

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

PASIVNÍ DOMY A ZÁŘIVÉ TOKY ENERGIE

PASSIVE HOUSES AND RADIATIVE ENERGY FLUXES

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
OUTLINE OF A PhD THESIS

VĚDNÍ OBOR 36-33-9, FYZIKÁLNĚ MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

AUTOR RNDr. JAN HOLLAN
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Doc. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2009

Obsah

Keywords	3
1 Úvod	3
2 Fungování průhledných tepelně izolujících vrstev	5
2.1 Prostup tepla neprodyšným souvrstvím	5
2.1.1 Součinitel prostupu tepla U	5
2.1.2 Na čem závisí „ u “	6
2.1.3 Konvekce podrobněji	8
2.1.4 Záření k obloze	8
2.1.5 „ U “ vícevrstevných zasklení	9
2.2 Vliv netěsností	10
3 Zjišťování tepelných toků termografií	10
3.1 Obrazy vytvářené termokamerami	11
3.1.1 Odhad tepelných toků z jasových teplot	11
3.1.2 Využití denního světla pro zjištění vlastností oken	11
3.2 Konstrukce elektricky vyhřívané srovnávací plošky	12
4 Vytvoření těsných přepážek z foliových rolet	12
5 Ověření vlastností okenních souvrství	13
5.1 Emitance	13
5.1.1 Příklady měření směrových emitancí	14
5.2 Výpočty skutečných teplot	14
5.2.1 Vhodné zobrazování jasových teplot	15
5.3 Využití vypuklého zrcadla pro snímky velkých prostorových úhlů	15
5.4 Přepočet teplot na tepelné toky	15
6 Závěr	16
6.1 Shrnutí výsledků	16
6.2 Doporučení pro budoucnost	16
7 Glosář	17
Literatura	17
Abstract	20

Klíčová slova

tepelné vlastnosti budov, okna, zářivé toky, infračervená radiometrie termografie, pohyblivé clony, emitance, emisivita, jasová teplota, měření tepelných toků, úspora energie na vytápění, pasivní domy

Keywords

heat protection of buildings, windows, radiative fluxes, infrared radiometry, thermography, movable blinds, emittance, emissivity, luminance temperature, measurement of heat fluxes, heat demand reduction, passive houses

1 Úvod

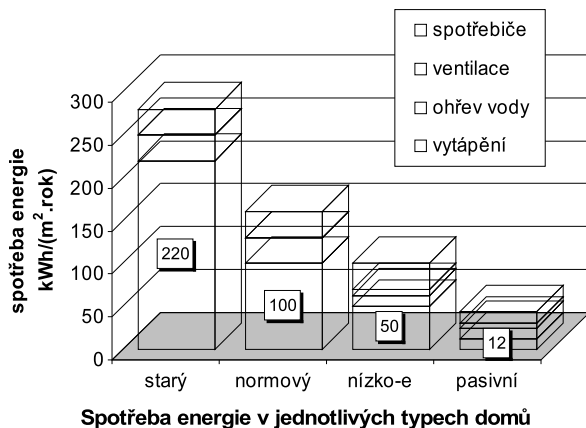
„Pasivní dům je budova, v níž lze dosáhnout tepelné pohody (ISO 7730) samotným dohříváním nebo dochlazováním jen tak velkého proudu přiváděného čerstvého vzduchu, který je žádoucí pro dostatečnou kvalitu vzduchu (DIN 1946)...“ – jde o koncept dosažení maximálního komfortu s nízkými celkovými náklady, viz [5]. Cituji dále autora tohoto konceptu prof. Wolfganga Feista: „Tato definice je čistě funkční, neobsahuje žádné číselné hodnoty a platí pro každé klima. Ukazuje, že nejde o žádný libovolně stanovený standard, ale o fundamentální koncept. Pasivní dům tedy nebyl vynalezen, ale princip pasivního domu byl spíše objeven. Lze se ptát, zdali je název „pasivní dům“ pro takový koncept vhodný. Nuže – žádný lepší neexistuje. Tepelná pohoda se totiž v té míře, jak to vůbec rozumně lze, zajišťuje pasivními opatřeními (tepelnou izolací, zpětným získáváním tepla tam, kde jsou k dispozici teplotní spády, pasivním využitím solárního tepla a vnitřních tepelných zisků).“

Z tohoto konceptu lze pro obytné domy jeden energetický parametr odvodit, totiž horní mez pro topný příkon na jednotku bytové plochy. Kromě objemu vzduchu potřebného pro větrání je dalším parametrem horní mez pro jeho teplotu, která nemá – aby se nesnížila jeho kvalita – překročit 50 °C. Výsledkem je typicky 10 W/m², viz např. [5, 14]. Další uváděné energetické parametry už závisí i na klimatu (roční spotřeba na vytápění) a na dnešních nejlepších technologiích pro jiné oblasti spotřeby; vyplývají spíše z reálně dosahovaných hodnot.

Nejvyšší přípustné měrné hodnoty pro pasivní dům	
normová tepelná ztráta	10 W/m ²
roční spotřeba na topení	15 kWh/m ² a
roční dodávka energie do domu	42 kWh/m ² a
primární energie kvůli tomu uvolněná	120 kWh/m ² a

Tabulka 1: Přehled celkových limitů, které platí pro pasivní domy pro většinu území Německa i Česka. Jde o celkové spotřeby za jeden rok dělené obsahem podlahové plochy, konkrétně tzv. Treated Floor Area [15, str. 54].

Aby větrání zajišťující komfort v budově skutečně fungovalo, musí být ostatní části pláště budovy co možná vzduchotěsné. Horní mezí je hodnota 0,6 h⁻¹, udávající podíl objemu vzduchu, který budovou proteče při tlakovém rozdílu 50 Pa oproti exteriéru, a objemu interiéru. Tato mez se ověřuje tzv. blow-door testem a její ověřování je neobyčejně účinnou



Obrázek 1: Pasivní standard znamená velké snížení spotřeby energie [23]

metodou, jak nalézt vady v provedení stavby. Tisíce budov v Německu a Rakousku tento limit s rezervou splňují.

Jiným limitem, jehož splnění je pro pasivní zajištění tepelné pohody v domech nezbytné, je nejvyšší přípustná měrná tepelná prostupnost oken (spolu s dveřmi jsou to obvykle tepelně nejhůře izolující části pláště budovy). Pro naše klima činí $U_w \leq 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (viz [6]) a lze konstatovat, že u střešních oken zatím není nikdy dosahována. Cestu, jak jí i tam dosáhnout, ve své disertaci popisují.

Úvodní informace o pasivním standardu (který už v samotném Rakousku splňují tisíce budov, viz <http://igpassivhaus.at>) zakončím citací Evropského parlamentu. Jeho *Legislativní usnesení ze dne 31. ledna 2008 o Akčním plánu pro energetickou účinnost: využití možností* v bodě 29 „vyzývá Komisi, aby navrhla jednak závazné požadavky, podle nichž by všechny nové budovy vyžadující vytápění či chlazení musely být od roku 2011 postaveny podle norem pro pasivní domy nebo obdobných norem pro nebytové domy, a jednak požadavek používat pro vytápění a ochlazování od roku 2008 pasivní řešení“ [4].

Více o pasivních domech, vč. příkladů realizací (i českých) viz brožuru Pasivní dům II [15], již jsem editoval a která je volnou přílohou těchto Tezí. V samotném plném textu disertace se k takovému již mnohokrát publikovaným principům nevracím. Ani k porovnávání pasivního standardu s normami atp., jak jsem popsal v textu [14]. Rostoucí množství aktuálních odborných informací o pasivních domech je k dispozici v [7]. Má práce se soustředí na témata související, jejichž vývoj je teprve na počátku. Jde o snížení zimního zářivého ochlazování a přitom zvýšení zářivých zisků, v létě pak o jejich potlačení. Dále se zabývá tím, jak záření využívat i ke zjištění fyzikálních vlastností budovy.

Motivací k tomu je přispět podstatným způsobem k ochraně klimatu, více viz plný text práce http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/okna_disertace.html a [10, 17]. Dnešní budovy se na spotřebě fosilních paliv podílejí celou polovinou, zejména vinou vytápění; lze je ale zlepšit tak zásadně, že tuto spotřebu půjde snadno pokrýt místními nefosilními zdroji.

Zářivé toky udržují díky oknům průměrnou teplotu v domech výrazně vyšší, než je průměrná teplota venku. To je dáno tím, že sklo se vůči těmto dvěma oborům vlnových délek

– slunečnímu a pozemskému – chová zcela jinak. Pro sluneční je téměř úplně průhledné, pro zemské je zcela nepropustné. Dům s okny je tak „tepelnou pastí“. Je pozoruhodné si uvědomit, o kolik je u nás tzv. topná sezóna kratší než ta část roku, kdy venku průměrná Celsiova teplota nedosahuje dvacetí stupňů (ta činí v teplých oblastech Česka asi 330 dní, na Českomoravské vrchovině až 350 dní, [22, str. 44]). Koncept pasivního domu se snaží období, kdy okna nestačí coby hlavní „otopná soustava“, co nejvíce zkrátit. Podstatnou technologií, která k tomu pomáhá, je užívání velmi dobře tepelně izolujících oken. Přesto i v pasivních domech únik tepla okny často dominuje (oproti úniku tepla vedením přes zdi a úniku větráním), zejména pokud jsou okna velkoryse dimenzovaná. To bývá žádoucí nejen kvůli zvýšení solárních tepelných zisků, ale i kvůli komfortu, lepšímu osvětlení pro práci, úsporám elektřiny na svícení [13, 18]. I nejlepší dnešní okna mívají ale na stinné straně domu tepelnou bilanci negativní. Zpravidla se proto volí malá, dimenzovaná jen v míře opravdu nutné pro osvětlení nebo pro výhled.

Získat okna tepelně izolující ještě alespoň dvakrát lépe, než to dokáží technologie, které se již tržně uplatnily, je fyzikálně možné. Vedou k tomu dvě cesty. Jedna je používat evakuovaných okenních souvrství. Druhá je pak užívat pohyblivých odrazných vrstev, kterými se tepelné vlastnosti oken dají dle potřeby zejména v noci, ale někdy i ve dne, podstatně vylepšit. V této disertaci takové realizace popisují, a také metody, jimiž lze zářivé toky energie a tepelně izolační vlastnosti budov studovat.

Většina zde uvedených zjištění, metod a výsledků byla již publikována v časopisech a na odborných konferencích. Text disertace obsahuje řadu hypertextových a křížových odkazů, které jsou funkční v jeho elektronické verzi, http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/okna_disertace.html.

2 Fungování průhledných tepelně izolujících vrstev

2.1 Prostup tepla neprodyšným souvrstvím

2.1.1 Součinitel prostupu tepla U

Sousedí-li spolu dvě prostředí o různých, ale stálých teplotách, oddělaná neprodyšnou přepážkou (rozhraním), prochází touto přepážkou kladný tepelný tok od teplejšího prostředí ke studenějšímu. Koeficient úměrnosti mezi tepelným tokem a součinem obsahu rozhraní a teplotního rozdílu obou prostředí se ve stavební literatuře nyní označuje symbolem U . Je zřejmé, že jeho jednotkou je watt na metr čtvereční a kelvin (např. typickou hodnotou udávanou pro dvojitě okno je $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Tato veličina je ve skutečnosti funkcí $U(T_m)$ střední teploty obou prostředí T_m , a to funkcí zvolna rostoucí, jak vlivem růstu tepelné vodivosti plynů s teplotou, tak vlivem většího vlivu sálání. Při velkém teplotním rozdílu kromě toho roste tepelný tok rychleji než přímo úměrně onomu rozdílu.

V textu této práce užívám i bezrozměrnou veličinu, totiž číselnou hodnotu veličiny U vyjádřenou v základních jednotkách SI, tedy

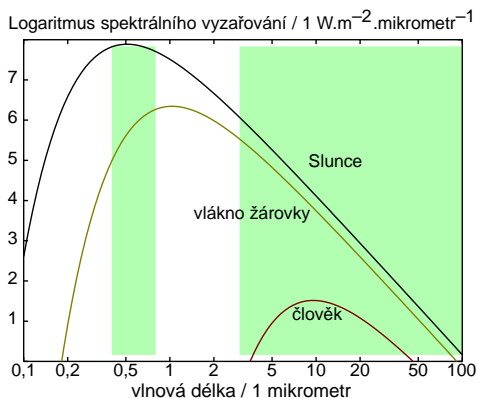
$$u = U/(1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})). \quad (1)$$

Fyzikálně jednoduchý případ souvrství dvojrozměrně (podél rozhraní) homogenního je nekonečná rovinná plocha. Reálná rozhraní nejsou homogenní, v každém případě mají okraje, pro každý takový případ lze ale stanovit nějakou hodnotu u vztaženou na celý

soubor daného typu, např. celého okna vč. rámu a způsobu zabudování do konstrukce jako „poruchy“ tepelných vlastností okolní zdi – tato veličina se u oken označuje jako U_W , viz Glosář. Disertace se nejprve soustřeďuje na tepelné toky „středem homogenního souvrství“, v experimentální části pak zmiňuje i odhady tepelných toků celým oknem jakožto „poruše“ ve zdi.

2.1.2 Na čem závisí „u“

Sklo či plastová fólie poskytuje základní funkci, totiž znemožní proudění vzduchu zvenčí dovnitř, zajistí neprodyšnost rozhraní. Sklo je kromě toho úplnou bariérou pro elektromagnetické záření vlnových délek nad tři mikrometry. Tedy pro ono záření, které vyzařujeme my sami i všechny věci okolo nás. Jde o *dlouhovlnné infračervené záření*, které budeme častěji označovat jen jako *dlouhovlnné záření*, v kontrastu se zářením krátkovlnným, slunečním.



Obrázek 2: „Planckovy křivky“ v logaritmickém zobrazení. Stínováním jsou odleva vyznačeny postupně oblasti ultrafialová, viditelná, infračervená krátkovlnná a dlouhovlnná.

Intenzita vyzařování velmi závisí na teplotě zářícího povrchu, konkrétně je úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty (tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon):

$$E = e\sigma T^4, \quad (2)$$

kde e je tzv. emitance (viz Glosář) daného povrchu (pro sklo je to $e = 0,84$),

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4) \quad (3)$$

je Stefanova–Boltzmannova konstanta a T je absolutní teplota.

Jeden metr čtvereční skla o absolutní teplotě 300 K (27 °C) tak vyzařuje do poloprostoru výkon

$$E = 0,84 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 81 \cdot 10^8 \text{ W} \approx 386 \text{ W}, \quad (4)$$

obě strany skla dohromady pak vyzařují do obou poloprostorů dvojnásobek, téměř osm set wattů. Takovým výkonem se ale sklo neochlazuje, neb na ně dopadá záření zvenčí. Příkon dopadající na metr čtvereční jedné strany skla je obvykle jednoduše σT_{SURR}^4 , tj. okolí

(surroundings) bereme jako černý zářič o teplotě T_{surr} . Měrná (na metr čtvereční) zářivá bilance B jedné strany skla je pak

$$B = e\sigma(T^4 - T_{\text{surr}}^4), \quad (5)$$

protože emitance skla se pro dlouhovlnné záření na něj dopadající uplatní jako absorptance (sklo je pro takové záření nepropustné). Zářivá bilance skla je tak dána rozdílem čtvrtých mocnin teplot.

Ukažme pro představu, o jak velké toky v praxi jde, jeden příklad. Pro realistické teploty skla $T = 283 \text{ K}$ a exteriéru $T_{\text{surr}} = 273 \text{ K}$ (čili bodu mrazu) lze rovnicí 5 psát jako

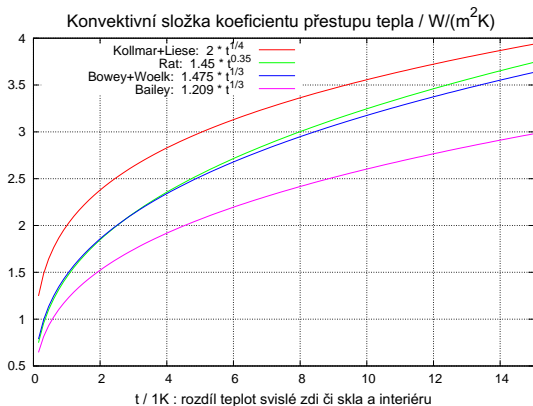
$$B = 0,84 \cdot 5,67 \cdot (64,1 - 55,5) \text{ W} \approx 41 \text{ W} \quad (6)$$

– tolik by činil výsledný zářivý tok tepla mezi sklem a exteriérem. Měrná hustota výsledného zářivého toku mezi povrchem skla a okolím činí zhruba $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Mezi interiérem a exteriérem je pak jedenkrát přerušovaný zářivý přenos, při jedné překážce tvořené sklem, právě poloviční, čili $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Zářivý únik tepla z interiéru do exteriéru přerušovaný takovou tenkou přepážkou je úměrný emitanci přepážky. Půjde-li místo skla o tenkou aluminiovou fólii s emitancí (řekněme) desetinou, tedy $e = 0,084$, bude zářivý únik právě desetkrát nižší.

Jednoduchá těsná přepážka, např. zasklení, tepelně izoluje tak, že zamezuje proudění vzduchu mezi interiérem a exteriérem, dělí zářivý přenos tepla na dva (tj. skutečně snižuje na polovinu) a i přes samovolnou konvekci vzduchu poskytuje jeden centimetr jakoby nehybného vzduchu, který též tepelně izoluje. Z toho lze pochopit, proč pomůže, je-li přepážek více než jedna. Každá z nich totiž poskytuje zhruba tentýž tepelný odpor. Okno se dvěma skly tak musí izolovat zhruba dvakrát lépe než jednoduché zasklení, čtyři skla opět dvakrát lépe než dvě skla.

Hodnota U mírně roste s rozdílem teplot interiéru a exteriéru. Například pro neradiační složku součinitele přestupu tepla h_c za bezvětří (zpravidla jen v interiéru) udávají různí autoři tyto hodnoty [21, str. 24]:



Obrázek 3: Neradiační složka tepelného toku na interiérové straně, daná jen vlivem rozdílu teploty proti (izotermnímu) okolí

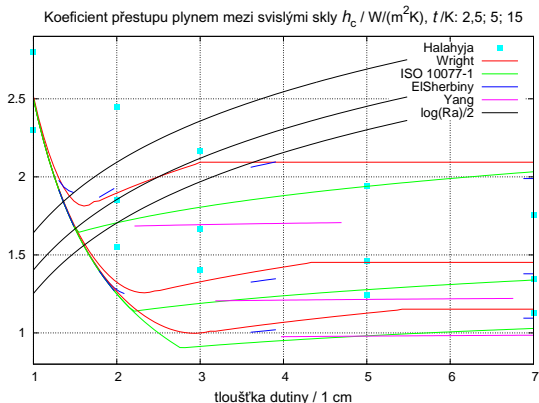
Celkově lze psát pro měrnou tepelnou prostupnost souvrství rovnici, kde tepelné odpory $1/h$ krajních „vrstev“ popisují přestup tepla z pevné přepážky do okolního prostředí:

$$U = 1 / \left(\frac{1}{h_{\text{out}}} + \frac{1}{h_{\text{bar}}} + \frac{1}{h_{\text{int}}} \right), \quad (7)$$

h_{out} a h_{int} jsou koeficienty přestupu tepla: do exteriéru, brány např. jako $h_{\text{out}} = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, do interiéru, např. až $h_{\text{int}} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. h_{bar} je už materiálová vlastnost přepážky; např. pro jedno sklo tlusté 4 mm ji lze (při $\lambda = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) brát jako $h_{\text{bar}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})/0,004 \text{ m} = 250 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ – z toho vyplývá, že na tloušťce skla izolační vlastnosti okna téměř nezávisí.

2.1.3 Konvekce podrobněji

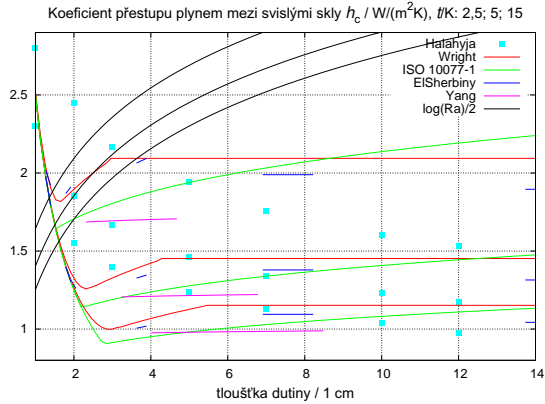
Základní experimentální údaje o neradiační složce tepelného toku v dutinách obdobných dvojsklům jsou uvedené v práci [3] z roku 1982, o níž se opírají všechny práce další. Moderní práce shrnující poznatky v této oblasti (a přidávající vlastní počítačové modelování) je [26]. Její výsledky jsou pro svislé dutiny (ve střešních oknech je vliv konvekce výrazně vyšší) spolu se staršími údaji uvedeny v grafech.



Obrázek 4: Neradiační složka přestupu tepla vzduchovými dutinami s izotermními stěnami, pro tři různé teplotní rozdíly (2,5 K, 5 K a 15 K – čím vyšší teplotní rozdíl t , tím větší přestup tepla). Stoupající křivky udávají Rayleighova čísla pro tyto tři případy (v práci se jimi jinde nezabývám, nicméně pro posuzování vlivu konvekce jsou to údaje základní). Realitou existence optimální tloušťky dutiny, např. necelých 2 cm pro $t = 15 \text{ cm}$, si nejsem jist, ale přinejmenším pro případ velkých t ji na základě dosavadních poznatků určitě nelze vyloučit. Případ meziskelních dutin v oknech se kromě toho od situace zobrazené v grafu liší tím, že teplota horní a dolní části skla není stejná (viz např. [8]).

2.1.4 Záření k obloze

Druhý důvod vyššího tepelného toku střešními okny oproti oknům svislým spočívá ve skutečnosti, že pokud není mlha nebo velmi nízká hustá oblačnost, tak na střešní okno dopadá v noci mnohem méně záření než na okno svislé, natož pak okno nakloněné dolů. Vhodnou



Obrázek 5: Neradiační složka přestupu tepla, i pro tlusté dutiny. Zdroje: Halahya [9, str. 64], Wright: [25], ISO 10077-1: [1], ElSherbiny: [2], Yang: [26]. Nejstarší zdroj Halahya téměř jistě přeceňuje vliv konvekce u tenkých dutin, ISO 10077-1 a Wright naopak jej přeceňují naopak u tlouštěk nad 10 cm.

formuli pro odhad černé teploty jasné noční oblohy T_{sky} v závislosti na teplotě přizemního vzduchu T_{air} udává [21, str. 13] (citující starší prameny):

$$T_{sky} = 0,0553 \cdot T_{air}^{1,5} \quad (8)$$

Jak velké je zářivé ochlazování, to bývá patrné po jasné noci z množství z kondenzované rosy nebo nasublimovaného jíní na plochách, které jsou zespolu tepelně izolovány. Ty se vyzařováním vzhůru ochladí až na rosný bod či bod ojínění a od dalšího chladnutí je chrání skupenské teplo přibývající vrstvičky vody či ledu. U budov se to z vnější strany stává na nejlepších trojitých zaskleních. Obranou je přidat nad ně na noc další vrstvu, která se ojíní místo nich. Mohlo by jít i o vrstvu průhlednou či dobře průsvitnou.

2.1.5 „U“ vícevrstevných zasklení

Tok tepla z jedné skleněné tabule na druhou, rovnoběžnou, blízkou a stejně velkou se liší od toku z rozlehlého okolního prostředí na vnější plochu skla tím, že je nutné počítat nejen s odrazem od jedné plochy, kdy stačí brát okolí jako černé těleso nějaké teploty. U paralelních tabulí je nutné uvažovat mnohonásobné odrazy od obou ploch [11].

Podstatný je rozdíl mezi výkonem a absorbovaným příkonem:

$$A_1 - E_1 = \sigma \frac{(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \quad (9)$$

Pro stejné emitance $e_1 = e_2 = e$ je tedy

$$A_1 - E_1 = \sigma(T_2^4 - T_1^4) \frac{e}{2 - e} \quad (10)$$

Pro dostatečně malý rozdíl teplot $t \ll T$ platí přibližně

$$A_1 - E_1 = 4 \sigma T^3 t \frac{e}{2 - e} \quad (11)$$

Komponenta U odpovídající zářivému toku je mezi nepovrstvenými skly poněkud menší než mezi sklem a rozlehlým okolím, a to o 14 %. Přesto je větší než komponenta připadající na transport tepla plynem.

Pro výrazné snížení tepelných ztrát je nezbytné potlačit přenos zářivý. Standardem pro pasivní domy jsou dnes zasklení trojitá, v nichž jsou dvě krajní skla opatřena na straně do okenní dutiny vrstvou nízké emitance, běžně klesající až k $e = 0,04$. Pak je většina tepelného toku už realizována ne zářením, ale právě jen plynou náplní dutiny. Cesta k ještě lepší tepelné izolaci tak dále vyžaduje snížení tepelného toku realizovaného plynou náplní souvrství.

vzduch	argon	krypton	xenon
25	17	8,7	5,3

Tabulka 2: Měrné tepelné vodivosti plynů / $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ při 10°C

Neomezená celková tloušťka dutiny mezi krajními skly dává možnost umístit do ní i přepážky pohyblivé, omezující průhled oknem ven, v chladném období na noc uzavírané. Takové přepážky mohou mít velmi nízkou emitanci. Pokud by šlo o přepážky těsné, tepelný odpor každé takové podskupiny povrch-plyn-povrch by dosahoval zhruba $0,6 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ při argonové náplni a $0,4 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ při užití pouhého vzduchu. Použití právě takových pohyblivých clon s nízkou emitancí navrhl autor již v roce 1998. Praktické realizace se jim dostalo ale až jako předmětu jeho činnosti během doktorského studia. Jejich umístěním do dvojítkých oken a uzavíráním na noc byly skutečně dosaženy očekávané hodnoty $U = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ při aplikování jedné clony a $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ při aplikaci dvou clon.

2.2 Vliv netěsností

Výše uvedené úvahy a změřené hodnoty se vesměs týkají přepážek těsných, zcela zabraňujících proudění vzduchu mezi prostory, které rozdělují. Takovými jsou nejlepší okna (nejen ve standardu pro pasivní domy), a mohou jimi býti i okna stará, jsou-li správně utěsněná.

Jiný typ netěsnosti se týká přepážek tvořených jiným materiálem než sklem pevně spojeným s rámem. Běžný je případ vnějších pohyblivých clon. Opačný případ je ještě běžnější, totiž zcela prodyšná přepážka na interiérové straně od zasklení. U špatně izolujících zasklení tím ovšem v zimě roste počet případů, kdy na interiérové straně zasklení kondenzuje vodní pára. Jako výhodná se jeví aplikace vnitřní clony s nízkou emitancí, pokud by vytvářela poměrně těsnou komoru s minimalizovanou výměnou vzduchu. Její užití je reálné v případě nejlepších zasklení dosahujících standardu pro pasivní domy. Přídavný tepelný odpor, který se tím dá docílit, je zhruba $0,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Na skle nebude kondenzovat voda, bude-li v interiéru s teplotou 20°C relativní vlhkost menší než 50 %. Clonu lze realizovat podobně, jako jsem to učinil pro clony meziskelní.

3 Zjišťování tepelných toků termografií

Cílem mé práce bylo najít postup, jak je nepřímo zjišťovat pozorováním *in situ*, u skutečných oken v existujících budovách.

Termografií obecně rozumíme pořizování snímků v takovém oboru vlnových délek, aby se v zobrazované scéně projevil vlastní vzařování předmětů. Při teplotách běžných v interiéru

rech a exteriérech, tedy rozsahu od 230 K do 310 K, jde o vlnové délky elektromagnetického záření nad $3 \mu\text{m}$ (obr. 2 (str. 6)) a prakticky též pod $100 \mu\text{m}$. Sluneční záření naopak můžeme v tomto oboru zanedbat, naprostá většina jeho energie připadá na vlnové délky pod $3 \mu\text{m}$. Záření s vlnovými délkami nad touto hranicí budeme nazývat *dlohovlnné*.

3.1 Obrazy vytvářené termokamerami

Kamery, zcela obecně, zaznamenávají vybranou (spektrálně filtrovanou) oblast spektrálního zářivého toku, přicházejícího z jednotlivých míst snímané scény.

V kamerách je matice bolometrů, obdobně k matici CCD nebo CMOS u kamer pro viditelné záření. Vzhledem k jejich velmi malým rozměrům je označujeme jako mikrobolometry. Jsou-li vrstvičky zachycující infračervené záření velmi tenké, reagují dostatečně rychle na změny zářivého toku a lze je užívat i v módu videokamery. Přehled fyziky a technologií (a návrh jejich nového typu) viz [20].

Termokamery neudávají záře scény, ale jen odhad teplot scény. Ten počítají z registrovaného signálu úměrného záři prošlé jakýmsi „spektrálním filtrem“, daným optickou konstrukcí kamery. Zaznamenávané pásmo bývá udáváno bez specifikování skutečného průběhu spektrální citlivosti kamery, např. jen jako „obor $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ “. Ten se v termografické praxi často označuje jako LWIR.

3.1.1 Odhad tepelných toků z jasových teplot

Jak patrně z předchozí kapitoly, tepelné toky jsou úměrné teplotním rozdílům. Termokamerou můžeme zjišťovat právě jen teplotní rozdíly. Na tepelné toky je můžeme přepočítat s využitím vztahů uvedených dříve. Předpokladem je, že známe velikost součinitele přestupu tepla ze zkoumané plochy do okolí – to bývá dobře splněno u rovinných ploch zdí v interiéru, kde lze předpokládat $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ (dle ISO 10077-1, viz [1, str. 53]). Je-li okolí chladnější než zkoumaná plocha, lze si při neznalosti součinitele přestupu tepla pomoci referenční vyhřívanou ploškou.

Interiérová, ale zejména exteriérová měření tepelně izolačních vlastností oken není vhodné provádět ve dne, protože běžná skla se slunečním zářením zahřívají, a to v různé míře, dle obsahu železa a samozřejmě dle hustoty zářivého toku, který skrze ně prochází. Ideálním počasím pro měření tepelných toků jsou mrazivé dny s nízkou hustou inverzní oblačností, kdy je zářivý sluneční příkon skrze oblačnost malý a kolísání teplot vzduchu mezi dnem a nocí činí jen několik kelvinů. Tehdy lze měřit již brzy zvečera. Po slunném dni je vhodné počkat alespoň do půlnoci, zejména u masivního zdiva s velkou tepelnou kapacitou. Za jasných nocí je vhodné pořizovat snímky směrem šikmo dolů, aby se v oknech neodrážela chladnější obloha.

3.1.2 Využití denního světla pro zjištění vlastností oken

Měření během dne může být někdy zajímavým doplněním měření nočního, a to v případě prosklených částí budovy. Lze tak totiž zhruba zjistit koeficient prostupu slunečního tepla do interiéru, tedy podíl krátkovlnného příkonu na vnější plochu okna a příkonu, který se dostává do interiéru. Běžně se označuje symbolem g .



Obrázek 6: Elektricky vyhřívaná skleněná ploška je na obrázku vlevo. Nahoře je polepená papírem, aby posloužila i pro porovnání s nelesklými předměty, jako jsou dřevěné rámy oken. Sousední skleněná ploška je zčásti překryta alobalem a slouží jen na ověření správné tepelné kompenzace. Napětí na odporovém vinutí pod samostatně vyhříváním sklem a proud vinutím se měří dvojicí multimetrů.

3.2 Konstrukce elektricky vyhřívané srovnávací plošky

4 Vytvoření těsných přepážek z foliových rolet

Cílem mé práce bylo rozdělit vzduchovou dutinu meziskelního prostoru mobilními přepážkami s nízkými emitancemi tak, aby okna jimi opatřená skutečně dosáhla teoreticky očekávaných vlastností.

Clony jsem vytvořil jako obdobu běžných látkových rolet. Na standardní dutou dřevěnou hřídel s vnitřním šroubovicovou pružinou poskytující navíjení jsem jen místo látky nalepil tenkou pokovenou plastovou fólii. Boční těsnění zajistily dřevěné lišty. Poslední etapou bylo vytváření spodního těsnění. Rozvinutá roleta se dole opírá o spodní desku ve dvojitěm okně prostřednictvím velmi měkkého pružného profilu, alternativně pomocí měkké pružné chlopně.



Obrázek 7: Dvě lišty na boku starého dvojitěho okna spolu se dvěma roletami z pokovené fólie snížily noc koeficient prostupu tepla až na $U = 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Ručně ovládané rolety s navíjecí pružinou mají nevýhodu v tom, že pro manipulaci s nimi je potřeba otevřít vnitřní křídla dvojitěho okna. Trvale udržitelným řešením, které

může být aplikováno kdekoliv, je automatické večerní zavírání a ranní otvírání rolet elektrickým pohonem.



Obrázek 8: Model okna s elektricky navíjenou foliovou roletou

Jiné firmy nabízejí pod názvem ISO-Roll elektricky ovládané foliové rolety dokonce do těsných dvojskel s argonovou náplní. Užívají strukturované dvojité fólie s napařeným aluminím uvnitř, natolik tlusté, že emitance výrazně stoupne. Tržní uplatnění takových foliových rolet v dutinách vyplněných argonem skýtá reálnou naději, že je možné vyvinout mechanismy užívající tenkých hřídelí a fólií, u nichž se dbá na co nejnižší emitanci. Trojice rolet ve starém dvojitém okně sníží jeho hodnotu u pod 0,5.

Foliové rolety mají uplatnění nejen pro zvýšení izolace proti úniku tepla z budovy, ale i pro regulaci jejího osvětlení. Fólie, které jsem užíval, propouštějí jedno až tři procenta světla a světlo téměř nerozptylují. Obecně je možné a vhodné kombinovat fólie s průhlednostmi od jednoho procenta až do deseti procent.

Alternativou je aplikace roletových soustav do oken užívajících kombinace dvojskla a dalšího vnějšího skla odděleného tlustou vzduchovou vrstvou. To je také konfigurace vhodná pro zvukovou izolaci. Nabízí ji řada výrobců oken, např. firma Interpane pod názvem Edition 4 [19]. Není žádný technický problém, aby tam užívali clony foliové, až pětinašobné. Celkový tepelný odpor takového okna může pak dosáhnout hodnoty až $6 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Při dosažení této hranice lze používat skleněné výplně místo neprůsvitných zdí téměř kdekoliv.

5 Ověření vlastností okenních souvrství

5.1 Emitance

Emitanci lze snadno a rychle měřit jen v tom oboru, ve kterém pracuje daný infrateploměr nebo termokamera, tedy obvykle v oboru od osmi do čtrnácti mikrometrů aneb LWIR. Postup, jak to dělat, jsem podrobně uvedl v práci [12], vyzařování jsem aproximoval pátou

mocninou teploty. Lepší je ale kvadratická aproximace vzniklá proložením závislosti určitého integrálu Planckovy křivky v daném intervalu na teplotě

$$E_{\text{LWIR}}/(W/m^2) = 110,12 + 2,002\theta + 0,0119\theta^2, \quad (12)$$

kde θ je číselná hodnota Celsiovy teploty, tedy $\Theta/^\circ\text{C}$. Odchytky v oblasti od -20°C do 100°C nepřesahují jedno promile.

Pro šedé těleso s jasovou teplotou θ_{lum} , skutečnou teplotou θ_{obj} a pro (jasovou) teplotu odraženého okolí θ_{surr} pak zřejmě platí (značíme $a = 110,12$, $b = 2,002$, $c = 0,0119$)

$$a + b\theta_{\text{lum}} + c\theta_{\text{lum}}^2 = e_{\text{LWIR}}(a + b\theta_{\text{obj}} + c\theta_{\text{obj}}^2) + (1 - e_{\text{LWIR}})(a + b\theta_{\text{surr}} + c\theta_{\text{surr}}^2) \quad (13)$$

a pro *pásmovou emitanci* e_{LWIR} v oboru LWIR pak (zavádíme $q = c/b = 0,006$)

$$e_{\text{LWIR}} = \frac{\theta_{\text{lum}} - \theta_{\text{surr}} + q(\theta_{\text{lum}}^2 - \theta_{\text{surr}}^2)}{\theta_{\text{obj}} - \theta_{\text{surr}} + q(\theta_{\text{obj}}^2 - \theta_{\text{surr}}^2)}. \quad (14)$$

Jako ideální zařízení k měření LWIR emitance při běžných teplotách se mi osvědčila nádoba s hrubozrnným sněhem. Ten po umístění do pokojové teploty začne tát. Jeho hrubozrnnost zajišťuje velmi členitý povrch, který díky vícenásobným odrazům vede k emitanci velmi blízké jedné. Přímé měření infrateploměrem či termokamerou také skutečně nulu Celsia s odchylkami nepřevyšujícími desetinu kelvinu udává. Je pak snadné umístit nad nádobu různé odrazné plochy a z boku či zespodu měřit jejich jasové teploty. Podobně lze měřit i transmisivitu nepokovených fólií (pozorováním shora).

5.1.1 Příklady měření směrových emitancí

Hlavním materiálem pro mou práci byla pokovená fólie se světelnou propustností kolem tří procent. Tloušťka fólie je $14\ \mu\text{m}$ až $15\ \mu\text{m}$. Dlouhovlnné vlastnosti fólie jsem měřil pomocí infrateploměru Raynger MX, výrobku firmy Raytek s udaným oborem citlivosti $8\ \mu\text{m}$ až $14\ \mu\text{m}$, tedy právě LWIR.

K rychlému počítání jsem napsal program b2e.pas, je k dispozici na [16]. Měření s užitím misky se sněhem v prostředí s teplotou 18°C indikují LWIR směrové emitance od 0,025 do 0,035. Opačná strana fólie dávala jasové teploty $3,4^\circ\text{C}$ až $4,1^\circ\text{C}$, tomu odpovídají emitance 0,17 až 0,16.

Měřil jsem i vlastnosti průhledné fólie, kterou doma léta užíváme na mírné zlepšení starých dvojitých oken. Její propustnost pro LWIR záření se ukázala jako 0,82 při úhlu dopadu zhruba 45° , odrazivost jako 6 % až 8 %, pohltivost a tedy i emisivita je tudíž asi 0,11. Fólie má tloušťku $25\ \mu\text{m}$.

Pro kovové zrcadlo (viz dále sekci Využití vypuklého zrcadla...), které užívám pro termografické zobrazování velkých prostorových úhlů, vyšla jasová teplota odrazu tajícího sněhu jako $1,0^\circ\text{C}$ při teplotě zrcadla $18,5^\circ\text{C}$. LWIR emitance jeho povrchu (téměř normálová) je tedy 0,05 (přesněji $0,049 \pm 0,005$).

5.2 Výpočty skutečných teplot

Nastavením emisivity uvažované teploměrem či kamerou na jedničku a užitím upravené rovnice 13 pro šedé těleso po zavedení $q = c/b = 0,006$ dostáváme, při vynechání indexu LWIR u pásmové emitance,

$$\theta_{\text{lum}} + q\theta_{\text{lum}}^2 = e(\theta_{\text{obj}} + q\theta_{\text{obj}}^2) + (1 - e)(\theta_{\text{surr}} + q\theta_{\text{surr}}^2), \quad (15)$$

$$\theta_{\text{obj}} + q \theta_{\text{obj}}^2 = (\theta_{\text{lum}} + q \theta_{\text{lum}}^2 - (1 - e)(\theta_{\text{surr}} + q \theta_{\text{surr}}^2))/e, \quad (16)$$

takže pro získání teploty objektu je potřeba řešit kvadratickou rovnici. K rychlému přesnému počítání (tj. řešení rovnice 16) jsem napsal program `b2r.pas`. Pro teploty mimo interval, v němž platí kvadratická aproximace, program počítá přímo integrál Planckovy funkce v daném spektrálním oboru.

5.2.1 Vhodné zobrazování jasových teplot

Pro kvantitativní vyhodnocení scén je žádoucí mít možnost takového zobrazení, v němž lze teploty přímo „vidět“, tedy říci, jaká jasová LWIR teplota odpovídá tomu kterému bodu snímku. To vyžaduje použití diskretní škály barev, kdy je na první pohled zřejmé, kterému místu teplotní stupnice daná barva odpovídá. Obecně nemusí jít o barvy, ale jen o stupně šedi, těch lze ale na první pohled správně rozlišit a přiřadit ke zvolené škále jen nevelký počet, škála tak může mít stěží více než osm různých šedí. Použití diskretní posloupnosti barev dává možnost rozlišit více než deset různých teplot.

Osvědčilo se mi kódování takové, že v každé barvě jsou pro jemnější rozlišení teplot čtyři úrovně jasu. Stupnici jsem vytvořil programem `palette4.pas`. Barevných kombinací je celkem 13. Podobně, malinkým programem `gray.pas`, jsem vytvořil spojitou šedou škálu. Programy i palety jsou uvedeny na adrese [16]. Typické použití takové palety je pro rozsah právě oněch 13 K, nejmenší dílek tehdy odpovídá čtvrtině kelvinu. Jemnější stupnice už nepřidává lepší rozlišení, jen se více projevuje šum signálu kamery.

Dalším nástrojem, potřebným pro zobrazení, je šablona stránky pro program Reporter. V ní lze nastavit paletu, která se bude pro snímky používat, stejně jako rozsah a způsob zobrazení teplot. Vytvořené šablony jsou dostupné v [16].

5.3 Využití vypuklého zrcadla pro snímky velkých prostorových úhlů

Termografické kamery zobrazují jen nevelké zorné pole, což je zcela adekvátní při zkoumání detailů. V interiérech je ale často potřeba mít informaci i o celkovém rozložení teplot, např. pro možnost zvolit nějakou teplotu jako reprezentativní pro celý interiér.

K tomuto účelu jsem užil vypuklé lesklé kovové zrcadlo, v němž se zobrazuje celý poloprostor. Reflektance zrcadla je 0,951(5). Pokud jde o teplotní rozdíly, zrcadlo je „zmenší“ o čtyři až osm procent. Výpočet opravených jasových teplot poskytuje program `b2s.pas` [16].

Při termografickém průzkumu je vhodné začít právě pohledem přes vypuklé zrcadlo. Stejného zrcadla lze užít i pro snímek obyčejným fotoaparátém, pro usnadnění orientace v termosnímku.

5.4 Přepoččet teplot na tepelné toky

Z vypočítaných skutečných teplot různých ploch, např. zkoumaného skla v okně a srovnávací skleněné plošky skrze kterou je tepelný tok blízký nule, lze vždy odhadovat hustotu tepelného toku skrze zkoumanou plochu do okolí či z okolí. Odhad její zářivé složky je jednoduchý, odhad složky konvektivní je méně jistý. Podmínkou věrohodného odhadu tepelného toku je, že panuje ustálený stav, tj. tepelné toky jsou stálé. To vyžaduje poměrně stálé vnitřní i vnější teploty, ty jsou naštěstí v zimních inverzních situacích (stratus nízko nad

krajinou) běžné. Dále pokud možno izotermický interiér. Pro získání spolehlivých odhadů u je žádoucí dostatečně dlouho před měřením vypnout zejména radiátory pod okny.

Příklad vývoje foliové clony a měření tepelných toků oknem ukazuje závěrečná série barevných termografických obrazů v příloze plného textu disertace .

6 Závěr

6.1 Shrnutí výsledků

Idea velmi snížit zářivou složku tepelného toku vzduchovými dutinami užitím dodatečných přepážek s nízkou emitancí není nová. Je popsána např. v učebnici Halahyja a kol. [9, str. 66-68]. Ta zdůrazňuje i nutnost, aby kolem takové přepážky nemohl cirkulovat vzduch. Já jsem jen takové přepážky, jako rolety z tenké fólie s napařeným hliníkem, do oken skutečně nainstaloval, docílil jejich praktické těsnosti, ověřil, že jejich tepelné vlastnosti odpovídají teorii a léta je za zimních nocí používal, podobně i někteří mí příbuzní.

Nový je i popis metod, jak pomocí infrateploměrů a termokamer dojít k dobrým odhadům velikostí tepelných toků užitím správných přepočtů pro danou oblast Planckovy křivky (software k tomu viz [16]) a užitím speciálních technických pomůcek. Pomůčkami jsou především referenční plošky z téhož materiálu, jakým je tvořen povrch zkoumaných částí budovy, avšak ze zadu dobře tepelně izolované. Další pomůckou je elektricky vyhřívaná ploška, u níž lze hustotu tepelného toku jí protékající snadno regulovat a měřit. Poslední pomůckou je vypuklé zrcadlo, umožňující pořídit snímek téměř celé místnosti současně.

Disertační práce sama obsahuje některé myšlenky, které nebyly obsaženy v předchozích pracích. Jde např. o větší clonění nejlépe izolujících střešních oken proti ojmění, viz str. 9 a užití foliových rolet na vnitřní straně pasivních trojitých oken, viz str. 10.

6.2 Doporučení pro budoucnost

Hojné používání soustav foliových pokovených rolet by mohlo vlastnosti starých, nových i nově rekonstruovaných domů výrazně zlepšit. Umožnit užívání větších prosklených ploch bez jakékoliv ztráty komfortu, naopak s jeho ziskem. A také další snížení potřeby umělého vytápění. K rozmachu takových aktivních prvků v budovách je ale potřeba přivést na trh lehké, levné, elektricky poháněné a počítačové řízené rolety. Takové, které bude možné přidat do starých oken nebo k nim, do nových oken se vzduchovou komorou, vložit do nově lepených skleněných souvrství. Doufejme, že se z „kosmicky“ vypadajících budov stane nová, účelná móda. Že deset mikrometrů plastu s nanometry hliníku poslouží jako „nové krajkové záclony“ (viz více [18]). Je pravděpodobné, že by na interiérové straně mohly zahrnovat i barevné vzory, aniž by se tím významně zhoršila jejich tepelné funkce.

Rozvoj užívání elektrických roletových systémů je šancí pro zachování starých dvojitých oken. Dnes se při opravách budov většinou vybourají a nahradí okny jednoduchými. Alternativní oprava, kdy se nahradí jednoduchá skla dvojskly, je mnohem méně běžná. Široká vzduchová dutina uvnitř dvojitého okna je ale ideální pro umístění systému alespoň tří rolet s dostatečnými odstupy. Podmínkou pro jejich aplikaci je jen velmi dobré utěsnění vnitřních křídel oken. To je možné téměř vždy.

Disertace řadu témat jen otevírá. Nejde jen o základní námět, přivést na trh systémy elektricky poháněných levných pokovených foliových rolet, které jsou např. i podmínkou nejen splnění pasivního limitu pro střešní okna, ale i pro to, aby v létě neznamenala ztrátu

komfortu. Jde i o praktické rozšíření termografie tím způsobem, že se publikují snímky s barevně kódovanými jasovými teplotami (doplňené šedým zobrazením), které umožní snadné kvantitativní vyhodnocení scén i těm, kteří nemají proprietární software.

7 Glosář

ϵ , Emisivita je vlastnost materiálu, měřená jako emitance vzorku, který je dostatečně tlustý, aby byl pro dané záření kompletně neprůchodný, a má opticky hladký povrch [24]. To je i případ tabulového skla, u nějž lze pak pojmy emisivita a emitance zaměňovat.

e , emitance je poměr zářivého toku emitovaného z plochy vzorku k toku, který by vydávala stejně velká plocha černého zářiče téže teploty [24]. Jde tedy o vlastnost tělesa.

U [$W/(m^2K)$], součinitel prostupu tepla (dříve označovaný k) – charakteristika konstrukce – tepelný tok jednotkovou plochou daného souvrství při jednotkovém rozdílu teplot na jeho opačných stranách. Nižší součinitel znamená lépe izolující souvrství. V případě oken se veličina uvádí s indexy **g** , **f** a **w** – míní se tím charakteristika zasklení (daleko od jeho okrajů, g jako glass), rámu (umístěných v hypotetickém tepelně nevodivém okolí, f jako frame) a konečně celého okna (w jako window) tak, jak alternuje okolní „obyčejnou“ stěnu.

u , číselná hodnota součinitele prostupu tepla = $U / (1 W/(m^2K))$. Je to tedy hodnota veličiny U vyjádřená v základních jednotkách SI. V praktické technické komunikaci se skutečně jednotky vynechávají. To je v pořádku jen tehdy, pokud jde o pouhé číslo.

Dlouhovlnné záření je v této disertaci označení elektromagnetického záření s vlnovými délkami většími než $3 \mu m$. Tepelný význam má v oboru pozemských teplot jen do vlnových délek kratších než stovky mikrometrů. Na interval $3 \mu m - 200 \mu m$ připadá více než 99 % toku energie vyzařovaného předměty s teplotami pod $150^\circ C$.

Literatura

- [1] Carli: TARCOG: Mathematical Models for Calculation of Thermal Performance of Glazing Systems With or Without Shading Devices. Technická zpráva, Carli Inc. Technical Report, 2006, draft, October 17.
URL <http://windows.lbl.gov/software/window/6/tarcog%20mathematical%20model.pdf> 9, 11
- [2] ElSherbiny, S. M.: Free convection in inclined air layers heated from above. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ročník 39, č. 18, 1996: s. 3925 – 3930, ISSN 0017-9310, doi:10.1016/0017-9310(96)00047-6.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3H-3WCSP8Y-16/2/f81b70b6ca93bb125a17ed77e5f79ed0> 9

- [3] ElSherbiny, S. M.; Raithby, G. D.; Hollands, K. G. T.: Heat Transfer by Natural Convection across Vertical and Inclined Air Layers. *Transactions of the ASME*, ročník 104, 1982: s. 96–102, ISSN 0022-1481. 8
- [4] Parlament: Legislativní usnesení Evropského parlamentu ze dne 31. ledna 2008 o Akčním plánu pro energetickou účinnost: využití možností. 2008, 2007/2106(INI). URL <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P6-TA-2008-0033+0+DOC+XML+V0//CS> 4
- [5] Feist, W.: Passivhaus Definition. 2005. URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Definition.html 3
- [6] Feist, W.: Fenster und Behaglichkeit: der qualitative Unterschied. 2006. URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Fenster_Behaglichkeit_Vergleich.htm 4
- [7] Feist, W.: Übersicht Passivhaus. 2006. URL http://passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Verzeichnis.html 4
- [8] Gustavsen, A.; Uvslokk, S.; Jelle, B. P.: Numerical and Experimental Studies of the Effect of Various Glazing Spacers on the Window U-value and the Glazing Temperature. 2005. URL http://www.byv.kth.se/avd/byte/reykjavik/pdf/art_153.pdf 8
- [9] Halahyja, M.; Beško, B.; Bloudek, K.; aj.: *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*. Bratislava a Praha: Alfa a SNTL, 1985. 9, 16
- [10] Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P.; aj.: Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *Open Atmos. Sci. J.*, ročník 2, 2008: s. 217–231, doi:10.2174/1874282300802010217. URL http://pubs.giss.nasa.gov/abstracts/2008/Hansen_etal.html 4
- [11] Hollan, J.: Teplo skrze okna (pracovní poznámky). 2000. URL http://astro.sci.muni.cz/pub/hollan/e_papers/stavby/okna/pozn_o.pdf 9
- [12] Hollan, J.: Termografické zjišťování tepelných vlastností budov in situ (zjišťování emisivit a tepelných toků pomocí termokamery). In *Workshop Nedestruktivní testování v technických oborech*, Brno: Akad. nakl. CERM, s.r.o., 2004, ISBN 80-7204-371-4, s. 248–253, promítané snímky viz http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/term_tep.pdf. URL http://amper.ped.muni.cz/pasiv/windows/term_tepT.pdf 13
- [13] Hollan, J.: Zásady osvětlování ve veřejných institucích. In *Zelené úřadování - vybraná témata*, Brno: STEP (<http://www.ekoporadna.cz>), 2007. URL <http://zeleneuradovani.cz/content/File/svetlo.pdf> 5
- [14] Hollan, J.: A Standard House – what’s that? Houses, standards, real life (Co je to standardní dům? Domy, normy a realita). In *Sborník semináře v rámci projektu "Energy in Minds!"*, Zlín: Zelené bydlení, o.s., 2008. URL <http://amper.ped.muni.cz/pasiv/standardy/> 3, 4
- [15] Hollan, J. (editor): *Pasivní dům II*. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2008, 56 s. URL http://www.veronica.cz/dokumenty/pasivni_dum_2008.pdf 3, 4

- [16] Hollan, J.: adresář s pomůckami pro termografii a termografickými snímky. 2009.
URL <http://amper.ped.muni.cz/LW-infrared> 14, 15, 16
- [17] Hollan, J.: adresář s českými předklady zásadních textů o změně klimatu. 2009.
URL <http://amper.ped.muni.cz/gw> 4
- [18] Hollan, J.: Nové paradigma osvětlení v budovách, nová řešení. In *Sborník anotací konference JUNIORSTAV 2009*, Brno: VUT v Brně, FAST, 2009, ISBN 978-80-214-3810-1, str. 75.
URL http://amper.ped.muni.cz/light/texty_pdf/paradigma.pdf 5, 16
- [19] Internorm: Dřevohliníkové zdvojené okno EDITION 4. 2007, podrobně viz http://www.internorm.at/cps/rde/xbc/SID-53E1FFC5-D0211FD2/internorm_at/pr_AT-DE-A_EDITION4_vetro_design1.pdf.
URL http://www.internorm.cz/cps/rde/xchg/SID-E4D25477-F3B1F887/internorm_cz/hs.xsl/fehoal_1088.html 13
- [20] Liger, M.: *Uncooled Carbon Microbolometer Imager*. Diplomová práce, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2006.
URL <http://etd.caltech.edu/etd/available/etd-09302005-174955/unrestricted/thesisweb.pdf> 11
- [21] Müller, H.-C.: *Entwicklung und Bau einer solaren Gebäudeheizung im Altiplano/Argentinien*. Diplomová práce, Universität Karlsruhe, 1999.
URL http://www.hc-solar.de/Diplomarbeit_cm.PDF 7, 9
- [22] Tolasz, R. (editor): *Atlas podnebí Česka*. Praha a Olomouc: Český hydrometeorologický ústav a Univerzita Palackého, 2007, ISBN 978-80-86690-26-1. 5
- [23] Trnka, L.: Pasivní dům. 2005, podklady k přednášce.
URL http://www.veronica.cz/energie/pasiv/pasiv_trnka.pdf 4
- [24] Weast, R. C. (editor): *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press, 1979, F-104 s. 17
- [25] Wright, J. L.: A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazings. *ASHRAE Transactions*, ročník 102, č. 1, 1996: s. 940–946. 9
- [26] Yang, Y.: *Natural Convective Flow and Heat Transfer in Vertical and Inclined Glazing Cavities*. Diplomová práce, Graduate School of the University of Massachusetts, Amherst, September 2003.
URL <http://www.ceere.org/beep/docs/FY2003/New-Yunhua-thesis-1.pdf> 8, 9

Abstract

To understand insulation properties of buildings, radiative energy fluxes indoors, outdoors and between these two environments are to be understood as well. Radiative fluxes are important in case of windows especially. The largest improvements are achievable just there.

Windows are weak points of modern buildings; because of that, traditional houses had small windows to be sustainable. Technologies to improve the poor properties of windows exist just some twenty years. However, from the viewpoint of physic, their development seems to be finished, no large improvements can be expected. The only exception is development of evacuated glazings with very thin cavities, whose market penetration may start after 2010.

There is, however another pathway to improve windows: by including movable, just a bit transparent foils into windows. Such foils act similarly as the highly transparent "low-e" layers, but bring another advantages as well. Their primary goal is suppressing heat loss at night, but they offer a very effective tool to control solar heat gains and light as well.

Such layers are commercially available as very thin plastic foils with an aluminium layer deposited in vacuum chamber, and they are cheap. Applying them in a sophisticated way (using two roller shades and creating three air cavities which are airtight enough) enables achieving the passive house limit of composite thermal transmissivity $U = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ even for old double windows. Their application the only available way how to get roof windows with favourable physical properties (and obeying the passive house limit). I have proposed (and explained from the viewpoint of physics) such use of aluminised foils inside windows cavities in 1998 already. In this thesis I describe their function in detail and show real examples of their application. In addition, I discuss radiometric methods (thermography) by which heat fluxes can be measured in common civil engineering practice.