



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Simulace tepelného toku infračervených zářičů

Heat flux simulation of infrared emitters

Autoreferát disertační práce

Studijní program: P 2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612V045 – Technická kybernetika

Autor práce: Ing. Jan Loufek
Školitel: doc. Ing. Jiřina Královcová, Ph.D.



Abstrakt

Obsahem této disertační práce je řešení problematiky simulace přenosu tepla. Práce je zaměřena především na úlohy přenosu tepla zářením. Předmětem práce je popsat fyzikální procesy, které při přenosu tepla zářením probíhají, pro dané procesy vhodně navrhnout a následně realizovat model. Dále jsou výsledky implementovaného modelu porovnány s reálně změřenými hodnotami s cílem prokázat, že zpracovaný popis přenosu tepla zářením dostatečně vhodně vystihuje chování reálného systému.

Část disertační práce je věnována rešerši problematiky simulace přenosu tepelné energie zářením. Další část rešerše je zaměřena na numerické řešení a porovnání různých metod určování pohledových faktorů.

Práce je zaměřena na návrh a realizaci modelu přenosu tepla zářením s cílem poskytovat charakteristiky tepelného toku na ozařované ploše za stanovených fyzikálních podmínek. Představovaný model se skládá ze tří základních prvků – vyzařovací těleso, reflektor a ozařovaná plocha. Navrhovaný model je složen z elementů, které mají vlastnosti šedého tělesa.

Výstupní charakteristiky představovaného modelu je možné využít k nahrazení fyzického měření charakteristik tepelného toku na ozařované ploše v různých výškách a s různým náklonem. Dalším možným využitím je návrh alternativního tvaru reflektoru pomocí optimalizace využívající simulace. Dále lze model využít k analýze chování ozařování různě zakřivených ploch, či vzájemné působení více zářičů ozařujících stejnou plochu.

Klíčová slova:

Simulace, Záření, Tepelné pole, Infračervený zářič, Měkčená umělá kůže

Abstract

The aim of this doctoral thesis is to handle problems of the heat transfer simulation in an appropriate way. The work is mainly focused on the issues of radiation heat transfer. This thesis is intended to clearly describe physical processes of radiation heat transfer. Furthermore, it is necessary to appropriately design the model. By using the implementation of the proposed model, it must be verified the simulated with real values, so that it has been proven that the developed radiation heat transfer model description best suited to the real behavior.

Part of the thesis is dedicated to research problems of radiation heat transfer simulations. Another part of the research is focused on the numerical solutions and on various view factor methods comparison.

The work is focused on the design and implementation of a radiation heat transfer model to provide characteristics of heat flux at the surface irradiated under given physical conditions. Presented model consists of three basic elements – radiating body, reflector and an irradiated surface. The proposed model is composed of elements that have the properties of a gray body.

The output characteristics of the presented model are possible to be used as replacement of a physical heat flux measurement on the irradiated surface at various heights and with different tilting. Another possible use is an alternative reflector shape design using optimization by simulation. Furthermore, the model can be used to analyze the behavior of radiation on various curved surfaces or interaction of multiple sources irradiating the same area.

Keywords:

Simulation, Radiation, Thermal field, Infrared emitter, Artificial soft skin

Obsah

Úvod.....	5
1 Cíle disertační práce.....	8
2 Návrh modelu přenosu tepla zářením	10
2.1 Model tepelného toku.....	10
2.2 Následné využití modelu.....	14
3 Realizace modelu a jeho využití	18
3.1 Měření charakteristik zářiče	18
3.2 Implementace modelu ve 2D	18
3.2.1 Implementace modelu	18
3.2.2 Hledání alternativního tvaru	20
3.2.3 Hodnocení řešených úloh.....	21
3.3 Implementace modelu ve 3D	24
3.3.1 Implementace modelu	25
3.3.2 Určení pohledových faktorů metodou Monte Carlo	26
3.3.3 Určení pohledových faktorů metodou dvojnásobné numerické plošné integrace.....	28
3.4 Kalibrace modelu	30
3.5 Tepelné pole při použití více zářičů ve virtuálním ohřevu.....	32
4 Shrnutí výsledků	35
Závěr	37
Seznam použité literatury	39
Publikační činnost.....	40

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou simulace přenosu tepla a to konkrétně přenosu tepla záření. V obecné rovině je teplota veličinou, která je velmi často středem zájmu v oblasti aplikací a to nejen co se týká jejich monitorování, ale i řízení. Regulace teploty je často rozhodující pro vlastní kvalitu výsledného produktu, procesu nebo také pro bezpečnost daného procesu jako takového.

Téma této disertační práce spadá do oblasti výzkumu, týkajícího se měření a regulace teploty v procesu výroby umělých kůží. Jedná se o materiály, které se používají jako povrchová úprava palubních desek automobilů apod. Tyto umělé kůže se vyrábějí v procesu tváření. Základním prvkem tohoto procesu je forma, která je vytvarována do podoby vyráběné kůže. Základním problémem uvedené metody tváření je ohřátí formy. Stěžejními požadavky na ohřev jsou: rovnoměrnost, rychlost ohřátí a přesná teplota. Tyto požadavky závisí jak na postupu ohřevu, tak i na vlastnostech formy jako takové.

Při ohřevu skořepinové formy s použitím infračervených zářičů, který je využíván při výrobním postupu producenta Magna Exteriors & Interiors Bohemia, je nutné dbát na vhodné rozmístění zářičů tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného ohřevu dané formy. Distribuční charakteristika intenzity tepelného záření je výrobcem dodávána pouze ve velmi omezené podobě, proto je nutné tyto charakteristiky měřit popřípadě modelovat, aby bylo možné s použitím simulačních nástrojů určit rozložení tepelné energie na ozařované formě a případně optimalizovat rozdělení intenzity na této formě.

Základním fyzikálním procesem, na kterém je založen ohřev formy, je přenos tepelné energie záření. Přenos tepla v tomto případě neprobíhá ve hmotném prostředí, protože se tepelná energie přenáší v podobě elektromagnetického záření. Při použití infrazářičů je hlavním problémem rozmístění infrazářičů nad plochou tak, aby byla ozařovaná plocha co nejrovnoměrněji ohřátá. Vhodným nástrojem pro testování různých variant je simulace komplexního systému sestávajícího se z formy a sady zářičů. Pro realizaci komplexní simulace je třeba znát osvitovou funkci konkrétního zářiče. Tuto charakteristiku lze získat buď pomocí měření vlastností konkrétního zářiče či pomocí simulace s použitím modelu přenosu tepla záření.

V souvislosti s výzkumem optimalizace ohřevu forem infračervenými zářiči se tato disertační práce soustředila na vývoj modelu infrazářiče s cílem poskytnout jeho

osvitovou funkci nebo navrhnout některé prvky zářiče tak, aby bylo dosaženo, pokud možno optima osvitové funkce.

Tato předkládaná práce zahrnuje návrh a realizaci modelu přenosu tepla zářením. Navrhovaný model je zaměřen na simulaci průmyslově používaných infračervených zářičů. Obecně se jedná o trojdimenzionální problém, jehož model je v této práci uvažován také v dvourozměrné variantě. Současně s návrhem modelu bylo nutné provést měření charakteristik zářičů, které slouží ke kalibraci tohoto modelu. Na základě měření a problematika návrhu alternativních tvarů reflektorové části zářiče. Tato práce shrnuje fyzikální a geometrické předpoklady potřebné pro návrh takového modelu.

Vlastní text disertační práce je kromě tohoto úvodu členěn do sedmi kapitol. První kapitola vytyčuje cíle disertační práce a definuje jednotlivé její body. Druhá kapitola seznamuje s použitím ohřevu infračerveným zářením v praxi. Jsou zde představeny některé dílčí problémy, které jsou v rámci dané problematiky řešeny. Nejprve je zde popsán postup simulace komplexního ohřevu formy ve výrobní lince firmy Magna Exteriors & Interiors Bohemia, následně je zde uvedena problematika globální optimalizace rozmístění zářičů nad touto formou. Závěr této kapitoly stručně popisuje reálné nasazení popisovaného řešení v praxi. Třetí kapitola shrnuje základní procesy, fyzikální veličiny a zákony týkající se přenosu tepla se zaměřením především na přenos tepla zářením. Postupně jsou zde uvedeny nejdůležitější vztahy vystupující v modelu radiace. Stručně je zde popsáno technické použití ohřevu infračervenými zářiči a rozdělení infrazářičů do kategorií podle jejich vlastností. Čtvrtá kapitola shrnuje rešerši prací týkajících se základního problému v simulaci přenosu tepla zářením a to určování hodnoty pohledového faktoru mezi objekty v prostoru. Jsou zde probrány metody jako Monte Carlo, adaptivní numerická integrace či metoda zkřížených strun. Metody jsou zde hodnoceny z hlediska časové náročnosti a přesnosti dané metody. Pátá kapitola je věnována samotnému návrhu modelu přenosu tepelné energie zářením a jejímu následnému použití. Šestá kapitola prezentuje aplikační realizaci modelu přenosu tepla zářením, popsaného v předchozích kapitolách. Hlavní pozornost je zde věnována nástroji IRE Designer, který je navržen pro praktické použití při návrhu alternativních tvarů reflektoru pro infračervené zářiče. Dále je zde popsána aplikace IRE Designer 3D, která je trojrozměrnou realizací stejného modelu jako v případě dvourozměrné aplikace. Implementace modelu v trojrozměrném prostředí však přináší

mnohé problémy, které jsou v práci postupně představeny. Dále tato verze obsahuje jednoduché rozhraní pro implementaci dalších metod numerického řešení pohledových faktorů. Na závěr této kapitoly je zde představen vizualizační nástroj IRE Plotter, který pracuje se speciálním textovým formátem navrženým pro měření intenzity tepelného toku. V poslední sedmé kapitole jsou shrnuty výsledky dosažené v rámci této disertační práce a možnost návazností na dosažené výsledky.

Obsah této práce tematicky souvisí s projektem MPO TIP: FR-TI1/266 "Inovace výroby umělých kůží". Problematika řešená ve zmiňovaném projektu zapadá do technické realizace výrobního procesu technologií Slush moulding, která využívá sady infrazářičů jako zdroj tepelné energie k ohřevu skořepinové formy.

1 Cíle disertační práce

Jedním ze základních prvků výroby umělých kůží je ohřev formy. Tento ohřev musí být rovnoměrný a pokud možno i rychlý. Rovnoměrnost ohřevu je kritická především pro kvalitu, respektive použitelnost výsledku, rychlost je důležitá pro efektivitu výroby. Oba uvedené požadavky pak jdou často proti sobě. Prodloužením doby ohřevu lze dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení teplotního pole a naopak. Uvedené téma sebou nese řadu výzkumných i technických problémů. Jedním z nich je např. vlastní způsob ohřevu formy. Ten je v praxi realizován různými způsoby, které lépe či hůře umožňují naplnění základních požadavků ohřevu.

Jedním z možných způsobů ohřevu formy je bezkontaktní ohřev pomocí sady infračervených zářičů [3]. Primárním procesem je zde přenos tepla sáláním mezi zářiči a formou. Sekundárně pak probíhají další procesy jako vedení tepla ve formě a podobně. Příspěvek jediného zářiče k lokálnímu ohřevu formy je determinován na jedné straně teplem tokem zářiče, který je závislý na aktuálních parametrech formy i zářiče, na straně druhé tvarem (natočením) formy vzhledem k zářiči. Důležitým úkolem je pak návrh rozmístění sady zářičů takovým způsobem, aby navržené řešení bylo technicky realizovatelné a zároveň zajišťovalo dostatečnou rovnoměrnost ohřevu tedy primárně pokud možno rovnoměrný tepelný tok z příspěvků všech zářičů na celé ploše formy. Důležitou roli hraje i forma a její vlastní geometrie – obecně se jedná o zakřivenou plochu s řadou relativně malých (vzhledem k velikosti zářičů) prohlubní.

K testování rovnoměrnosti ohřevu pro konkrétní navržený způsob rozmístění zářičů kolem formy se s výhodou používá i numerický model připravený ve spolupráci firmy LENAM s.r.o. s Technickou univerzitou v Liberci [10]. Tento model předpokládá známé charakteristiky jednotlivých zářičů – tj. pro daný zářič, teplotu, materiálové vlastnosti, vzdálenost zářiče od plochy je třeba mít k dispozici stopu tepelného toku na rovinné ploše. Základní prvky charakteristiky jednotlivých zářičů poskytují výrobci. Tato data však nejsou dostatečně podrobná, aby je bylo možné využít v modelu nasazeném pro řešení reálných úloh. Z tohoto důvodu se používají buď změřené charakteristiky, nebo je možné konkrétní charakteristiky v konkrétních konfiguracích získat simulací, což je problematika, kterou se zabývá tato disertační práce.

Z výše uvedené tematiky vychází i téma a cíle této disertační práce. Její užší zaměření je na modely tepelného toku individuálních zářičů v kontextu problematiky

ohřevu forem pro výrobu umělých kůží prostřednictvím infračervených zářičů s ohledem na využitelnost výsledků práce při realizaci modelu komplexního systému forma-zářiče. V souladu s tím byly postupně stanoveny dva základní cíle této práce:

- Návrh a realizace modelu okamžitého tepelného toku individuálního zářiče, který bude poskytovat stopu tepelného toku v definované ploše za konkrétních teplotních podmínek. Základním požadavkem je kompatibilita výsledků se vstupy výše zmíněného modelu celého systému.
- Návrh a implementace prostředků pro definování, případně modifikaci, profilu reflektoru zářiče.

V souladu se stanovenými cíli je základním prvkem tématu práce proces přenosu tepla zářením a jeho numerické řešení. Numerické postupy zpravidla předpokládají vyhodnocení pohledových faktorů mezi jednotlivými částmi simulovaného systému. Dílčími kroky práce pak jsou:

- Analýza problematiky numerického popisu přenosu tepla zářením.
- Studium metod výpočtu pohledových faktorů a návrh vhodné metody pro modely realizované v disertační práci.
- Zpracování reálných dat.
- Implementace, validace a kalibrace modelů na reálných datech.
- Variantní výpočty některých konfigurací.

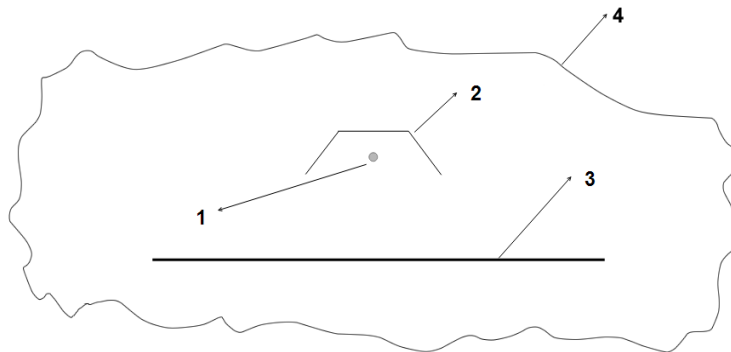
2 Návrh modelu přenosu tepla zářením

V této kapitole je uveden návrh modelu tepelného toku, který byl realizovaný v rámci této disertační práce. Návrh modelu je zaměřen na simulaci tepelného toku průmyslových infrazářičů.

2.1 Model tepelného toku

Uvažujeme reálný systém (Obr. 2-1) sestávající se z těles následujících tří typů:

1. Zářiče – v reálném systému je zářičem wolframové vlákno ve tvaru spirály umístěné v halogenové trubici.
2. Reflektory – reflektor zářiče slouží k odrazu tepelného toku směřujícího od požadované plochy. V reálném systému jsou tyto plochy obvykle složeny z leštěného hliníku.
3. Ohřívané objekty – zpravidla zakřivená plocha, která vzniká galvanizací niklu. Pro efektivnější přenos tepelné energie je tato plocha obarvena na černo.



Obr. 2-1 Schematické zobrazení reálného systému
(1) zářič, (2) reflektor, (3) ozařovaná plocha a (4) okolí ozařovaného systému

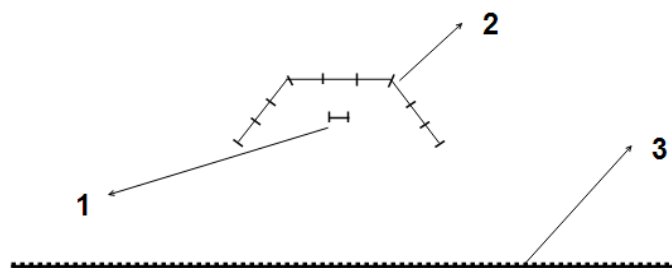
Dále předpokládáme, že pro každou část systému jsou dány

- emisivita $\varepsilon(-)$,
- teplota $T(K)$,

jako funkce $\vec{x} = (x, y, z)$.

Naším cílem je výpočet okamžité hodnoty funkce tepelného toku q (Wm^{-2}) jako funkce (x, y, z) .

Pro účely zavedení matematického modelu je možné na všechny objekty definovaného systému nahlížet jednotně – o jednotlivých dílčích objektech systému předpokládáme, že jsou definovány svými hraničními plochami. Systém hraničních ploch představuje modelovanou doménu Ω . Systém hraničních ploch (Ω) reprezentuje povrch všech uvažovaných objektů systému. Nad systémem těchto hraničních ploch zavedeme diskretizaci hraničních ploch objektů na systém N elementů u takový, že sjednocení elementů $\{u_i\}$, kde $\bigcup_{i=1}^N u_i = \Omega$ popisuje povrchy všech elementů modelu, kde pro každé dva elementy platí, že mají prázdný průnik $u_i \cap u_j = \emptyset; i \neq j$.



Obr. 2-2 Schéma diskretizace základní konfigurace složený ze základních elementů: zářiče (1), reflektoru (2) a ozařované plochy (3).

Pro každý element u_i rozkladu je potom dáno:

- Umístění elementu v prostoru je zadáno hraničními body daného elementu $\vec{p}_{ij} = (p_{ijx}, p_{ijy}, p_{ijz})$ jako množina bodů popisujících vrcholy daného elementu u . Ve 2D se jedná o úsečku popsanou dvěma krajními body a ve 3D je to polygon popsany vrcholy.
- Normálový vektor $\vec{n}_i = (n_{ix}, n_{iy}, n_{iz})$ – určuje incidentní stranu elementu. Elementy ozařované plochy jsou definovány s incidentní stranou směřovanou k zářiči. Pro některé části simulovaného systému se v rozkladu mohou vyskytovat dvojice elementů se stejnou pozicí, ale opačným normálovým vektorem. Příkladem může být reflektor, u kterého je třeba uvažovat obě strany jako incidentní.
- Emisivita $\varepsilon(-)$ – hodnota určující schopnost elementu vyzařovat respektive absorbovat tepelnou energii.
- Teplota $T(K)$ – povrchová teplota každého elementu (výpočet okamžitého tepelného toku).

Systém elementů u doplníme o element reprezentující tzv. obalovou plochu na $N+1$ elementů (Obr. 2-1 část 4). Tento specifický element je popsán pouze teplotou a emisivitou, slouží k uzavření řešeného systému (představuje vnější okolí). Parametry této obalové plochy je pro výpočet nutné zvolit tak, aby výrazně neovlivnila chování uvažovaného modelu (např. vysokým tepelným tokem z okolí). Hodnota emisivity prostředí je volena blízká se nulové hodnotě a teplota očekávanou v daném prostředí, aby její vliv na daný model byl zanedbatelný.

Na definovaném systému elementů pak hledáme řešení funkci q (Wm^{-2}), která představuje hodnoty tepelného toku dopadajícího na ozařované těleso. Aplikací rovnice (2.2) získáme hodnoty zářivosti B_i (Wm^{-2}) jednotlivých elementů. Hodnoty B_i (Wm^{-2}) jsou následně použity pro získání hodnoty tepelného toku q_i pro jednotlivé elementy.

V prvním kroku simulace jsou určeny pohledové faktory pro všechny dvojice elementů (včetně obalové plochy) a následně je sestrojena matice pohledových faktorů. Pro určení pohledového faktoru $F_{i,j}$ použitím některého z numerických algoritmů uvedených v textu disertační práce. Element představující obalovou plochu e_{N+1} modelu slouží jako doplňující element, jehož pohledový faktor lze vyjádřit následovně

$$F_{i-(N+1)} = 1 - \sum_{k=1}^N F_{i-k} . \quad (2.1)$$

Vztahy mezi jednotlivými plochami lze popsat kombinací dvou vztahů (2.2a) a (2.2b). Model je rozdělen na jednotlivé elementy, jejichž sjednocení představuje plochy objektů modelu a jeden speciální element představující okolí modelové situace. Každá z těchto ploch obsahuje informaci o teplotě, emisivitě, na základě předchozího výpočtu také informaci o interakci s ostatními elementy modelu.

$$Q_i = \frac{e_b - B_i}{(1-\varepsilon)/(\varepsilon A_i)} \quad (2.2a)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{B_i - B_j}{1/(A_i F_{i-j})}; i \neq j \quad (2.2b)$$

$$\frac{e_{bi} - B_i}{(1-\varepsilon)/(\varepsilon A_i)} = \sum_{j=1}^n \frac{B_i - B_j}{1/(A_i F_{i-j})}; i \neq j. \quad (2.2)$$

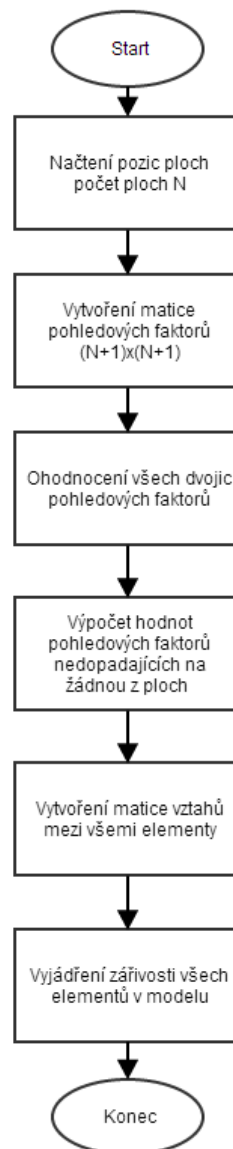
Vztahy (2.2a) a (2.2b) je možné využít pro sestrojení soustavy rovnic (2.2). Výsledkem řešení soustavy rovnic jsou zářivosti B_i na jednotlivých elementech. Rovnici (2.2) je možné upravit do maticové podoby, kde na levé straně jsou neznámé hodnoty zářivosti \vec{B}

$$\mathbf{G} \cdot \vec{B} = \vec{e}_g. \quad (2.3)$$

pravou stranu soustavy rovnic pak tvoří hodnoty vyzařované energie jednotlivých elementů e_{gi} . Určíme všechny neznámé kromě zářivosti elementů $\vec{B}=(B_1, \dots B_n, B_{n+1})$. Vyřešíme danou soustavu a získáme tedy zářivosti B_i jednotlivých ploch

$$G_{ij} = F_{i-j}(1 - \varepsilon_i), \quad (2.4)$$

Následným dosazením hodnot B_i do vztahu (2.2a) určíme tepelný tok $\vec{q}=(q_1, \dots q_n, q_{n+1})$ (Wm^{-2}) jednotlivých elementů řešeného systému, který je hledaným řešením dané úlohy. Míra diskretizace ozařované plochy pak ovlivňuje jemnost výsledné charakteristiky zářivosti. Diagram na Obr. 2-3 zobrazuje postup výpočtu konkrétní simulace, a hodnotí rozložení tepelné radiace pro všechny prvky daného modelu.



Obr. 2-3 Základní postup simulace přenosu tepla zářením

2.2 Následné využití modelu

Na základě uvedeného modelu tepelného toku v systému definovaném v kapitole 2.1 byl v rámci této disertační práce dále řešen postup případné tvarové optimalizace reflektoru zářiče. Výsledkem jedné simulace jsou hodnoty tepelného toku \vec{q}_{sim} (Wm^{-2}) nad částí elementů W , které odpovídají elementům povrchu ohřívané plochy. Pro účely návrhu reflektoru umožňujeme změnu pozice hraničních bodů elementů reflektoru. Při optimalizaci je třeba některé elementy uvažovat jako fixní, například z důvodu použití daného elementu pro umístění držáku reflektoru. Dále předpokládáme, že je definována požadovaná hodnota tepelného toku \vec{q}_{opt} (Wm^{-2}) pro každý element ohřívajícího objektu. Hledáme pak takové rozmístění elementů reflektoru, které minimalizuje

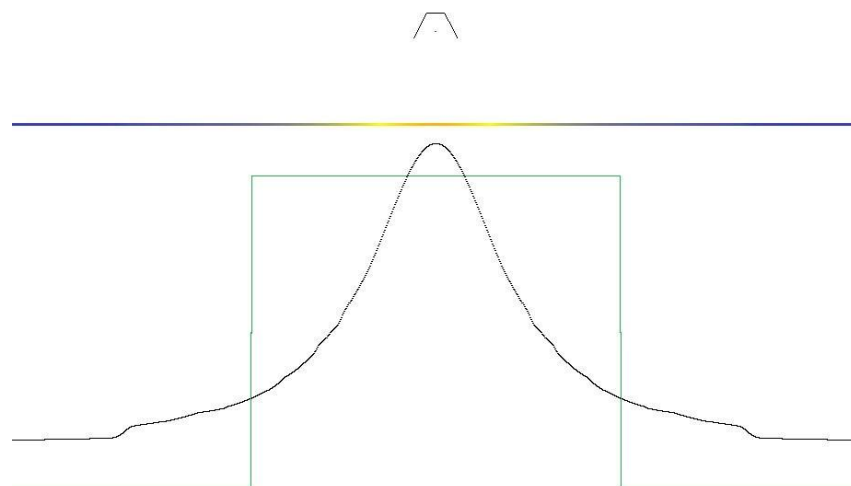
$$\min \sum_{\bar{e}} (q_{sim}(u_i) - q_{opt}(u_i))^2, \quad (2.5)$$

kde tepelný tok $q(u)$ je po elementech konstantní. Jedná se o optimalizační úlohu, pro kterou lze využít některý z vhodných optimalizačních algoritmů. V případě 2D úlohy optimalizace tvaru reflektoru, byl použit gradientní optimalizační algoritmus tzv. „horolezecký algoritmus“ [2]. Jako optimum může být zvolen různý tvar tohoto rozložení podle specifických požadavků (např. rovnoměrná distribuce toku záření s ostrými okraji pro souvislé ohřátí plochy bez teplotních špiček, nebo pro ozáření úzkého pruhu s vysokou intenzitou pro těžko dostupná místa). Na obrázku Obr. 2-5 je zobrazen jeden z možných optimalizačních výsledků. Pro trojrozměrnou úlohu je však vzhledem vyššímu stupni volnosti řešené úlohy třeba využít jiný způsob řešení. Jako vhodné řešení se jeví dvoufázový optimalizační postup popsáný R. Srbem a J. Mlýnkem v publikaci Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe [10], kde v první fázi optimalizace je úloha řešena genetickým algoritmem a na výsledek genetické optimalizace je v až druhé fázi nasazen gradientní optimalizační algoritmus. Úloha gradientního algoritmu v případě takového 3D řešení je pak pouze k určení lokálního extrému v blízkém okolí bodu získaného jako výsledek činnosti genetického algoritmu.

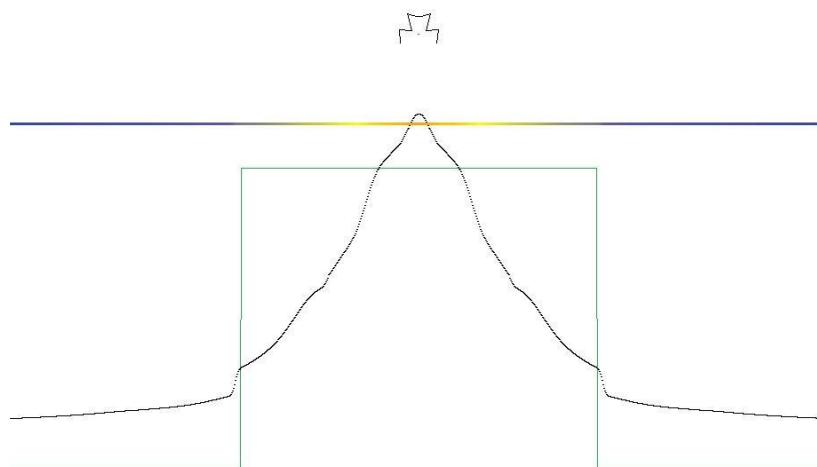
Výstupní hodnoty modelu se optimalizují k předem definované distribuční funkci řešené úlohy (např. rovnoměrné ozáření plochy, směrování tepelného toku do určitého místa pod zářičem atp.). Uvedený postup je možné alternativně použít také pro optimalizaci pozice zářiče nad plochou. Optimalizační úloha návrhu alternativního tvaru reflektoru vychází ze zadaného výchozího tvaru (např. v průmyslu používaný tvar reflektoru). Algoritmus postupně modifikuje pozice hraničních bodů a hledá takový tvar, jehož distribuční charakteristika (rozložení tepelného toku dopadajícího na

ozařovanou plochu) odpovídá co možná nejvíce požadovaným vlastnostem (např. rovnoměrný ohřev).

Další možností použití optimalizačních algoritmů je optimalizace polohy zářiče, respektive sady zářičů nad ozařovanou plochou. V tomto případě je v algoritmu měněna poloha a směr všech zářičů nad ohřívanou plochou tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody s očekávaným rozložením intenzity na ozařované ploše. Optimalizace pak spočívá v minimalizaci rozdílu mezi uživatelem zadaným průběhem dopadajícího tepelného toku, kterou by výsledná konfigurace měla splňovat, a funkcí tepelného toku, která je výsledkem dílčích simulací.



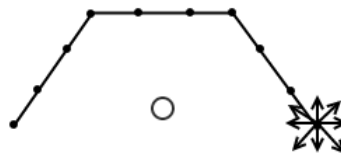
Obr. 2-4 Funkce ozáření – rozložení tepelného toku dopadajícího na ozařovanou plochu (černá křivka) a požadovaný průběh rozložení tepelného toku na ozařované ploše (zelená obdélníková funkce)



Obr. 2-5 Částečný výsledek optimalizačního algoritmu po několika krocích

V prvním kroku je model inicializován, jsou nastaveny všechny diskrétní

elementy modelu (umístění, teplota, emisivita). Před spuštěním vlastní optimalizace je nutné zadat optimalizační kritérium. Toto kritérium je názorně zobrazeno v obrázcích Obr. 2-4 a Obr. 2-5 v podobě obdélníkové funkce. Modelová situace je následně simulována a hodnota tepelného toku je ohodnocena tak, aby bylo možné vhodně porovnat simulovanou hodnotu s hodnotou požadovanou (minimalizace rozdílu mezi hodnotami simulovaného a požadovaného tepelného toku dopadajícího na ozařovanou plochu – vztah 2.5). Pokud není splněno ukončovací kritérium (simulovaný výsledek odpovídá požadovanému průběhu nastavenému v počátku optimalizace, či algoritmus dosáhl limitujícího počtu cyklů). Výběr bodů pro jeden optimalizační krok 2D úlohy je znázorněn na obrázku Obr. 2-6. V každém kroku jsou pak vyhodnoceny všechny varianty posunutí pro všechny body, které nejsou omezené fixací. Pro případ dvourozměrné varianty postačuje využít varianty horolezeckého optimalizačního algoritmu. V každém kroku algoritmu je automaticky modifikován každý bod tvaru reflektoru o určitou délku (viz Obr. 2-6). Z těchto variant je následně vybrána nejvhodnější, která je použita jako výchozí pro další krok optimalizačního algoritmu.



Obr. 2-6 Optimalizace tvaru reflektoru

Optimalizace na 2D modelu, která je prezentována na obrázku Obr. 2-6 pak obsahuje $4(N+1)$ stupňů volnosti, kde N je elementů, které nejsou fixované zadáním, popisujících tvar reflektoru a zároveň jsou zahrnuty do optimalizační úlohy. Při optimalizaci tvaru reflektoru nejsou zahrnuty některé z ploch popisujících tvar reflektoru například z důvodu potřeby zachování oblasti upevnění reflektoru. Pro úlohu optimalizace trojrozměrného popisu zářiče se pak jedná o úlohu, která obsahuje přibližně $6N$ stupňů volnosti, v závislosti na diskretizaci tohoto tvaru.

Základním principem horolezeckého algoritmu je nalezení největšího gradientu pro aktuální bod řešené úlohy. V každém kroku tohoto algoritmu je vytvořeny a ohodnoceny všechny sousední body řešené úlohy, ze kterých je pak zvolen bod s největším gradientem. Pro tento vybraný bod jsou pak v dalším kroku algoritmu vytvořeny a ohodnoceny všechny sousední body. U horolezeckého optimalizačního

algoritmu může snadno dojít k uváznutí v nějakém lokálním minimu [2], proto je pro tuto variantu vhodné využít například horolezecký algoritmus s náhodným restartem. Pro variantu s trojrozměrnou optimalizací je však využití zmíněného postupu nevhodné a to především z hlediska časové náročnosti pro výpočet velkého množství variant dané úlohy. Počet stupňů volnosti takovéto úlohy se výrazně zvýší a je tedy třeba využít jiného sofistikovanějšího způsobu. Jako vhodná varianta se zde jeví využití genetických algoritmů [7], která nabízí pro komplexní úlohy několik předností. Při tomto typu algoritmu ohodnocujeme tzv. *fitness* funkci, která ohodnocuje kvalitu každé varianty. V prvním kroku algoritmu je vytvořena tzv. nultá generace, která se skládá z různých modifikací dané úlohy. Tyto varianty mohou být náhodně vybrány. Algoritmus následně z každé generace pomocí křížení, mutace a reprodukce vytváří generace nové. Při křížení jsou upřednostněny silnější jedinci, a tak se výsledek úlohy postupně zkvalitňuje.

V kapitole je navržen obecný model pro přenos tepelné energie zářením. Model je zde navržen tak, aby bylo snadné jej využít mimo samotnou simulaci přenosu tepelné energie k získání charakteristiky zářiče, také k částečné optimalizaci tvaru reflektoru zářiče. Toto lze využít k návrhu alternativních tvarů reflektoru, které budou lépe splňovat určitá kritéria ohřevu (např. rovnoměrné rozložení tepelného záření pod zářičem). Dále byly v kapitole uvedeny některé z dalších možností použití modelu přenosu tepelné energie zářením pro optimalizaci rozložení tepelné energie infračervených zářičů na ozařované ploše.

3 Realizace modelu a jeho využití

V rámci disertační práce byly vytvořeny dva hlavní softwarové nástroje, které implementují navržený model přenosu tepla zářením. Model byl implementován ve dvou variantách a to pro simulaci ve 2D a 3D prostoru. Při implementaci modelu byly postupně zaváděny jednotlivé funkcionality aplikace. V první fázi byla nutné definovat uvažovanou konfiguraci a realizovat pomocí diskrétních elementů popisujících jednotlivé objekty modelu. Pro určení tepelného toku je dále v první fázi výpočtu nezbytné určit pohledové faktory mezi všemi dvojicemi elementů popisujících povrchy. Pro řešení realizace byly vybrány některé numerické algoritmy pro výpočet pohledových faktorů. Zvolené algoritmy byly při implementaci validovány oproti hodnotám, které jsou analyticky řešitelných úloh. Pro kalibraci výsledného modelu byla provedena měření reálných dat pro porovnání výsledků simulací s reálným systémem.

3.1 Měření charakteristik zářiče

Pro získání popisu přenosu tepla reálného systému je potřebné provést řadu měření. Sada dat získaných z měření je potřeba pro získání představy o chování daného systému a jako zdroj dat pro kalibraci a následnou validaci vytvořeného modelu. Tepelné vlastnosti různých typů reflektorů byly experimentálně ověřeny.

3.2 Implementace modelu ve 2D

Jedná se o nástroj, který byl vytvořen za účelem realizovat navržený model simulace přenosu tepla zářením, který je popisován v této práci. Tento nástroj umožňuje simulovat různé modelové situace ve 2D.

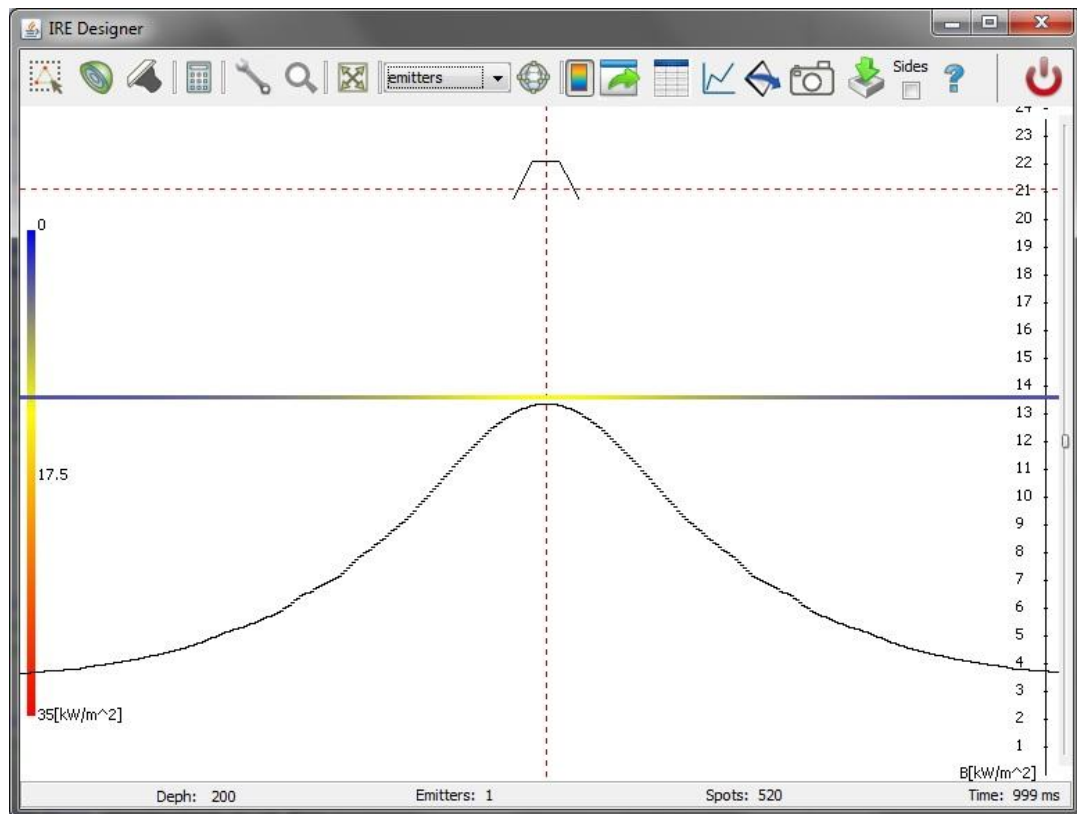
3.2.1 Implementace modelu

Aplikace IRE Designer byla vyvíjena za účelem bližšího zkoumání chování infrazářičů v různých konfiguracích (různá natočení, více zářičů atp.). Hlavní vlastností této implementace modelu přenosu tepelné energie zářením je zjednodušení dané problematiky na dvourozměrnou úlohu. Jednotlivé elementy modelu jsou zde reprezentovány úsečkami, které jsou popsány krajními body v prostoru E2, emisivitou a teplotou reprezentované plochy. Realizace aplikace pro práci s 2D modelem byl vytvořen v jazyce Java. V průběhu tvorby tohoto nástroje byly kromě vlastního modelu dále implementovány i další funkční prvky. Vlastnosti této aplikace lze shrnout následujícími body.

- Poskytuje charakteristiku tepelného záření pro zadané modelové 2D situace.
- Přenos tepelné energie je určen na základě fyzikální podstaty šíření tepla radiací.
- Umožňuje návrh různých typů zářičů a tvarů jejich reflektorů.
- Obsahuje rozhraní pro snadnou manipulaci s objekty v rámci modelové situace.
- Vytváří porovnatelný grafický výstup pro různé situace.
- Možnost definovat vlastní tvar ozařovaných ploch.
- Implementuje optimalizační algoritmy pro návrh alternativního ozáření plochy (změna tvaru reflektoru / změna polohy zářiče).
- Lze importovat výsledky měření intenzity záření reálných zářičů pro porovnání shody mezi simulací a reálnou situací.

Nástroj dále implementuje řadu různých funkcí, na kterém je možné vyzkoušet, jakým způsobem se chovají různé konfigurace zářičů nad plochou, jak ovlivňuje ozařovanou plochu reflektor nebo jakým způsobem se ovlivňují skupiny zářičů. V popisovaném modelu je možné využít optimalizační algoritmy, které modifikují tvar resp. pozici zářiče a snaží se tak nalézt řešení, které se více blíží požadovanému průběhu tepelného toku v závislosti na pozici.

Pro výpočet pohledových faktorů, v implementaci modelu pracující se systémem ploch ve 2D, byla zvolena Howellova metoda zkřížených strun, pomocí které získáme základní informaci o prostorové konfiguraci dané simulace. Dále je v modelu uchovávána pro každou část informace o její aktuální teplotě a emisivitě. Tyto informace jsou následně zpracovány a výsledkem jsou informace o intenzitách tepelného záření pro každý element, se kterým se v modelu pracuje. Graficky jsou pak znázorněny pouze ty intenzity, které náleží ozařované ploše (viz Obr. 3-1). Aplikace obsahuje několik ovládacích prvků a pomocných podprogramů. Jedná se například o možnost importovat měřené hodnoty, navrhovat různé typy zářičů, exportovat simulované hodnoty do grafů a tabulky hodnot. S jednotlivými bloky modelu lze různě manipulovat atp.

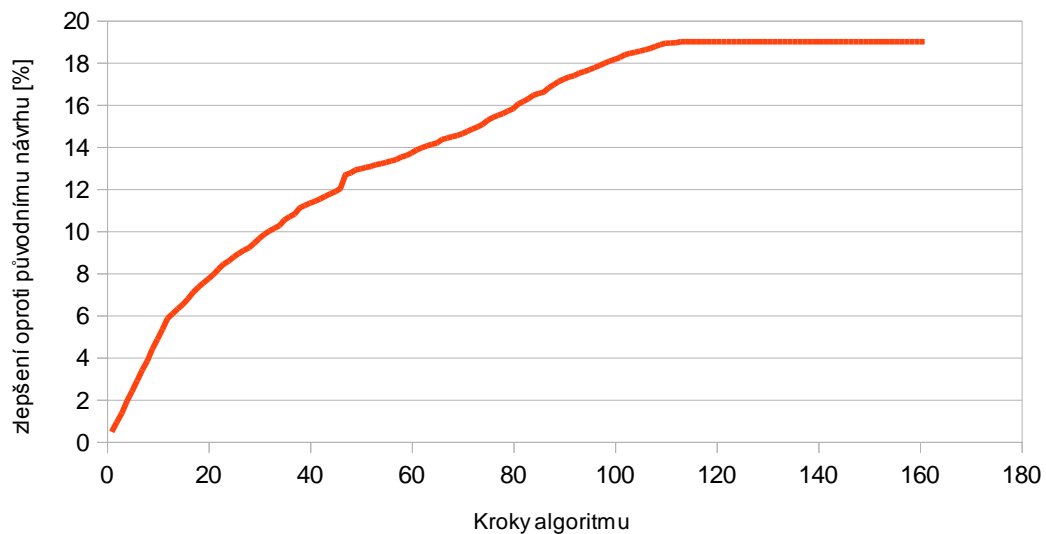


Obr. 3-1 Aplikace IRE Designer se zobrazenou simulací

3.2.2 Hledání alternativního tvaru

Jedno z možných využití tohoto nástroje je využití optimalizace s využitím simulace k návrhu alternativních tvarů reflektoru. Optimalizační úloha v tomto případě minimalizuje rozdíl mezi simulovanou distribuční funkcí zářiče a požadovanou distribuční funkcí (2.5). Při prvním kroku optimalizačního algoritmu je vypočtena hodnota celkového rozdílu simulované hodnoty od požadované a algoritmus v každém kroku pozmění pozici jednoho bodu z posloupnosti bodů, které popisují tvar reflektoru tak, že dojde k pokud možno co největšímu zlepšení pro další krok. Jak je vidět z grafu na Obr. 3-2, algoritmus po přibližně 100 krocích již neměl možnost nalezení další možné modifikace reflektoru a tedy již nedocházelo k dalšímu zlepšení. Uvedený graf zobrazuje průběh optimalizačního algoritmu pro úlohu zobrazenou v předchozí kapitole na obrázcích Obr. 2-4 a Obr. 2-5, kde bylo cílem získat co možná nejrovnoměrnější ozářenou plochu. Základní vlastností algoritmu je, že algoritmus vždy hledá lokální extrém dané funkce, je tedy zapotřebí vycházet z určitého tvaru reflektoru a brát v úvahu možnost uvážnutí v lokálním extrému. Zvolený tvar reflektoru je možné v případě uvážnutí v lokálním extrému ručně upravit, či použít algoritmus s náhodným restartem, který může tyto problémy částečně eliminovat. Výsledkem algoritmu může

být tvar, který není možné vyrobit a tak je zapotřebí tvar upravit pomocí uživatelského vstupu.

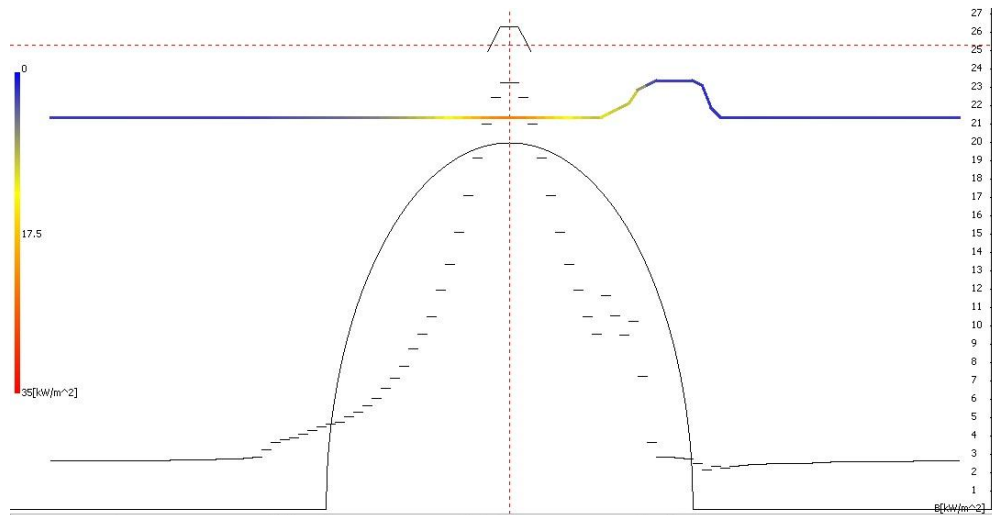


Obr. 3-2 Zobrazení účinnosti algoritmu pro vyhledání nového tvaru reflektoru

3.2.3 Hodnocení řešených úloh

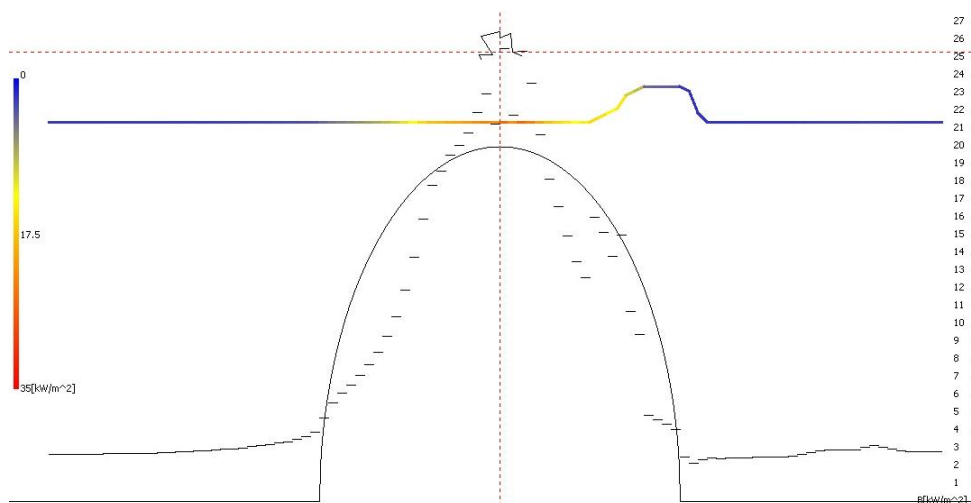
Na prezentovaném modelu je dále možné realizovat další dílčí úlohy různého charakteru. Optimalizační úlohy jsou v realizovaném modelu dvou typů – tvarová a polohová optimalizace (kapitola 2.2). Na obrázku Obr. 3-3 je zobrazen počáteční stav optimalizační úlohy, jejímž cílem bylo optimalizovat tvar reflektoru pro nerovnou ozařovanou plochu. Pro potřeby průmyslového ohřevu to pak může být úloha požadující cílené směrování tepelné energie do těžko přístupných míst.

Požadovaná distribuční funkce tepelného toku může mít různý charakter. Na příkladu z předchozí kapitoly (Obr. 2-5) byla požadována stopa s obdélníkovým průběhem. Následující příklady (Obr. 3-3 a Obr. 3-5) pak mají za cíl nalézt distribuční funkci tepelného toku s eliptickým průběhem nad plochou obsahující nerovnost na ozařované ploše.



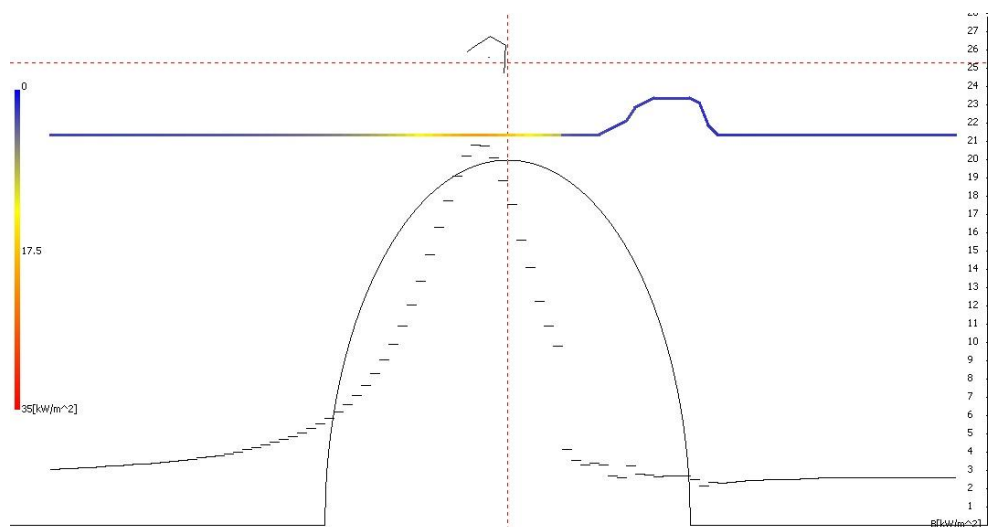
Obr. 3-3 Optimalizace tvaru reflektoru, který okrajově ozařuje zakřivenou plochu

Obrázek Obr. 3-4 zobrazuje výsledek předchozí úlohy. Z uvedených ilustrací je dobře vidět, že optimalizační úloha (2.5) dopadla s uspokojivým výsledkem. V uvedeném příkladu nejsou nastaveny požadavky pro zachování částí reflektoru sloužící k uchycení reflektoru a také zde není brána v úvahu minimální vzdálenost mezi trubicí zářiče a stěnou reflektoru.



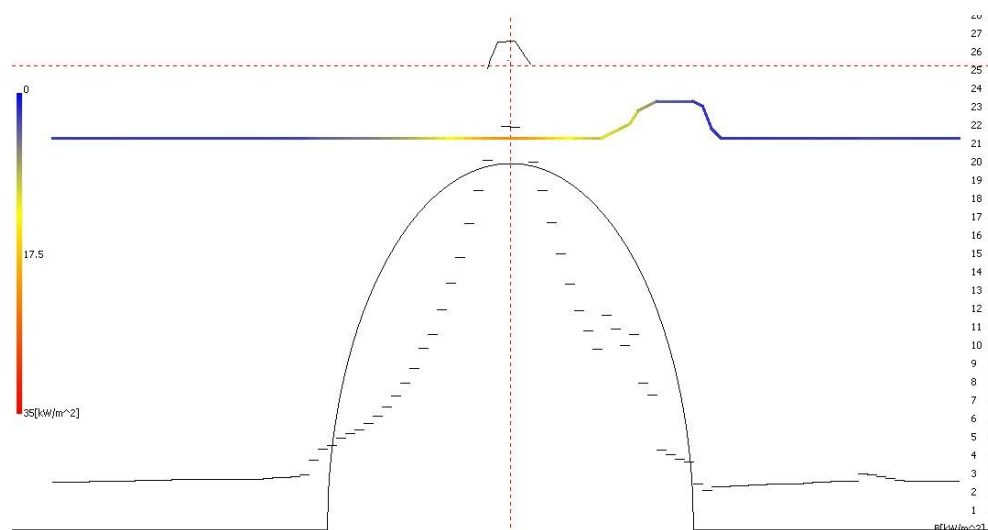
Obr. 3-4 Výsledek optimalizace tvaru reflektoru s částečným ozářením zakřivené plochy

Dalším typem úloh optimalizace tepelného toku infrazářiče je optimalizace pozice zářiče nad plochou. Algoritmus je v tomto případě ponechán stejný s rozdílem, že stupně volnosti vycházející z bodů popisujících tvar zářiče byly nahrazeny posunem celého zářiče v prostoru a jeho natočením oproti původní pozici. Výsledek simulace na obrázku Obr. 3-5 zobrazuje počáteční umístění a natočení zářiče s požadovanou výslednou distribuční funkcí, která odpovídá eliptické stopě shodné s předchozím příkladem.



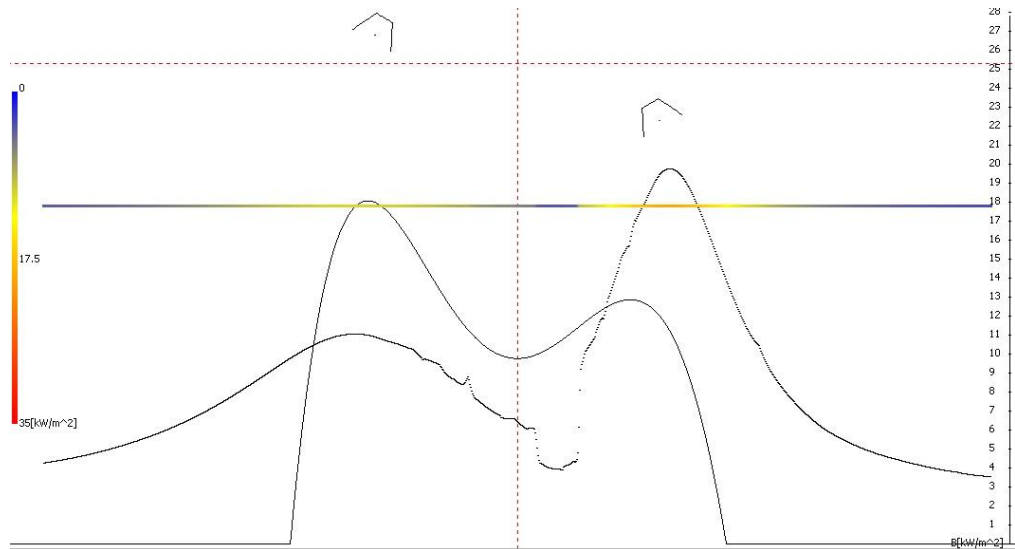
Obr. 3-5 Optimalizace pozice reflektoru pro zakřivenou plochu

V tomto modelovém příkladu došlo dle předpokladu k srovnání natočení zářiče oproti ozařované ploše a pozice tak, aby výsledek minimalizace zadání (kapitola 2.2) pomocí gradientního algoritmu našel své lokální minimum odpovídající požadovanému ozáření.



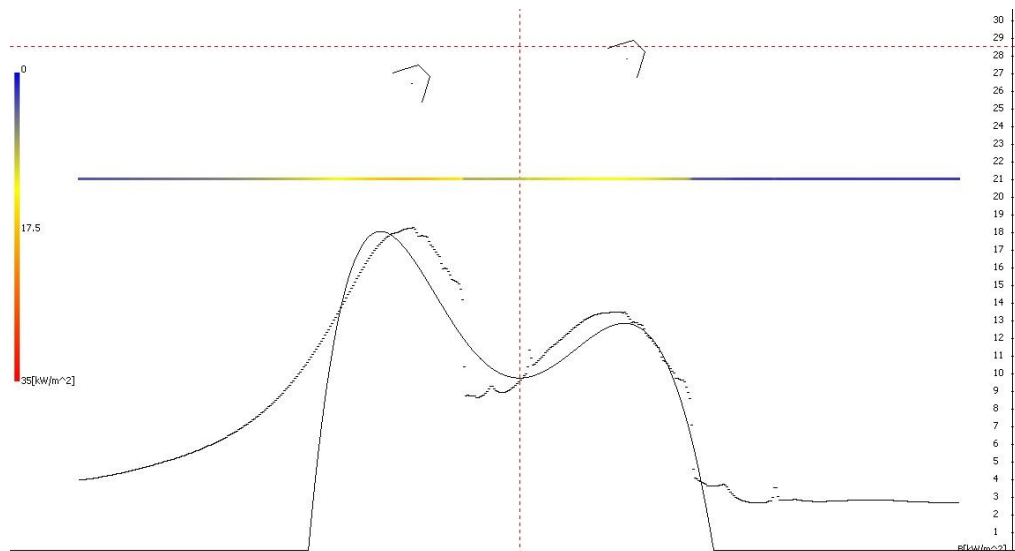
Obr. 3-6 Výsledek optimalizace pozice reflektoru pro zakřivenou plochu

Předchozí příklad demonstroval použití optimalizace pozice reflektoru. Stejným způsobem lze použít tento typ optimalizační úlohy i pro více zářičů. Na obrázku Obr. 3-7 je zobrazena počáteční konfigurace optimalizační úlohy, kde požadovaný průběh distribuční funkce ozáření je popsán pomocí Lagrangeova interpolačního polynomu se dvěma vrcholy. Zářiče jsou nad rovinnou plochou umístěny náhodně. Pro přehlednější zobrazení výsledku bylo zvoleno umístění a nasměrování zářičů takové, aby byl znatelný rozdíl mezi simulovanou a požadovanou distribučních funkcí.



Obr. 3-7 Optimalizace pozice více reflektorů nad rovinnou ozařovanou plochu

Po několika krocích optimalizačního algoritmu bylo nalezeno výsledné lokální minimum pro tuto konkrétní konfiguraci (Obr. 3-8). Na obrázcích Obr. 3-7 a Obr. 3-8 je na simulované distribuční viditelný šum, který je způsoben použitým algoritmem pro určení velikosti stínění ploch.



Obr. 3-8 Výsledek optimalizace pozice více reflektorů nad rovinnou ozařovanou plochu

3.3 Implementace modelu ve 3D

Aplikace IRE Designer 3D je implementuje model představený v předchozí podkapitole ve 3D. Aplikace IRE Designer 3D rozšiřuje původní aplikaci, ve které bylo možné pracovat s profily zářičů. Přidání třetího prostorového rozměru však zvýší

náročnost řešení daného problému a to především ve dvou oblastech

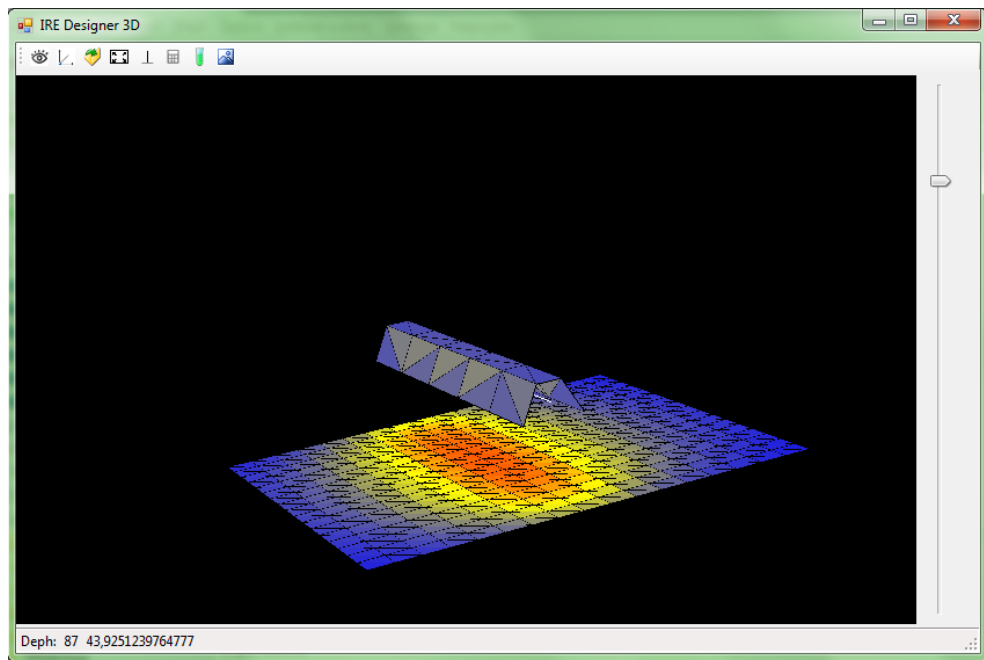
- 1) Pohledový faktor – pro trojrozměrný model je nutné zpracovat vhodnou variantu řešení integrálního vztahu určujícího pohledový faktor mezi dvěma plochami. Možnosti řešení této rovnice je uvedena v textu disertační práce. IRE Designer využívá pro výpočet pohledových faktorů Hottelovo pravidlo zkřížených strun, které významně celý výpočet usnadňuje. Toto pravidlo však lze použít pouze v případě řešení dvourozměrné varianty.
- 2) Optimalizace – Oproti dvourozměrné variantě aplikace není vhodné implementovat jednoduchý gradientní algoritmus (např. horolezecký algoritmus s náhodným restartem, jak tomu bylo u dvourozměrné varianty), protože se jedná o mnohem komplexnější úlohu a určení největšího gradientu je pro tento případ časově velmi náročné. V trojrozměrné variantě výrazně přibude počet bodů, se kterými lze manipulovat, každý bod pak obsahuje více stupňů volnosti a zároveň jeden krok výpočtu distribuce intenzity záření na plochu je díky numerické integraci náročnější. Pro tento případ tedy není vhodné použití gradientního algoritmu, vhodnější je zvolit genetický algoritmus.

3.3.1 Implementace modelu

Na Obr. 3-9 je zobrazeno hlavní okno aplikace, kde je umístěn reflektor nad ozařovanou plochou. Stejně jako tomu bylo v předchozí variantě aplikace, je možné snadno manipulovat s polohou zářiče nad plochou. Objekty v aplikaci jsou složeny z elementů, kde většina je reprezentována jako trojúhelník. Tyto objekty jsou rozděleny do dvou skupin

1. Zářič s reflektorem, jehož střed zářiče je standardně umístěn do počátku definovaného souřadného systému tak, aby vlastní zářič (trubicový zdroj tepelné energie) byl umístěn v tomto počátku. Tvar reflektoru je tvořen dvojnásobkem počtu ploch, tak aby bylo docíleno oboustranné interakce tepelného záření.
2. Ozařovaná plocha, která je umístěna pod reflektorem a je možné snadno manipulovat s hodnotou posunutí této plochy oproti počátku souřadného systému (změna výšky zářiče nad ozařovanou plochou). Ozařovaná plocha je ve výchozím stavu rovinná a je složena ze sady trojúhelníkových ploch,

stejně jako reflektor zářiče. Jelikož není uvažováno záření z obou stran ozařované plochy, je dostačující vytvořit pouze jednostrannou plochu s normálovými vektory směřujícími k počátku souřadného systému.



Obr. 3-9 IRE Designer 3D

Aplikace je navržena tak, aby bylo snadné implementovat různé algoritmy pro řešení pohledových faktorů, jejichž řešení je popsána v textu disertační práce. Postupy řešení se dají rozdělit do dvou základních skupin:

- Statistické metody
- Integrační metody

3.3.2 Určení pohledových faktorů metodou Monte Carlo

V rámci práce byla implementována statistická metoda Monte Carlo pro určování pohledových faktorů. Hlavní myšlenkou této metody je fyzikální podstata pohledového faktoru, který nám určuje frakci veškeré radiační energie vyzařované jednou plochou, dopadající na jinou plochu. Výhodou metody Monte Carlo je její jednoduchá implementace. Více informací o této metodě v kapitole 4.1 textu disertační práce.

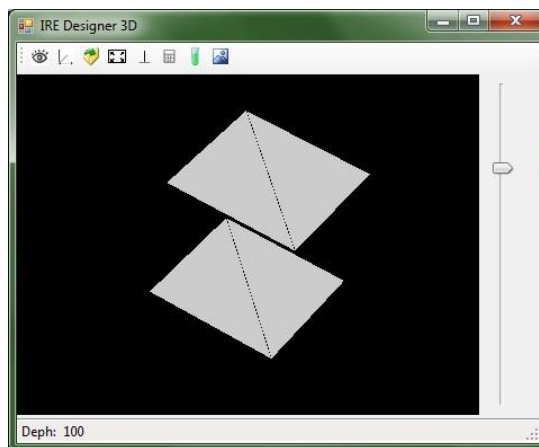
Metoda pro výpočet pohledového faktoru trojrozměrných těles je v této části práce aplikována na trojúhelníkovou síť, ve které jsou určovány pohledové faktory mezi jednotlivými plochami. Je tedy uvažován model složený z trojúhelníkových ploch, které jsou definovány vždy třemi prostorovými body na uvažovaném povrchu.

Výpočet a zhodnocení algoritmu

Po zavedení celého modelu soustavy entit a určení vztahů je možné přistoupit k vlastnímu výpočtu pohledového faktoru pomocí metody Monte-Carlo. K jejímu výpočtu je nutné znát celkové množství emitovaných paprsků zářičem a počet paprsků, které dopadli na ozařovanou plochu. Poměrem těchto dvou údajů (počet paprsků, které dopadnou na ozařovanou plochu, k celkovému množství vyzářených paprsků), získáme hodnotu pohledového faktoru.

Množství emitovaných paprsků nám ovlivňuje přesnost a časovou náročnost daného výpočtu. Jestliže bude emitováno malé množství paprsků, tak výpočet bude rychlý, ale také nepřesný. Se zvyšujícím se množstvím paprsků se zvyšuje přesnost, ale bohužel i časová náročnost.

Pro testování kvality numerických metod byla zvolena testovací konfigurace (Obr. 3-10), která odpovídá dvěma paralelně umístěným čtvercovým plochám. Tato prostorová konfigurace byla zvolena proto, že je známo analytické řešení dané konfigurace a lze jí použít pro porovnání určených hodnot s analytickým řešením.



Obr. 3-10 Testovací konfigurace pro určování pohledového faktoru

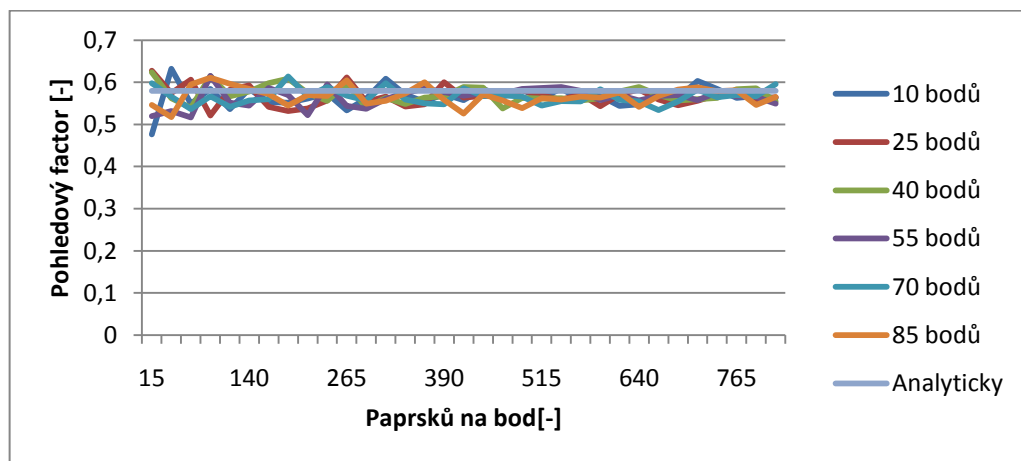
Analytické řešení je uvedeno v hlavním textu disertační práce (4.19- kap. 4.3, str. 68). Pro numerické řešení pohledového faktoru F_{1-2} této konkrétní je nutné spočítat čtyři pohledové faktory a to mezi plochami $1a-2a$, $1a-2b$, $1b-2a$ a $1b-2b$, kde a, b jsou označeny trojúhelníkové části jednotlivých čtverců. Při výpočtu platí pravidlo superpozice, které určuje vztah pro určení pohledového faktoru ploch složených z více složených ploch. Platí zde

$$F_{1-2} = F_{1-2a} + F_{1-2b} \quad (3.1)$$

Dále zde platí pravidlo pro sdružení více pohledových faktorů ovlivňujících jednu plochu:

$$F_{1-2} = \frac{A_1 F_{1a-2} + A_2 F_{1b-2}}{A_1 + A_2}. \quad (3.2)$$

Kombinací vzorců (3.1) a (3.2) tak získáme vzorec určující pohledový faktor F_{1-2} pro uvažovanou modelovou situaci. Grafy na Obr. 3-11 zobrazují výsledné pohledové faktory popsaného modelového případu. Pro obě varianty jsou uvažovány dvě čtvercové plochy o délce hrany 10[-]. V první variantě jsou plochy umístěny ve vzdálenosti 10[-] a v druhém případě ve vzdálenosti 3[-]. Hodnoty pohledových faktorů určené analyticky jsou pro vzdálenost 10[-] přibližně $F_{1-2} \approx 0,1998$ a pro vzdálenost 3[-] přibližně $F_{1-2} \approx 0,5795$.



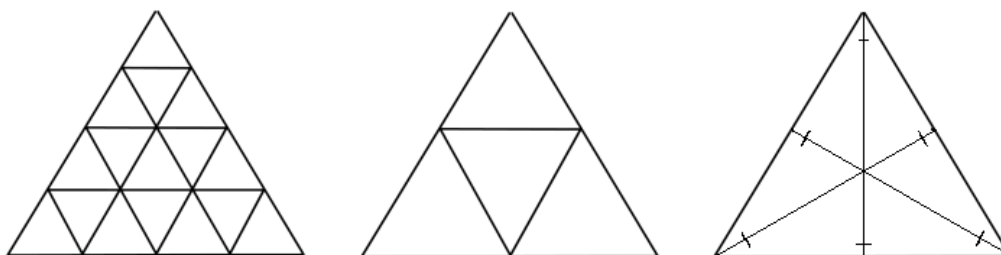
Obr. 3-11 pohledového faktoru metodou Monte Carlo (vzdálenost 3[-])

Z dosažených výsledků zobrazených na grafu Obr. 3-11 je možné tvrdit, že použití metody Monte Carlo je vhodné spíše pro použití k orientačnímu určení pohledového faktoru. Pro získání přesnějšího řešení je vhodnější použití některého z deterministických algoritmů pro řešení pohledového faktoru.

3.3.3 Určení pohledových faktorů metodou dvojnásobné numerické plošné integrace

Jako druhý přístup k určování pohledového faktoru byla implementována deterministická numerická integrace. Tento přístup byl zvolen jako vhodný na základě provedené rešerše. Pro porovnání výsledků byl použit stejný model jako při ověřování vhodnosti algoritmu Monte-Carlo v kapitole 3.3.2, kde jsou umístěny dvě čtvercové plochy proti sobě (viz. Obr. 3-10). Měřené hodnoty byly zaznamenány pro různé typy diskretizace pro numerickou integraci. Toto rozdělení je vidět na obrázku Obr. 3-12.

Levý obrázek znázorňuje rozdělení trojúhelníku na 16 částí, kde pro jednotlivé kroky integrace jsou použity středy trojúhelníků. Prostřední obrázek znázorňuje stejný způsob rozdělení trojúhelníku na 4 části. V pravém obrázku je znázorněno rozdělení bodů dle Moana [6], kde na každé ose stran trojúhelníka jsou umístěny dva body, poslední sedmý bod je pak umístěn v těžišti trojúhelníku.



Obr. 3-12 Diskretizace trojúhelníkových prvků pro numerickou integraci

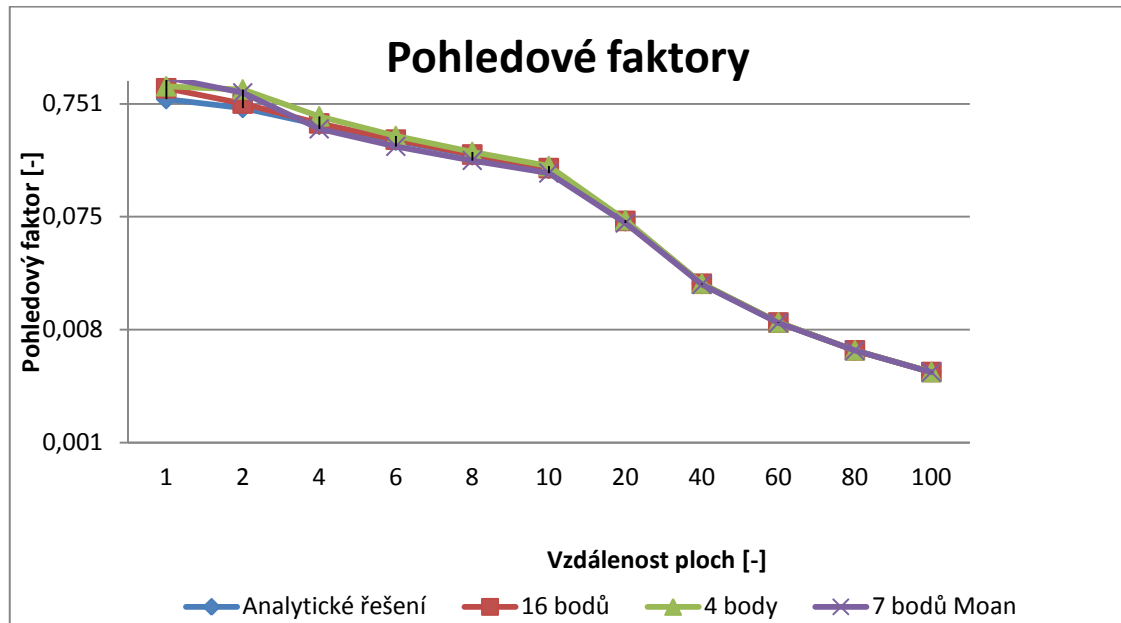
V tabulce Tab. 1 jsou uvedeny hodnoty pro vzdálenosti dvou čtvercových ploch v rozmezí 1–100 [-]. Tabulka obsahuje analytické řešení a následně numerické řešení pro jednotlivé typy diskretizace trojúhelníkových prvků.

Tab. 1 Porovnání hodnot pohledového faktoru modelové situace

Vzdálenost [-]	Analytické řešení	16 bodů	4 body	7 bodů - Moan
100	0,003162057	0,003162924	0,003165532	0,00315584
80	0,004922461	0,004924556	0,004930862	0,004907457
60	0,008681966	0,008688436	0,008707961	0,008635688
40	0,019106958	0,019137691	0,019231059	0,018887984
20	0,068589589	0,068952708	0,070085254	0,066043733
10	0,199824896	0,202386335	0,210814744	0,18277263
8	0,262988691	0,267151875	0,281451115	0,23660611
6	0,354493646	0,361633353	0,389465641	0,315266439
4	0,489216296	0,503134031	0,581797412	0,45066755
2	0,690244694	0,754844902	1,007244049	0,939530895
1	0,826994522	1,030649137	1,073362984	1,28985998

Grafické zobrazení výsledků je znázorněno na obrázku Obr. 3-13. Z uvedeného grafu je možné odvodit, že pro vzdálené trojúhelníkové prvky je možné s vysokou přesností určit pohledový faktor již při použití čtyřbodového rozdělení. Se zkracující se vzdáleností přesnost všech tří variant klesá, nejméně však u varianty s šestnáctibodovým rozdělením. Z toho tedy lze usoudit, že je možné pro usnadnění výpočtu nejprve určit dispozice porovnávaných ploch, a pokud jejich vzdálenost přesáhne určitou hranici (např. střední délka stran), je vhodné použít vyšší míru

diskretizace. Podobným způsobem tento problém řešil Walton [8], který ve své práci představil výpočet pohledového faktoru s použitím adaptivní integrace.

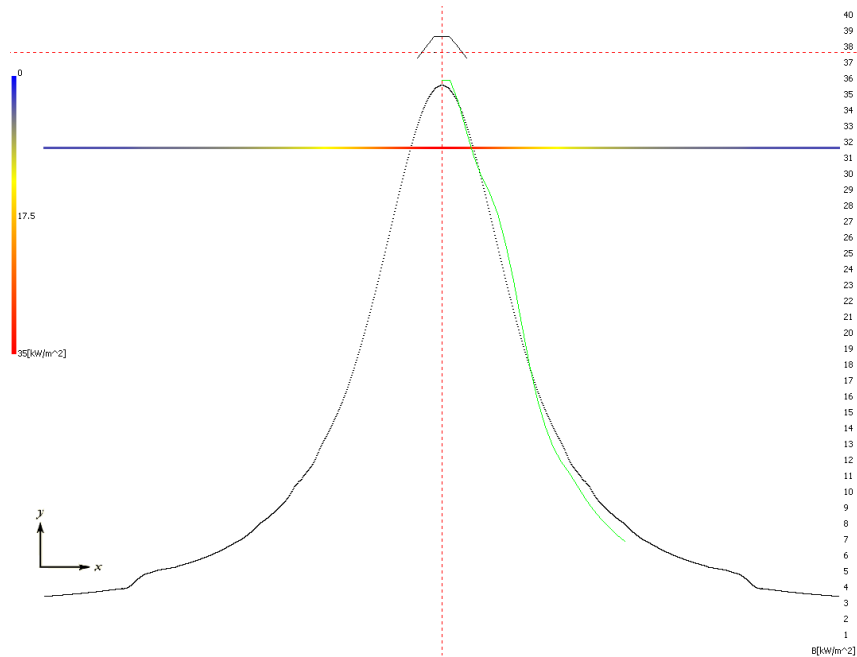


Obr. 3-13 Numerická integrace - porovnání přesnosti

3.4 Kalibrace modelu

Základní kalibrace popisovaného modelu byla provedena v aplikaci s dvourozměrnou implementací modelu přenosu tepelné energie. Na obrázku Obr. 3-14 je znázorněn proces kalibrace. Zelenou křivkou je zde znázorněn měřený průběh tepelného toku pro zářič s reflektorem Phillips. Černá křivka zde pak znázorňuje hodnoty získané simulací. Kalibrovány byly hodnoty emisivity a teplot jednotlivých typů elementů (ozařovaná plocha, reflektor a zářič). Výchozí hodnoty pro kalibraci byly odvozeny od reálných/tabulkových hodnot jednotlivých parametrů a následně byly měněny, dokud nebylo dosaženo dostatečné shody mezi hodnotami měřenými a simulovanými. Kalibrované hodnoty pak byly následně ověřeny pro zbylé dvě výšky. Kalibrační bylo dosaženo následujících hodnot: teplota ozařované plochy: 110°C; teplota zářiče: 3230°C; teplota reflektoru: 300°C; emisivita ozařované plochy 0,73; emisivita zářiče 0,95; emisivita reflektoru 0,05.

Výsledná teplota zářiče z provedené kalibrace dosahovala lepší shody, než v případě použití hodnot barevné teploty zářiče uvedené výrobcem ($2400\text{K} \pm 100\text{K}$). Tento rozdíl je dán několika rozdíly mezi reálným a modelovaným systémem. Reálný systém se sestává ze spirálovitého topného tělesa, které je umístěno v halogenové trubici opatřené reflektivním povrchem. Oproti tomu v modelu je topné těleso zjednodušeno na všesměrově orientovanou plochu umístěnou v prostoru.

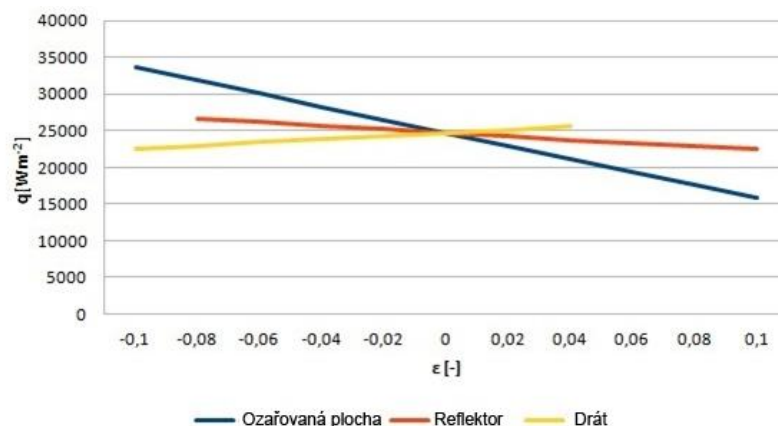


Obr. 3-14 Kalibrace modelu oproti naměřeným hodnotám. Měřené hodnoty jsou zobrazeny zelenou křivkou a simulované hodnoty pak černou křivkou.

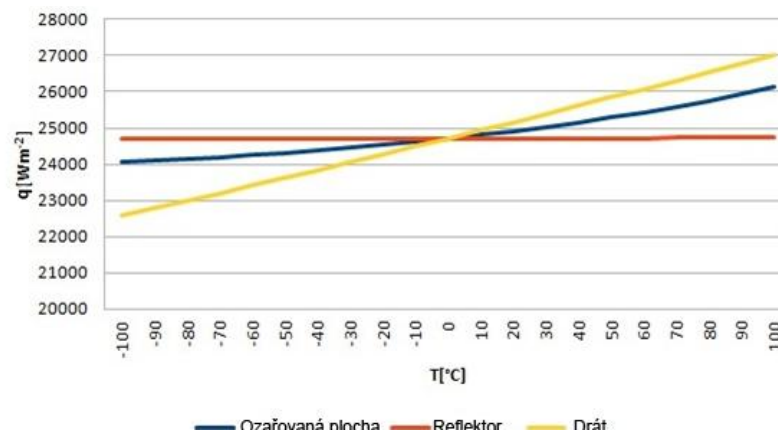
Grafy Obr. 3-15 a Obr. 3-16 zobrazují citlivostní charakteristiku vstupních parametrů – teploty a emisivity, která slouží k nastavení modelu. Na vertikální ose je zobrazena maximální hodnota tepelného toku pro danou simulovanou situaci. Horizontální osa pak zobrazuje posun dané veličiny (emisivita, teplota) od hodnot získaných kalibrací modelu. V obou případech je vidět téměř lineární závislost daných parametrů. V případě citlivostní charakteristiky teplotních parametrů, lze konstatovat, že model je nejcitlivější na změny teploty zářiče (drátu) a naopak nejméně citlivý pro změny teploty reflektoru. V případě citlivostní charakteristiky pro parametry emisivity, je pak nastavení modelu nejvíce citlivé na změnu emisivity ozařované plochy a nejméně citlivá opět na nastavení emisivity reflektoru zářiče.

Výsledky kalibrace dvourozměrného modelu byly přeneseny do trojrozměrného modelu. Výsledné charakteristiky reálně naměřených hodnot a simulovaných jsou zobrazeny v přílohách A-C disertační práce, v příloze D jsou pak pro jednotlivé měřené výšky zobrazeny rozdílové charakteristiky mezi naměřenou a simulovanou charakteristikou. Z grafů v příloze D je dobře vidět, že kalibrace byla prováděna na dvourozměrném modelu, pro hodnoty měřené ve střední části charakteristiky. Především pak rozdílový graf pro výšku 80mm zobrazuje výrazné špičky v oblasti okrajů zářiče. Rozdíly v tomto případě jsou částečně způsobeny nelineárními vlastnostmi reálné zářiče oproti simulovanému, který má v použitém modelu

charakteristické vlastnosti konstantní. Reálný zářič je charakterizován maximální teplotou ve středu zářiče a po stranách klesající teplotou. V případě reálného zářiče má také vliv uchycení vlastního zářiče, jelikož úchyty mohou také mít částečný vliv na charakteristiku zářiče v okrajích zobrazované charakteristiky. V této části se tedy naskýtají možné navazující práce v simulaci infračerveného zářiče, jako definice nelineárního zdroje tepelné energie a tvorba kalibračního algoritmu pro navržený trojrozměrný model.



Obr. 3-15 Závislost maximální hodnoty tepelného toku na emisivitě jednotlivých elementů modelu



Obr. 3-16 Závislost maximální hodnoty tepelného toku na teplotě jednotlivých elementů modelu

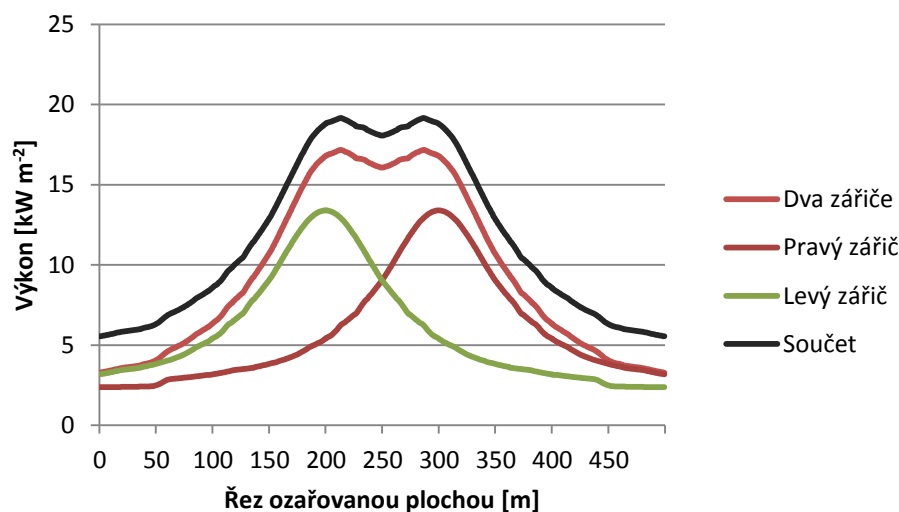
3.5 Tepelné pole při použití více zářičů ve virtuálním ohřevu

Při návrhu modelu přenosu tepla zářením (kapitola 2) jsou využívány naměřené charakteristiky tepelného toku jednotlivých variant infračervených zářičů. Pomocí modelu, popisovaném v této disertační práci, byla řešena problematika skládání tepelných toků (superpozice) pro model s více zdroji záření. V modelu byly umístěny dva identické infrazářiče (viz. Obr. 3-17). Bylo vytvořeno několik dílčích simulací (jednotlivé zářiče, oba zářiče).



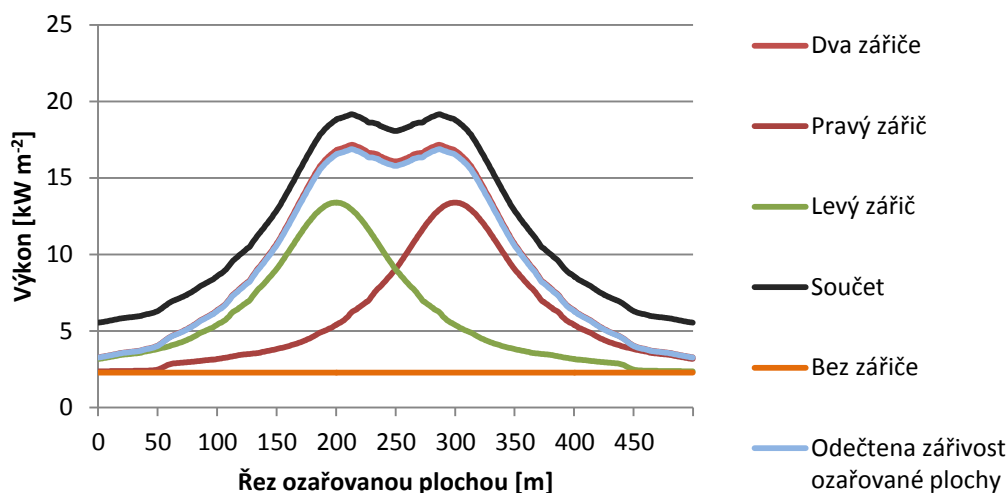
Obr. 3-17 Plocha ozařovaná dvěma shodnými zářiči

Výsledné charakteristiky provedených simulací (Obr. 3-18) při použití principu superpozice obsahují rozdílné charakteristikami osvětlení pro součet jednotlivých zářičů a hodnotu distribuční funkce obou zářičů.



Obr. 3-18 Charakteristiky simulací tepelného toku – ozáření plochy více zářiči

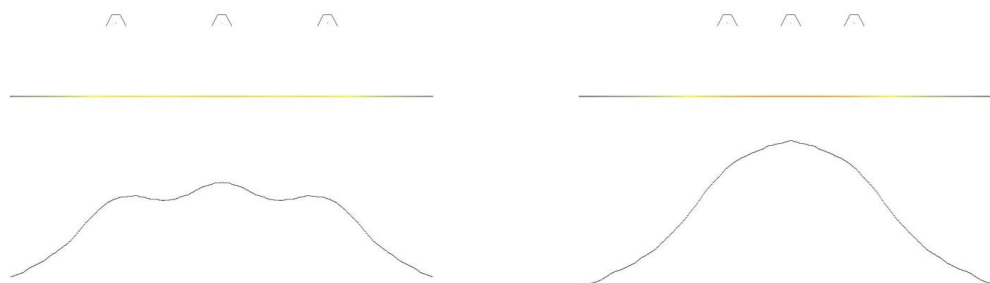
Jak je v grafu vidět, křivky těchto dvou charakteristik jsou téměř shodné, jen posunutá v ose výkonu vyzařené energie. Jak vychází ze Stefan-Bolzmannova zákona, každé těleso neustále vyzařuje určitou tepelnou energii v závislosti na teplotě a povrchových vlastnostech daného tělesa. Byla tedy vytvořena charakteristika záření, která odpovídá neozařované ploše se stejnými parametry (teplota, emisivita) jako v předchozím případě. Hodnoty odpovídající vlastní zářivosti ozařované plochy byly následně odečteny od hodnot určených prostým součtem. Z grafu na obrázku Obr. 3-19 je pak zřejmé, pro výsledek celkové energie v místě, které ovlivňuje více zářičů, je potřeba uvažovat také vlastnosti ozařované plochy a do výsledné hodnoty tepelného toku tyto hodnoty vhodně započítat.



Obr. 3-19 Ozáření plochy více zářiči - odečtena vlastní zářivost ozařované plochy

Modelové situace pro skládání různých tvarů charakteristik ozáření

Na obrázku v příloze F disertační práce jsou zobrazeny různé varianty skládání více zdrojů tepelné energie. Pro všechny čtyři typy uvažovaných charakteristik (obdélníková, Gaussova, lichoběžníková a trojúhelníková funkce) byly vytvořeny dvě varianty s různou vzdáleností mezi středy uvažovaných zářičů. Všechny charakteristiky byly tvořeny pro stejnou šířku dané ozařovací funkce za předpokladu principu superpozice. Jednotlivé charakteristiky zářičů jsou zobrazeny zelenou, modrou a červenou barvou. Výsledná hodnota pak barvou černou. Zde se jako nejvhodnější jeví použití charakteristik s Gaussovou, popřípadě trojúhelníkovou křivkou. Pro zvolené modelové situace jsou pro tyto dvě varianty nejlépe ozařovaná plocha – relativně rovnoměrně bez výskytu špiček. Pro porovnání pak byly provedeny simulace s kalibrovanými zářiči Phillips, které mají charakteristiku podobnou modelové Gaussově funkci. Výsledek těchto simulací je znázorněn na obrázku Obr. 3-20.



Obr. 3-20 Simulace skládání tepelného toku více zářičů

4 Shrnutí výsledků

Tato disertační práce se zabývá problematikou simulace šíření tepelné energie zářením. Iniciativou pro vypracování této práce bylo řešení dané problematiky v rámci výrobního procesu umělé kůže technologií *slush moulding*. Problematika tohoto výrobního procesu ve firmě Magna Exteriors & Interiors je řešena nanesením termoplastického prášku na ohřátou skořepinovou formu. Jako médium pro ohřev této formy byl zvolen ohřev sadou infrazářičů umístěných nad formu. Tento způsob má několik významných kladů, především se jedná o snadnější manipulaci se systémem ohřevu, kde jiné způsoby ohřevu vyžadují značné nároky na manipulaci s ohřevným médiem (horký olej či písek). Dále tento způsob snižuje náklady na ohřev forem. Tento způsob ohřevu, kdy je forma ohřívána primárně sadou zářičů nebyl patentován jinou společností. Jako hlavní kvalitativní požadavek při výrobě umělé kůže je co možná nejrovnoměrnější ohřev formy tak, aby výsledný produkt dosahoval na celé ploše stejných parametrů (tloušťka, lesk, atp.). V průběhu prací se vyskytlo několik požadavků, které měly za cíl vhodněji „směřovat“ tepelný tok od zářičů na formu. Především se jednalo o speciální případy, kdy intenzita tepelného toku je směřována do určitého místa, které se s použitím standardních typů zářičů špatně prohřívá (např. různé záhyby palubních desek), nebo naopak o rovnoměrné ohřátí plochy pod zářičem, aby byly ploché části forem rovnoměrně ohřáté.

Problematika simulací přenosu tepla zářením je v odborných textech zmiňována v různém kontextu jako například zkoumání účinnosti tepelných štítů, inovační techniky pro solární systémy, některé práce se zabývají pouze hlubší studií numerických postupů při určování pohledových faktorů, které se využívají i v jiných oborech než je přenos tepla sáláním (např. v počítačové grafice).

V průběhu řešení práce byl na základě hlubšího prozkoumání fyzikální podstaty přenosu tepla sáláním navržen model přenosu tepla. Popisovaný model byl také prakticky použit v navrženém 2D simulačním nástroji. Tento nástroj byl dále kalibrován podle reálného infrazářiče. V práci byly také popsány různé přístupy měření charakteristiky zářiče s několika typy reflektorů. V rešeršní části práce byly porovnány různé postupy tvorby modelu přenosu tepla. Především se jednalo o různé pohledy použití simulace přenosu tepla zářením.

Na základě předchozích zkušeností s implementací 2D modelu, bylo dále

navrženo jeho využití v trojrozměrné simulaci, která je výrazně náročnější především ve fázi určování velikosti pohledových faktorů a následně ve složitosti optimalizační úlohy. V práci je uvedena rešerše metod určování pohledových faktorů. Jedná se o metody, které mohou být použitelné v připraveném modelu. Z této rešerše byla realizována metoda založená na Monte Carlo s popsanou implementací náhodného generování paprsků z plochy, která je zářičem. Dále zde byla na základě rešerše realizována také vlastní implementace algoritmu pro určení pohledového faktoru v 3D modelu s využitím numerické dvojnásobné plošné integrace. Hodnoty implementovaných metod byly ověřeny a použity pro 3D modelovou situaci.

Na základě provedené studie byly navrženy postupy implementace modelu do trojrozměrného prostředí. Bylo zapotřebí více do hloubky zhodnotit vhodnost použití různých postupů při určování hodnot pohledových faktorů. Navrhnout postup a prostředí pro diskretizaci modelu a provedení výpočtů pro okamžitý stav systému v trojrozměrném prostředí. Tato disertační práce obsahuje návrh modelu přenosu tepelné energie zářením pro simulaci ve 2D a 3D prostředí. Dále jsou zde zmíněny použitelné optimalizační algoritmy, které by bylo vhodné na tento typ problému použít.

Současný stav popisu přenosu tepla zářením ve dvourozměrném modelu byl vytvořen jako podpůrný prostředek při inovaci ohřevu galvanoforem pro výrobu umělých kůží ve firmě Magna Exteriors & Interiors. Inovace v tomto případě má za cíl vytvořit popis přenosu tepla, který není závislý na měřených datech. Nejedná se tedy o žádnou interpolaci či aproximaci hodnot, které byly získány měřením. Měřené hodnoty jsou zde využívány pouze pro kalibraci modelové situace. Takový popis lze využít k různým účelům a to například k hledání nových tvarů reflektoru, které budou vystihovat námi požadované směrování tepelného záření nebo také jako nástroj určený ke studii vzájemného vlivu několika zářičů různě polohovaných nad ohřivanou plochou.

Implementace trojrozměrného modelu je navržena tak, aby bylo snadné implementovat popisované algoritmy. Nástroj je navržen především jako zkušební prostředí pro porovnávání různých přístupů k řešení popisované problematiky.

Dále jsou v disertační práci popsány různé způsoby identifikace distribuční funkce ozařování infračerveným zářičem.

Závěr

V závěru této disertační práce je možné konstatovat, že byla zpracována rešerše problematiky simulací přenosu tepelné energie se zaměřením na přenos tepla zářením, která je uplatnitelná v průmyslovém prostředí. Na základě provedených rešerší, je v této práci navržen obecný model přenosu tepla zářením. Popisovaný model je dále implementován nejprve ve 2D prostoru pro potřeby simulací přenosu tepla zářením výkonových infračervených zářičů používaných v průmyslové praxi.

V rámci práce byla prováděna některá měření. V disertační práci jsou použité měřicí postupy popsány a porovnány z hlediska jejich použitelnosti. Výstupní charakteristiky provedených simulací popisovaného modelu byly porovnány s hodnotami naměřenými.

V průběhu hlubšího poznávání problematiky přenosu tepla zářením vyvstala myšlenka na možnost modifikace tvaru reflektoru tak, aby odpovídal různým specifickým situacím. Při použití ohřevu infračervenými zářiči na tvarově velmi komplikované formě je velmi složité dosáhnout rovnoměrného zahřátí v co nejkratším čase. Rovnoměrné rozložení teploty na ohřivané formě je jeden z hlavních kvalitativních požadavků na výsledný produkt, proto byla požadována možnost navrhnout alternativní tvar reflektoru s použitím používaných variant zářičů. Jedná se například o směřování tepelného toku v určitém směru, či „vyrovnání“ charakteristiky tepelného záření pod zářičem. Jedna z možných variant optimalizace byla pro daný model implementována a odzkoušena.

V návaznosti na předchozí implementaci modelu v jeho dvojrozměrné podobě bylo pokračováno v rozšíření na trojrozměrný problém. Tato varianta značně komplikuje dané řešení, a to především z časové náročnosti. Jedná se především o použití vhodné varianty řešení pohledových faktorů, které jsou u simulací tepelného toku zářením základním kamenem. Proto v této práci je značná část věnována této problematice, kde jsou probrány různé používané algoritmy numerického řešení pohledových faktorů. Ve 3D implementaci modelu byla použita jedna z variant a porovnána z hlediska časové náročnosti a přesnosti.

Vícerozměrný problém je následně komplikován také ve fázi optimalizace distribuční funkce tepelného toku, tak abychom docílili alternativních tvarů reflektoru. Pro tento případ se jeví vhodnější použití genetických algoritmů.

Pokračování této práce shledávám v implementaci metody adaptivní integrace pro řešení pohledového faktoru v trojrozměrné variantě a následném využití genetických algoritmů, které se zdají být pro dostačující řešení dané optimalizační úlohy z časového hlediska jako nejvhodnější. Dále by měla být věnována pozornost analýze vhodného řešení stínění mezi plochami. Vzhledem k počtu uvažovaných ploch, se jedná o úlohu s vysokým počtem pohledových faktorů, kde pro každý je nutné řešit kolizi se všemi plochami a to v každém kroku optimalizační úlohy.

Seznam použité literatury

- [1] LIENHARD IV, John H. a John H. LIENHARD V. *A heat transfer textbook*. 3rd ed. Cambridge, Mass: Phlogiston Press, 2003. ISBN 09-713-8352-9.
- [2] GLOMBÍKOVÁ, Viera. Optimalizace v simulačním modelování. Technická univerzita v Liberci [online]. 2007 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/info_predmety/Psi/prednasky_2007/prednaska_4_PSI.pdf
- [3] POTĚŠIL Antonín, Tomáš VÍT Tomáš a Martin ŽIVNÝ. Metoda rozmístění infrazářičů pro ohřev formy pro výrobu umělých kůží. Interní zpráva projektu FR-TI1/266, ed. (LENAM, s.r.o., Liberec, 2010).
- [4] MODEST, Michael F.: Radiative heat transfer 3rd ed. ISBN 01-238-6944-7.
- [5] HOWELL, John R. The Monte Carlo Method in radiative Heat Transfer. Journal of heat transfer. 1997
- [6] MOAN, Torgier. Experiences with Orthogonal Polynomials and ‘Best’ Numerical Integration Formulas on a Triangle; with Particular Reference to Finite Element Approximations, Zeitschrift Fuer Angewandte Mathematik und Mechanik. 1974. s:501-508.
- [7] TEDA, Jaroslav, Genetické algoritmy a jejich aplikace v praxi. [cit. 2013-08-26]. Dostupné z: <http://programujte.com/clanek/2005072601-geneticke-algoritmy-a-jejich-aplikace-v-praxi/>
- [8] WALTON, George N., Algorithms for Calculating Radiation View Factors Between Plane Convex Polygons With Obstructions,” National Bureau of Standards, NBSIR 86-3463 .
- [9] Dr. Fischer Europe S.A.S., Infrared Halogen Lamps, [cit. 2013-11-26] Dostupné z: http://www.dr-fischer-group.com/img_pool/DF%20IR%20Catalogue.pdf

Publikační činnost

Práce související s tématem disertační práce

- [10] Kolektiv autorů. Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe. Editor Jaroslav Mlýnek, Antonín Potěšil 2012, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, Číslo publikace 55-064-1, ISBN 978-80-7372-884-7.
- [11] LOUFEK, Jan. Simulations of radiation heat transfer in design of alternative infrared emitters. Publikováno: XI. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms 2012. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012.
- [12] LOUFEK, Jan a Martin HUŠEK. Simulation of infrared rating for industrial practice. Publikováno: 19th International conference engineering Mechanics 2013. Svratka. ISBN:978-80-87012-46-8
- [13] LOUFEK, Jan a František VLAS. Usage of radiative heat transfer simulations to determine alternative reflector shape. Publikováno: 30th Danubia-Adria Symposium on advances in experimental mechanics. Primošten, Chorvatsko. 2013. ISBN 978-953-7539-17-7
- [14] LOUFEK, Jan a Jiřina KRÁLOVCOVÁ. Simulation of Radiative Heat Flux Distribution Under an Infrared Heat Emitter. *Acta Polytechnica*. 1. vyd. Praha: Czech Technical University, 2015, roč. 55, č. 1. ISSN 1210-2709.

Další práce autora

- [15] LOUFEK, Jan. Systém správy sítě s využitím SNMP. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. 2007.
- [16] LOUFEK, Jan. Zásuvný modul pro matching ontologií v systému Protégé. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. 2009.
- [17] TYL, Pavel a Jan LOUFEK. COMP – Comparison of Matched Ontologies in Protégé. Publikováno: Information Technologies – Application and Theory (ITAT 2010), Bratislava, Slovensko, 2010, s.107–110. ISBN 978-80-970179-3-4.
- [18] TYL, Pavel a Jan LOUFEK. COMP: Comparing Ontology Matching Plug-in. Publikováno: Next Generation Web Services Practices, (Ed. A. Abraham, D. Húsek, V. Snášel), Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009, s. 44–49. ISBN 978-0-7695-3821-1.
- [19] LOUFEK, Jan, Klára CÍSAŘOVÁ a Marian LAMR. Využití richmedií pro studenty s poruchou zraku. *Sborník příspěvků ze IX. ročníku konference „Vysokoškolské studium bez bariér“*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. S. 35 – 44. ISBN 978-80-7494-169-6.