích místa s horší tepelnou izolací je běžné použití termografie. K takovému ani nejsou potřeba nějaké zvláštní meteorologické podmínky, i když termografové dávají přednost časnému ránu, kdy slunce ještě nezačalo hřát.

Zjistit ze snímků nějaké informace o velikostech toků, to je úloha složitější, ač v principu též jednoduchá. Hustoty toků lze v prvním přiblížení brát jako úměrné rozdílu teploty pláště a exteriéru. Konstanta úměrnosti záleží na rychlosti větru. Při naprostém bezvětří může dosahovat pouhých sedmi wattů na metr čtvereční a kelvin, stejně jako na straně interiérové. I když ale konstantu neznáme, můžeme alespoň porovnávat toky různě dobře izolujícími částmi pláště, takové porovnání je u obdobně ovívaných ploch spolehlivé.

Problémem je ovšem, **co to je teplota exteriéru**. Ten není izotermický nikdy, až na případ husté mlhy. I nízká oblačnost je o kelvin či dva chladnější než půda nebo vegetace.

Je jediná cesta, jak problém obejít: plášť budovy porovnávat s povrchy obdobnými, ale nijak nevyhřívány, které jsou v tepelné rovnováze s okolím (plášť budovy v zimě není v rovnováze, ale měl by být pokud možno v ustáleném stavu). Obdobnost povrchů by měla být co největší – jak pokud jde o zrcadlovost, čili hladkost povrchu, tak o jeho emisivitu. **Referenční nevyhřívané povrchy** musí být rovnoběžné s těmi, které na budově zkoumáme, a

musí být v jejich těsné blízkosti, daleko od clonících předmětů (stromů) v okolí. Když to nejde, je jejich referenčních plošek nutno použít více, aby se zjistily rozdíly způsobené jejich různým zastíněním.

Já jsem použil hranol z pěnového polystyrénu o rozměrech jeden krát dva decimetry a tloušťce pět centimetrů. Ze zadní strany byl navíc opatřen hliníkovou fólií, pro snížení zářivé komunikace s budovou. Na jedné polovině vnější plochy byla přilepena skleněná destička tloušťky 2,3 mm.

Hranol jsem stavěl na parapety oken a snímkoval jej spolu s okny. Po instalování takové referenční plošky je potřeba vyčkat, až se dostane do rovnováhy s okolím. Měrná tepelná kapacita metru čtverečního použitého skla by byla asi 6 kJ/K, tok její exponovanou stranou do okolí asi 8 W/(m²K), za jednu minutu se tedy rozdíl teploty oproti okolí sníží o osm procent, za devět minut na polovinu atd. Za hodinu a půl je to na jednu tisícinu, takže i sklo původně teplé dvacet stupňů je po takové době odlišně nejvýše o několik setin kelvinu od teploty rovnovážné.

U snímků zasklení, jako zrcadlících ploch, je důležité, co se v nich zrcadlí. Rozhodující je, aby to bylo v izolovaném sklíčku i v okenní tabuli to stejné, nebo alespoň stejně teplé. Nemělo by to být bezoblačné nebe, neb to má teplotu hodně závislou na úhlové výšce.

Takovým způsobem jsem zaznamenal řadu oken různých typů. Bylo téměř bezvětrí a venkovní teplota byla o dvacet kelvinů nižší než vnitřní teplota. Zaznamenal jsem tak okna zasklená trojvrstvě (hm88tc s kryptonem, říkejme tomu superzasklení, viz obr. 2), dvojvrstvě s povrstvením a argonem, stejně jako dvojsklem primitivním, i okna stará dvojitá. Zobrazené rozdíly teplot okenních tabulí od teploty izolovaného sklíčka se pohybovaly od 1,2 K do čtyř kelvinů, pro okna s nominálními hodnotami U od 0,75 W/(m²K) po 2,8 W/(m²K). **Skutečné rozdíly jsou větší o patnáct procent**, s ohledem na emisivitu skla asi 0,85.

Pro daná okna lze v panujícím takřka bezvětrí čekat hustoty tepelných toků od 15 W/m² do 52 W/m². Je zřejmé, že při takových tocích odpovídají změřené rozdíly teplot koeficientům pro vnějšek budovy vyšším než pro interiér, tedy že i velmi slabé pohyby venkovního vzduchu, kterých jsem si ani nevšiml, hrají zřetelnou roli: vodivost rozhraní pláště-exteriér byla asi 12 W/(m²K), aneb jeho tepelný odpor 0,08 m²K/W.

Ještě poznámku k zasklení dvojitým: ta „tepelně izolační“ měla teplotní rozdíly asi 2,3 K oproti nevyhřívanému sklu, ta nejhorší 4,6 K, tedy dvojnásobně. To je téměř podle očekávání, až na to, že ta „izolační“ dvojskla se zdají mít ne oněch deklarovaných 1,1 W/(m²K), ale spíše o takových deset procent více.

To je ale jen hrubý údaj opírající se o konvenční hodnotu pro neizolační dvojsklo, a v tomto případě dokonce nevyužívající ve všech případech referenční nevyhřívané sklíčko.

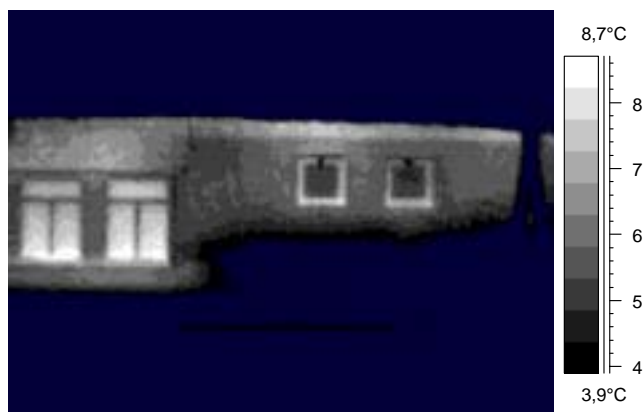
Dospět k údaji přesnějšímu lze až tak, že kromě nevyhřívané plošky, která je v tepelné rovnováze s okolím, se užije i **ploška vyhříváná vhodným příkonem**. Např. pro měření nejlepšího zasklení by to mělo na jeden decimetr čtvereční být jen asi 0,15 W, pro měření starých dvojitých oken asi 0,5 W (za velkých mrazů v extrému až dvojnásobek). Takový výkon snadno poskytne už jeden akumulátor typu AA.

I pokud teplota vyhříváného sklíčka nebude totožná s teplotou okenní tabule, ale teplotní rozdíl oproti nevyhřívanému sklíčku bude tak na třicet procent shodný, bude možné s velmi dobrou přesností tepelný tok oknem spočítat.

Totéž co pro zasklení platí samozřejmě pro celá okna a jiné části pláště. Například rozdíl průměrné teploty okna i s jeho okolím oproti ploškám, které jsou v tepelné rovnováze s exteriérem, je úměrný tepelnému toku touto částí budovy ven (tedy, je-li plášť těsný a neprotéká-li přes něj také teplý vzduch). Je možné jej porovnat s tokem z neprůsvitného pláště neporušeného překlady a nevyhříváného přímo radiátory. Průměrovat ale musíme tak, že užíváme správných referenčních materiálů: skla pro sklo, dřeva pro dřevo, PVC pro PVC a omítky pro omítku. Na druhé straně, hranol z pěnového polystyrénu, který jsem užíval já, může

v nouzi stačit: jeho polovina nepokrytá sklem má vlastnosti podobné jako zmíněné materiály. Je jen potřeba dbát na to, aby taková srovnávací ploška byla vystavena obdobnému exteriéru – např. část stěny více zacloněná stromy a tedy méně vystavená ledovému nebi bude nutně teplejší než část, kterou nebe více ochlazuje. Jiné nehomogenity může do ochlazování pláště přinášet vítr, to jsem ale dosud nezkoumal.

Orientační porovnání tepelných toků různými okenními výplněmi jsme provedli na severní straně budovy planetária. Ukázalo se, že nově instalované výplně s lepším zasklením v úhrnu nepřinesly žádné patrné zlepšení, neb o co lepší jsou dvojskla, o to horší naopak rámy (staré byly tlusté dřevěné, nové jsou tenčí plastové), zabírající značnou část otvoru.... Porovnání zde bylo zvláště snadné, protože průměr teplot byl pro oba typy výplní stejný.



Obr. 2: snímek (vzhůru nohama) starých dvojitých oken a oken se superzasklením

Na obrázku zachycujícím naopak jižní průčelí hvězdárny jsou srovnávací plošky na spodním okraji oken se superzasklením (obrázek je vzhůru nohama, kameru jsme drželi nad hlavou, aby se ve skle odrazil terén, ne obloha). V detailnějším pohledu je vidět, vidět, že polystyrén se jeví chladnější: to je proto, že se v něm neodráží jen terén, jako ve skle, ale v difúzním odrazu se uplatňuje i studené nebe. Záření z nebe se rozptýleně zobrazuje i na stěnách, jen na horním zanořeném rámu okna ne. Pro ten můžeme tedy brát rovnovážnou teplotu stejnou jako pro sklo.

Závěry a poděkování

Termokamerou lze dobře porovnávat tepelné toky různými těsnými částmi budovy, použijí-li se srovnávací plošky stejných odrazných vlastností, ale nevyhřívané z interiéru (či opačně, při snímání zevnitř, neochlazované z exteriéru). Pro nalezení skutečných velikostí toků je v exteriéru vždy nutné navíc použít plošky vyhřívané známým příkonem, aby se obešla nejistota ohledně ochlazování budovy větrem. Pro zjišťování rozložení teplot v poloprostoru, či prostoru doporučuji užívat pokovených kulových zrcadel. Pro přesné výpočty emisivit i termodynamických teplot na základě černých teplot doporučuji zjistit spektrální citlivost kamery (o tyto údaje jsem požádal i výrobce, ale nezávislé měření je beztak potřeba).

Za pomoc při práci a seznamování se s kamerou děkuji kolegovi Jiřímu Zachovi a svému školiteli Stanislavu Šťastníkovvi.

V barevném zobrazení lze najít obrázky uvedené v této stati i další, prezentované na workshopu, v souboru term_tep.pdf na adrese <http://amper.ped.muni.cz/jenik/windows>.