



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM A JEHO DOPADY V BĚŽNÉM ŽIVOTĚ

THERMAL RADIATION IN REAL LIFE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR KALUS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUBOMÍR KLIMEŠ, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Petr Kalus**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Přenos tepla zářením a jeho dopady v běžném životě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přenos tepla zářením je jedním ze způsobů přenosu tepla a nachází uplatnění v celé řadě technických zařízení a mnoha inženýrských aplikacích. Porozumění této problematice je základním předpokladem pro technické výpočty a kvantifikaci přenosu tepla zářením.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je (1) provést rešerši, teoreticky popsat základní zákony přenosu tepla zářením (radiací), (2) identifikovat a analyzovat jevy z běžného života (nebo inženýrské praxe), ve kterých je radiace dominantní (např. skleníkový efekt, souvislost mezi barvou předmětu a jeho teplotou, tepelné ztráty vůči obloze apod.) a (3) vytvořit jednoduchý skript (např. v Excelu, Google Spreadsheetu, MATLABu apod.), který bude umožňovat základní výpočet přenosu tepla zářením.

Seznam doporučené literatury:

INCROPERA, Frank P., David P. DEWITT, Theodore L. BERGMAN a Adrienne S. LAVINE. Principles of heat and mass transfer. Sedmé vydání. Singapore: John Wiley, 2013. ISBN 978-0-470-64615-1.

HOWELL, John R., Kyle DAUN, Robert SIEGEL a M. Pinar MENGÜC. Thermal Radiation Heat Transfer. Sedmé vydání. Boca Raton: CRC Press, 2020. ISBN 978-0367347079.

ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. Thermodynamics: An engineering approach. Osmé vydání. New York: McGraw-Hill, 2015. ISBN 978-007-3398-174.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem přenosu tepla zářením na život kolem nás. V rámci rešeršní části jsou shrnuty základní zákony a pojmy potřebné pro pochopení dané problematiky. Dále jsou popsány a analyzovány jevy z běžného života, ve kterých je radiace dominantní. Největší pozornost byla věnována slunečnímu záření a následně skleníkovému efektu spolu s jeho vlivem na globální oteplování. Součástí práce je také postup při výpočtu přenosu tepla zářením mezi dvěma povrchy, na jehož základě byl napsán skript v jazyce Python. Následně byla vytvořena samostatně spustitelná aplikace s vlastním grafickým rozhraním. Závěr práce se zaměřuje na popis procesu tvorby softwaru a ukázce zkušebních příkladů z termomechaniky.

Klíčová slova

tepelné záření, přenos tepla zářením, sluneční záření, skleníkový efekt, globální oteplování

Summary

This bachelor's thesis deals with the impact of heat transfer by radiation on the life around us. The research part summarizes the fundamental laws and concepts necessary for understanding the given issue. Furthermore, it describes and analyzes phenomena in everyday life where radiation is dominant. The greatest attention has been devoted to solar radiation, followed by the greenhouse effect, along with its influence on global warming. The thesis also includes a procedure for calculating heat transfer by radiation between two surfaces, based on which a Python script was written. Subsequently, a standalone application with a graphical interface was developed. The conclusion of the thesis focuses on describing the software development process and provides examples of test cases in thermomechanics.

Keywords

thermal radiation, radiation heat transfer, solar radiation, greenhouse effect, global warming

Bibliografická citace

KALUS, Petr. *Přenos tepla zářením a jeho dopady v běžném životě*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Lubomír Klimeš.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Přenos tepla zářením a jeho dopady v běžném životě* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Lubomíra Klimeše, Ph.D. s využitím vlastních znalostí a materiálů uvedených v seznamu literatury.

Petr Kalus

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Lubomíru Klimešovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat také mé rodině za její podporu a ochotu při psaní práce.

Petr Kalus

Obsah

Úvod	11
2 Přenos tepla zářením	12
2.1 Černé těleso	13
2.2 Hustota zářivého toku	14
2.3 Irradiace	14
2.4 Emisivita	14
2.5 I. Kirchoffův zákon	15
2.6 Radiozita	16
2.7 Planckův vyzařovací zákon	16
2.8 Wienův posunovací zákon	17
2.9 Stefanův-Boltzmannův zákon	17
2.10 II. Kirchoffův zákon	18
3 Výpočet přenosu tepla zářením	19
3.1 Tepelný tok od/k povrchu	19
3.2 Úhlový faktor	20
3.3 Tepelný tok mezi dvěma povrchy	24
3.3.1 Přenos tepla mezi dvěma povrchy v uzavřeném prostoru	25
3.4 Radiační štíty	27
4 Dopady přenosu tepla zářením v běžném životě	29
4.1 Sluneční záření	29
4.1.1 Energetická bilance	33
4.1.2 Aplikace sluneční energie	34
4.2 Skleníkový efekt	36
4.3 Globální oteplování	37
4.4 Souvislost barvy předmětu s jeho teplotou	41
4.5 Radiační štíty	41
5 Program pro základní výpočet přenosu tepla zářením	43
5.1 Popis prostředí	44
5.2 Ukázka řešení	45
5.2.1 Příklad 1	45
5.2.2 Příklad 2	47
5.2.3 Příklad 3	49
5.2.4 Příklad 4	50
5.2.5 Základní zákony přenosu tepla zářením	51
Závěr	52
Seznam použitých zdrojů	53
Seznam použitých zkratk a symbolů	58

Úvod

Přenos tepla je jedním z důležitých způsobů přenosu energie. Jedním ze tří základních způsobů přenosu tepla je přenos zářením, spolu s vedením a prouděním. Jako jediný způsob nepotřebuje k přenosu tepla médium a probíhá i ve vakuu. Tepelnou energii zářením vyzařují všechny objekty o teplotě $T > 0$ K. V životě kolem nás se setkáváme se spoustou jevů, kde hraje přenos zářením roli a nebo je přímo hlavním faktorem.

Cílem bakalářské práce je seznámit se základními zákony souvisejícími s přenosem tepelné energie zářením. Dále identifikovat a analyzovat případy přenosu tepla kolem nás, z běžného života. A nakonec popsat základní výpočet přenosu tepla zářením, a na jeho základě vytvořit výpočtový software.

V první části práce jsou popsány základní zákony a pojmy, potřebné pro následující části. V druhé části je popsán postup při základním výpočtu přenosu tepla zářením. Ve třetí části jsou popsány a analyzovány jevy přenosu tepla radiací z běžného života, obzvláště se věnuji slunečnímu záření a skleníkovému efektu a jeho vlivu na globální oteplování. Součástí práce je samostatně spustitelný výpočtový program, který je vytvořen na základě druhé části, pro rychlý a snadný výpočet přenosu tepla zářením pro základní geometrie. Závěrem se věnuji popisu tvorby a uživatelského prostředí softwaru spolu s demonstrací zkušebních úloh.

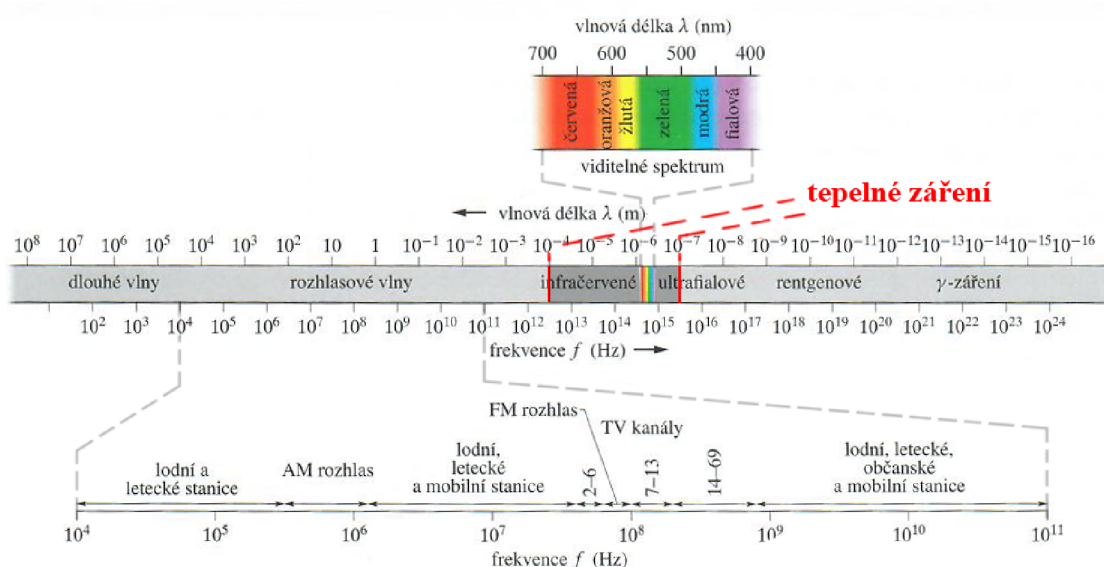
2 Přenos tepla zářením

Každý objekt o teplotě $T > 0\text{ K}$ je zdrojem elektromagnetického záření. Díky dualismu lze elektromagnetické záření chápat jako vlny nebo energii distribuovanou ve formě kvant. Záření se šíří rychlostí světla c_0 ve vakuu [1]. Vlnová stránka záření je charakterizována svou vlnovou délkou λ a frekvencí f . Tyto vlastnosti jsou spojeny výrazem (2.1)

$$\lambda = \frac{c_0}{f}. \quad (2.1)$$

Záření se šíří rychlostí c , pokud se pohybuje v jiném prostředí. Pro tento případ definujeme index lomu n , který vyjadřuje poměr rychlosti v daném prostředí k rychlosti záření ve vakuu [1]. Ten je ve tvaru (2.2)

$$n = \frac{c_0}{c}. \quad (2.2)$$



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetických vln ([2], upraveno)

Celé spektrum elektromagnetického záření můžeme vidět na obrázku 1. Krátké vlnové délky typu záření gamma, paprsků X a ultrafialové záření jsou zejména zájmem fyziků a jaderných inženýrů, zatímco dlouhé vlny jako mikrovlny a radiové vlny jsou zájmem elektroinženýrů [3]. Přenos tepla probíhá v úseku vlnových délek $\lambda = 0,1 - 100\ \mu\text{m}$ a tedy tato oblast je hlavním zájmem při popisu přenosu tepla radiací. Do této oblasti spadá celá část infračerveného záření, celé viditelné spektrum a část ultrafialového záření [3].

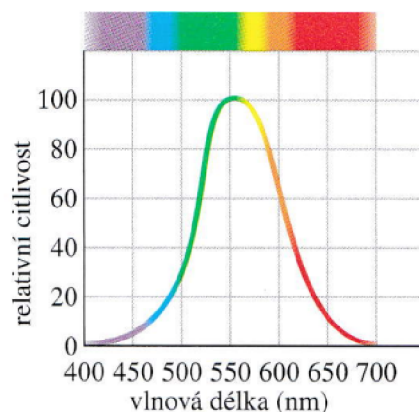
Elektromagnetické záření je vyzařováno nebo pohlcováno jen ve formě kvant. Každé kvantum obsahuje určitou hodnotu energie e

$$e = hf = h\frac{c}{\lambda}, \quad (2.3)$$

kde: $h = 6,6256 \times 10^{-34}\text{ J s}$ je Planckova konstanta.

Energie kvant je nepřímo úměrná vlnové délce. Tudíž elektromagnetické záření o kratších vlnových délkách má větší energii, než záření o velkých vlnových délkách. Proto se snažíme vyhnout kontaktu se zářením o velmi malých vlnových délkách, neboť obsahují velké množství energie a jsou pro nás velmi nebezpečné.

Světlem nazýváme zkrátka část elektromagnetického záření, které je pro nás viditelná a nachází se v rozsahu $0,4-0,7\ \mu\text{m}$. Skládá se ze základních barev a citlivost oka k jednotlivým barvám je na obr. 2.

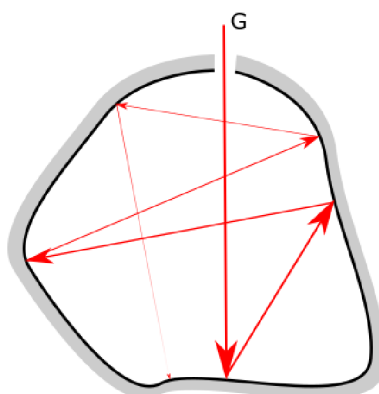


Obrázek 2: Citlivost oka k viditelnému spektru [2]

2.1 Černé těleso

Černé těleso je definováno jako dokonalý zářič a dokonalý pohlcovač záření. Slouží jako referenční těleso pro porovnání zářivosti šedých (nečerných) těles. Při stejné teplotě T a vlnové délce λ emituje černé těleso největší hodnotu energie [3].

Černé těleso ve skutečnosti neexistuje. Nejbližší černému tělesu se lze dostat aproximací tělesem s matnými dutinami. Záření, vstupující do dutiny malým otvorem, prochází opakovaně odrazem a absorpcí energie při dopadu na povrch dutiny, až se většina energie absorbuje a těleso tak působí jako pohlcovač záření nebo-li černé těleso [4].



Obrázek 3: Aproximace černého tělesa

2.2 Hustota zářivého toku

Zářivost nebo také hustota zářivého toku E nám popisuje množství energie tělesem vyzařené. Při přeměně této energie při dopadu na teplo pak hovoříme o hustotě tepelného toku \dot{q} .

Spektrální hustota zářivého toku

Hustota zářivého toku vztažená na jednotku vlnové délky se nazývá spektrální hustota zářivého toku $E_{0,\lambda}$.

2.3 Irradiace

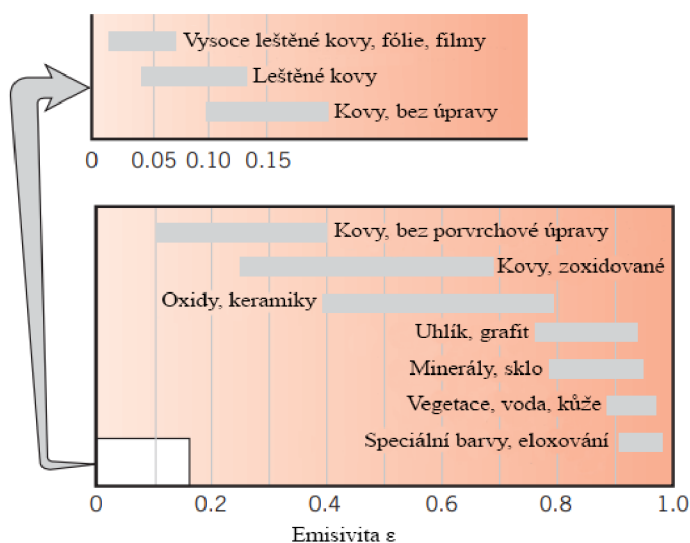
Celkové záření dopadající na povrch tělesa přes všechny vlnové délky a ze všech směrů se nazývá irradiace G (W m^{-2}), jedná se o součet záření vyzařujících z okolních povrchů (slunce, případně jiných zdrojů) [5].

2.4 Emisivita

Poměrná zářivost ε nebo-li emisivita představuje poměr zářivosti reálného tělesa ku zářivosti černého tělesa při stejné teplotě (2.4). Může nabývat hodnot $0 \leq \varepsilon \leq 1$, kdy $\varepsilon = 1$ se nazývá černé těleso, $\varepsilon = 0$ bílé těleso, $0 < \varepsilon < 1$ šedé těleso.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_0(T)} \quad (2.4)$$

Emisivita silně souvisí s vlastnostmi povrchu (viz 4), které mohou být ovlivněny různými způsoby (oxidace povrchu, typ dokončovací metody, čistota povrchu).



Obrázek 4: Emisivita různých materiálů ([3], upraveno)

2.5 I. Kirchoffův zákon

Při dopadu záření na semitransparentní povrch se část irradiance může odrazit (reflektance = R), část pohltit (absorptance = A) anebo také projít tělesem skrz (transmitance = T) [4]. Pro energetickou bilanci pak platí

$$G = G_A + G_R + G_T, \quad (2.5)$$

po úpravě

$$1 = A + R + T. \quad (2.6)$$

Pro černé těleso, které je dokonalý pohlcovač záření, platí $R = 0$ a $T = 0$, poté se bilance zjednoduší na

$$1 = A. \quad (2.7)$$

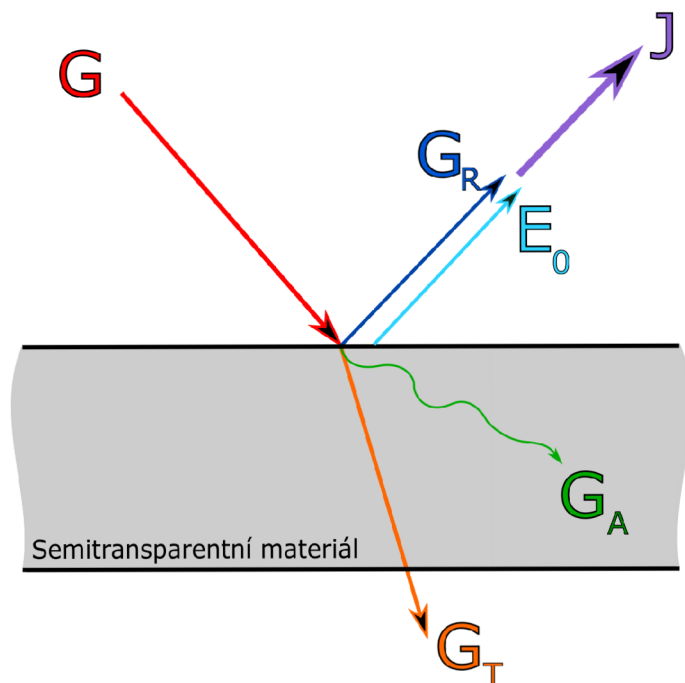
Pro většinu neprůhledných povrchů (netransparentních) platí, že transmitance $T = 0$ a poté

$$1 = A + R. \quad (2.8)$$

Naopak pro většinu plynů je reflektance $R = 0$

$$1 = A + T. \quad (2.9)$$

Stačí tedy v některých případech znát pouze jeden parametr a automaticky známe i druhý.



Obrázek 5: Rozpad záření dopadajícího na povrch

2.6 Radiozita

Radiozita J nám udává celkovou energii opouštějící povrch (viz obr. 5). Jde o součet zářivosti tělesa E_0 a odražené složky irradie G_R .

$$J = \varepsilon \cdot E_0 + R \cdot G. \quad (2.10)$$

V praxi je většina povrchů netransparentní $T = 0$ (viz vztah (2.8)) a tak lze vztah (2.10) upravit do podoby

$$J = \varepsilon \cdot E_0 + (1 - A) \cdot G. \quad (2.11)$$

Pro černé těleso lze zjednodušit díky reflektanci $R = 0$

$$J = E_0 = \sigma_0 T^4. \quad (2.12)$$

2.7 Planckův vyzařovací zákon

Vztah pro spektrální hustotu zářivého toku černého tělesa $E_{0,\lambda}$ byl objeven Maxem Planckem v roce 1901 [4]. Popisuje nám velikost zářivé energie v závislosti na vlnové délce a teplotě. Lze jej napsat ve tvaru

$$E_{0\lambda}(\lambda T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (2.13)$$

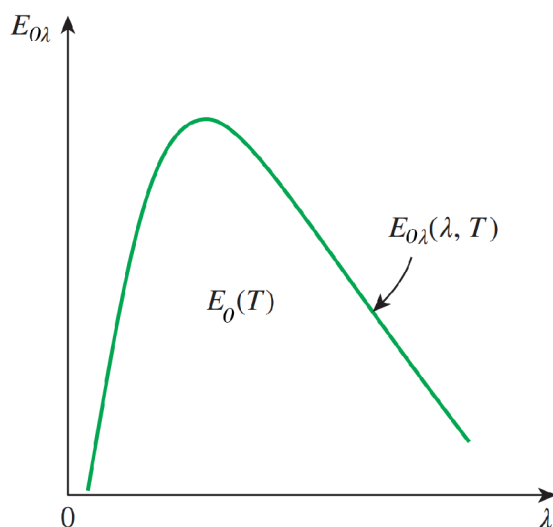
kde: $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3,742 \times 10^{-8} \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$

$C_2 = hc_0/k = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m K}$

$k = 1,381 \text{ J K}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta

$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$ je Planckova konstanta

Příklad spektrální hustoty zářivého toku je vidět na obrázku 6.

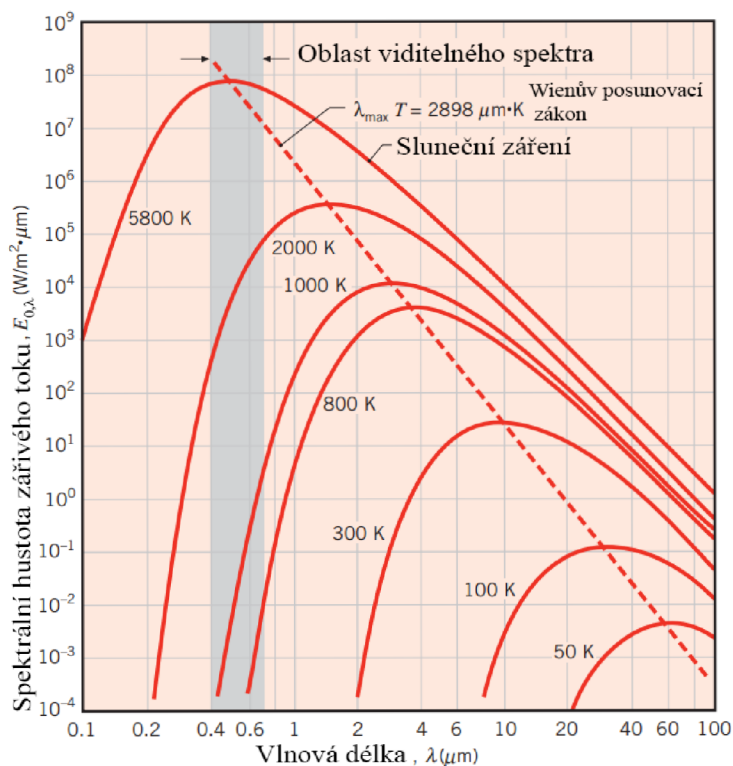


Obrázek 6: Spektrální hustota zářivého toku ([4], upraveno)

2.8 Wienův posunovací zákon

Na obrázku 7 lze vidět, že čím vyšší je teplota T , tím více se maximum λ_{max} posouvá doleva, k menším vlnovým délkám λ . Takle závislost je popsána Wienovým zákonem a zní

$$\lambda_{max}T = C_3 = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}. \quad (2.14)$$



Obrázek 7: Spektrální hustoty zářivého toku ([3], upraveno)

2.9 Stefanův-Boltzmannův zákon

Tento zákon definuje hustotu zářivého toku pro černé těleso a lze jednoduše napsat jako

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \quad (2.15)$$

kde: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ je Steffan-Bolzmannova konstanta.

Tohoto vztahu lze dosáhnout integrací Planckova zákona přes všechny vlnové délky a tak dosáhnout právě celkové hustoty zářivého toku černého tělesa (viz 6).

$$E_0 = \int_0^\infty E_{0,\lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} = \sigma_0 T^4. \quad (2.16)$$

2.10 II. Kirchoffův zákon

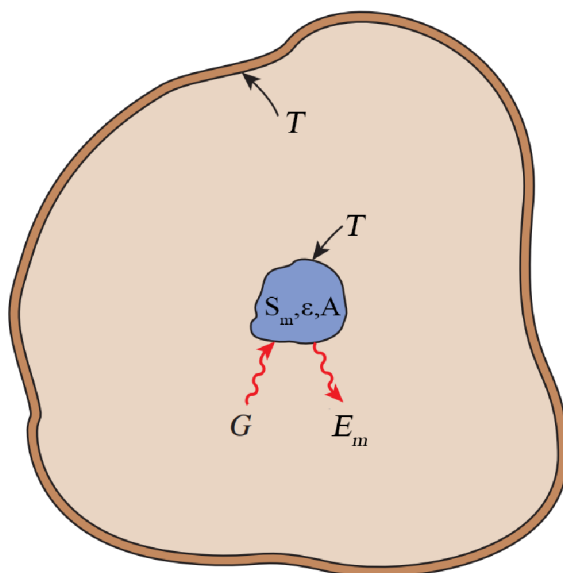
Na obrázku 8 je malé těleso o ploše S_m , emisivitě ε , absorptanci A a o teplotě T uvnitř mnohem většího izotermického tělesa o teplotě T . Velké těleso se dá považovat za černé těleso a malé těleso je natolik malé, že vliv na okolní stěny nemá. Dopadající hustota zářivého toku na malé těleso je poté rovna hustotě zářivého toku černým tělesem o teplotě T vyzářené [4]. Absorbovaná část je $G_A = AG = A\sigma T^4$. Hustota zářivého toku malým tělesem vyzářená $E_m = \varepsilon\sigma T^4$.

Pokud budeme uvažovat tepelnou rovnováhu mezi malým a velkým tělesem, pak tepelný tok mezi tělesy je roven nule. Pak tedy vyzářená a absorbovaná část se rovná nule

$$S_m \varepsilon \sigma T^4 = S_m A \sigma T^4. \quad (2.17)$$

Poté můžeme vztah upravit a dostaneme podobu 2. Kirchoffova zákona, který značně ulehčuje analýzu problematiky přenosu tepla radiací,

$$\varepsilon = A. \quad (2.18)$$



Obrázek 8: Odvození 2. Kirchoffova zákona ([4], upraveno)

3 Výpočet přenosu tepla zářením

Hlavním cílem při výpočtu přenosu tepla zářením je zjistit celkový tepelný tok. Ať už se jedná o zjištění tepelného toku sálajícího od jednoho tělesa (zdroje) anebo o tepelnou výměnu mezi dvěma nebo více tělesy.

3.1 Tepelný tok od/k povrchu

Výsledný tepelný tok od povrchu tělesa S_i je dán rozdílem radiozity J (2.10) a irradiance G (2.5), tedy energie povrchem vyzářené a absorbované.

$$\dot{Q}_i = \left(\begin{array}{c} \text{Radiace opouštějící} \\ \text{povrch } i \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Radiace dopadající} \\ \text{na povrch } i \end{array} \right) = S_i (J_i - G_i) \quad (3.1)$$

Irradiaci G_i lze upravit ze vztahu (2.11), potom

$$\dot{Q}_i = S_i \left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{0,i}}{1 - \varepsilon_i} \right) = \frac{S_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{0,i} - J_i). \quad (3.2)$$

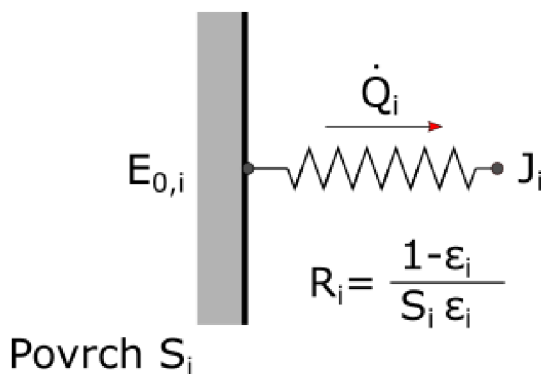
Lze zde využít analogie s elektrickými obvody a po upravě dostáváme obdobu Ohmova zákona

$$\dot{Q}_i = \frac{E_{0,i} - J_i}{R_i}, \quad (3.3)$$

kde

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{S_i \varepsilon_i}, \quad (3.4)$$

je povrchový odpor (viz vztah 9). Rozdíl $E_{0,i} - J_i$ odpovídá rozdílu potenciálu a tepelný tok \dot{Q}_i pak elektrickému proudu.

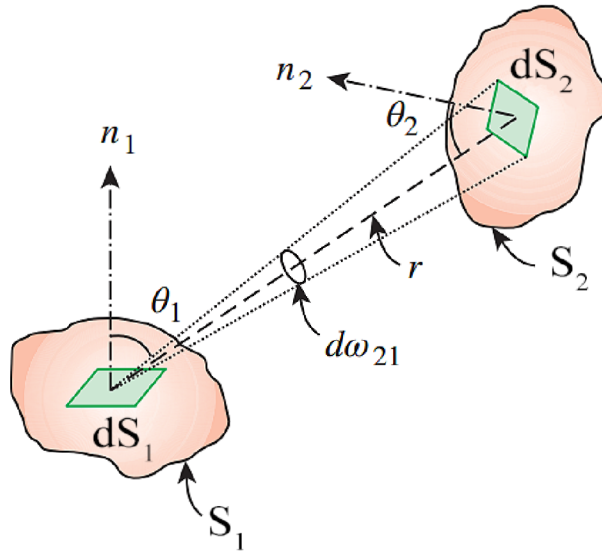


Obrázek 9: Povrchový odpor (překresleno dle [4] a upraveno)

Pokud je $J_i > E_{0,i}$ jedná se o tepelný tok vyzářující od povrchu S_i , naopak k povrchu S_i pokud je $E_{0,i} > J_i$. Pro výpočet přenosu tepla mezi dvěma a více povrchy je potřeba definovat nový parametr a to úhlový faktor.

3.2 Úhlový faktor

Jedná se o čistě geometrický parametr (nezávislý na vlastnostech povrchu a teplotě), který nám udává jaká část vyzářené energie dopadá z jednoho povrchu na druhý [4].



Obrázek 10: Úhlový součinitel - geometrie ([3], upraveno)

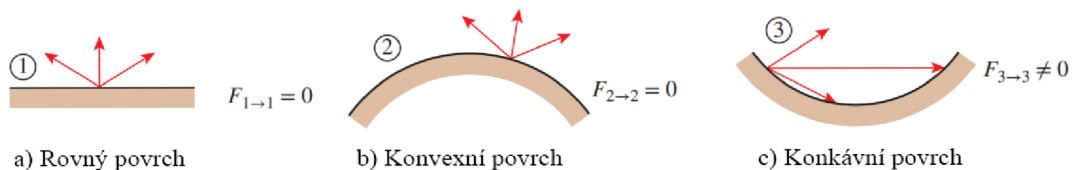
$$F_{1 \rightarrow 2} = F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{S_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi R^2} dA_1 dA_2, \quad (3.5)$$

$$F_{2 \rightarrow 1} = F_{A_2 \rightarrow A_1} = \frac{1}{S_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi R^2} dA_1 dA_2. \quad (3.6)$$

Pokud upravíme rovnice (3.5) a (3.6) vynásobením konstantou S_1, S_2 před integrálem dostaneme rovnost (3.7). Ta se nazývá **reciprocita** a umožňuje výpočet jednoho úhlového součinitele při znalosti druhého a naopak

$$S_1 F_{1 \rightarrow 2} = S_2 F_{2 \rightarrow 1}. \quad (3.7)$$

Hodnota úhlového faktoru se pohybuje mezi $F_{ij} = 0 - 1$. Pokud není povrch vypuklý, tak lze zjistit i úhlový faktor povrchu vidícího sám na sebe (viz 11).

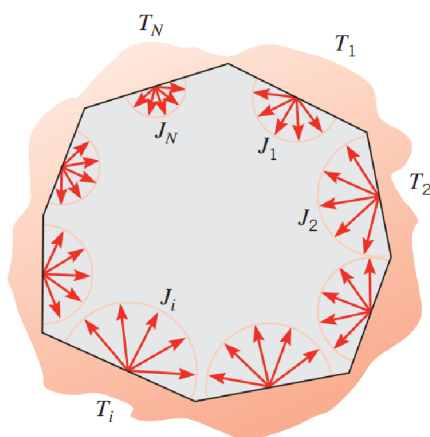


Obrázek 11: Případy úhlového součinitele vidícího sám na sebe ([4], upraveno)

Pravidlo součtu

Další důležité pravidlo platí v případě, kdy řešíme přenos tepla v uzavřeném prostoru s více povrchy. Zajímá nás přenos tepla z povrchu i na okolní povrchy j . Platí, že součet úhlových faktorů od povrchu i v uzavřeném prostoru do všech N ostatních povrchů je roven jedné [3].

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (3.8)$$



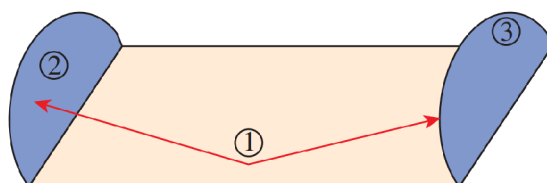
Obrázek 12: Pravidlo součtu [3]

Symetrie

Další způsob jak ulehčit výpočet neznámého úhlového faktoru je použití symetrie. Pokud máme povrchy o stejné velikosti, stejném rozložení, k námi počítanému povrchu, pak tyto povrchy získávají stejné množství energie [4].

Pokud povrch i a k je symetrický k povrchu i , poté platí

$$F_{i \rightarrow j} = F_{i \rightarrow k}. \quad (3.9)$$

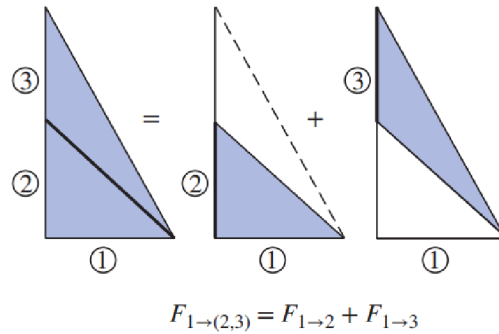


$$F_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 3} \\ (\text{také, } F_{2 \rightarrow 1} = F_{3 \rightarrow 1})$$

Obrázek 13: Úhlový součinitel - případ symetrie [4]

Superpozice

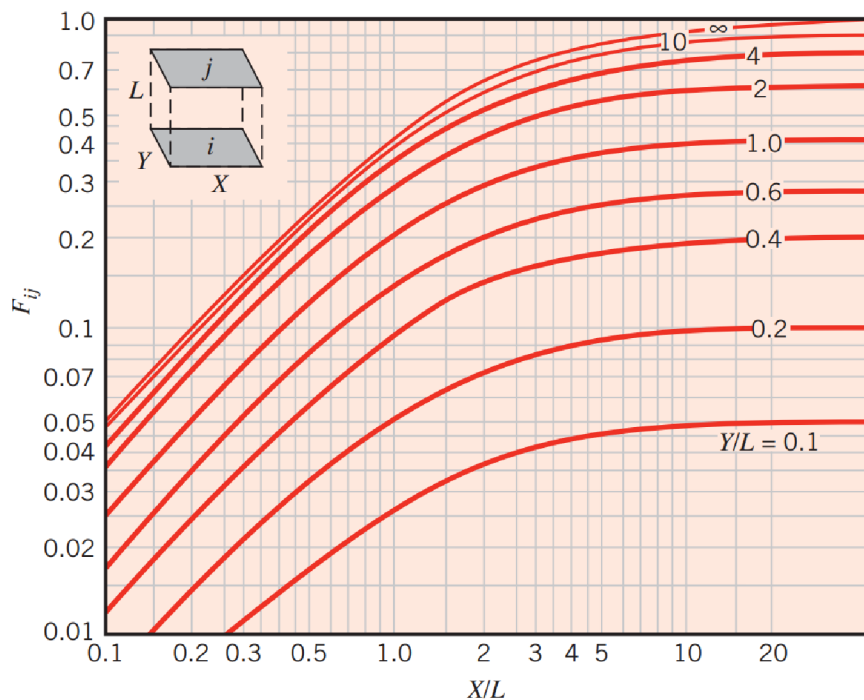
Lze využít také princip superpozice a to v případě, kdy z dostupných tabulek a grafů, nelze zjistit úhlový faktor pro danou geometrii. V případě, kdy neznáme úhlový faktor z povrchu i na povrch j , můžeme si pomoci rozdělením povrchu j na více povrchů pro které lze zjistit úhlový faktor.



Obrázek 14: Úhlový součinitel - případ superpozice [4]

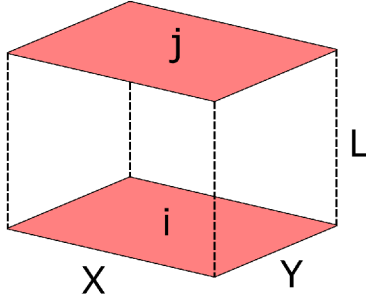
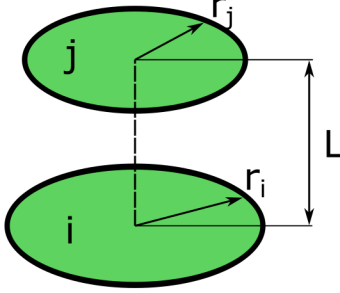
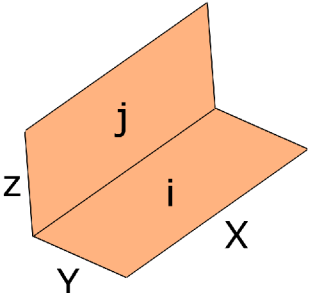
Aplikace

Při výpočtu neznámého úhlového faktoru lze přistoupit k řešení více způsoby. Lze vypočítat integrací dle vztahu (3.5), v některých případech lze zjistit pouhou úvahou (například koule obklopující kouli) a nebo lze využít dostupné grafy (viz obr. 15) nebo již upravené vztahy pro určité geometrie (např. v tabulce 1).



Obrázek 15: Úhlový faktor diagram [3]

Tabulka 1: Výpočet úhlového faktoru pro základní geometrii ([2], upraveno)

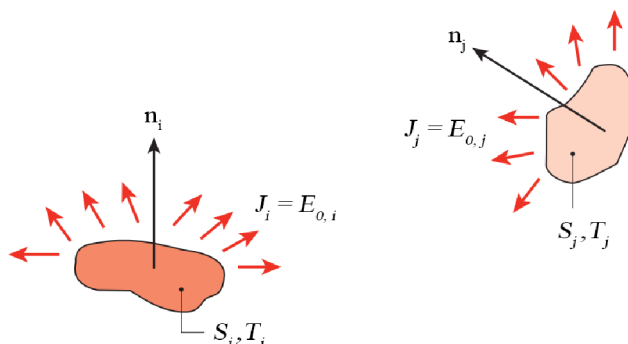
Geometrie	Vztah
	$\bar{X} = \frac{X}{L} \text{ a } \bar{Y} = \frac{Y}{L}$ $F_{ij} = \frac{2}{\pi \bar{X} \bar{Y}} \left\{ \ln \left[\frac{(1 + \bar{X}^2)(1 + \bar{Y}^2)}{1 + \bar{X}^2 + \bar{Y}^2} \right]^{1/2} \right.$ $+ \bar{X}(1 + \bar{Y}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{X}}{(1 + \bar{Y}^2)^{1/2}}$ $+ \bar{Y}(1 + \bar{X}^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{\bar{Y}}{(1 + \bar{X}^2)^{1/2}}$ $\left. - \bar{X} \tan^{-1} \bar{X} - \bar{Y} \tan^{-1} \bar{Y} \right\}$
	$\text{Pro } R_i = \frac{r_i}{L} \text{ a } R_j = \frac{r_j}{L}$ $S = 1 + \frac{1 + R_j^2}{R_i^2}$ $F_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ S - \left[S^2 - 4 \left(\frac{r_j}{r_i} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$ $\text{Pro } r_i = r_j \text{ a } R = r/L$ $F_{ij} = F_{ji} = 1 + \frac{1 - \sqrt{4R^2 + 1}}{2R^2}$
	$H = \frac{Z}{X} \text{ a } W = \frac{Y}{X}$ $F_{ij} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} \right.$ $- (H^2 + W^2)^{1/2} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{1/2}}$ $+ \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \right.$ $\left. \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right\}$

3.3 Tepelný tok mezi dvěma povrchy

Tepelný tok mezi dvěma šedými, neprůhlednými povrchy S_i a S_j obecného tvaru je rozdílem energie vyzářené povrchem S_i na povrch S_j a energií vyzářené povrchem S_j zpátky na povrch S_i .

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \left(\begin{array}{c} \text{Radiace zářící z povrchu } i \\ \text{dopadající na povrch } j \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Radiace zářící z povrchu } j \\ \text{dopadající na povrch } i \end{array} \right)$$

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = S_i J_i F_{ij} - S_j J_j F_{ji} \quad (3.10)$$



Obrázek 16: Tepelný tok mezi dvěma povrchy ([3], upraveno)

Po aplikaci reciprocity (3.7)

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = S_i F_{ij} (J_i - J_j). \quad (3.11)$$

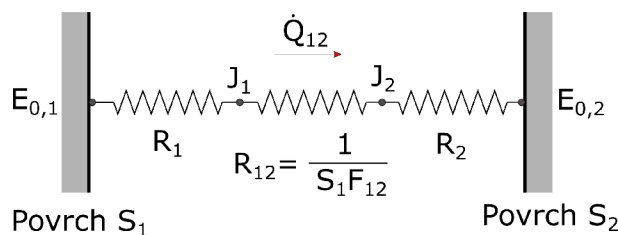
Analogie s elektrickými obvody

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}}, \quad (3.12)$$

kde

$$R_{i \rightarrow j} = \frac{1}{S_i F_{i \rightarrow j}} \quad (3.13)$$

je prostorový odpor (viz vztah 17). Opět je zde analogie k elektrickým obvodům. Rozdíl $J_i - J_j$ odpovídá rozdílu potenciálu a tepelný tok pak elektrickému proudu.

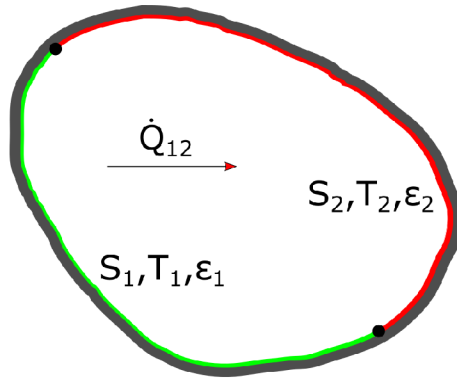


Obrázek 17: Prostorový odpor (překresleno dle [4] a upraveno)

3.3.1 Přenos tepla mezi dvěma povrchy v uzavřeném prostoru

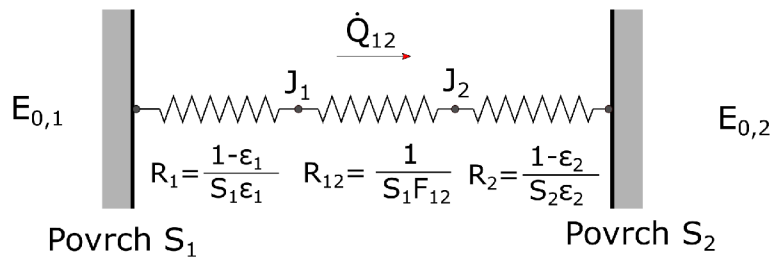
Nejjednodušší případ lze ukázat na přenosu tepla mezi dvěma povrchy v uzavřeném prostoru. Přenos tepla probíhá u povrchů 1 a 2 pouze mezi sebou, a proto přenos tepla od povrchu 1 je stejně velký jako přenos tepla k povrchu 2, a zároveň se rovná tepelnému toku \dot{Q}_{12}

$$\dot{Q}_1 = -\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{12} \quad (3.14)$$



Obrázek 18: Tepelný tok mezi dvěma povrchy v uzavřeném prostoru

Odporové schéma je na obr. 19.



Obrázek 19: Odporové schéma [4]

Pak celkový tepelný tok mezi povrchy 1 a 2 je ve tvaru

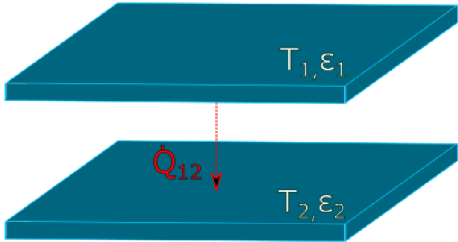
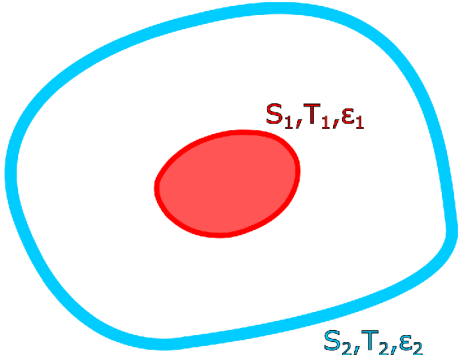
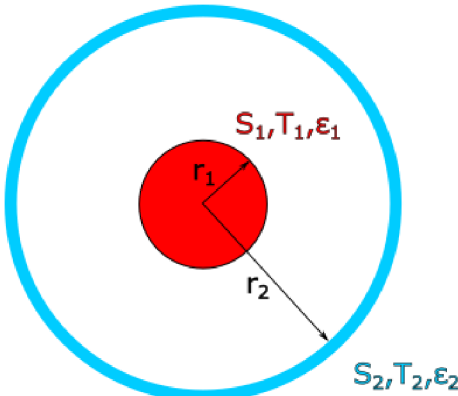
$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{E_{0,1} - E_{0,2}}{R_1 + R_{1 \rightarrow 2} + R_2}, \quad (3.15)$$

Po dosazení povrchových odporů (3.4) a prostorového odporu (3.13)

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{S_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{S_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{S_2 \varepsilon_2}}. \quad (3.16)$$

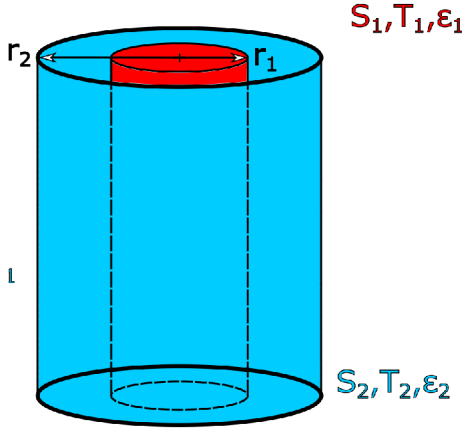
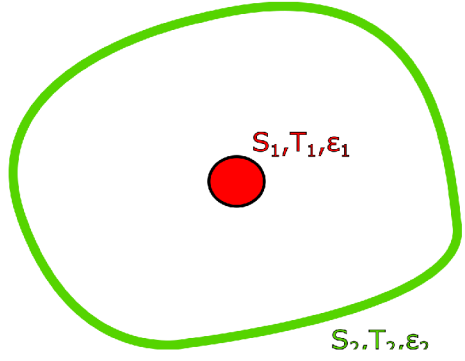
Vztah (3.16) platí pro jakékoliv dva šedé, povrchy v uzavřeném prostoru. Zjednodušené případy, kde úhlový faktor $F_{12} = 1$, pro časté povrchy jsou v tabulce 2.

Tabulka 2: Tepelný tok pro časté případy ([3], upraveno)

Geometrie	Vztah
	$S_1 = S_2 = S$ $F_{12} = 1$ $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$
	$F_{12} = 1$ $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$
	$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$ $F_{12} = 1$ $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2}$

Pokračování na další straně ...

Tabulka 2 – pokračování z předchozí strany

Geometrie	Vztah
	$\frac{S_1}{S_2} = \frac{r_1}{r_2}$ $F_{12} = 1$ $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$
	$\frac{S_1}{S_2} \doteq 0$ $F_{12} = 1$ $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = S_1 \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$

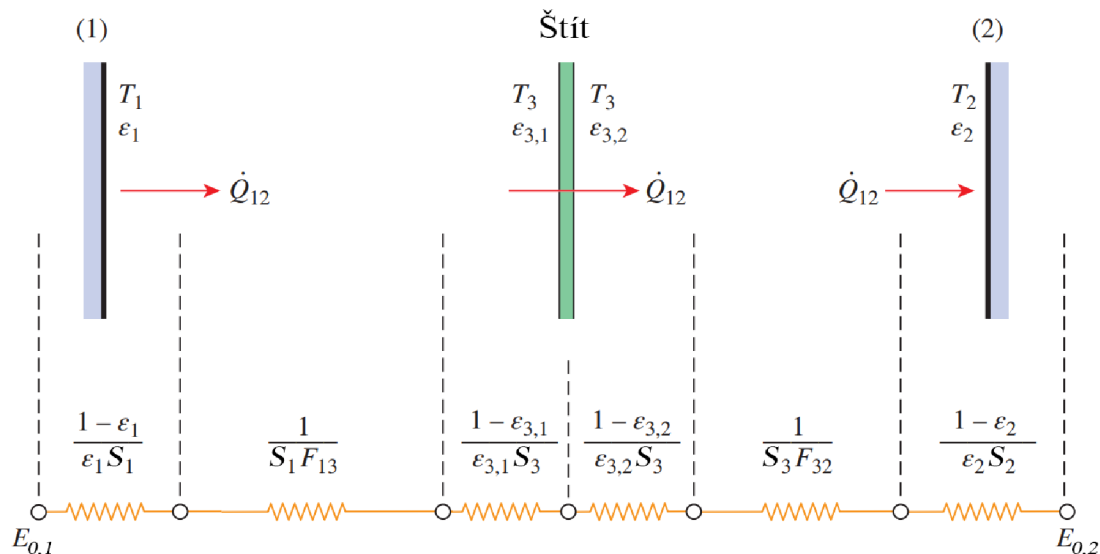
3.4 Radiační štíty

Radiační štíty jsou určeny pro zmenšení velikosti tepelného toku mezi povrchy. Používají se štíty zejména o vysoké reflektanci (o malé emisivitě), aby se dosáhlo nejlepší redukce. Přidání jednoho radiačního štítu se v rovnici pro tepelný tok mezi dvěma povrchy (3.16) projeví jako přídatný odpor. Poté lze rovnici napsat ve tvaru

$$\dot{Q}_{12, \text{štít}} = \frac{E_{0,1} - E_{0,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{S_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{S_1 F_{13}} + \frac{1 - \varepsilon_{3,1}}{S_3 \varepsilon_{3,1}} + \frac{1 - \varepsilon_{3,2}}{S_3 \varepsilon_{3,2}} + \frac{1}{S_3 F_{32}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{S_2 \varepsilon_2}}. \quad (3.17)$$

Vztah (3.17) platí obecně pro geometrii, kde radiační štít kompletně brání přenosu záření mezi oběma povrchy (nekonečné desky, soustředné koule, soustředné válce).

V případě geometrie nekonečných rovnoběžných desek (viz obr. 20) lze vztah zjednodušit



Obrázek 20: Radiační štít mezi rovnoběžnými deskami ([4], upraveno)

$$\dot{Q}_{12, \text{štít}} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1 \right)}. \quad (3.18)$$

Pro N štítů pak

$$\dot{Q}_{12, N \text{ štítů}} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1 \right) + \dots + \left(\frac{1}{\varepsilon_{N,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{N,2}} - 1 \right)}. \quad (3.19)$$

S rostoucím počtem štítů se odpor ve jmenovateli rozrůstá a tepelný tok se tak zmenšuje. Pokud štít má stejnou emisivitu jako povrchy, lze jej upravit

$$\dot{Q}_{12, N \text{ štítů}} = \frac{S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{(N + 1) \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)} = \frac{1}{N + 1} \dot{Q}_{12}. \quad (3.20)$$

Zde přidáním pouze jednoho štítu se celkový tepelný tok mezi povrchy 1 a 2 zmenší na polovinu.

4 Dopady přenosu tepla zářením v běžném životě

4.1 Sluneční záření

Slunce je pro Zemi hlavním zdrojem energie. Je to naše nejbližší slunce a má přibližně tvar koule o průměru $D = 1,39 \times 10^9$ m a hmotnosti $m = 2 \times 10^{30}$ kg. Nachází se ve vzdálenosti $L = 1,50 \times 10^{11}$ m od planety Země. Lze považovat za černé těleso o teplotě povrchu $T = 5780$ K [4]. Poté dle Stefanova-Bolzmannova zákona je hustota zářivého toku.

$$E_0 = \sigma \cdot T_s^4 = 5,67 \times 10^{-8} \cdot 5780^4 = 6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (4.1)$$

Po vynásobení obsahem Slunce dostaneme zářivý tok, který slunce vyzařuje do všech směrů.

$$\dot{Q}_S = S_S \cdot E_0 = \pi \cdot (1,39 \times 10^9)^2 \cdot 6,33 \times 10^7 = 3,84 \times 10^{26} \text{ W} \quad (4.2)$$

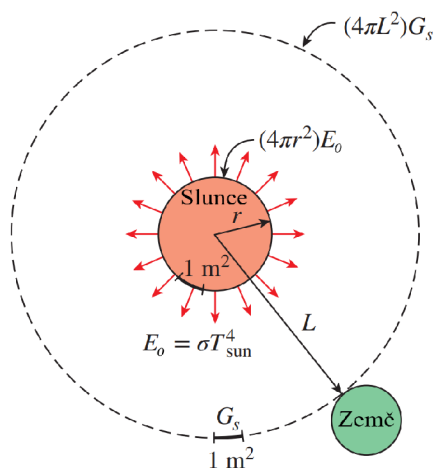
Celkový zářivý tok dopadající na Zemi

$$\dot{Q}_{S-Z} = \dot{Q}_S \cdot F_{S-Z} = 3,8 \times 10^{26} \cdot 4,48 \times 10^{-10} = 1,72 \times 10^{17} \text{ W}, \quad (4.3)$$

kde $F_{S-Z} = 4,48 \times 10^{-10}$ je úhlový faktor mezi Sluncem a Zemí.

Sluneční záření dopadající na atmosféru Země se nazývá celková solární irradiace nebo také solární konstanta G_S a lze vypočítat

$$G_S = \frac{\dot{Q}_S}{4\pi R^2} = 1373 \text{ W/m}^2. \quad (4.4)$$



Obrázek 21: Geometrie Slunce–Země ([4], upraveno)

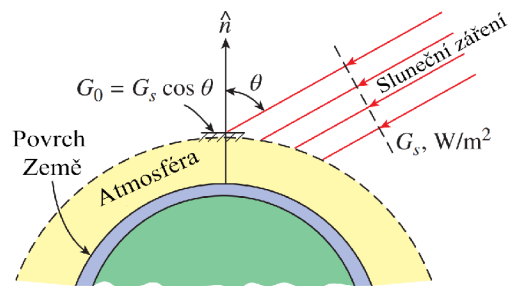
Velký vliv na hodnotu sluneční konstanty má excentrická oběžná dráha Země okolo Slunce, díky tomu se hodnota pohybuje v mezích 1322–1420 W/m². Schválené hodnoty solární konstanty institucí „American Society for Standards and Measurement (ASMT)“

je 1366 W/m^2 , ale například instituce „National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA)“ používá hodnotu 1376 W/m^2 [6].

Hodnota sluneční konstanty lze získat také měřením, a zpětně dokázat, že teplota Slunce lze aproximovat jako černé těleso o teplotě $T = 5780 \text{ K}$.

$$(4\pi L^2) G_S = (4\pi r^2) \sigma T_s^4 \quad (4.5)$$

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{(4\pi L^2)}{(4\pi r^2) \sigma} G_S} = \sqrt[4]{\frac{(1,50 \times 10^{11})^2}{(6,95 \times 10^8)^2 5,67 \times 10^{-8}} 1373} = 5780 \text{ K} \quad (4.6)$$

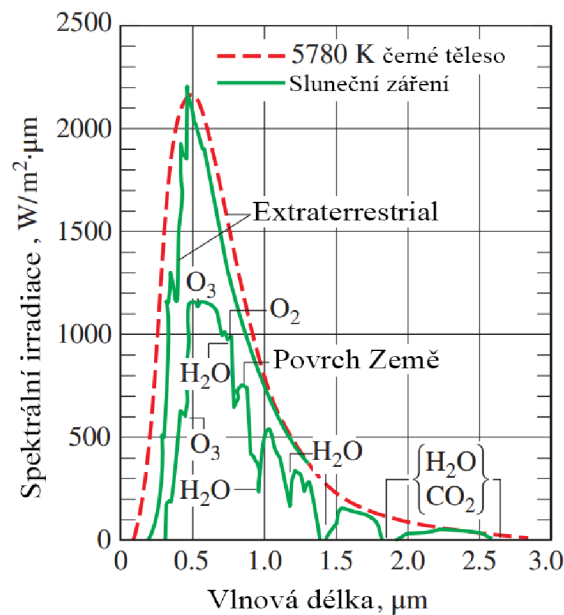


Obrázek 22: Sluneční irradiance dopadající na Zemi ([4], upraveno)

Nicméně solární konstanta nám udává pouze velikost dopadající záření na vrchní hranici atmosféry pod úhlem θ k normále povrchu, který je rovnoběžný s povrchem Země (viz obr. 22). Na povrch pak dopadá tzv. extraterrestrální záření [4]

$$G_0 = G_S \cdot f \cdot \cos \theta. \quad (4.7)$$

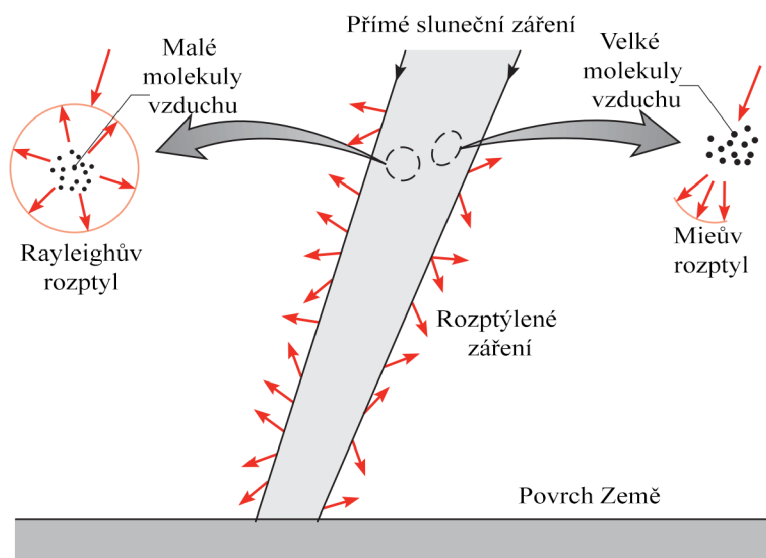
Kde f je korekční faktor pro započítání excentricity oběžné dráhy ke Slunci.



Obrázek 23: Spektrální irradiance slunečního záření ([4], upraveno)

Než záření dopadne na povrch Země, musí nejprve projít atmosférou. Při interakci s atmosférou projde záření částečnou absorpcí, rozptylem nebo odrazem. Celková irradiance dopadající na povrch Země je pak 70% – 80% hodnoty dopadající záření na atmosféru při jasném dni, tato hodnota klesá pokud je oblačno/zataženo, zbylá část je poté odražena zpět do vesmíru [7]. Na obrázku 23 lze pozorovat průběh spektrální irradiance pro povrch Země. Výkyvy jsou zde způsobeny právě interakcí s atmosférou.

- Ozonová vrstva v atmosféře pohlcuje ultrafialové záření a chrání tak Zemi proti nebezpečnému UV záření. Ultrafialové záření o vlnové délce $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ pohlcuje téměř úplně a o vlnové délce $\lambda = 0,3 - 0,4 \mu\text{m}$ do jisté míry [4].
- V atmosféře probíhají 2 druhy rozptylu (viz obr. 24), v závislosti na poměru velikosti molekuly k vlnové délce záření ($\pi D/\lambda$) [3]. Při střetu záření s malými molekulami vzniká tzv. „Rayleighův“ rozptyl a záření je rozloženo do všech směrů, oproti tomu u větších molekul vzduchu při střetu vzniká „Mieův“ rozptyl, kde rozptýlené záření pokračuje ve směru slunečního záření [3].

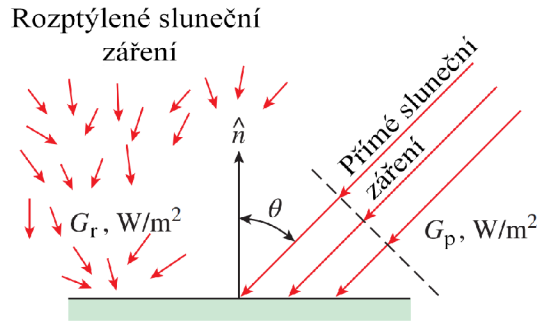


Obrázek 24: Rayleighův a Mieův rozptyl ([3], upraveno)

- Kyslík O_2 pohlcuje záření o vlnové délce $\lambda \doteq 0,76 \mu\text{m}$ [3].
- V oblasti infračerveného záření je absorpce dominantní vodní parou H_2O a oxidem uhličitým CO_2 .
- K rozptylu a absorpci přispívají také prachové částice a jiné nečistoty obsažené v atmosféře [3].

Celkové sluneční záření dopadající na povrch Země G_S je po průchodu atmosférou oslabeno (průměrně na 950 W/m^2) [4]. Při povrchu Země jde o součet rozptýleného G_r a přímého dopadajícího slunečního záření G_p (viz obr. 25). Velikost rozptýleného záření se pohybuje v závislosti na stavu atmosféry mezi 10% při jasném dni a téměř 100% z celkového dopadajícího záření při zataženém, velmi oblačném počasí [4].

$$G_S = G_p \cos \theta + G_r \quad (4.8)$$

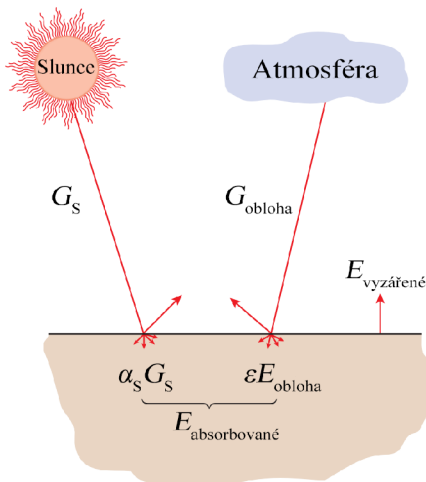


Obrázek 25: Dopadající záření na povrch Země ([4], upraveno)

Díky absorpci tepelného záření v atmosféře, především víceatomovými molekulami (H_2O a CO_2), musíme do dopadajícího záření na povrch Země počítat také se zářením od atmosféry. Pro výpočet je vhodné uvažovat záření od černého tělesa [4] a poté dostáváme vztah pro záření od oblohy dopadající na povrch

$$G_{\text{obloha}} = \sigma T_{\text{obloha}}^4, \quad (4.9)$$

kde T_{obloha} je efektivní teplota oblohy. Její hodnota závisí na podmínkách atmosféry, $T_{\text{obloha}} = 230 \text{ K} = -43,15^\circ\text{C}$ pro chladnou, čistou oblohu a $T_{\text{obloha}} = 280 \text{ K} = 6,85^\circ\text{C}$ pro teplou, oblačnou oblohu [4]. Pak tepelný tok pro povrch vystavený jak slunečnímu záření tak záření od oblohy (viz obr. 26) lze spočítat dle vztahu (4.10).



$$\begin{aligned} \dot{q} &= \sum E_{\text{absorbované}} - \sum E_{\text{vyzářené}} \\ &= E_{\text{slunce, absorbované}} + E_{\text{oblohy, absorbované}} - E_{\text{vyzářené}} \\ &= A_s G_S + \epsilon \sigma T_{\text{obloha}}^4 - \epsilon \sigma T_p^4 \\ &= A_s G_S + \epsilon \sigma (T_{\text{obloha}}^4 - T_p^4) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Obrázek 26: Povrch vystavený slunečnímu záření a záření od atmosféry ([4], upraveno)

4.1.1 Energetická bilance

Trenberth a kolektiv [8] zkoumali energetickou bilanci Země a provedli řadu měření pro určení všech vlivů vstupující do energetického oběhu. Výsledkem jejich práce je obrázek 27, který ukazuje globální toky energie planety Země sledované v období od března 2000 až po květen 2004.

Do atmosféry vstupuje sluneční záření o velikosti $G_S = 341,3 \text{ Wm}^{-2}$ (průměrná hodnota v závislosti na čase a lokalitě), část je odražena mraky a atmosférou $G_{S,od,atm} = 79 \text{ Wm}^{-2}$ a část je odražena při dopadu na povrch $G_{S,od,p} = 23 \text{ Wm}^{-2}$. Celková energie od slunečního záření je potom $G_{S,c} = 239,4 \text{ Wm}^{-2}$

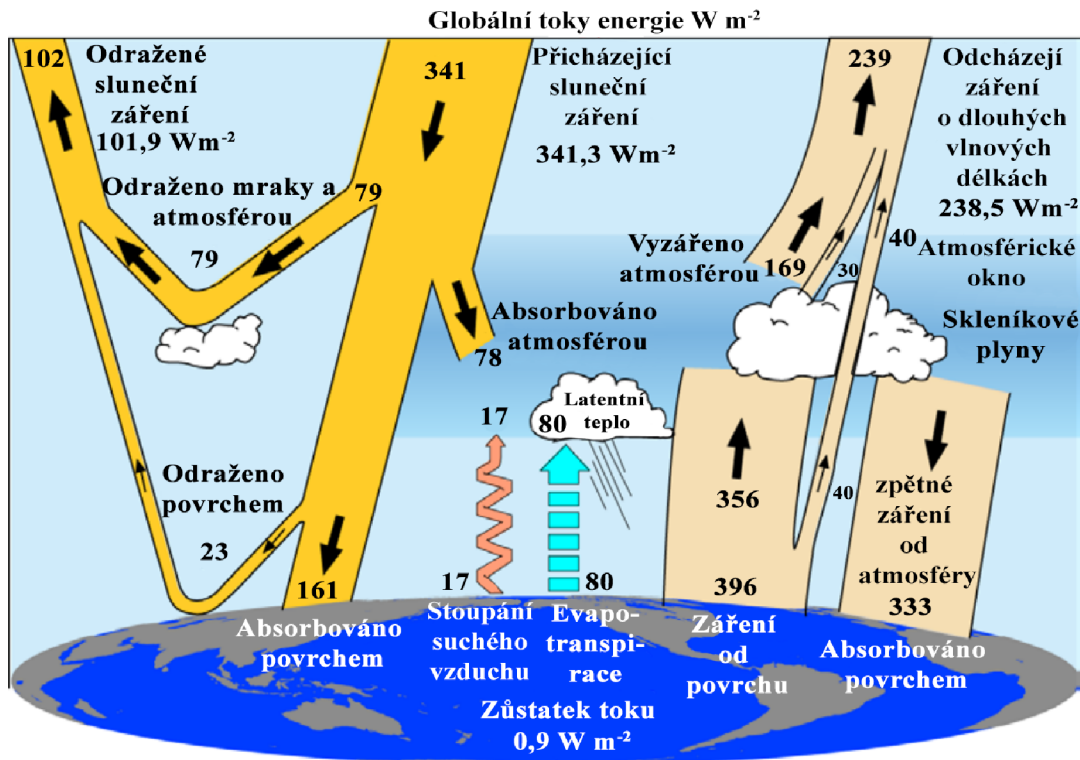
Odcházející záření o dlouhých vlnových délkách je složeno ze záření od atmosféry $E_{atm} = 169 \text{ Wm}^{-2}$, záření odraženého od povrchu $G_R = 40 \text{ Wm}^{-2}$ a záření odražené mraky $G_m = 30 \text{ Wm}^{-2}$. Celkové odcházející záření ze Země je potom o velikosti $E_{0,c} = 238,5 \text{ Wm}^{-2}$. V ideálním případě by platila rovnováha mezi vstupujícím a odcházejícím zářením, ale vstupují převyšuje a vzniká tak kladný tepelný tok a Země se otepluje.

$$G_{S,c} - E_{0,c} = 239,4 - 238,5 = 0,9 \text{ Wm}^{-2} \quad (4.11)$$

Na povrch dopadá sluneční záření o velikosti $G_{S,abs} = 161 \text{ Wm}^{-2}$, záření od atmosféry $E_{atm} = 333 \text{ Wm}^{-2}$. Celkové dopadající záření o velikost $G_{S,p,c} = 494 \text{ Wm}^{-2}$. Přenos od povrchu je od záření povrchu $E_p = 396 \text{ Wm}^{-2}$, vedení 17 Wm^{-2} a evaporací 80 Wm^{-2} . Celkem $E_{p,c} = 493 \text{ Wm}^{-2}$.

$$G_{S,p,c} - E_{p,c} = 494 - 493 \doteq 1 \text{ Wm}^{-2} \quad (4.12)$$

Tato nerovnováha se díky rostoucímu obsahu skleníkových plynů v atmosféře zvyšuje.



Obrázek 27: Energetická bilance ([8], upraveno)

4.1.2 Aplikace sluneční energie

V důsledku dopadajícího záření, o krátkých vlnových délkách, a vyzařovaného záření, o dlouhých vlnových délkách, se při aplikaci sluneční energie počítá u povrchu se dvěma vlastnostmi. Emisivitou ε a sluneční absorptancí A_S [3, 4]. Právě poměr těchto vlastností A_S/ε je důležitý inženýrský parametr [3]. Povrchy určené pro sběr sluneční energie by měly mít vysokou hodnotu A_S a nízkou hodnotu ε , naopak povrchy, u kterých chceme minimální příjem tepelné energie, by měly mít vysokou hodnotu ε a malou hodnotu A_S [4]. Ukázka vlastností (A_S , ε) a poměru A_S/ε pro běžné materiály (viz tabulka 3).

Tabulka 3: Sluneční absorptance, emisivita pro běžné materiály ([3, 4], upraveno)

Povrch	A_S	ε (300 K)	A_S/ε
Hliník leštěný	0,09	0,03	3,0
Hliník eloxovaný	0,14	0,84	0,17
Hliníková fólie	0,15	0,05	3
Beton	0,60	0,88	0,68
Červená cihla	0,63	0,93	0,68
Asfalt	0,90	0,90	1
Černá barva	0,97	0,97	1
Bílá barva	0,14	0,93	0,15
Lidská pokožka	0,62	0,97	0,64
Sníh	0,28	0,97	0,29

Se sluneční energií se pracuje i u tepelné regulace budov. Průběh slunečního záření při vstupu přes okno/sklo je na obrázku 28. Dopadající záření sklo částečně absorbuje (20 %) a zbylou část propustí (80 %), z této absorbované části pak sklo samo o sobě vyzáří ještě další část tepla (4 %) do budovy [4]. Poté se definuje parametr „Solar heat gain coefficient (SHGC)“, a je vyjádřen [4]:

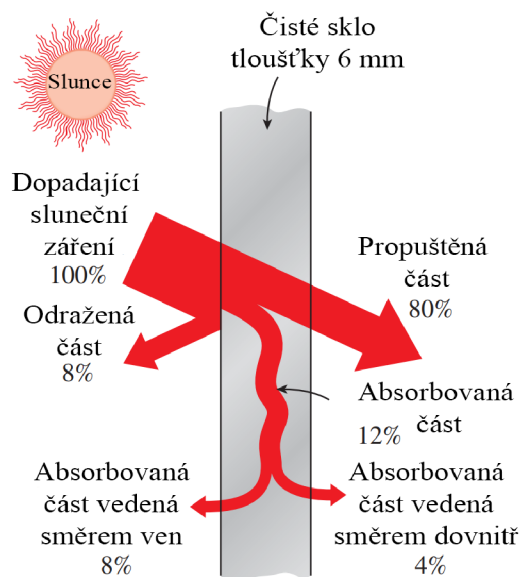
$$\begin{aligned} \text{SHGC} &= \frac{\text{hustota tepelného toku skrz okno}}{\text{sluneční záření dopadající na okno}} \\ &= \frac{\dot{q}_{\text{slunce,zisk}}}{\dot{q}_{\text{slunce,dopad}}} = T_S + f_i A_S \end{aligned} \quad (4.13)$$

kde: A_S = sluneční absorptance skla
 f_i = vstupující část od absorbovaného záření
 (T_S) = propuštěná složka
 $(f_i A_S)$ = vyzářená složka

Hodnota se pohybuje mezi $\text{SHGC} = 0 - 1$, kde 1 znamená otevřený prostor bez zasklení. Pro standardní sklo o tloušťce 3 mm je $\text{SHGC} = 0,87$. [4].

$$\dot{Q}_{\text{slunce,zisk}} = \text{SHGC} \times S_s \times \dot{q}_{\text{slunce,dopad}} \quad (4.14)$$

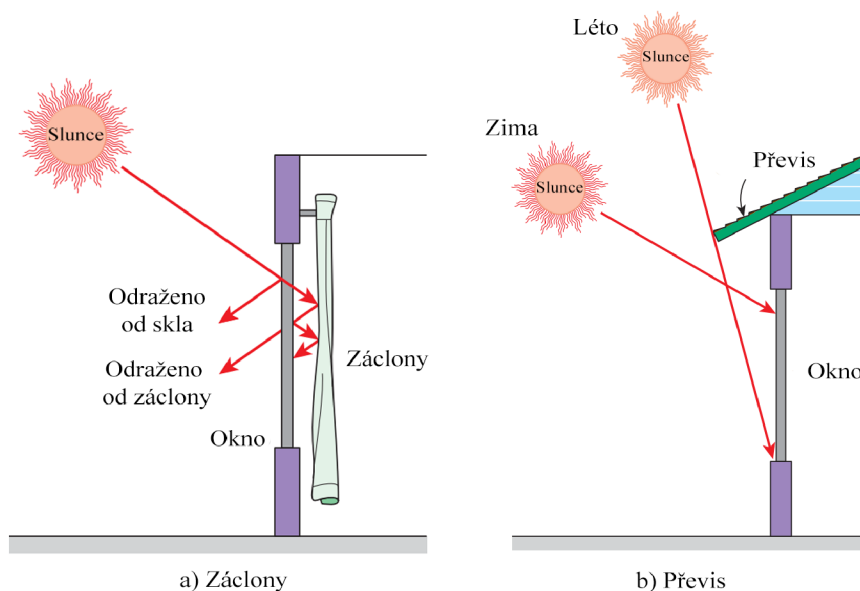
kde: S_s = obsah prosklené plochy okna
 $\dot{q}_{\text{slunce,dopad}}$ = tepelný tok od slunečního záření dopadající na okno



Obrázek 28: Distribuce solárního záření při dopadu na čisté sklo ([4], upraveno)

Dalším parametrem je „stínící koeficient“ (shading coefficient SC). Tento parametr porovnává jiné druhy stínící techniky (viz obr. 29) s klasickým sklem o tloušťce 3 mm [4].

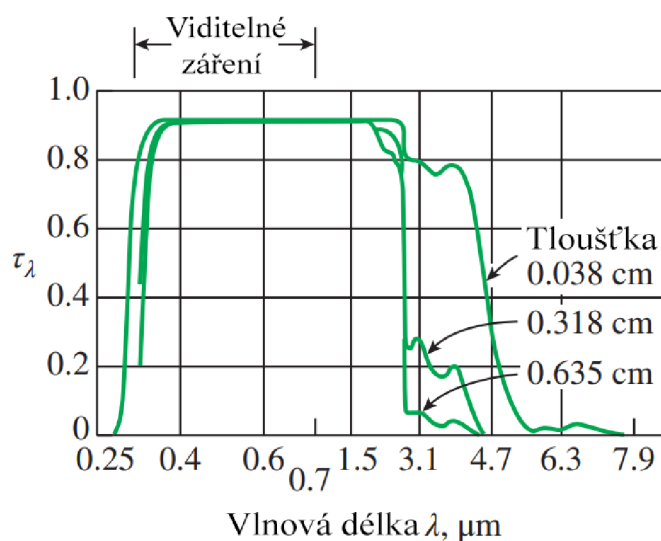
$$\begin{aligned}
 SC &= \frac{\text{Zísaný tepelný tok od slunce}}{\text{Zísaný referenční tepelný tok od slunce}} \\
 &= \frac{SHGC}{SHGC_{ref}} = \frac{SHGC}{0.87} = 1,15 \times SHGC
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$



Obrázek 29: Ukázka různé stínící techniky ([4], upraveno)

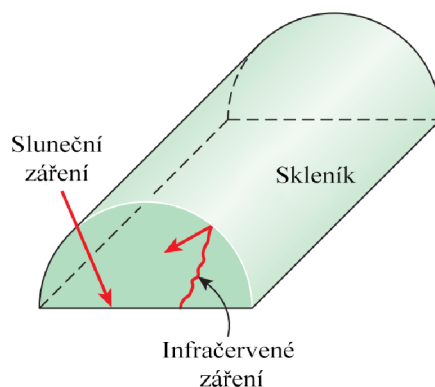
4.2 Skleníkový efekt

Pro zachycení tepla lze využít rozdílné transmisivity materiálu pro různé vlnové délky (spektrální transmisivita). Například materiál propustí záření od zdroje o vysoké teplotě (krátké vlnové délky) a naopak záření vyzářené od zdroje o malé teplotě nepropustí (dlouhé vlnové délky). Tomuto jevu se říká „Skleníkový efekt“ a jak vyplývá z jeho názvu, sklo je typickým materiálem s rozdílnou transmisivitou pro různé vlnové délky. Sklo je k tomuto velmi vhodné, jelikož propouští téměř většinu slunečního záření a pro téměř většinu infračerveného záření je nepropustné [4]. Na obrázku 30 lze vidět spektrální transmisivitu pro sklo o různé šířce. S rostoucí tloušťkou skla se křivka uzavírá a absorptance pro infračervené záření roste.



Obrázek 30: Spektrální transmisivita skla při pokojové teplotě pro různé tloušťky ([4], upraveno)

Typický příklad využití tepelného záření v běžném životě je skleník (viz. 31). Využitím skleníkové efektu udržuje teplotu uvnitř vyšší a umožňuje tak pěstování rostlin se specifickými potřebami.

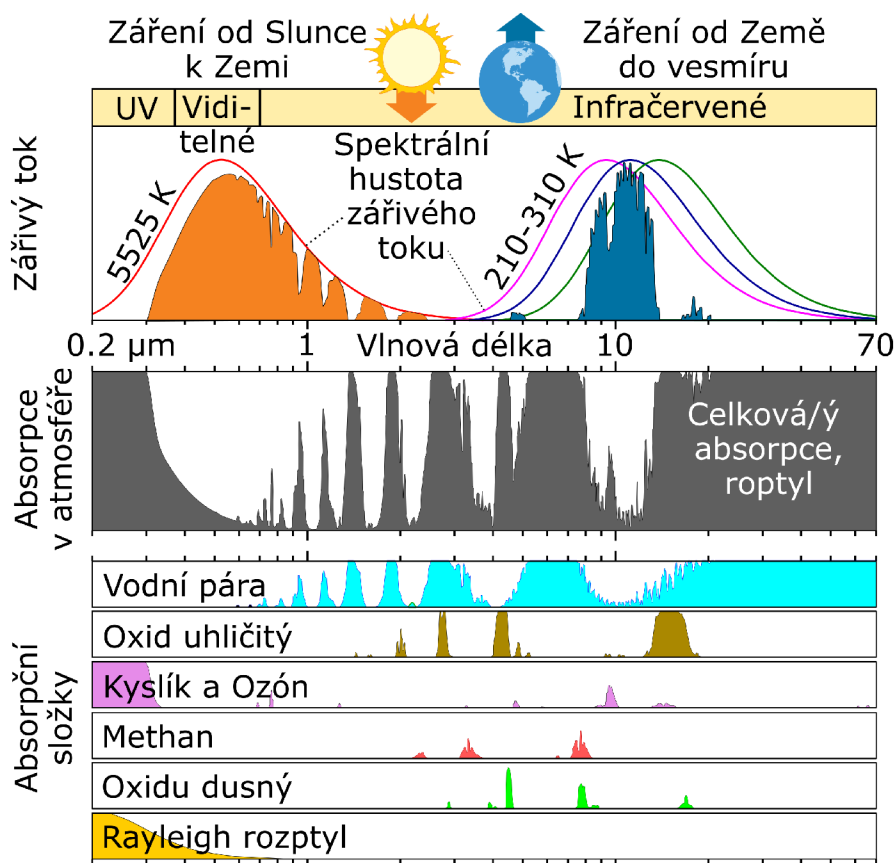


Obrázek 31: Skleníkový efekt ve skleníku ([4], upraveno)

4.3 Globální oteplování

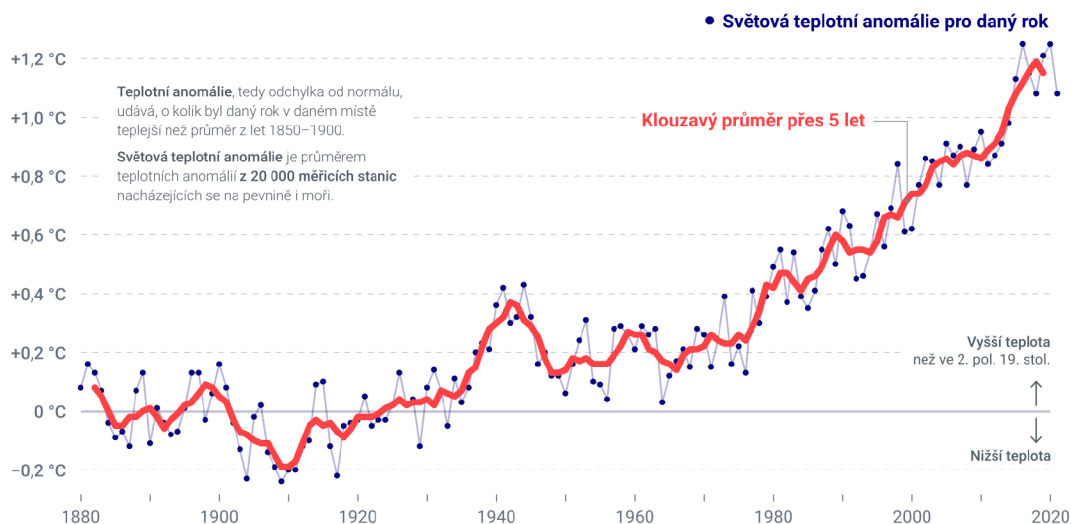
Globální oteplování je velkým tématem dnešní doby. Jedním z hlavních příčin oteplování planety Země je právě již zmíněný skleníkový efekt. Zemi si lze představit jako prostý skleník, kde funkci skla plní atmosféra Země. Ta je složena ze skleníkových plynů, které propouští dlouhé vlny slunečního záření, ale krátké vlnové záření vyzářené od povrchu Země absorbují. Mezi hlavní skleníkové plyny patří [5]:

- vodní pára (H_2O)
- oxid uhličitý (CO_2)
- methan (CH_4)
- oxid dusný (N_2O)
- Freony
 - CFC_{11}
 - CFC_{12}



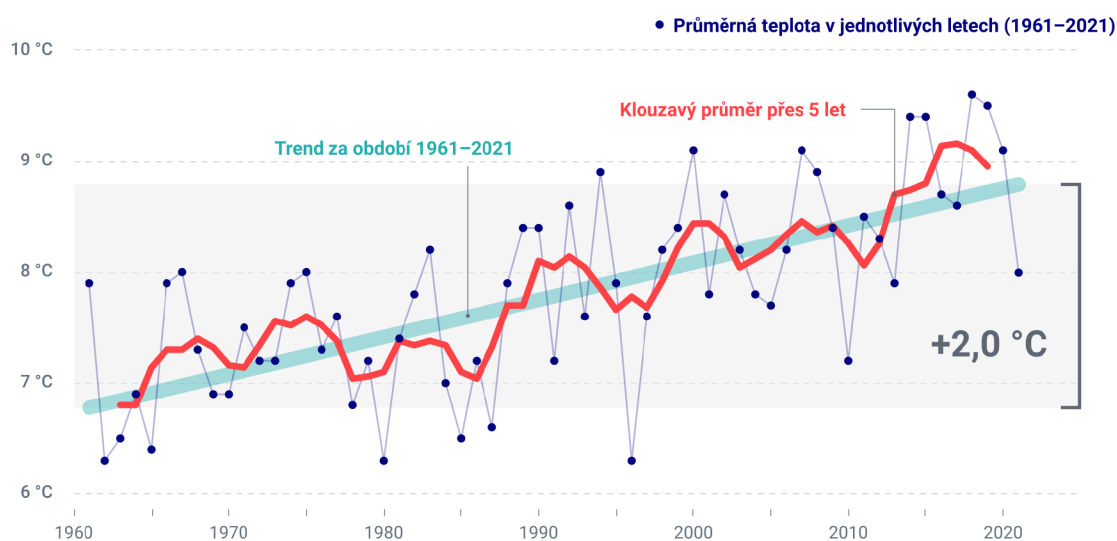
Obrázek 32: Absorpce záření v atmosféře ([9], upraveno)

Skleníkový efekt je pro život na Zemi velmi důležitý. Udržuje průměrnou teplotu povrchu Země na $t = 15^\circ\text{C}$, bez skleníkových plynů a skleníkového efektu by teplota na Zemi byla kolem $t = -20^\circ\text{C}$ [5]. Je to přirozený jev, který se ale vlivem lidské činnosti projevuje stále silněji než dříve. Lidským faktorem se obsah skleníkových plynů v atmosféře zvyšuje a energetická bilance (viz obr.27) je v nerovnováze a teplota planety se zvyšuje (viz obr. 33).



Obrázek 33: Změna teploty Země v důsledku globálního oteplování ([10], upraveno)

Obrázek 33 udává, že svět se oteplil přibližně o 1,2 °C od poloviny 19. století a rychlost v posledních 40 letech je 0,2 °C za desetiletí [10]. Pro Českou Republiku se průměrná teplota zvýšila o 2 °C, průběh teplot a teplotní trend popisuje obrázek 34 [11].



Obrázek 34: Změna teploty pro Českou Republiku ([11], upraveno)

Pro porovnání vlivu skleníkových plynů se zavádí pojem „GWP“ (global warming potentials - potenciál globálního oteplování), který porovnává vliv konkrétního skleníkového plynu s oxidem uhličitým (CO_2), jak v rámci síly na skleníkový efekt, tak na dobu po kterou vydrží v atmosféře [5]. Uvádí se proto s časovým intervalem, nejčastěji 20, 100, 500 let (GWP_{20} , GWP_{100} , GWP_{500}).

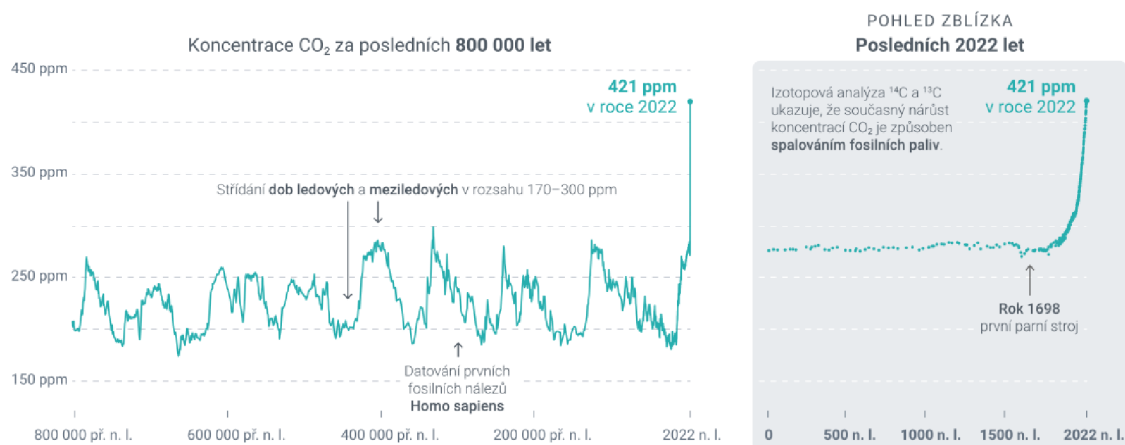
Jednotkou GWP je ekvivalent oxidu uhličitého ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), který udává kolik kg CO_2 se rovná vlivu 1 kg daného skleníkového plynu na globální oteplování. Množství skleníkového plynu se udává v jednotkách koncentrace ppm (parts per million), ppb (parts per billion) nebo ppt (parts per trillion). Vlastnosti základních skleníkových plynů jsou v tabulce 4.

Tabulka 4: Vlastnosti skleníkových plynů ([5], upraveno)

Plyn	Přírodní koncentrace kolem roku 1750	Globální průměrná koncentrace v roce 2012	Průměrná změna v koncentraci v letech 2005–2012	Životnost v atmosféře (v letech)	GWP_{100}
CO_2	228 ppm	393 ppm	2,0 ppm/rok	5 až 200	1
CH_4	720 ppb	1,819 ppb	6,4 ppb/rok	12	25
N_2O	270 ppb	325 ppb	0,9 ppb/rok	114	298
CFC_{12}	0	524 ppt	-0,8 ppt/rok	100	10,900
CFC_{11}	0	241 ppt	-1,8 ppt/rok	45	4,750

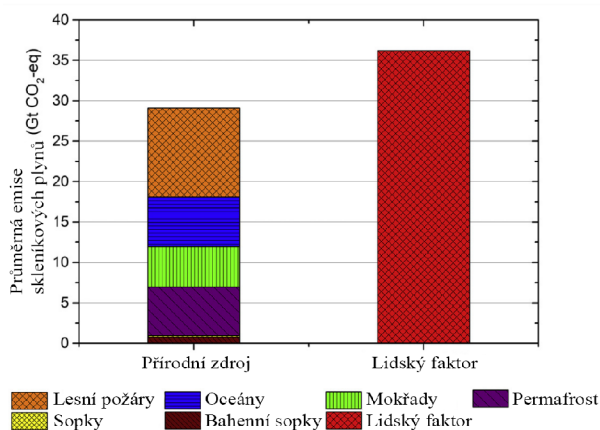
Na obrázku 32 můžeme vidět jakou část slunečního záření a záření od povrchu Země absorbují skleníkové plyny. Hlavním skleníkovým plynem je vodní pára, ta ale na rozdíl od ostatních není člověkem výrazně ovlivňována. Obsah oxidu uhličitého (CO_2), methanu (CH_4) a oxidu dusného (N_2O) v atmosféře je jak přírodního původu, tak vytvořeného člověkem (antropogenního původu). Freony (CFC_{11} , CFC_{12}) jsou čistě antropogenního původu.

Obsah skleníkových plynů se začal zvyšovat kolem roku 1750 (období začátku průmyslové revoluce), do téhle doby se stav skleníkových plynů udržoval v ustálených mezích [5]. Na obrázku 35 je vidět vývoj koncentrace CO_2 . Přestože podrobnější přímé měření začalo až kolem roku 1950, díky nepřímému měření se můžeme dostat k datům starým až 800 000 let. Hlubokými vrty, které probíhají na Antarktidě a v Grónsku, získáváme ledové jádra s uchovanými bublinkami vzduchu, které nám po analýze dodávají informace o složení atmosféry v minulosti [12].

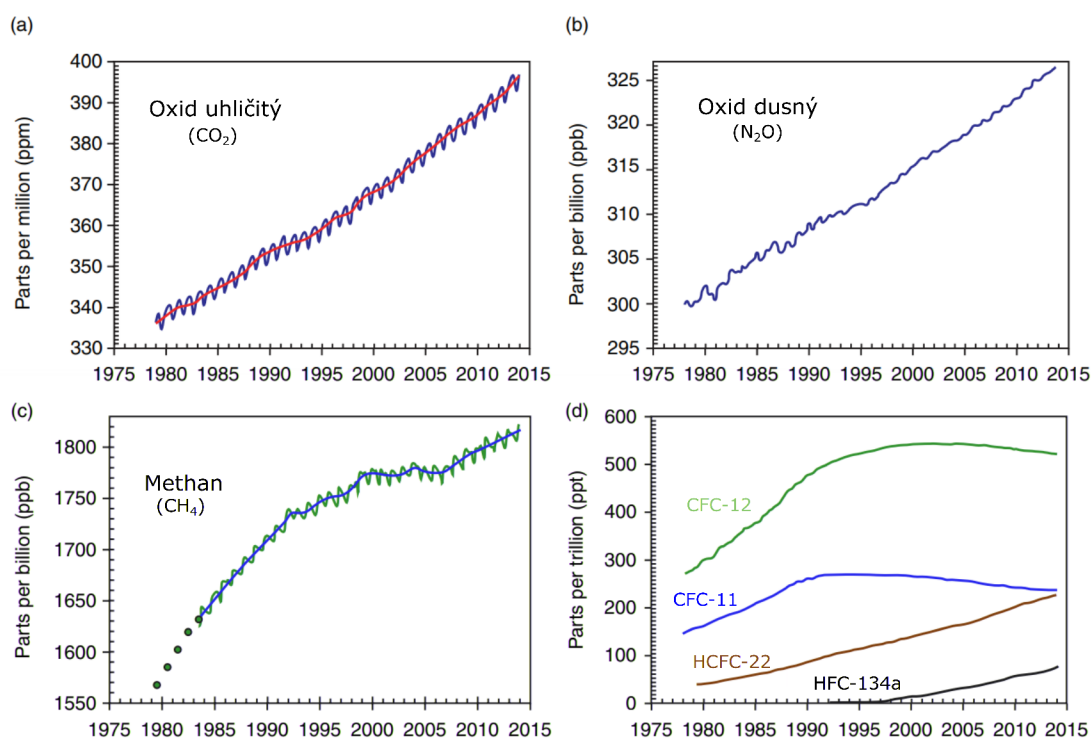


Obrázek 35: Vývoj koncentrace CO_2 v atmosféře ([13], upraveno)

Mezi hlavní přírodní zdroje skleníkových plynů patří lesní požáry, oceány, mokřady, permafrost, sopky, bahenní sopky a zemětřesení. Mezi lidské faktory patří zejména spalování fosilních paliv, výroba cementu, pěstování rýže. Porovnání mezi přírodním a antropogenním původem je na obrázku 36. Obsah methanu a oxidu dusného také roste (viz 37). Klesající trend na grafu d) v obrázku 37 je způsoben snížením emisí freonů, používaných jako chladicí médium (např. pro klimatizace) [5]. Bylo totiž objeveno, že freony chemickými reakcemi v atmosféře oslabují ozonovou vrstvu a způsobují vznik tzv. ozonové díry.



Obrázek 36: Porovnání přírodního a antropogenního zdroje emisí skleníkových plynů ([14], upraveno)



Obrázek 37: Vývoj koncentrace skleníkových plynů v atmosféře (1975 – 2015) ([5], upraveno)

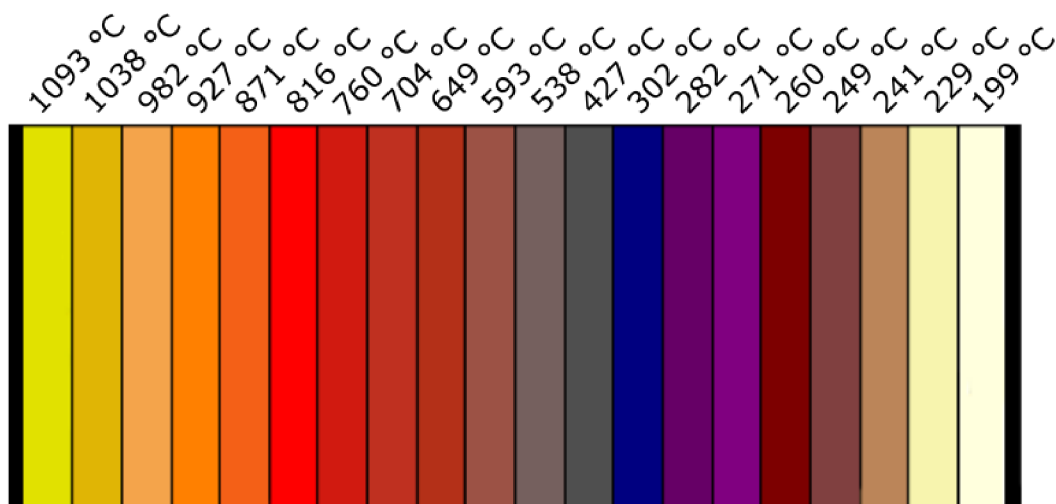
4.4 Souvislost barvy předmětu s jeho teplotou

Barva předmětu je spojena s vlastnostmi povrchu absorbovat a reflektovat dopadající viditelné světlo. Výsledná barva předmětu pro lidské oko je rovna reflektované části viditelného záření. Například zelený list obsahující pigment chlorofyl absorbuje fialovou, modrou, žlutou, oranžovou a červenou část viditelného záření a odražená zelená část nám pak udává výslednou barvu. Toto platí pro předměty s nízkou teplotou.

Předměty samy o sobě vyzařují elektromagnetické záření, ale díky nízké teplotě se pohybují pro nás v neviditelné oblasti, konkrétně v infračerveném spektru. S rostoucí teplotou se ale vlnová délka posouvá podle Wienova zákona (2.8) směrem ke kratším vlnovým délkám a dostává se tak do oblastí viditelného spektra.

Draperův bod (anglicky „Draper point“) je určená teplotní hranice, při které téměř všechny pevné materiály „září“ (začínají vyzařovat viditelné světlo). Hraniční teplota je $T = 798 \text{ K} = 525 \text{ °C}$

Toho lze využít pro přibližné určení teploty pouhým pozorováním. Při zpracování oceli může například kovář podle barvy kovu určit, v jaké tepelné oblasti se nachází, a dle toho dále postupovat. Příklad průběhu změny barvy při kování s rostoucí teplotou je na obr. 38. Další typickým příkladem je klasická vláknová žárovka, kde se maximum vlnové délky λ_{max} posune až do oblasti žluté barvy viditelného spektra.



Obrázek 38: Průběh záření oceli (překresleno dle [15])

4.5 Radiační štíty

Pro zmírnění dopadajícího tepelného záření lze využít radiačních štítů. Speciálně ve vesmíru, kde se nachází vakuum, je přenos zářením jediným mechanismem pro tepelnou kontrolu a při návrhu vesmírných zařízení je tomuto věnována velká pozornost [6].

Štíty o více vrstvách mohou chránit teplotně citlivé části satelitu od dopadajícího slunečního záření. Na obrázku 39 je ukázka radiačního štítu o pěti vrstvách pro Webbův

vesmírný dalekohled, který operuje v oblasti infračerveného spektra $\lambda = 0,6 - 25 \mu\text{m}$ [6]. Radiční štít zde chrání dalekohled proti externím zdrojům záření a zároveň udržuje sám sebe chladným, aby nevyzařoval záření sám na sebe a neovlivnil měření [16]. Jednotlivé vrstvy jsou velmi tenké. Vrstva nejbližší slunci má $0,025 \text{ mm}$ a nejnižší vrstva je kolem 100 nm [16].



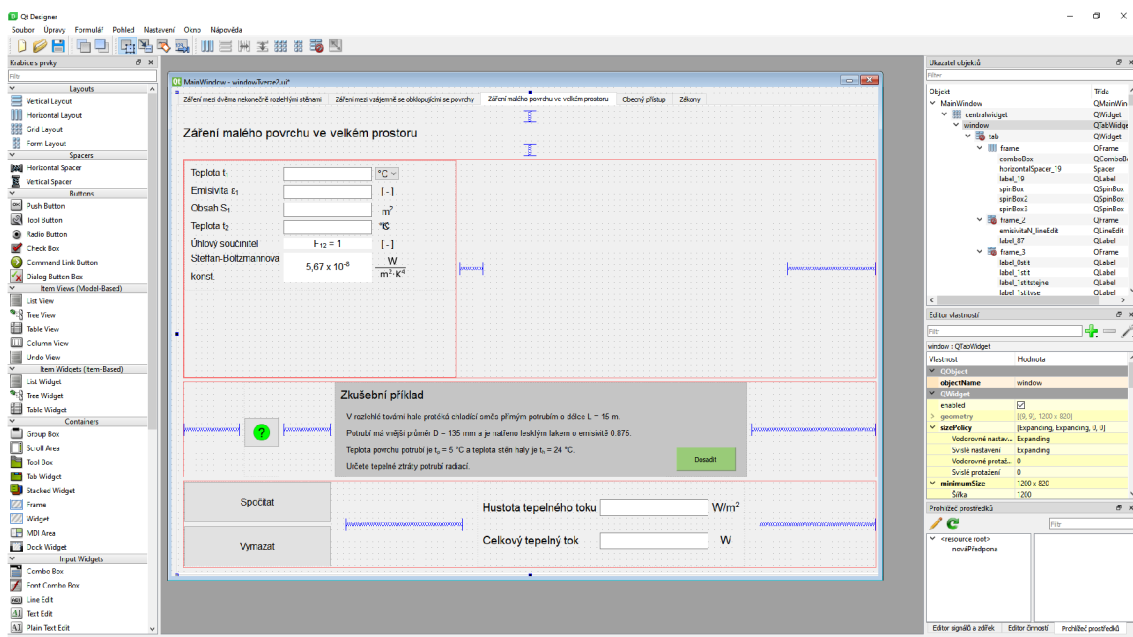
Obrázek 39: Radiční štíty pro Webbův teleskop [17]

5 Program pro základní výpočet přenosu tepla zářením

Program je napsán v programovacím jazyce Python (verze 3.9) [18]. Jedná se o vysokoúrovňový programovací jazyk, v dnešní době velmi populární díky své jednoduchosti a přehledné syntaxi. Nabízí široké možnosti použití od tvorbu softwaru, webových stránek až po zpracování vědeckých dat, tvorbu her [19]. Lze využít velké množství knihoven, které rozšiřují základní možnosti programovacího jazyka. Při tvorbě programu byly použity následující knihovny:

- PyQt5 pro tvorbu uživatelského prostředí využitím aplikace Qt Designer.
- Matplotlib pro tvorbu grafů
- Numpy pro matematické operace

Na obrázku 40 lze vidět konečnou verzi GUI (grafické uživatelské rozhraní) vytvořené v aplikaci Qt designer [20]. Bylo zvoleno záložkové rozvržení pro snadný přechod mezi různými typy příkladů.



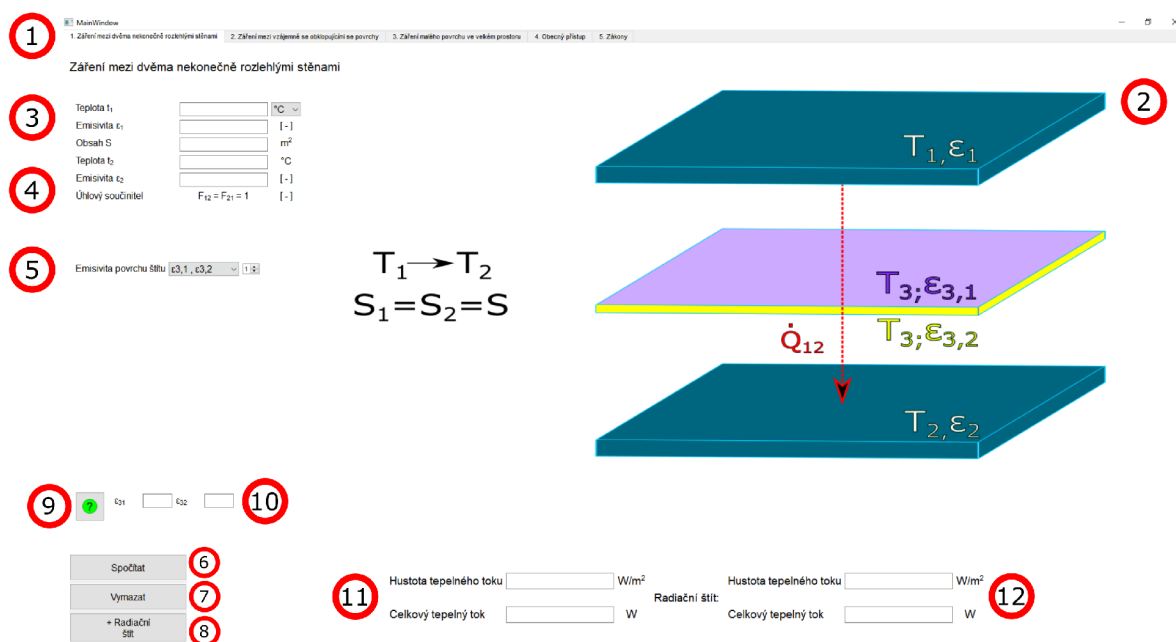
Obrázek 40: Tvorba uživatelského rozhraní v aplikaci Qt designer

Celkem je vytvořeno 5 záložek:

1. Záření mezi dvěma nekonečně rozlehlými stěnami
2. Záření mezi vzájemně se obklopujícími se povrchy
3. Záření malého povrchu ve velkém prostoru
4. Záření mezi dvěma povrchy obecně
5. Základní zákony přenosu tepla zářením

5.1 Popis prostředí

1. Záložka ve které se zrovna uživatel nachází
2. Obrázek geometrie k příkladu
3. Prostor pro zadání vstupních veličin povrchu 1
4. Prostor pro zadání vstupních veličin povrchu 2
5. Určení emisivity pro radiační štít + počet štítů
6. Tlačítko „Spočítat“ provede výpočet
7. Tlačítko „Vymazat“ vymaže obsah vstupních hodnot a výsledek
8. Tlačítko „+ Radiační štít“ rozšíří příklad o možnost radiačního štítu
9. Pomocné tlačítko pro zobrazení nápovědy s ukázkovým příkladem
10. Zadání emisivity pro radiační štít
11. Kolonka pro zobrazení výsledku ve formě hustoty tepelného toku a celkového tepelného toku.
12. Kolonka pro zobrazení výsledků s účinkem radiačního štítu
13. Zkušební příklad pro výpočet
14. Tlačítko pro dosažení zkušebních vstupních hodnot



Obrázek 41: Prostředí programu

5.2 Ukázka řešení

Funkčnost programu byla ověřena na příkladech ze cvičení a přednášek předmětu termomechanika.

5.2.1 Příklad 1

Dva rovnoběžné povrchy o stejné velikosti plochy $S = 1,8 \text{ m}^2$ se vzájemně ozařují. Jeden je z oxidované oceli o teplotě $t = 105 \text{ °C}$ a emisivitě $\varepsilon_1 = 0,61$. Druhý povrch je z červených cihel o teplotě $t = 22 \text{ °C}$ a emisivitě $\varepsilon_2 = 0,93$. Určete tepelný tok \dot{Q} vzájemně vyzářený mezi povrchy.

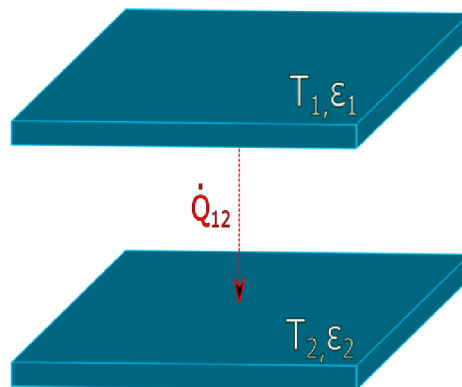
Řešení

Příklad lze řešit jako záření mezi dvěma nekonečnými deskami, volíme proto záložku číslo 1. Dosadíme vstupní hodnoty (viz obr. 42). Při zápisu lze desetinných čísel lze použít jak čárku, tak tečku. U teploty lze zvolit jednotku stupeň Celsia °C , anebo Kelvin K.

Záření mezi dvěma nekonečně rozlehlými stěnami

Teplota t_1	<input type="text" value="105"/>	<input type="text" value="°C"/>
Emisivita ε_1	<input type="text" value="0.61"/>	<input type="text" value="[-]"/>
Obsah S	<input type="text" value="1.8"/>	<input type="text" value="m²"/>
Teplota t_2	<input type="text" value="22"/>	<input type="text" value="°C"/>
Emisivita ε_2	<input type="text" value="0.93"/>	<input type="text" value="[-]"/>
Úhlový součinitel	<input type="text" value="F<sub>12</sub> = F<sub>21</sub> = 1"/>	

$$T_1 \rightarrow T_2$$
$$S_1 = S_2 = S$$



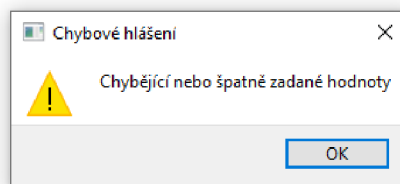
Obrázek 42: Dosazení vstupních hodnot pro příklad 1

Pokud je vše vyplněno správně, tak po stisknutí tlačítka „spočítat“ se zobrazí výsledek (viz 43) ve formátu hustoty tepelného toku \dot{q} [W] a tepelného toku \dot{Q} [W m^2].

Hustota tepelného toku	<input type="text" value="425.275"/>	<input type="text" value="W/m²"/>
Celkový tepelný tok	<input type="text" value="765.495"/>	<input type="text" value="W"/>

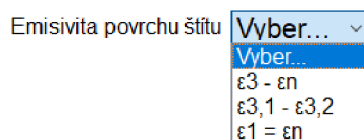
Obrázek 43: Výsledek pro příklad 1

V případě, že je pole vynecháno nebo napsáno špatně, zobrazí se chybové hlášení (viz obr. 44).



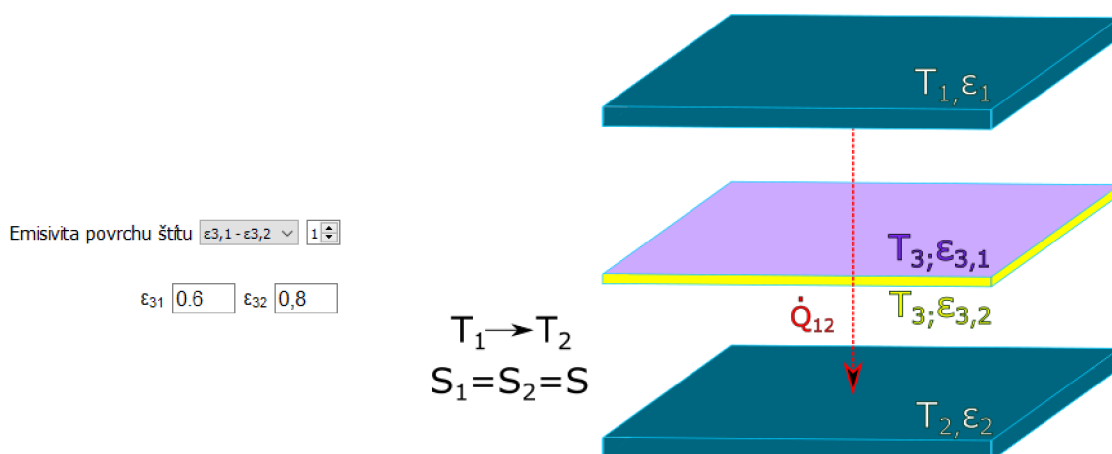
Obrázek 44: Chybové hlášení

Je zde možnost příklad rozšířit o radiační štít, stačí kliknout na tlačítko „+ Radiační štít“, které nám přidá možnost nadefinovat parametry radiačního štítu. Radiační štít může mít emisivitu stejnou pro obě své strany $\varepsilon_{\text{štít}}$ anebo odlišnou $\varepsilon_{\text{štít},1}$ a $\varepsilon_{\text{štít},2}$. Parametry počítaného štítu vybere z nabídky dle obrázku 45.



Obrázek 45: Výběr emisivity u radiačního štítu

Přidáme tedy do zadání příkladu 1 radiační štít o emisivitě $\varepsilon_{31} = 0,7$ na jedné straně štítu a o emisivitě $\varepsilon_{32} = 0,8$ na druhé straně (viz obr. 46).



Obrázek 46: Nadefinovaný radiační štít

Výsledný tepelný tok se poté zobrazí v novém poli pro výsledek (viz obr. 47).

Hustota tepelného toku W/m²
 Radiční štít:
 Celkový tepelný tok W

Obrázek 47: Výsledek pro upravený příklad 1 s radičním štítem

5.2.2 Příklad 2

Kamna o rozměrech $a = 0,4 \text{ m} \times b = 0,6 \text{ m} \times c = 1,3 \text{ m}$ jsou umístěna v místnosti o rozměrech $x = 5 \text{ m} \times y = 3 \text{ m} \times z = 2,5 \text{ m}$. Teplota povrchu kamen je $t_1 = 150 \text{ °C}$ a jeho emisivita je $\varepsilon_1 = 0,5$. Teplota povrchu zdí místnosti je $t_2 = 15 \text{ °C}$ a jeho emisivita je $\varepsilon_2 = 0,9$. Určete tepelný tok vzájemného záření mezi kamny a stěnami místnosti.

Řešení

Příklad se řeší jako záření mezi vzájemně se obklopujícími se povrchy, zvolíme záložku číslo 2. Vyplní se vstupní hodnoty (viz obr. 48).

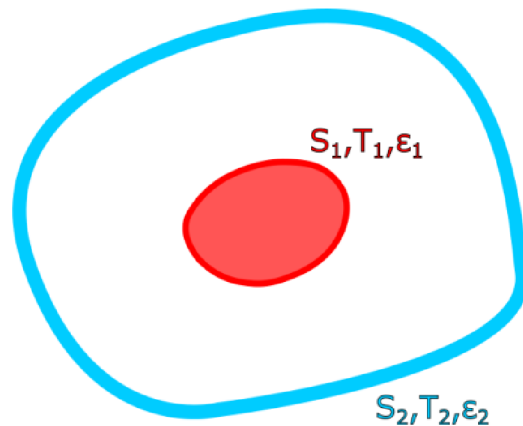
Záření mezi vzájemně se obklopujícími se povrchy

Obecně

Teplota t_1	<input type="text" value="150"/>	°C
Emisivita ε_1	<input type="text" value="0.5"/>	[-]
Obsah S_1	<input type="text" value="3.08"/>	m ²
Teplota t_2	<input type="text" value="15"/>	°C
Emisivita ε_2	<input type="text" value="0.9"/>	[-]
Obsah S_2	<input type="text" value="70"/>	m ²

Úhlový součinitel $F_{12} = 1$ [-]

$F_{12} = 1$
 $T_1 \rightarrow T_2$
 $S_2 \gg S_1$



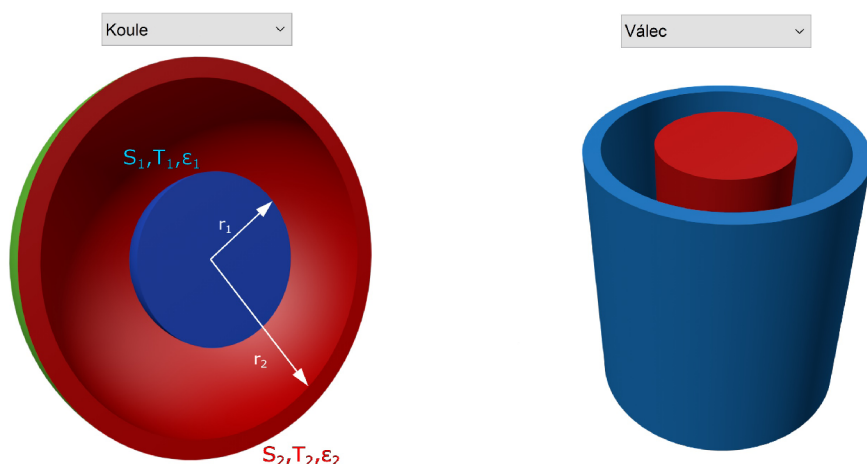
Obrázek 48: Dosazení vstupních hodnot pro příklad 2

Pokud je vše vyplněno správně, tak po stisknutí tlačítka „spočítat“ se zobrazí výsledek (viz obr. 49) ve formátu hustoty tepelného toku \dot{q} [W] a tepelného toku \dot{Q} [W m²].

Hustota tepelného toku W/m²
 Celkový tepelný tok W

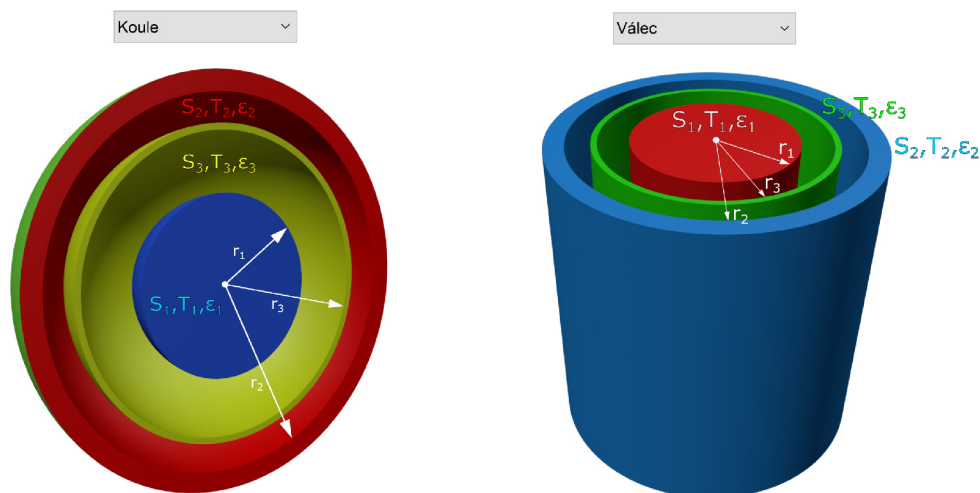
Obrázek 49: Výsledek pro příklad 2

Pro záření mezi obklopujícími se povrchy je zde možnost místo obecné geometrie vybrat geometrii vzájemně se obklopujících soustředných koulí nebo soustředných válců (viz obr. 50).



Obrázek 50: Geometrie pro soustředné koule a soustředné válce

Stejně jako u příkladu 1 je zde možnost přidání radičního štítu pro geometrii koule nebo válce (viz obr. 51).



Obrázek 51: Geometrie pro soustředné koule a soustředné válce + radiční štít

5.2.3 Příklad 3

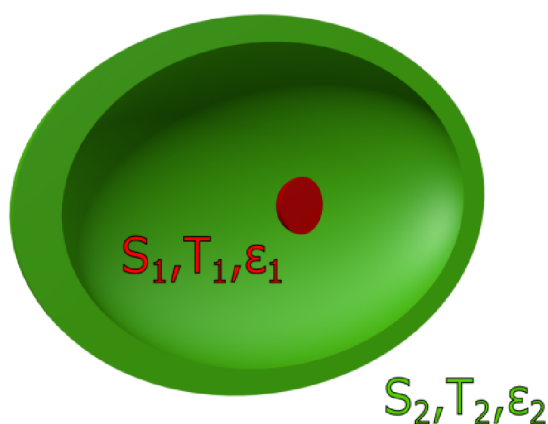
V rozlehlé tovární hale protéká chladicí směs přímým potrubím o délce $L = 15$ m. Potrubí má vnější průměr $D = 135$ mm a je natřeno lesklým lakem o emisivitě $\varepsilon_1 = 0.875$. Teplota povrchu potrubí je $t_p = 5$ °C a teplota stěn haly je $t_h = 24$ °C. Určete tepelné ztráty potrubí radiací.

Řešení

Příklad lze řešit díky malému rozměru potrubí oproti hale jako záření malého povrchu ve velkém prostoru, použijeme tedy záložku číslo 3. Vyplněné vstupní hodnoty (viz obr. 52).

Záření malého povrchu ve velkém prostoru

Teplota t_1	<input type="text" value="5"/>	°C
Emisivita ε_1	<input type="text" value="0.875"/>	[-]
Obsah S_1	<input type="text" value="6.36"/>	m ²
Teplota t_2	<input type="text" value="24"/>	°C
Úhlový součinitel	$F_{12} = 1$	[-]



Obrázek 52: Dosazení vstupních hodnot pro příklad 3

Pokud je vše vyplněno správně, tak po stisknutí tlačítka „spočítat“ se zobrazí výsledek (viz obr. 53) ve formátu hustoty tepelného toku \dot{q} [W] a tepelného toku \dot{Q} [W m²].

Hustota tepelného toku	<input type="text" value="-89.846"/>	W/m ²
Celkový tepelný tok	<input type="text" value="-571.422"/>	W

Obrázek 53: Výsledek pro příklad 3

5.2.4 Příklad 4

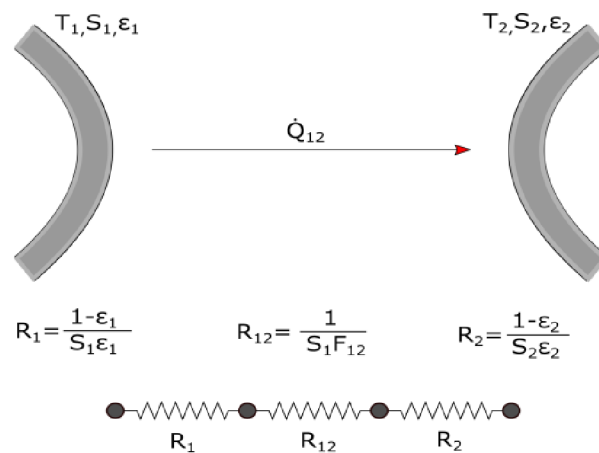
Přenos tepla radiací probíhá mezi tělesem 1 a 2. Těleso o povrchu $S_1 = 2,5 \text{ m}^2$, emisivitě $\varepsilon_1 = 0,7$ a teplotě $T_1 = 500 \text{ °C}$. Druhé těleso o povrchu $S_2 = 3 \text{ m}^2$, $\varepsilon_2 = 0,9$ a teplotě $T_2 = 20 \text{ °C}$. Úhlový součinitel $F_{12} = 0,9$. Vypočítejte tepelný tok \dot{Q}_{12} pro přenos tepla mezi povrchem 1 a 2.

Řešení

V případě, že úhlový faktor mezi dvěma povrchy není roven jedné $F_{12} \neq 1$, můžeme použít záložku číslo 4, která počítá přenos tepla zářením mezi dvěma obecnými povrchy bez jakékoli úpravy. Po zadání vstupních hodnot (viz obr. 54).

Záření mezi dvěma povrchy obecně

Teplota t_1	<input type="text" value="500"/>	°C ▾
Emisivita ε_1	<input type="text" value="0.7"/>	[-]
Obsah S_1	<input type="text" value="2.5"/>	m ²
Teplota t_2	<input type="text" value="30"/>	°C
Emisivita ε_2	<input type="text" value="0.9"/>	[-]
Obsah S_2	<input type="text" value="3"/>	m ²
Úhlový součinitel F_{12}	<input type="text" value="0.9"/>	[-]



Obrázek 54: Dosazení vstupních hodnot pro příklad 4

Pokud je vše vyplněno správně, tak po stisknutí tlačítka „spočítat“ se zobrazí výsledek (viz obr. 53) ve formátu hustoty tepelného toku \dot{q} [W] a tepelného toku \dot{Q} [W m²].

Hustota tepelného toku W/m²

Celkový tepelný tok W

Obrázek 55: Výsledek pro příklad 4

5.2.5 Základní zákony přenosu tepla zářením

Po zadání teploty se nám v této záložce číslo 5 zobrazí základní zákony přenosu tepla zářením.

Ukázka pro teplotu slunce $T = 5800\text{K}$ (viz obr. 58)

- Graf spektrální hustoty zářivého toku $E_{0,\lambda}$ pro Planckův vyzařovací zákon (2.7).
- Maximální vlnová délka λ_{max} (viz obr. 56) pro Wienův posunovací zákon (2.8).

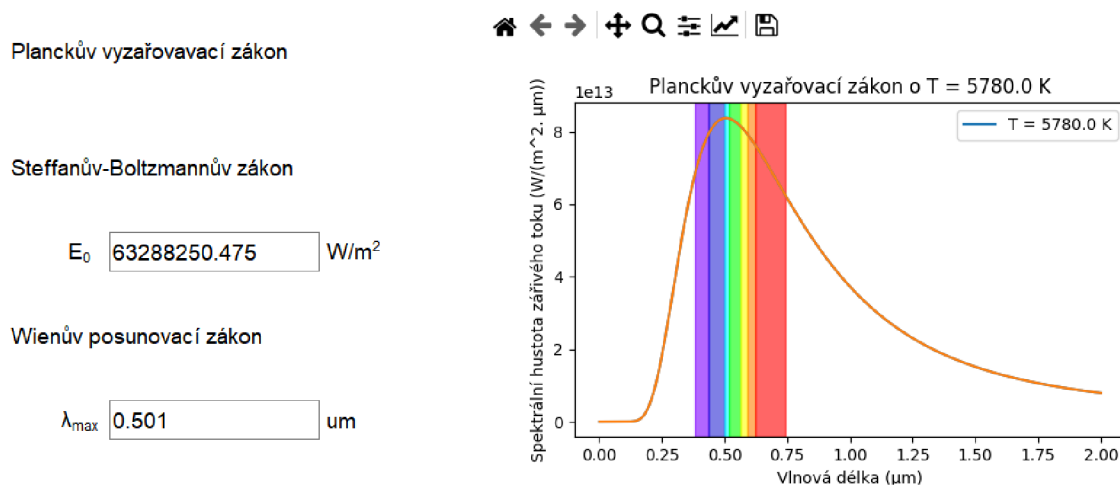
λ_{max} μm

Obrázek 56: Výsledek pro Wienův posunovací zákon

- Hustota zářivého toku E_0 (viz obr. 57) pro Stefanův-Boltzmannův zákon (2.9).

E_0 W/m^2

Obrázek 57: Výsledek pro Stefanův-Boltzmannův zákon



Obrázek 58: Ukázka záložky pro základní zákony záření

Závěr

Bakalářská práce se zabývá přenosem tepla zářením a jeho dopady kolem nás. Cílem bylo provést rešerši základních zákonů a pojmů, potřebných k pochopení dané problematiky. Na základě toho pak identifikovat a objasnit případy přenosu tepla zářením z běžného života. Součástí bylo také vytvořit skript pro řešení základních výpočtů při přenosu tepla zářením.

V práci byly identifikovány a analyzovány jevy, kde je přenos tepla zářením dominantní. Slunečnímu záření byla věnována většina pozornosti. Je zde popsán průběh slunečního záření od Slunce, přes atmosféru až po dopad na povrch planety Země. Dále je zde rozebrán skleníkový efekt a jeho vliv na globální oteplování. Souvislost barvy předmětu s jeho teplotou je zde také vysvětleno. Krátké ohlédnutí je zde věnováno i radiačním štítům a jejich využití ve vesmírném průmyslu.

Za účelem vytvoření skriptu, je v práci rozebrán postup při výpočtu přenosu tepla zářením mezi dvěma povrchy. Výpočtový skript byl napsán v programovacím jazyce Python. V nástavbě jazyka Python bylo vytvořeno i uživatelské rozhraní pro snadnější ovládní a přehlednost. Nakonec byla ze skriptu vytvořena samostatně spustitelná aplikace, pro snadný přístup bez potřeby instalování dalších nástaveb. Program byl vyzkoušen na zkušebních příkladech a v poslední části práce je popsán postup při výpočtu a použití programu na testovacích příkladech.

Program pro výpočet přenosu tepla zářením obsahuje záložky pro základní geometrie a jedna je věnována zákonům:

- Záření mezi dvěma nekonečně rozlehlými stěnami
- Záření mezi vzájemně se obklopujícími se povrchy
- Záření malého povrchu ve velkém prostoru
- Záření mezi dvěma povrchy obecně
- Základní zákony přenosu tepla zářením

Seznam použitých zdrojů

- [1] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [2] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika*. Druhé přepracované vydání. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [3] BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. *Fundamentals of Heat and Mass transfer*. Eight edition. USA: Wiley, 2017. ISBN 978-1-119-32042-5.
- [4] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. *Heat and Mass Transfer: fundamentals a applications*. Sixth editon. New York: McGraw-Hill, 2019. ISBN 978-0-07-339819-8.
- [5] INCROPERA, Frank P. *Climate change: a wicked problem : complexity and uncertainty at the intersection of science, economics, politics, and human behavior*. New York: Cambridge University Press, 2016. ISBN 978-1-107-10907-0.
- [6] HOWELL, John R.; MENGÜC, M. Pinar; DAUN, Kyle; SIEGEL, Robert. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Seventh edition. Boca Raton: CRC press, 2021. ISBN 978-0-367-34707-9.
- [7] WALD, Lucian. *Fundamentals of Solar Radiation*. First. London: CRC Press, 2021. ISBN 978-0-367-72588-4.
- [8] TRENBERTH, Kevin E.; FASULLO, John T.; KIEHL, Jeffrey. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2009, roč. 90, č. 3, s. 311–324 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>.
- [9] *Atmospheric Transmission* [online]. San Francisco: Robert A. Rohde, 2021 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_Transmission.svg.
- [10] *Vývoj světové teplotní anomálie* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/teplotni-anomalie>.
- [11] *Průměrná roční teplota v ČR* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/teplota-cr>.
- [12] METELKA, Ladislav; TOLASZ, Radim. *Klimatické změny: fakta bez mýtů*. První. Praha: Univerzita Karlova v Praze, Centrum pro otázky životního prostředí, c2009. ISBN 978-80-87076-13-2.
- [13] *Vývoj koncentrace CO₂ v atmosféře* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/koncentrace-co2>.
- [14] YUE, Xi-Liu; GAO, Qing-Xian. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research* [online]. 2018, roč. 9, č. 4, s. 243–252 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accr.2018.12.003>.
- [15] *Steel temperature chart* [online]. Elgin: FMA Communications, 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/how-to-heat-aluminum-to-avoid-cracking-after-bending>.

- [16] *JAMES WEBB SPACE TELESCOP* [online]. Washington, D.C.: NASA [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://webb.nasa.gov/content/observatory/sunshield.html>.
- [17] *NASA's Webb Sunshield Stacks Up to Test!* [online]. NASA/Chris Gunn, 2014 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/14753947223/in/album-72157624420579873/>.
- [18] SWEIGART, Albert. *Automate the boring stuff with Python: practical programming for total beginners*. San Francisco: No Starch Press, 2015. ISBN 978-1-59327-599-0.
- [19] *Python: About:Applications* [online]. Delaware: Python Software Foundation, c2023 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.python.org/about/apps/>.
- [20] FITZPATRICK, Martin. *Create GUI Applications with Python and Qt6: The hands-on guide to making apps with Python*. 5th edition. 2022. ISBN 9798831846126.

Seznam obrázků

1	Spektrum elektromagnetických vln ([2], upraveno)	12
2	Citlivost oka k viditelnému spektru [2]	13
3	Aproximace černého tělesa	13
4	Emisivita různých materiálů ([3], upraveno)	14
5	Rozpad záření dopadajícího na povrch	15
6	Spektrální hustota zářivého toku ([4], upraveno)	16
7	Spektrální hustoty zářivého toku ([3], upraveno)	17
8	Odvození 2. Kirchoffova zákona ([4], upraveno)	18
9	Povrchový odpor (překresleno dle [4] a upraveno)	19
10	Úhlový součinitel - geometrie ([3], upraveno)	20
11	Případy úhlového součinitele vidícího sám na sebe ([4], upraveno)	20
12	Pravidlo součtu [3]	21
13	Úhlový součinitel - případ symetrie [4]	21
14	Úhlový součinitel - případ superpozice [4]	22
15	Úhlový faktor diagram [3]	22
16	Tepelný tok mezi dvěma povrchy ([3], upraveno)	24
17	Prostorový odpor (překresleno dle [4] a upraveno)	24
18	Tepelný tok mezi dvěma povrchy v uzavřeném prostoru	25
19	Odporové schéma [4]	25
20	Radiační štít mezi rovnoběžnými deskami ([4], upraveno)	28
21	Geometrie Slunce–Země ([4], upraveno)	29
22	Sluneční iradiace dopadající na Zemi ([4], upraveno)	30
23	Spektrální iradiace slunečního záření ([4], upraveno)	30
24	Rayleighův a Mieův rozptyl ([3], upraveno)	31
25	Dopadající záření na povrch Země ([4], upraveno)	32
26	Povrch vystavený slunečnímu záření a záření od atmosféry ([4], upraveno)	32
27	Energetická bilance ([8], upraveno)	33
28	Distribuce solárního záření při dopadu na čisté sklo ([4], upraveno)	35
29	Ukázka různé stínící techniky ([4], upraveno)	35
30	Spektrální transmisivita skla při pokojové teplotě pro různé tloušťky ([4], upraveno)	36
31	Skleníkový efekt ve skleníku ([4], upraveno)	36
32	Absorpce záření v atmosféře ([9], upraveno)	37
33	Změna teploty Země v důsledku globálního oteplování ([10], upraveno)	38
34	Změna teploty pro Českou republiku ([11], upraveno)	38
35	Vývoj koncentrace CO ₂ v atmosféře ([13], upraveno)	39
36	Porovnání přírodního a antropogenního zdroje emisí skleníkových plynů ([14], upraveno)	40
37	Vývoj koncentrace skleníkových plynů v atmosféře (1975 – 2015) ([5], upraveno)	40
38	Průběh záření oceli (překresleno dle [15])	41
39	Radiační štíty pro Webbův teleskop [17]	42
40	Tvorba uživatelského rozhraní v aplikaci Qt designer	43
41	Prostředí programu	44
42	Dosazení vstupních hodnot pro příklad 1	45

43	Výsledek pro příklad 1	45
44	Chybové hlášení	46
45	Výběr emisivity u radiačního štítu	46
46	Nadefinovaný radiační štít	46
47	Výsledek pro upravený příklad 1 s radiačním štítem	47
48	Dosazení vstupních hodnot pro příklad 2	47
49	Výsledek pro příklad 2	47
50	Geometrie pro soustředné koule a soustředné válce	48
51	Geometrie pro soustředné koule a soustředné válce + radiační štít	48
52	Dosazení vstupních hodnot pro příklad 3	49
53	Výsledek pro příklad 3	49
54	Dosazení vstupních hodnot pro příklad 4	50
55	Výsledek pro příklad 4	50
56	Výsledek pro Wienův posunovací zákon	51
57	Výsledek pro Stefanův-Boltzmannův zákon	51
58	Ukázka záložky pro základní zákony záření	51

Seznam tabulek

1	Výpočet úhlového faktoru pro základní geometrii ([2], upraveno)	23
2	Tepelný tok pro časté případy ([3], upraveno)	26
3	Sluneční absorptance, emisivita pro běžné materiály ([3, 4],upraveno)	34
4	Vlastnosti skleníkových plynů ([5], upraveno)	39

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
O ₃	ozón
O ₂	kyslík
H ₂ O	vodní pára
CO ₂	oxid uhličitý
CH ₄	methan
N ₂ O	oxid dusný
CFC ₁₁	trichlorfluormethan
CFC ₁₂	dichlordifluormethan
CO _{2eq}	ekvivalent CO ₂
GWP	potenciál globálního oteplování (z anglického „Global warming potential“)
SGHC	z anglického „Solar heat gain coefficient“
SC	z anglického „Shading coefficient“

Symbol	Rozměr	Veličina
A	[1]	absorptance
A_S	[1]	sluneční absorptance
c_0	$[\text{m s}^{-2}]$	rychlost světla ve vakuu
c	$[\text{m s}^{-2}]$	rychlost světla v jiném prostředí
C_1	$[\text{W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2]$	konstanta
C_2	$[\mu\text{m K}]$	konstanta
C_3	$[\mu\text{m K}]$	konstanta
D	[m]	průměr
e	[J]	energie
E	$[\text{W}/\text{m}^2]$	hustota zářivého toku šedého tělesa
E_0	$[\text{W}/\text{m}^2]$	hustota zářivého toku černého tělesa
E_λ	$[\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}]$	spektrální hustota zářivého toku
$E_{0,\lambda}$	$[\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}]$	spektrální hustota zářivého toku černého tělesa
F	[1]	úhlový faktor
f	[Hz]	frekvence
G	$[\text{W}/\text{m}^2]$	irradiace
G_A	$[\text{W}/\text{m}^2]$	absorbovaná část irradiace
G_R	$[\text{W}/\text{m}^2]$	odražená část irradiace
G_T	$[\text{W}/\text{m}^2]$	transmitovaná část irradiace
G_S	$[\text{W}/\text{m}^2]$	sluneční konstanta
G_0	$[\text{W}/\text{m}^2]$	extraterrestriální záření
h	$[\text{J s}^{-1}]$	Planckova konstanta
J	$[\text{W}/\text{m}^2]$	radiozita
k	$[\text{J K}^{-1}]$	Boltzmannova konstanta
\dot{Q}	[W]	tepelný tok
\dot{q}	$[\text{W}/\text{m}^2]$	hustota tepelného toku
R	[1]	reflektance
r	[m]	poloměr
S	$[\text{m}^2]$	plocha
T	[1]	transmitance
t	$[\text{°C}]$	teplota
T	[K]	absolutní teplota
ε	[1]	Emisivita
λ	[m]	vlnová délka
σ	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$	Stefanova-Boltzmannova konstanta

Seznam příloh

Práce obsahuje elektronické přílohy:

Příloha A Aplikace: PTZ.exe

Příloha B Zdrojový kód: Main.py