



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

Simulace tepelného toku infračervených zářičů

Heat flux simulation of infrared emitters

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.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucí mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 21.8.2015

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřině Královcové, Ph.D. za vedení mé disertační práce a doc. Ing. Antonínu Potěšilovi, CSc. za data, možnost účastnit se řešení projektu s praktickým uplatněním. Práce byla vytvořena v rámci MPO projektu FR-TI1/266 zaměřeného na inovaci technologie výroby umělých kůží.

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

Prohlášení.....	2
Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	11
Seznam symbolů.....	12
Seznam zkratk.....	13
Úvod.....	14
1 Cíle disertační práce.....	17
2 Proces výroby umělých kůží.....	19
2.1 Simulace virtuálního infra-ohřevu.....	21
2.2 Automatizované rozmístění zářičů nad ozařovanou formou.....	22
2.2.1 Výpočet intenzity záření na ozařované formě.....	23
2.2.2 Výsledná optimalizace rozmístění zářičů.....	24
2.3 Reality ohřevu forem na výrobní lince.....	24
3 Šíření tepla.....	27
3.1 Přenos tepla.....	27
3.1.1 Přenos tepla zářením.....	28
3.1.2 Zrcadlová a rozptýlená odrazivost a zářivost.....	35
3.1.3 Pohledový faktor.....	36
3.2 Ohřev užitím infračerveného záření.....	38
3.3 Technické zdroje pro ohřev infračerveným zářením.....	39
3.3.1 Světelné zdroje.....	39
3.3.2 Keramický zářič.....	41
3.3.3 Plynové zářiče.....	42
4 Numerické metody pro výpočet pohledového faktoru.....	43
4.1 Využití metody Monte Carlo k určení pohledového faktoru.....	43
4.2 Deterministické metody pro výpočet pohledového faktoru bez překážky.....	51
4.3 Algoritmy pro výpočet pohledového faktoru s překážkou.....	60
4.4 Výpočet pohledového faktoru pro dva libovolné mnohoúhelníky.....	69
4.5 Výpočet pohledových faktorů ve 2D.....	72
5 Návrh modelu přenosu tepla zářením.....	75
5.1 Model tepelného toku.....	75
5.2 Následné využití modelu.....	79
6 Realizace modelu a jeho využití.....	84
6.1 Měření charakteristik zářiče.....	84

6.2	Implementace modelu ve 2D	90
6.2.1	Implementace modelu	90
6.2.2	Hledání alternativního tvaru	92
6.2.3	Hodnocení řešených úloh.....	93
6.3	Implementace modelu ve 3D	97
6.3.1	Implementace modelu	97
6.3.2	Určení pohledových faktorů metodou Monte Carlo	98
6.3.3	Určení pohledových faktorů metodou dvojnásobné numerické plošné integrace.....	105
6.4	IRE Plotter.....	107
6.5	Kalibrace modelu	108
6.6	Tepelné pole při použití více zářičů ve virtuálním ohřevu.....	111
7	Shrnutí výsledků	114
	Závěr	116
	Seznam použité literatury	118
	Publikační činnost.....	123
	Přílohy.....	124
	A: Porovnání měřené a simulované charakteristiky zářiče umístěného ve výšce 80mm nad rovinnou plochou	124
	B: Porovnání měřené a simulované charakteristiky zářiče umístěného ve výšce 100mm nad rovinnou plochou	125
	C: Porovnání měřené a simulované charakteristiky zářiče umístěného ve výšce 120mm nad rovinnou plochou	126
	D: Rozdíl tepelného toku mezi měřenou a simulovanou charakteristikou	127
	E: Simulované charakteristiky pro různě zakřivené ozařované plochy	128
	F: Modelové situace se třemi zářiči s případovými charakteristikami ozáření.....	129

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Postup při výrobě umělých kůží metodou „Slush moulding”	19
Obr. 2-2 Technická příprava výrobní linky.	21
Obr. 2-3 Grafická reprezentace rozložení tepelného toku	22
Obr. 2-4 Názorné umístění zářičů nad testovací formou	24
Obr. 2-5 Testovací forma po optimalizaci.....	24
Obr. 2-6 Testovací forma s čidly.....	24
Obr. 2-7 Schéma znázorňující proces přípravy výrobního procesu, se znázorněním přínosu návrhu infračervených zářičů	26
Obr. 3-1 Rozložení tepelné energie dopadající na průsvitnou desku.....	30
Obr. 3-2 Porovnání reálného, šedého a černého tělesa	32
Obr. 3-3 Zobrazení Wienova posunovacího zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku.....	34
Obr. 3-4 Zrcadlový a rozptýlený odraz tepelné energie.....	35
Obr. 3-5 Výměna tepelné energie zářením mezi dvěma prvky.....	36
Obr. 3-6 Některé pohledové faktory	37
Obr. 3-7 Trubicový infračervený zářič Philips / Dr.Fischer.....	39
Obr. 3-8 Reflektor Philips IRZ500	40
Obr. 3-9 Směrová výkonová charakteristika dvou zářičů.....	40
Obr. 3-10 Porovnání výsledného výkonu dosaženého zářičem se zabudovaným reflektorem.....	41
Obr. 3-11 Charakteristika závislosti vyzařovaného výkonu na vlnové délce	41
Obr. 4-1 Geometrie pro pohledový faktor mezi částí plochy a rovinou	45
Obr. 4-2 Schematický diagram určení pohledového faktoru metodou Monte Carlo.....	46
Obr. 4-3 Znázornění modelové situace	49
Obr. 4-4 Vypočítané pohledové faktory pro 45 ploch s různým počtem paprsků vyzařených z každé plochy v závislosti na koeficientu x dle Obr. 4-3	50
Obr. 4-5 Doba výpočtu tří typů rozdělení počtu paprsků na prvek	51
Obr. 4-6 Geometrie a popis výpočtu 2AI a 2LI	54
Obr. 4-7 Jednoduchá plošná integrace	55
Obr. 4-8 Jednoduchá křivková integrace	56
Obr. 4-9 Časové testy - protilehlé strany krychle	57
Obr. 4-10 Časové testy - další konfigurace	57

Obr. 4-11 Body pro Gaussovskou plošnou integraci	58
Obr. 4-12 Chyba pro výpočet obdélníkovou metodou	58
Obr. 4-13 Chyba pro výpočet Gaussovskou metodou	58
Obr. 4-14 Chyba pro výpočet obdélníkovou metodou – přilehlé čtverce	59
Obr. 4-15 Chyba pro výpočet Gaussovskou metodou – přilehlé čtverce	59
Obr. 4-16 Částečně blokový pohled	60
Obr. 4-17 Adaptivní dělení polygonů	61
Obr. 4-18: Příklad analytického řešení	63
Obr. 4-19 Stříška složená z trojúhelníkových ploch	66
Obr. 4-20 Porovnání metody ViewFactor-LST a FATTIC pro výpočet pohledových faktorů trojúhelníků stříšky s měněným úhlem ploch	66
Obr. 4-21 Konfigurace pro výpočet pohledového faktoru s plochou obsahující otvor... ..	67
Obr. 4-22 paralelní identické plochy a soustředné neidentické plochy	67
Obr. 4-23 Konfigurace pohledového faktoru se stíněním.....	69
Obr. 4-24 Schematické znázornění dvou mnohoúhelníkových ploch	70
Obr. 4-25 Howellova metoda skřížených strun pro výpočet pohledového faktoru	73
Obr. 5-1 Schematické zobrazení reálného systému	75
Obr. 5-2 Schéma diskretizace základní konfigurace složený ze základních elementů ..	76
Obr. 5-3 Základní postup simulace přenosu tepla zářením.....	78
Obr. 5-4 Funkce ozáření – rozložení tepelného toku dopadajícího na ozařovanou plochu a požadovaný průběh rozložení tepelného toku na ozařované ploše.....	80
Obr. 5-5 Částečný výsledek optimalizačního algoritmu po několika krocích	80
Obr. 5-6 Optimalizace tvaru reflektoru	81
Obr. 5-7 Optimalizace modelu přenosu tepla zářením	83
Obr. 6-1 Zobrazení průběhů teplot na termočlátku č. 7	85
Obr. 6-2 Termovizní infrakamera značky FLIR - vlevo, Snímek termokamerou pro používaný zářič Philips - vpravo	86
Obr. 6-3 Senzor tepelného toku Hukseflux SGB01	86
Obr. 6-4 Umístění senzoru intenzity tepelného toku	87
Obr. 6-5 Schematické znázornění postupu měření intenzity tepelného toku.....	88
Obr. 6-6 Graf zaznamenaných hodnot pro všechny pokusy	89
Obr. 6-7 měření v úseku 0-1 (střed zářiče)	89
Obr. 6-8 Automatický měřicí systém	90
Obr. 6-9 Aplikace IRE Designer se zobrazenou simulací.....	92

Obr. 6-10 Zobrazení účinnosti algoritmu pro vyhledání nového tvaru reflektoru.....	93
Obr. 6-11 Optimalizace tvaru reflektoru, který okrajově ozařuje zakřivenou plochu	94
Obr. 6-12 Výsledek optimalizace tvaru reflektoru s částečným ozářením zakřivené plochy	94
Obr. 6-13 Optimalizace pozice reflektoru pro zakřivenou plochu.....	95
Obr. 6-14 Výsledek optimalizace pozice reflektoru pro zakřivenou plochu	95
Obr. 6-15 Optimalizace pozice více reflektorů nad rovinnou ozařovanou plochu	96
Obr. 6-16 Výsledek optimalizace pozice více reflektorů nad rovinnou ozařovanou plochu	96
Obr. 6-17 IRE Designer 3D	98
Obr. 6-18 vzájemná poloha dvou trojúhelníků v prostoru	99
Obr. 6-19 Generování náhodných bodů v trojúhelníku	100
Obr. 6-20 Vzájemná poloha trojúhelníku a bodu na ploše.....	102
Obr. 6-21 Testovací konfigurace pro určování pohledového faktoru	103
Obr. 6-22 Určení pohledového faktoru metodou Monte Carlo (vzdálenost 10[-]).....	104
Obr. 6-23 pohledového faktoru metodou Monte Carlo (vzdálenost 3[-]).....	104
Obr. 6-24 Časová závislost počtu paprsků generovaných z 10 bodů.....	105
Obr. 6-25 Diskretizace trojúhelníkových prvků pro numerickou integraci	106
Obr. 6-26 Numerická integrace - porovnání přesnosti.....	107
Obr. 6-27 Kalibrace modelu oproti naměřeným hodnotám. Měřené hodnoty jsou zobrazeny zelenou křivkou a simulované hodnoty pak černou křivkou.	109
Obr. 6-28 Závislosti maximální hodnoty tepelného toku na emisivitě jednotlivých elementů modelu.....	110
Obr. 6-29 Závislosti maximální hodnoty tepelného toku na teplotě jednotlivých elementů modelu.....	110
Obr. 6-30 Plocha ozařovaná dvěma shodnými zářiči	111
Obr. 6-31 Charakteristiky simulací tepelného toku – ozáření plochy více zářiči	111
Obr. 6-32 Ozáření plochy více zářiči - odečtena vlastní zářivost ozařované plochy....	112
Obr. 6-33 Simulace skládání tepelného toku více zářičů.....	113

Seznam tabulek

Tab. 1 Rozdělení elektromagnetického záření	29
Tab. 2 Celková emisivita pro různé povrchy	31
Tab. 3 Výsledek simulací metody Monte Carlo pro výpočet Pohledového faktoru realizované J.R. Howellem	46
Tab. 4 Porovnání časové náročnosti jednotlivých algoritmů	57
Tab. 5 Porovnání analytického řešení s výsledky výpočtu pomocí aplikace View3D....	64
Tab. 6 Porovnání analytického řešení s metodou 2AI	65
Tab. 7 Porovnání výpočtu hodnot numerickou a analytickou metodou.....	68
Tab. 8 Porovnání hodnot pohledového faktoru pro stíněné plochy (numerické a analytické řešení)	69
Tab. 9 Výsledky výpočtu pohledového faktoru s použitím metody křivkových integrálů pro dva mnohoúhelníky	72
Tab. 10 Porovnání hodnot pohledového faktoru modelové situace	106

Seznam symbolů

A	Plocha (m ²)
b	Faktor stínění (-)
B	Zářivost (Wm ⁻²)
c ₀	Rychlost světla c ₀ = 2,9979 · 10 ⁸ ms ⁻¹
C	Okrajová křivka
e	Vyzařovaný tepelný tok (Wm ⁻²)
F	Pohledový faktor (-)
\bar{h}	Koeficient přenosu tepla (Wm ⁻² K ⁻¹)
h	Planckova konstanta h = 6,62606876 · 10 ⁻³⁴ Js
H	Ozáření (Wm ⁻²)
k	Tepelnou vodivost materiálu (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
K _B	Boltzmannova konstanta K _B = 1,3806503 · 10 ⁻²³ JK ⁻¹
q	Tepelný tok (Wm ⁻²)
Q	Tepelná energie (W)
r, s	Délka (m)
T	Absolutní teplota (K)
u	Elementy modelu
λ	Vlnová délka (m)
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta σ = 5,6704x10 ⁻⁸ Wm ⁻² K ⁻⁴
α	Absorpce (-)
β, θ, Φ, g	Úhel (rad)
ε	Emisivita (-)
ρ	Prostupnost (-)
τ	Odrazivost (-)

Seznam zkratek

0LI	Analytická křivková integrace
1AI	Jednoduchá plošná integrace
1LI	Jednoduchá křivková integrace
2AI	Dvojnásobná plošná integrace
2LI	Dvojnásobná křivková integrace
IRE	Infrared emitter
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
PU	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou simulace přenosu tepla a to konkrétně přenosu tepla zářením. 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 výrobcí 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 zářením. 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 zářením.

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 [20]. 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 [56]. 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.

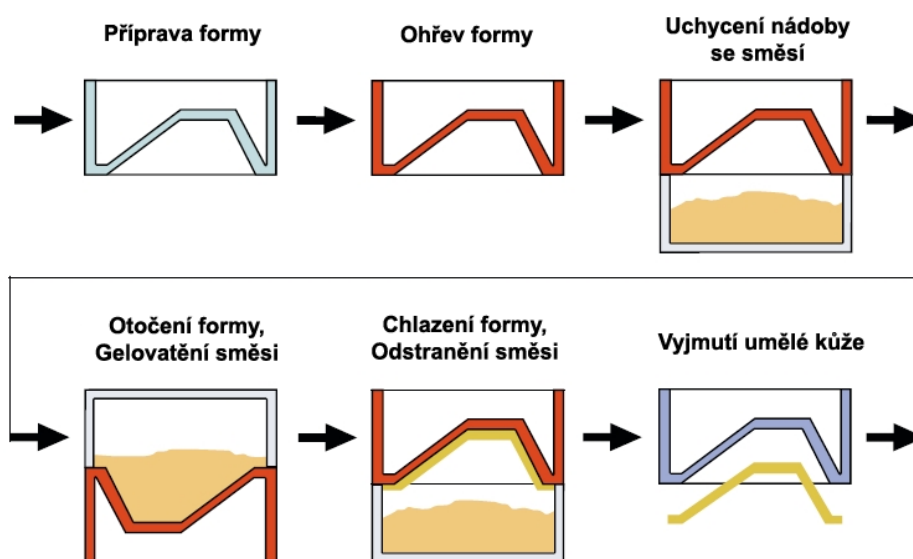
V souladu se stanovenými cíli je základním prvkem tématu práce proces přenosu tepla zářením a jeho numerické řešení. Numerické postupy zpravidla předpokládají vyhodnocení pohledových faktorů mezi jednotlivými částmi simulovaného systému. Dílčími kroky práce pak jsou:

- 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 Proces výroby umělých kůží

Vlastní téma disertační práce souvisí s aplikační oblastí, která se dotýká procesu výroby umělých kůží pro palubní desky automobilů. Z tohoto důvodu je zařazena tato kapitola jako vysvětlení širšího kontextu řešeného problému. Záměrem této kapitoly je i vysvětlení základního cíle disertační práce.

Při procesu tváření se využívá metoda zvaná „slush moulding“. Při ní nejprve dochází k ohřátí formy na provozní teplotu. Poté dojde k nanesení prášku z termoplastické hmoty na bázi PU nebo PVC na ohřátou formu, tak aby směs byla rovnoměrně rozložena po celém povrchu formy. Vzhledem k teplotě formy dochází k následnému roztavení směsi. Tloušťka roztaveného materiálu závisí na teplotě formy a době, po kterou probíhá tavení směsi. Po opětovném ochlazení formy je možné sejmut výslednou umělou kůží. Proces tváření měkkčených plastů je zobrazen na obrázku Obr. 2-1. Základními požadavky průmyslové praxe na výsledný proces jsou kvalita výsledných kůží a rychlost jednoho cyklu celého procesu. Oba požadavky jsou přitom víceméně protichůdné.



Obr. 2-1 Postup při výrobě umělých kůží metodou „Slush moulding“
(Zdroj: The TPU Center [8])

Pro ohřev formy používané pro výrobu umělých kůží je používána celá řada metod. Většina těchto postupů je patentově chráněna. Jako médium přenosu tepla se nejčastěji používá např. vzduch, písek, olej či záření. Některé výrobní postupy využívají různé kombinace více metod, tak aby bylo dosaženo co nejlepšího ohřevu, co se týče především času a rovnoměrného rozložení teplot na ohřívané formě. Co se týká

vlastního ohřevu formy, používají se v praxi různé způsoby, například:

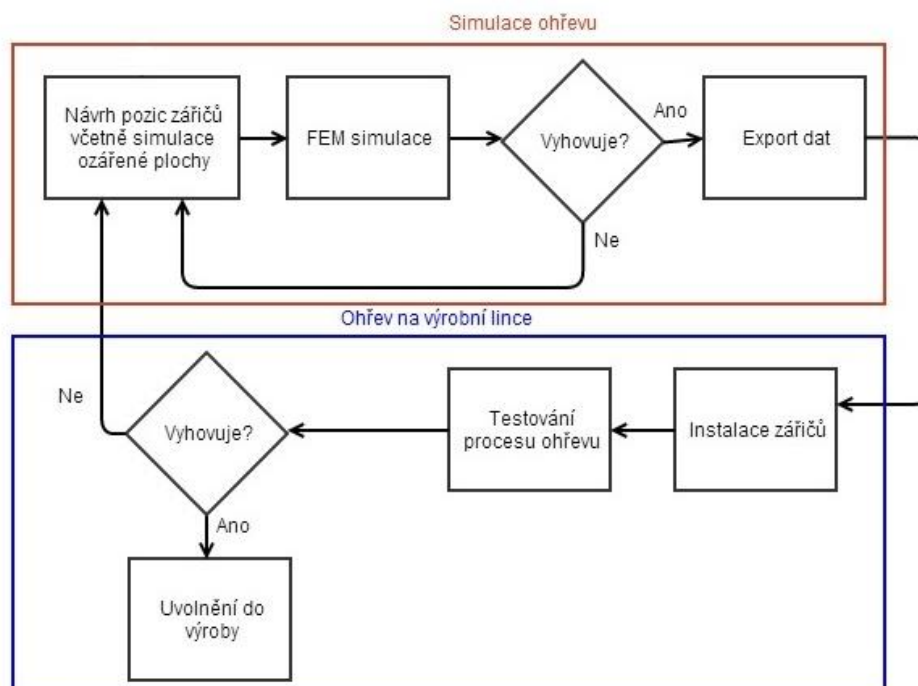
- Olejová lázeň – „Slush moulding“ řešení využívající ohřevu formy s olejovou lázní využívá například Krauss Maffei [19]. V této technologii je problematická manipulace s velkým objemem oleje (popř. jiného ohřevného média).
- Kombinované řešení – výrobce měkčených plastů Paul Kiefel GmbH využívá vlastní řešení kombinující ohřev infrazářiči, které slouží jako hlavní zdroj tepelné energie, společně s ohříváním pomocí horkého vzduchu, který je k formě přiveden systémem trysek, je zaručené rychlé a rovnoměrné ohřátí formy. [5]
- Ohřev infračervenými zářiči – česká společnost Magna Exteriors & Interiors Bohemia dodávající plastové díly do automobilů vyvinula pro ohřev forem vlastní řešení využívající sady infračervených zářičů. Jako jediný producent měkčených plastů využívá infračervené záření jako jediný zdroj tepelné energie. Největší nevýhodou této technologie je složitost způsobu ohřevu, kdy je zapotřebí zapojit regulaci jednotlivých zářičů tak, aby některá místa formy nebyla ohřátá příliš a jiná naopak vůbec. Dále je zde také problém s ohřevem těžko dostupných míst, pro která není snadné přesněji směřovat tepelný tok z infrazářičů. Tuto úlohu částečně řeší regulace.

Tyto představené metody ohřevu mají své nevýhody. V případě oleje a písku se jedná především o nutnost manipulace s velkým objemem těchto medií. V případě ohřevu vzduchem je zde problém s velikostí stroje a hlukem spojeným s tímto postupem. Ohřev pomocí tepelných zářičů je z těchto metod nejméně náročný na spotřebu energie a prostor, avšak je zde vysoká náročnost na řízení vlastního ohřevu a problematicky se dosahuje rovnoměrného rozložení teplot po celé ohřívané formě.

Firma Magna Exteriors & Interiors vyvíjí vlastní řešení, využívající infračervené zářiče jako hlavní zdroj tepla. Vývoj probíhá ve spolupráci s firmou Aura Engineering dodávající vlastní zařízení a související technologie. Dále se na vývoji podílí firma LENAM, provádějící předběžné a podpůrné studie a Technická univerzita v Liberci, provádějící vývoj programové části, regulačních algoritmů a měřicího systému [6]. Cílem těchto institucí je zefektivnění stávající výroby. Z tohoto důvodu byly vytvořeny softwarové prostředky umožňující simulaci výrobního procesu, dále byly navrženy regulační algoritmy, které ovládají výkony jednotlivých zářičů ohřívajících danou formu.

Tato vyvíjená technologie je založena na kombinaci infračervených zářičů a vhodném automatickém řízení, které nám umožní velmi efektivně ohřát formu, jak po stránce úspory energie, tak i s možností variability zařízení (např. při použití ohřevného zařízení na různé formy) a to bez nutnosti velkých zásahů do ohřívané formy. Pro ohřev jsou používány pokročilé metody řízení a regulace, jenž splní i takové požadavky, které jiné používané technologie splňují jen s problémy.

Technickou realizaci tohoto problému lze rozdělit do dvou základních oblastí, jež přispívají k výslednému funkčnímu systému, který je schopen vytvářet požadovaný produkt v podobě umělé kůže pro automobilový průmysl v požadované kvalitě a v co nejkratším čase. První oblastí je virtuální příprava výrobního procesu, kde jsou použité procesy simulovány pomocí podpůrných nástrojů, jejichž cílem je urychlit a zlevnit celý výrobní proces. Druhou částí je vlastní realizace výrobní linky, která obsahuje technické řešení tohoto procesu. V poslední fázi je potřeba uvažovat také regulaci systému, bez které by tato technologie nebyla použitelná. Technická příprava výrobního postupu je znázorněna v diagramu na Obr. 2-2.



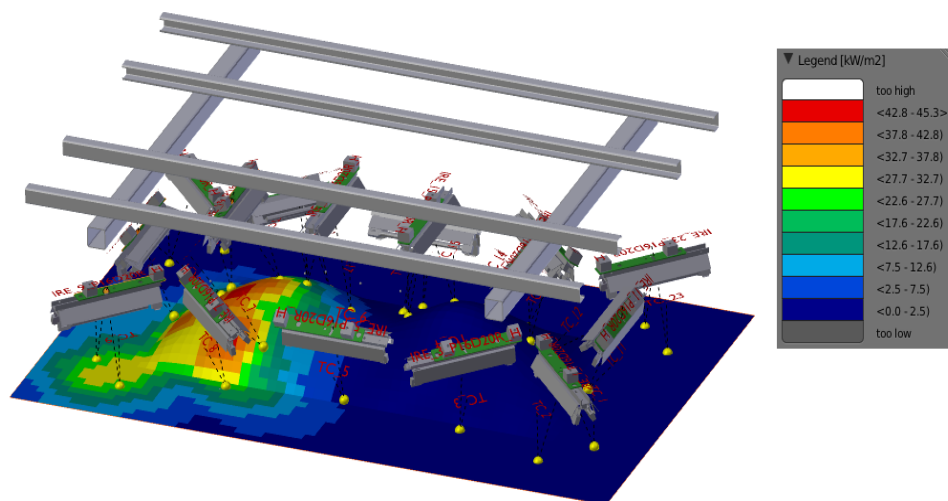
Obr. 2-2 Technická příprava výrobní linky.
(Zdroj: Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe [56])

2.1 Simulace virtuálního infra-ohřevu

Při návrhu výrobního procesu je důležité dosáhnout požadovaných parametrů a to především rychlost a rovnoměrnost ohřevu formy. Na Obr. 2-2 je názorně zobrazen

postup přípravy výrobní linky. Návrh rozmístění infrazářičů, ve kterém je možné využít podpory simulace intenzity záření jednotlivých zářičů. Návrh rozmístění zářičů je možné rozdělit na tři fáze. První fází je simulace jednotlivých zářičů, která je možná buď vytvořením modelu popisujícím rozložení tepelného záření a následným exportem charakteristiky daného zářiče, či naměřením charakteristiky v různých výškových hladinách a následnou interpolací naměřených hodnot.

Druhou fází je vlastní simulace ohřevu. Touto problematikou se zabývá Martin Hušek [56], který vytvořil na podporu výrobního procesu simulační nástroj IRE View Blender. V nástroji je umísťována sada zářičů nad ohřivanou plochu tak, aby bylo dosaženo co nejrovnoměrnějšího rozložení teplotního pole na celé ohřivané ploše. Intenzita dopadajícího záření na plochu je vypočtena jako součet všech intenzit zářičů, jejichž intenzita na dané místo dopadá. Na obrázku Obr. 2-3 je zobrazeno prostředí aplikace IRE View Blender s rozmístěním zářičů nad testovací formou.



Obr. 2-3 Grafická reprezentace rozložení tepelného toku získaná ze softwaru IRE View Blender (Zdroj: Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe [56])

Takto připravený model je následně přenesen do konečně-prvkového systému ANSYS, kde je tento model doplněn o důležité materiálové vlastnosti, okrajové podmínky, či v případě výpočtu průběhu ohřevu i počáteční podmínky

2.2 Automatizované rozmístění zářičů nad ozařovanou formou

Součástí druhé části přípravy ohřevu formy je kromě samotné simulace intenzity tepelného toku a teploty formy také optimalizace rozmístění zářičů nad plochou k dosažení co možná nejrovnoměrnějšího ohřevu. Touto prací se zabývá R. Srb a J. Mlýnek [56], kteří navrhli optimalizaci rozložení tepelného toku ze sady zářičů

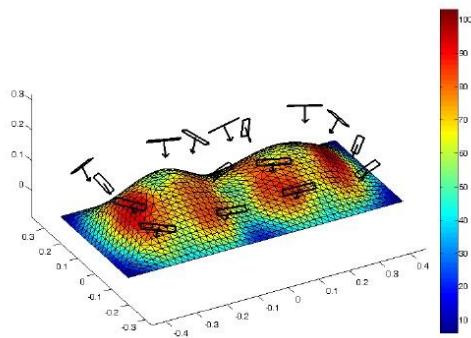
s využitím genetického optimalizačního algoritmu. Algoritmus opět využívá charakteristiky zářičů, které byly získány měřením. Současně je potřeba při optimalizaci uvažovat prostorové rozmístění zářičů tak, aby nedocházelo ke kolizi zářičů, aby nebyly dva zářiče v takové poloze, že jeden ze zářičů ozařuje jiný, či zda jsou zářiče v minimální vzdálenosti od ohřívané formy. Algoritmus se snaží nalézt co nejrovnoměrnější ohřátí formy, však s intenzitou záření v určitých mezích. Pokud by zde nebylo omezení minimální hodnota intenzity, algoritmus by pravděpodobně našel rozmístění zářičů ve velké vzdálenosti – rovnoměrné ohřátí.

Ke globální optimalizaci umístění zářičů je využíván genetický algoritmus. Tato metoda je obecně málo náchylná k uvíznutí v bodě lokálního minima ohodnocující funkce v průběhu realizace algoritmu. Na řešení nalezené pomocí genetického algoritmu je dále aplikována metoda „hill-climbing“ k následné lokální optimalizaci nastavení zářičů a lokálnímu vylepšení nalezeného řešení.

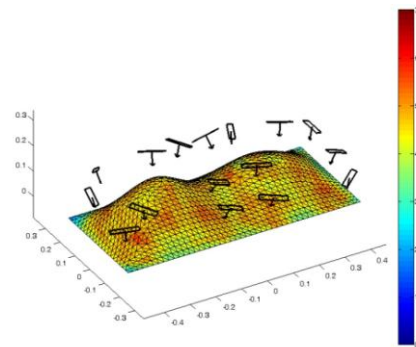
K optimalizaci je využíván matematický model, který se skládá z dvou základních prvků infrazářiče a ozařované plochy.

2.2.1 Výpočet intenzity záření na ozařované formě

V následujícím příkladu výpočtu intenzity záření je umístění každého použitého zářiče nad povrchem formy, celkem je použito M zářičů stejného typu (stejného výkonu a tvaru). Povrch formy je definován pomocí trojúhelníkových elementárních ploch. Při výpočtu tepelné intenzity záření na povrchu formy při zadaném nastavení zářičů je použito experimentálně naměřených hodnot intenzity záření v okolí použitého typu zářiče. Přitom intenzita záření v těžišti dané elementární plochy a závisí na poloze těžiště vzhledem k zářiči a na směru vnější normály k ploše. Na Obr. 2-4 je zobrazena modelová situace, kde je počítána intenzita záření na povrchu testovací formy. Půdorys formy je rozměrů 0,8 m x 0,4 m. Výška formy (vzdálenost nejnižší a nejvyšší položeného těžiště elementárních prvků) je 0,15 m. Povrch formy se skládá z 2064 elementárních trojúhelníkových ploch. Forma byla ozařována šestnácti zářiči Phillips o výkonu 1600W. Rozměry použitého zářiče jsou 20 cm x 4 cm. Umístění zářičů nad ozařovanou plochou je znázorněn na Obr. 2-4. Barevná škála znázorněná v pravé části obrázku udává odpovídající intenzitu tepelného záření v [kW/m²].



Obr. 2-4 Názorné umístění zářičů nad testovací formou
(Zdroj: Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe [56])



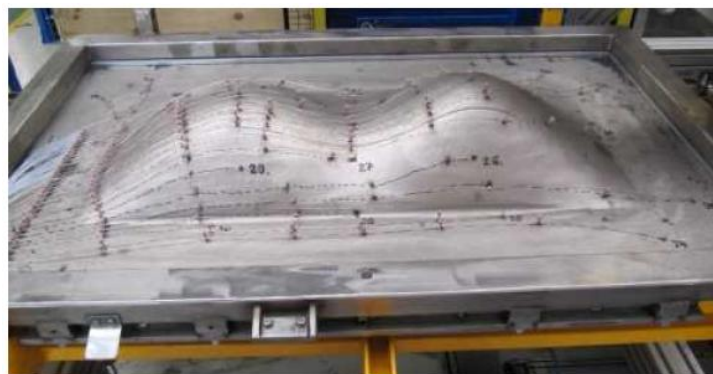
Obr. 2-5 Testovací forma po optimalizaci
(Zdroj: Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe [56])

2.2.2 Výsledná optimalizace rozmístění zářičů

Pro optimalizaci rozmístění zářičů byl použit dvoufázový algoritmus (genetický + horolezecký). Na obrázku Obr. 2-5 je zobrazeno rozmístění infrazářičů na konci optimalizačního algoritmu. Genetický algoritmus byl v tomto případě proveden v 100 000 iteracích a následným prohledáním lokálního maxima pomocí horolezeckého algoritmu s 5000 iteracemi. Sloupec barevných odstínů znázorněný v pravé části obrázku udává odpovídající intenzitu tepelného záření v $[\text{kW}/\text{m}^2]$.

2.3 Reality ohřevu forem na výrobní lince

Formy ve výrobním procesu jsou opatřeny termočlánky, které jsou přiřazeny k jednotlivým zářičům. Tyto termočlánky slouží regulaci ohřevu formy a umožňují v daných bodech odečítat teplotu formy. Po optimalizaci rozmístění reflektorů nad ohřivanou plochou jsou exportovány souřadnice všech zářičů, které slouží k umístění fyzických zářičů na požadovaná místa. Na obrázku Obr. 2-6 je zobrazena testovací forma, která slouží k testování předvýrobních postupů (simulace, regulace atp.).



Obr. 2-6 Testovací forma s čidly

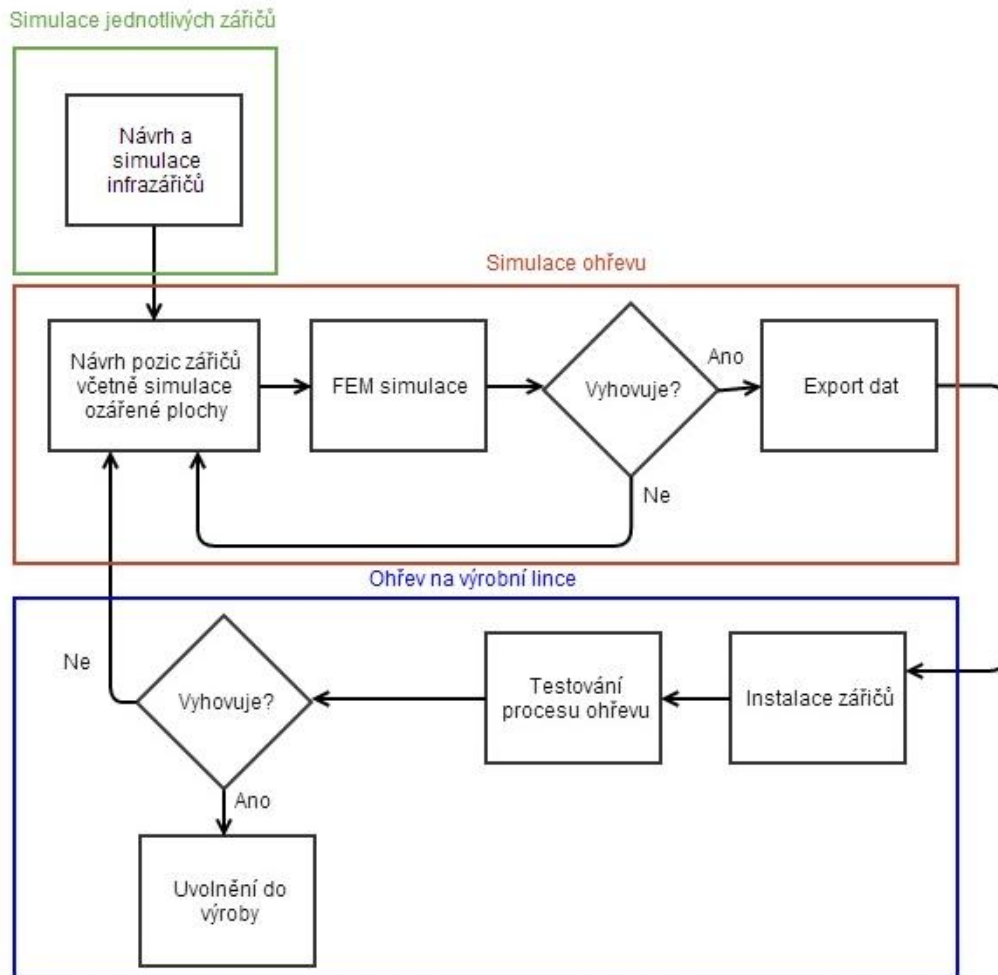
V popisované výzkumné oblasti se intenzivně řeší zásadní problém, jehož cílem je optimalizovaný ohřev celé formy. V první fázi návrhu probíhá optimalizace rozmístění zářičů nad ohřivanou formou. Optimalizace je provedena s použitím genetických algoritmů (kapitola 2.2). Výstupem této optimalizace je sada pozic jednotlivých zářičů nad uvažovanou plochou. Toto prostorové rozmístění je následně použito v další fázi, kde jsou přidány další parametry pro určení teplotní charakteristiky formy v čase (kapitola 2.1). Obě tyto fáze pracují s měřenými charakteristikami toku tepelného záření pod zářičem. Tyto charakteristiky jsou měřeny v různých výškových hladinách nad ozařovanou plochou, v různých úhlech naklonění zářiče oproti ozařované ploše. Tyto naměřené hodnoty jsou následně interpolovány a použity v jednotlivých modelech jako zdroj tepelné energie. V realizaci této problematiky se využívá mnoha různých typů zářičů (různé výkony, halogenové trubice s/bez zabudovaného keramického reflektoru, zářiče s jednou či dvěma trubicemi, Odlišně tvarované hliníkové reflektory, zářiče bez hliníkových reflektorů atp.) Z tohoto důvodu je nutné uchovávat širokou databázi zářičů a pro všechny takto uchovávat měřené hodnoty a pro výpočty používat interpolace hodnot pro potřebné body.

V této kapitole byly uvedeny dva případy, kdy je v přípravné fázi při návrhu rozmístění zářičů používána charakteristika infrazářiče. Uvedené měřené charakteristiky je vhodné nahradit nástrojem, generujícím charakteristiky zářičů na základě tvaru reflektoru a použitého zářiče. V této části by tedy odpadla nutnost měření charakteristik intenzity záření pro všechny použité nástroje.

Pro potřeby návrhu rozmístění zářičů a následný virtuální ohřev skořepinové formy je možné vytvořit univerzální model reflektoru, který by snadno určil tepelný tok v libovolném bodě pod zářičem. Cílem je, aby model poskytoval charakteristiku na základě parametrů, popisujících daný zářič (emisivita, teplota a tvar). Zakomponování tohoto modelu do systému virtuálního ohřevu je vizuálně naznačeno na Obr. 2-7. Zeleně označený blok v tomto schématu znázorňuje možnost nahrazení měřených dat simulací. Jedná se o první fázi celého procesu ohřevu formy, který je možné nahradit alternativním přístupem a to použitím simulace přenosu tepelné energie oproti stávajícímu zpracování měřených dat.

Při ohřevu pomocí infrazářičů se setkáváme s mnoha problémy. Při nevhodném rozmístění zářičů nad formou může snadno dojít k lokálnímu přehřátí formy, či naopak k nedostatečnému ohřevu. Aby bylo dosaženo výsledného produktu v požadované

kvalitě, je v technologii výroby umělých kůží metodou Slush-moulding požadován rovnoměrný ohřev. Pro některé specifické situace by pak bylo vhodné umožnit návrh reflektoru zářiče, který by ovlivnil tepelný tok zářiče dle požadovaných parametrů (např. rovnoměrnost či směrovost).



Obr. 2-7 Schéma znázorňující proces přípravy výrobního procesu, se znázorněním přínosu návrhu infračervených zářičů (Doplněno z: Ohřevy radiací – teorie a průmyslová praxe [56])

3 Šíření tepla

Třetí kapitola popisuje základy problematiky přenosu tepelné energie se zaměřením na přenos tepelné energie zářením. Jsou zde popsány konstitutivní vztahy přenosu tepelné energie, představena problematika určování pohledového faktoru v modelu přenosu tepla zářením. Kapitola uvozuje fyzikální a geometrické vztahy, ze kterých se vychází při implementaci výpočtu tepelného toku. Na závěr této kapitoly jsou zde popsány průmyslově používané zdroje tepelného záření. V rámci řešené výzkumné oblasti jsou využívány především halogenové infračervené zářiče, pro které jsou zde uvedeny jejich charakteristiky záření a porovnání různých variant.

Hmota je nositelem energie. Teplo je jednou z forem energie. Hmota je tedy také nositelem tepla čili tepelné energie. Podle druhé hlavní věty termomechaniky je sdílení tepla mezi dvěma hmotnými tělesy, případně mezi dvěma hmotnými částicemi, možné pouze tehdy pokud těleso, které teplo odebírá, má vyšší teplotu, než těleso, jemuž se teplo předává.

Tepelná energie se může šířit dvěma způsoby, které jsou z fyzikálního hlediska zcela odlišné. Prvním způsobem je přenos tepla, ve kterém je zprostředkován přenos energie nějakým hmotným médiem, a tedy jedná se o přenos tepla vedením (kondukcí) či prouděním (konvekcí). Druhý způsob využívá k přenosu tepelné energie elektromagnetické vlnění a jedná se o přenos zářením (radiací).

Teplotní pole je prostor, kde v každém jeho místě a čase můžeme určit termodynamickou teplotu. Při řešení problému můžeme v teplotním poli pozorovat ustálený stav s časově neměnným teplotním polem nebo přechodový děj, kdy pozorujeme v čase se měnící teplotní pole. Vztahy popisující teplotní pole jsou obecně nelineární, jelikož obsahují teplotně závislé veličiny (např. materiálové konstanty, koeficient přestupu tepla, teplotně závislé zdroje tepla atd.), radiační prvky (pro řešení radiace z objektů). [9]

3.1 Přenos tepla

Zabýváme-li se problematikou přenosu tepla, je třeba v obecné rovině uvažovat procesy vedení, proudění a záření. Při přenosu tepla vedením dochází postupně k šíření tepelné energie v nehybné hmotě prostřednictvím pohybu částic, kdy z teplejšího tělesa je předávána energie studenějšímu. Tepelný tok q (Wm^{-2}) lze vyjádřit

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3.1)$$

kde k ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) je konstanta uvádějící tepelnou vodivost materiálu, T (K) udává absolutní teplotu a x (m) udává směr osy x pro šíření tepla. Dalším ze způsobů přenosu tepla je přenos prouděním, který může probíhat pouze s v tekutém prostředí (kapalina plyn). Jedná se o výměnu tepla způsobenou promícháváním různě ohřátých částí hmoty. U tělesa s teplotou T_{body} (K) obklopeného tekutinou o teplotě T_∞ (K) lze vyjádřit hustotu tepelného toku q Newtonovým ochlazovacím zákonem

$$q = \bar{h} \cdot (T_{body} - T_\infty), \quad (3.2)$$

ve kterém vystupuje koeficient přenosu tepla v bodě povrchu \bar{h} ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$). Posledním typem přenosu tepla je tepelné záření, které je zprostředkováno elektromagnetickým vlněním. Tato práce se omezuje na tento způsob přenosu tepla, proto vztahy budou podrobněji popsány dále.

V technické praxi se nevyskytuje žádný případ sdílení tepla, při kterém by se uplatnil pouze jeden z výše uvedených procesů samostatně. Prakticky se vždy jedná o složitý děj, při kterém se teplo šíří současně vedením, prouděním a sáláním. Zpravidla však jeden z těchto způsobů má pro daný systém rozhodující význam. Při návrhu modelu přenosu tepla se úloha většinou zjednodušuje tak, že se řeší daný technický případ pouze pro základní způsob, jenž má rozhodující význam.

3.1.1 Přenos tepla zářením

Vztahy v této kapitole jsou převzaty z [7]. Každé těleso neustále vyzařuje elektromagnetickou energii. Obvykle je tento přenos energie nazýván *přenos tepla zářením* či *tepelná radiace*. Jako zřejmý příklad přenosu tepelné energie zářením lze uvést sluneční září za jasného dne či plameny ohně – kdy těleso vystavené slunečním paprskům resp. plamenům ohně je mnohem teplejší než strana odvrácená [21]. Velikost této energie závisí na teplotě objektu a na vlastnostech jeho povrchu. Velikost vyzařované energie roste úměrně se čtvrtou mocninou absolutní teploty. Tabulka Tab.1 popisuje rozdělení vlnových délek elektromagnetického záření. Nejvyšší účinek tepelné energie spadá do záření vlnových délek 10^{-7}m až 10^{-3}m (ultrafialové, viditelné a infračervené záření).

Tab. 1 Rozdělení elektromagnetického záření
(Zdroj: Infračervené záření a jeho užití. [15])

Charakter	Vlnová délka, λ	
Kosmické záření	< 0,3 pm	
Gama paprsky	0,3–100 pm	
Rentgenové paprsky	0,01–30 nm	
Ultrafialové světlo	30–400 nm	} Tepelné záření 0,1–1000 μm
Viditelné světlo	0,4–0,7 μm	
Infračervené záření	0,7–1000 μm	
Milimetrové vlny	1–10 mm	
Mikrovlny	10–300 mm	
Krátkovlnné rádiové vlny	300 mm–100 m	
Dlouhé vlny	100 m–30 km	

Zatímco u přenosu tepla vedením a prouděním mohou hodnoty k a \bar{h} být závislé na teplotě, ale tato závislost obvykle není velmi silná. Tedy pro většinu případů je přenos tepla vedením a prouděním lineárně závislý na teplotní diferencii. Jak je možné vidět na vztahu (3.3), přenos tepla zářením je obecně závislý na čtvrté mocnině teploty.

$$q = k\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.3)$$

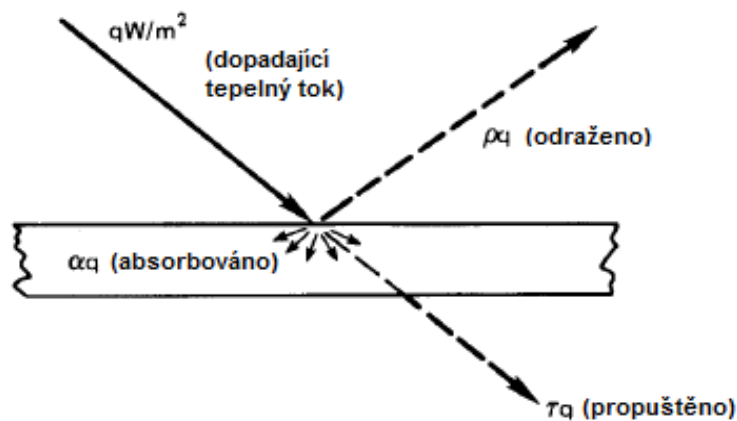
Konstanta k (-) představuje vzájemné charakteristické vlastnosti obou povrchů.

Tedy přenos tepla zářením se nabývá důležitosti s rostoucí teplotou a při velmi vysokých teplotách se může stát dominantním přenosem tepelné energie nad přenosem tepla vedením a prouděním. Přenos tepla zářením má tedy význam především pro aplikace se spalováním (ohniště, pece, spalovací motory atp.) [52], při nukleárních reakcích (atomové reakce na slunci, fúzní reaktory či atomové bomby) [51], pro atmosférické sestupy vesmírných raket [54] atp. Jako další oblasti, kde má přenos tepla zářením zásadní roli, jsou různé solární kolektory [55]. V neposlední řadě můžeme také uvést dnes velmi často zmiňovaný problém a tím je globální oteplování [53], které je způsobeno vysokou absorpcí slunečního záření skleníkovými plyny v atmosféře.

Významné vlastnosti vedení a proudění (tepelná vodivost, kinematická viskozita, hustota, atp.) jsou poměrně snadno měřitelné a závislost jejich vlastností je snadno odvoditelná (isotropní v celém médiu, případně se slabou teplotní závislostí). Vlastnosti tepelného záření jsou obvykle těžko měřitelné a často jsou používány nepřesné hodnoty. Pro kapaliny a pevná tělesa jsou tyto vlastnosti obvykle závislé na tenké vrstvě povrchu, která se může značně měnit v průběhu měření. Všechny vlastnosti přenosu tepla zářením se mohou také měnit s vlnovou délkou (především u plynů). [21]

Pokud budeme uvažovat tepelný tok q (Wm^{-2}), který dopadá na těleso, jak je naznačeno na Obr. 3-1, poměrná část energie α (-), z celkové energie dopadající na plochu se nazývá absorpce a je pohlcena tělesem, další část, ρ (-), nazývána odrazivost je odražena a poslední část energie, τ , je tělesem propuštěna. Pro α , ρ , τ přitom platí:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (3.4)$$



Obr. 3-1 Rozložení tepelné energie dopadající na průsvitnou desku
(Zdroj: A heat transfer textbook [7])

Uvažujme ideální zářič, který je označován jako *černé těleso* (*black body*). Takové těleso absorbuje veškerou energii a žádnou neodrazí ani nepropustí. $\alpha=1$; $\rho=0$; $\tau=0$. Energie vyzařená takovýmto tělesem je definována Stefan-Boltzmannovým zákonem (3.5). Tok energie vyzařující z tělesa je obecně označován e (W/m^2). Závislost intenzity tepelného toku černého tělesa e_b na teplotě T (K) pro *černé těleso* byla v roce 1879 experimentálně určena Stefanem a v roce 1884 odvozena Boltzmannem z termodynamických zákonů. Stefan-Boltzmannův zákon lze zapsat ve tvaru

$$e_b = \sigma T^4, \quad (3.5)$$

kde Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ a T je absolutní teplota tělesa.

Reálné těleso o teplotě T (K) nevyzařuje stejnou tepelnou energii jako černé těleso (vzorec 3.5), ale pouze určitou část ε (-) této energie. Pro tato tělesa (*nečerná*) tělesa zavádíme pojem emisivita. To samé platí také pro monochromatickou vyzařovanou energii (vyzařovaná energie pro jednotlivé frekvence) $e_\lambda(T)$, která je vždy nižší u reálného tělesa než u černého tělesa, jehož hodnotu nám udává Planckův zákon (3.14). Můžeme tedy definovat monochromatickou emisivitu, ε_λ (-)

$$\varepsilon_\lambda = \frac{e_\lambda(\lambda, T)}{e_{\lambda_b}(\lambda, T)}, \quad (3.6)$$

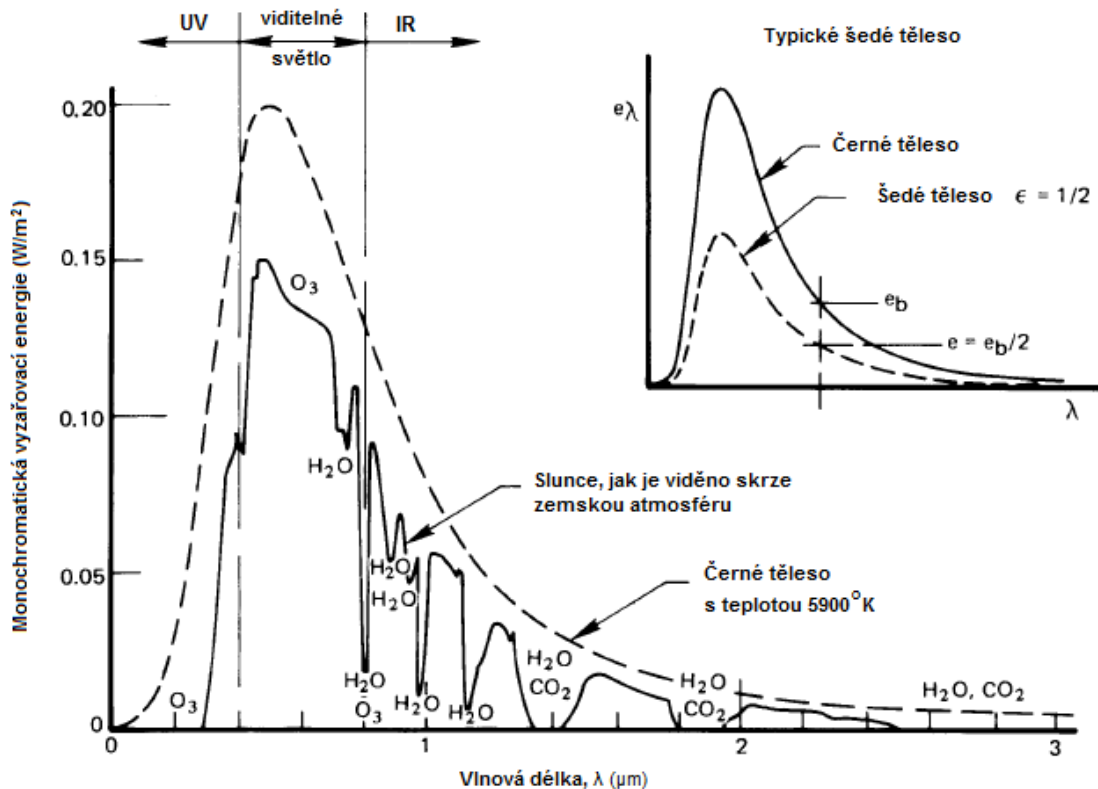
nebo celkovou emisivitu

$$\varepsilon = \frac{e(T)}{e_b(T)} = \frac{\int_0^\infty e_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}. \quad (3.7)$$

Pro reálná tělesa jsou obě hodnoty ε_λ a ε větší než nula a menší než jedna. Pro *černé těleso* platí $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$. Typické hodnoty emisivit pro některé materiály jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.

Tab. 2 Celková emisivita pro různé povrchy
(Zdroj: A heat transfer textbook [7])

	Teplota (°C)	ε
Hliník – leštěný	200-600	0,04-0,06
Mosaz – vysoce leštěná	260	0,03
Měď – elektrolyticky leštěná	90	0,02
Ocel – leštěná	150-480	0,14-0,32
Železo – zrezivělé	40	0,61-0,85
Antikorozní ocel – leštěná	40	0,07-0,17
Antikorozní ocel – po opakovaném zahřátí	230-900	0,50-0,70
Stříbro	200	0,01-0,04
Cihla – červená	40	0,93
Led	0	0,97-0,98
Malba bílá	40	0,89-0,97
Sklo – hladké	40	0,94
Dřevo	40	0,80-0,90



Obr. 3-2 Porovnání reálného, šedého a černého tělesa
(Zdroj: A heat transfer textbook [7])

Uvažujme těleso, které vyzařuje pro libovolnou vlnovou délku část energie určenou emisivitou ϵ oproti energii vyzářené *černým tělesem* o stejné teplotě ve stejné vlnové délce. Takové těleso nazýváme *šedé těleso* (*gray body*). Žádné reálné těleso není šedé, ale mnoho povrchů má přibližně stejné vlastnosti jako šedé těleso. Například slunce (viz. Obr. 3-2) se na zemi jeví jako *šedé těleso* s přibližnou emisivitou 0,6. Emisivita většiny běžných materiálů je závislá na vlnové délce a teplotě. Integrací přes vlnovou délku této charakteristiky získáme přibližnou emisivitu, která odpovídá *šedému tělesu*. Vyzařovanou energii *šedého tělesa* tedy můžeme zapsat pomocí vztahu

$$e_g = \epsilon \sigma T^4. \quad (3.8)$$

Vztah velikosti energie dopadající na ozařovaný povrch tělesa (ozáření) H (Wm^{-2}) a velikostí energie opouštějící těleso (zářivost) B (Wm^{-2}) lze zapsat vztahem

$$B = \rho H + e_g. \quad (3.9)$$

Hodnotu ozáření plochy H (Wm^{-2}) lze získat sečtením celkové incidentní energie dopadající na povrch daného tělesa. Zářivost B (Wm^{-2}) je pak stanovena jako součet tělesem odražené a energie vyzářené vlastním tělesem.

Vztah mezi monochromatickou směrovou emisivitou a monochromatickou směrovou absorpcí pro povrch, který je v termodynamické rovnováze s jeho okolím, popisuje Kirchhoffův zákon, jehož vyjádření lze zapsat jako

$$\varepsilon_{\lambda}(T, \theta, \phi) = \alpha_{\lambda}(T, \theta, \phi), \quad (3.10)$$

kde θ (rad) a ϕ (rad) určují směr dopadajícího respektive vyzařovaného toku energie.

Pro tělesa s rozptýleným typem sálání lze tento zákon zjednodušit do podoby, která není závislá na směru záření:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = \alpha_{\lambda}(T) \quad (3.11)$$

Pro *černé*, resp. *šedé těleso* můžeme Kirchhoffův zákon ještě upravit do následující formy:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (3.12)$$

Kirchhoffův zákon pro černé resp. šedé těleso nám tedy říká, že pokud je těleso v termodynamické rovnováze, vyzařuje stejné množství, které absorbuje ze všech směrů a všech vlnových délek.

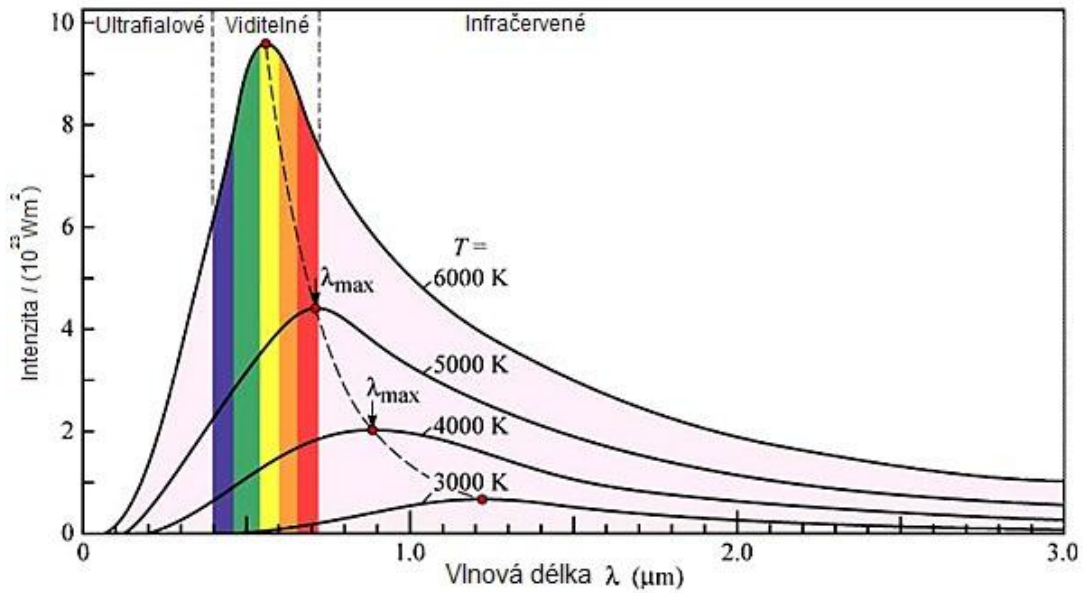
Maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku se s rostoucí teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám. Vztah mezi teplotou T (K) a vlnovou délkou λ_{max} (m) s maximem vyzařovaného toku popisuje Wienův posunovací zákon (viz. Obr. 3-3). Přibližně tři čtvrtiny tepelné energie vyzařované černým tělesem je vpravo od maximální hodnoty dané vztahem

$$\lambda_{max}T = 2,8978 \cdot 10^{-3} mK. \quad (3.13)$$

Závislost vyzařované energie černého tělesa na vlnové délce λ (m) je pak dána Planckovým zákonem (3.14)

$$e_{\lambda} = \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc_0}{K_B T \lambda}} - 1)}, \quad (3.14)$$

kde $c_0 = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ je rychlost světla, $h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ je Planckova konstanta a $K_B = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta. Závislost vyzařované energie na teplotě a vlnové délce je zobrazena na Obr. 3-3.



Obr. 3-3 Zobrazení Wienova posunovacího zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku (Zdroj: Infrared spectroscopy [online: <http://physics.schooltool.nl/irspectroscopy>])

Definujme $Q_{i;j}$ (W) jako velikost tepelné energie předané z tělesa i na těleso j . Předpokládejme, že ohřáté těleso 1 září na nějaké jiné těleso 2 a oba objekty mají vlastnost černého tělesa. Zároveň předpokládejme, že všechna tepelná energie z tělesa 1 dorazí na těleso 2 a opačně. Dále zavedme Q_k (W) jako celkovou výměnu tepelné energie mezi tělesy. V uvedeném případě se dvěma tělesy je Q_1 rozdílem hodnot $Q_{1;2} = A_1 e_b(T_1)$ a $Q_{2;1} = A_1 e_b(T_2)$. Záporná (respektive kladná) hodnota Q_1 představuje informaci o tom, zda těleso 1 tepelnou energii přijímá (respektive předává) tělesu 2 . V takto definovaném systému pak platí $Q_1 = -Q_2$.

$$Q_1 = A_1 e_b(T_1) - A_1 e_b(T_2) = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4). \quad (3.15)$$

Pokud není splněn předpoklad, že veškerá energie vyzářená jedním tělesem dopadá na těleso druhé, zavádíme tzv. pohledový faktor mezi tělesy 1 a 2 $F_{1;2}$ (-) vyjadřující podíl vzájemné sdílené energie. Pohledový faktor závisí na „vzájemné viditelnosti“ a vzájemné orientaci těles (respektive jejich povrchu) v prostoru.

$$Q_1 = A_1 F_{1;2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.16)$$

Uvažujme-li systém sestávající z n šedých těles s plochami A_i (m^2), pak můžeme pro každý objekt vyjádřit velikost tepelného přenosu jako rozdíl vyzářené energie šedým tělesem a celkové energie opouštějící povrch (včetně odražené)

$$Q_i = \frac{e_b - B_i}{(1-\varepsilon)/(\varepsilon A_i)} \quad (3.17)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{B_i - B_j}{1/(A_i F_{i-j})}; i \neq j \quad (3.18)$$

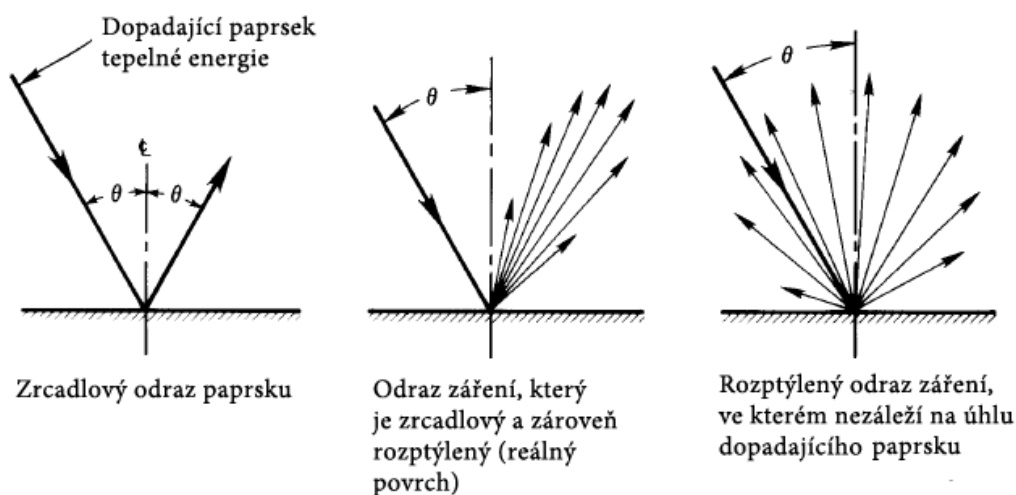
Řešením soustavy rovností, které vzniknou ze vzorců (3.17) a (3.18) získáme hodnoty zářivosti jednotlivých ploch řešeného systému B_i (W m^{-2}). Tyto hodnoty zpětně můžeme dosadit do (3.17), čímž získáme hodnoty přenesené tepelné energie. Záporné hodnoty Q představují tělesa, která tepelnou energii do řešeného systému předávají. Kladné hodnoty naopak představují tělesa přijímající tepelnou energii.

3.1.2 Zrcadlová a rozptýlená odrazivost a zářivost

Energie dopadající, částečně či zcela odražená může mít charakter rozptýleného nebo zrcadlového odrazu. Energie může být také vyzářena (odražena) způsobem, který slučuje oba tyto krajní odrazy. Zrcadlo odrazí viditelné spektrum energie téměř dokonalým způsobem. Pokud je zářivost nebo odrazivost rozptýlená, není upřednostněn směr odrazu odchozích paprsků. Černé těleso má vždy charakter rozptýleného záření, jelikož veškerá dopadající energie je tímto tělesem pohlcena a nedochází k odrazu žádné energie.

Způsob, jakým se daný povrch při záření a odrazu chová, se mění s vlnovou délkou záření. Pokud vezmeme v úvahu směrové i spektrální charakteristiky, tak jejich vlastnosti jako odrazivost a zářivost závisí na vlnové délce, teplotě, úhlech dopadu a směru záření.

V této disertační práci je uvažována restrikce problému na model složený z šedých těles, které jsou charakterizovány rozptýlenou odrazivostí stejně jako černá tělesa.



Obr. 3-4 Zrcadlový a rozptýlený odraz tepelné energie - šipky zobrazují velikost tepelného toku (Zdroj: A heat transfer textbook [7])

3.1.3 Pohledový faktor

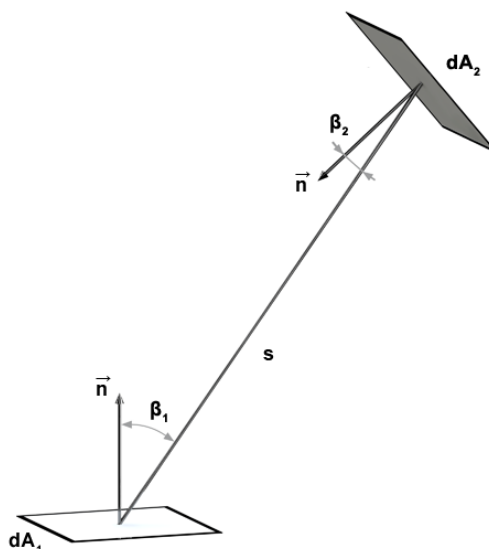
Při řešení problematiky přenosu tepelné energie mezi plochami stanovujeme tzv. pohledový faktor, který určuje geometrický vztah vzájemné polohy dvou ploch. V modelu výměny radiační energie uvažujeme uzavřený systém. K uzavření systému slouží vnější virtuální obálka, která má téměř nulovou či nulovou reflektivitu.

Při výpočtu přenosu tepla zářením je jednou ze stěžejních částí určení tzv. pohledového nebo také konfiguračního faktoru F_{i-j} (-). Analytické řešení pohledového faktoru je získáno řešením integrální rovnice

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi s^2} dA_i dA_j, \quad (3.19)$$

kde indexy i a j označují uvažované plochy A_i (m^2) a A_j (m^2) představují vlastní plochy, s (m) je vzdálenost mezi body v rámci uvažovaných ploch a úhly β (rad) jsou pak hodnoty úhlu svírajících spojnic mezi plochami s normálovým vektorem dané plochy. Řešení pohledových faktorů analytickým výpočtem není vzhledem k náročnosti vhodné. Složitější případy je vhodné řešit jinými způsoby, které aproximují danou situaci. Určování pohledových faktorů je při návrhu modelu přenosu tepelné energie zářením stěžejní, proto je mu dále věnována kapitola 4.

Pro některé standardní konfigurace jsou v literatuře uvedeny zjednodušené výpočty pohledových faktorů. Tyto vztahy uvádí například R. Siegel a J. Howel [16].



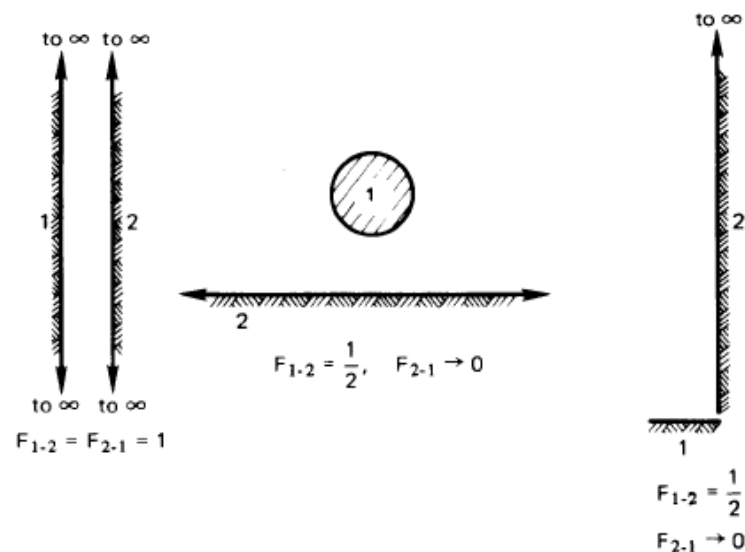
Obr. 3-5 Výměna tepelné energie zářením mezi dvěma prvky, které jsou součástí objektů 1 a 2

Na obrázku Obr. 3-6 jsou naznačeny některé konfigurace s jednoznačně odvoditelným pohledovým faktorem, podle kterých jsou hodnoty pohledových faktorů snadno stanovitelné podle následující definice:

$$F_{1-2} \equiv \text{část zorného pole 1 obsazené předmětem 2.}$$

Pokud jsou plochy izotermické a nemají vlastnost zrcadlového odrazu, pak platí

$$F_{1-2} \equiv \text{část energie opouštějící 1 zachycená předmětem 2.}$$



Obr. 3-6 Některé pohledové faktory
(Zdroj: A heat transfer textbook [7])

Pokud budeme uvažovat uzavřený systém, je zřejmé, že veškerá energie, která opouští plochu 1, dopadne na nějakou jinou plochu. Součet pohledových faktorů zářícího tělesa se všemi incidentními tělesy v daném systému je roven jedné. To je možné zapsat tímto vztahem:

$$1 = F_{1-2} + F_{1-3} + \dots + F_{1-n}, \quad (3.20)$$

kde (2), (3), ..., (n) jsou všechny objekty v okolí plochy 1.

Dalším pravidlem, které se při výpočtech pohledových faktorů využívá je pravidlo vzájemnosti, které vyjadřuje rovnost mezi dvěma vzájemnými pohledovými faktory takto:

$$A_i F_{i-j} = A_j F_{j-i} \quad (3.21)$$

Posledním pravidlem v algebře pohledových faktorů je pravidlo součtu ploch. Podle tohoto pravidla můžeme libovolnou plochu rozdělit na libovolný počet menších

ploch a pohledový faktor původní plochy je pak roven součtu pohledových faktorů všech jeho částí ploch. Pro $A_j = \sum_{k=1}^K A_{j,k}$ platí:

$$F_{i-j} = \sum_{k=1}^K F_{i-(j,k)} \quad (3.22)$$

Některé numerické metody výpočtu pohledových faktorů jsou také popisovány v [3], kde je vytvářen numerický model pro šíření tepla v dutém tělese, které je shora ohříváno. V tomto modelu jsou zahrnuty všechny tři typy šíření tepelné energie (vedením, prouděním a zářením).

3.2 Ohřev užitím infračerveného záření

Jak již bylo zmíněno, teplo se šíří třemi způsoby: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením (radiací). Při přenosu tepla vedením musí být tělesa v přímém kontaktu a teplo se zde šíří z teplejších míst do míst chladnějších. V případě proudění není předáváno ohřivanému objektu teplo ze zdroje tepla, ale prostřednictvím proudícího kapalného či plynného prostředí. Předchozí dva způsoby přenosu tepla jsou oproti záření vázány na hmotné prostředí. Přenos tepla zářením může probíhat, i když je mezi oběma tělesy vzduchoprázdný prostor. Při přenosu tepla radiací se tepelná energie zdroje tepla mění v elektromagnetické záření, které je následně absorbováno druhým tělesem, kde se teprve mění v tepelnou energii. Základní podmínku ohřevu tělesa radiací je tedy dostatečně velká vlastní absorpce tohoto tělesa.

Výhody ohřevu zářením tedy lze shrnout takto:

1. Při ohřevu zářením dochází k rychlému vzrůstu teploty ohřivaného tělesa ihned po zapnutí zdroje záření. Oproti konvekcii se tedy jedná o zlomkový čas (je zapotřebí ohřát příslušný objem prostředí, které má ohřívání těleso obklopit).
2. Vhodně zvolenými zrcadlovými plochami lze soustředit záření na ohřívání objekt tak, že prakticky neztratíme energii ohřevem okolí ohřivaného tělesa.
3. Účinnost přenosu tepla zářením roste s teplotním rozdílem zdroje a ohřivaného tělesa.

Dle zdroje [15] jsou první zmínky o využití infračerveného záření jako zdroji tepla v průmyslu datovány přibližně k roku 1933, kdy firma Ford Motor comp. v Dearbornu prováděla pokusy při sušení laků automobilových karoserií pomocí žárovkového záření pro zkrácení času sušení. Do této doby se používalo konvektivní sušení v komorových pecích. První praktické výsledky byly uveřejněny v r. 1938. Byly

ukázány značné výhody při sušení využitím infračerveného záření oproti sušení konvekčním. Hlavní výhodou bylo značné zkrácení doby sušení, ale také zlepšení kvality lakové vrstvy.

3.3 *Technické zdroje pro ohřev infračerveným zářením*

Pro průmyslové aplikace se využívají zdroje infračerveného záření, jejichž teploty se pohybují v rozmezí od 300°C do 2200°C. V technické praxi se setkáváme se zdroji, které můžeme rozdělit na zdroje „svítivé“ a „temné“, podle intenzity světla, které vydávají [15]. Některé zdroje mohou být doplněny o reflektor, který zvyšuje účinnost infračerveného zářiče.

3.3.1 Světelné zdroje

Ze svítivých zdrojů se nejčastěji používají halogenové infračervené žárovky nebo žárovky s wolframovým vláknem. Tyto zdroje infračerveného záření mohou na vnitřní straně obsahovat pokovení, které slouží jako vnitřní reflektor. Tento vlastní reflektor usměrňuje výstupní záření do úzkého kužele a slouží jako směrový zdroj infračerveného záření. Teplota vlákna takového zdroje je přibližně 1800°C.

Pro model popisovaný v této práci byl použit světelný infrazářič výrobce Philips (Obr. 3-7) s příkonem 1600W. Jedná se o zářič s vlastním reflektorem naneseným na vnitřní stranu skleněného obalu. Udávaná světelná teplota tohoto zářiče je 2400K. Při kalibraci byl tento zářič doplněn reflektorem stejného výrobce z leštěného hliníku s označením IRZ500 (Obr. 3-8).



Obr. 3-7 Trubicový infračervený zářič Philips / Dr.Fischer 13568Y/98 1600W 144V REFL
(Zdroj: Elkam Lighting
[<http://philips-svetelne-zdroje.elkam.cz/28982/13568y-98-1600w-144v-refl-philips-dr-fischer.html>])

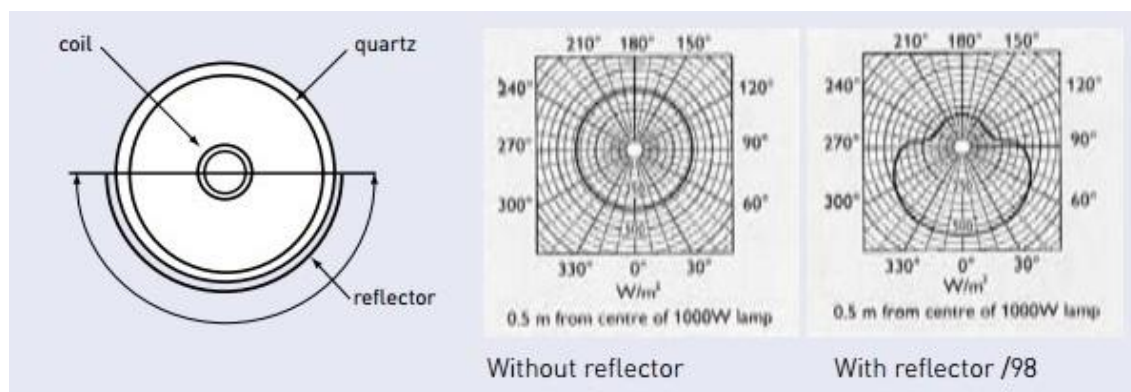


Obr. 3-8 Reflektor Philips IRZ500
(Zdroj: Mecserflex Manufacturing

[<http://www.mecserflex.co.uk/shop/pc/IRZ500-Lamp-Holder-Reflector-for-500W-Lamps-1230p6214.htm>])

Charakteristika zářiče Dr.Fischer

Výrobce dodává charakteristiky k halogenovým trubiciím, kde jsou zobrazeny vyzařovací charakteristiky samotné trubice ve vzdálenosti 0,5m (viz. Obr. 3-9). Charakteristika zobrazená vlevo v obrázku Obr. 3-9 (without reflector) zobrazuje vyzařovací charakteristika halogenové infračervené trubice bez reflektoru, kde je vidět rovnoměrné rozložení vyzařovaného výkonu do všech stran. V pravé charakteristice obrázku Obr. 3-9 (with reflector /98) je zobrazena halogenová trubice, která je opatřena zabudovaným keramickým reflektorem na jedné polovině použité trubice.



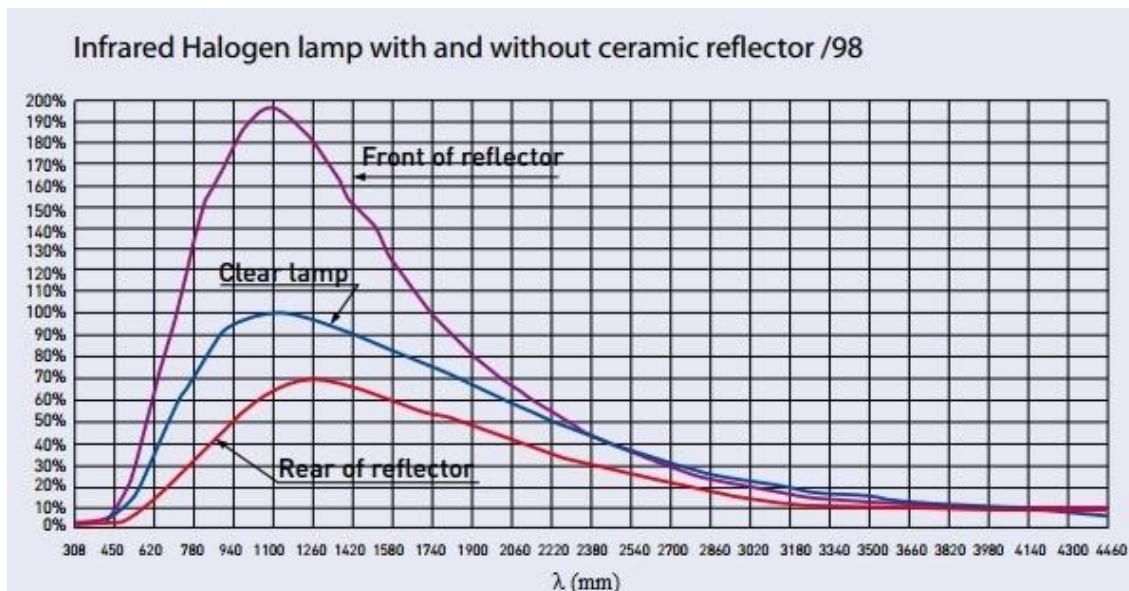
Obr. 3-9 Směrová výkonová charakteristika dvou zářičů (bez reflektoru, s vestavěným reflektorem)
(Zdroj: Infrared Halogen Lamps [47])

Výsledný efekt použití zabudovaného reflektoru je lépe vidět na Obr. 3-10, kde je zobrazena výkonová charakteristika infračervených halogenových zářičů v závislosti na vlnové délce záření. Modrá křivka grafu znázorňuje výkon zářiče bez reflektoru. Fialově je zde pak zobrazena charakteristika dosaženého výkonu ve směru od reflektoru, červená pak zobrazuje vyzařovaný výkon za zabudovaným reflektorem.

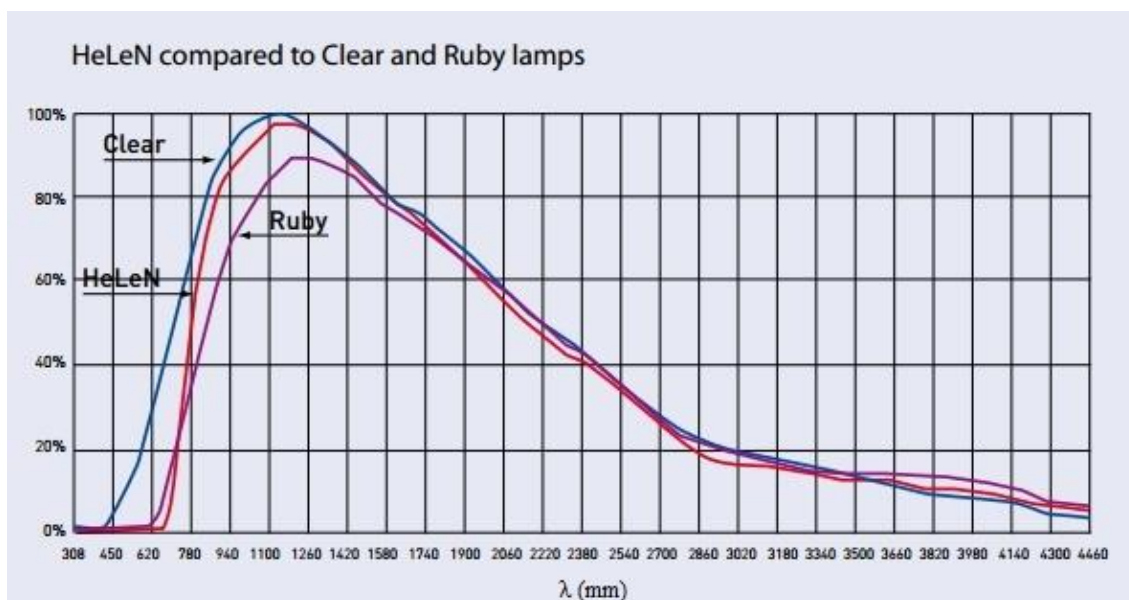
Charakteristiky infračervených zářičů, které jsou opatřeny dodatečným reflektorem (např. Obr. 3-8) nejsou od výrobce k dispozici. Některé typy zářičů jsou

dále modifikovány přímo ve výrobním procesu (např. dvě halogenové trubice pod jedním reflektorem, či z prostorových důvodů modifikovaný tvar reflektoru).

Obrázky Obr. 3-10 a Obr. 3-11 zobrazují závislost vyzařované energie na vlnové délce a typu použitého zářiče. Svislá osa obou grafů znázorňuje procentuelní zisk oproti standardnímu zářiči (modrá křivka) bez zabudovaného keramického reflektoru.



Obr. 3-10 Portovnění výsledného výkonu dosaženého zářičem se zabudovaným reflektorem
(Zdroj: Infrared Halogen Lamps [47])



Obr. 3-11 Charakteristika závislosti vyzařovaného výkonu na vlnové délce tří typů zářičů.
(Zdroj: Infrared Halogen Lamps [47])

3.3.2 Keramický zářič

Keramické zářiče jsou využívány v různých průmyslových aplikacích, především tehdy, pokud je vyžadován infračervený ohřev v delších vlnových délkách. Jedná se

o představitele temných infračervených zářičů, které se skládají z keramických těles různých tvarů se zalisovanou žhavicí spirálou. Povrchové teploty takových zářičů se pohybují v rozmezí od 350°C do 750°C.

3.3.3 Plynové zářiče

Tyto zářiče můžeme rozdělit do dvou skupin. V první skupině jsou zářiče tvořeny ocelovým plechem, který je z druhé strany žhaven plamenem. Druhá skupina zářičů využívá drobných pórů v keramické desce, kterými je protlačována směs plynu se vzduchem, kde je dosaženo rozžhnutí desky téměř bez-plamenným spalováním.

4 Numerické metody pro výpočet pohledového faktoru

Čtvrtá kapitola je zaměřena na numerické řešení pohledových faktorů. V této kapitole jsou popsány používané postupy pro řešení tohoto numerického problému. Základní rozdělení těchto metod je na metody stochastické (Monte-Carlo) a na metody deterministické (např. numerická plošná integrace). V kapitole jsou jednotlivé metody popsány včetně porovnání různých způsobů výpočtu. Jedná se o kapitolu, která shrnuje rešeršní část této práce a slouží jako podklad pro návrh řešení numerického modelu. Problematika pohledových faktorů je uvažována pro určování distribuce tepelné energie. Určování pohledových faktorů lze také využít při řešení různých optických modelů.

Pohledový faktor při výpočtu přenosu tepla zářením zaujímá klíčovou roli, především pak při vytváření numerických modelů. Právě numerické řešení těchto faktorů (vzorec 3.19) je jednou z největších komplikací, protože modely přenosu tepelné energie zářením obvykle pracují s velkým počtem ploch, pro které je potřeba určit co nejpřesněji jednotlivé pohledové faktory. Tato kapitola bude věnována rešerši různých postupů výpočtu a jejich porovnání. Dále bude diskutována vhodnost použití metod pro použití daných metod v uvažovaném modelu přenosu tepla zářením.

Pohledovým faktorem vyjadřujeme vzájemnou viditelnost dvou objektů. Pohledový faktor nabývá hodnot 0 až 1. Hodnota pohledového faktoru se dá interpretovat tak, že se jedná o podíl zachycených paprsků plochou, které jsou vyzářeny jinou plochou.

Numerické metody výpočtu pohledového faktoru se dají rozdělit na statistické a deterministické. Obě skupiny pak je možné ještě dělit na metody uvažující výpočet pohledového faktoru s překážkou a bez překážky.

4.1 Využití metody Monte Carlo k určení pohledového faktoru

Jedním z nejvýznamnějších autorů, věnujících se problematice přenosu tepla zářením je J. R. Howell, který se ve svém článku [22] věnuje z pohledu použití metod založených na stochastických technikách Monte Carlo. Obecně se dá tvrdit, že právě metody založené na Monte Carlo jsou v numerickém řešení pohledových faktorů velmi rozšířené. Tyto techniky jsou založené na statistické charakteristice fyzikálních procesů nebo na analogii v modelech, které napodobují fyzikální procesy. Metody Monte Carlo

byly původně navrženy k pokusům, které měly analyzovat potencionální chování atomových zbraní, u kterých byly experimentální pokusy velmi náročné, a také nebyl dostatečný výzkum popisující danou problematiku, tak aby výsledek odhadu chování byl dostatečně přesný.

Uvažujme geometrii zobrazenou na Obr. 4-1. Elementy dA_1 a dA_2 jsou části ploch A_1 , A_2 s nekonečnou délkou v pohledu kolmém na zobrazeném nákresu, jde tedy o dvourozměrný případ výpočtu. Howell dokázal, že pohledový faktor takovéto konfigurace je závislý pouze na úhlu β . Pohledový faktor pro tuto konfiguraci lze zapsat pomocí následující rovnice.

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos\beta d\beta}{2} = \frac{d(\sin\beta)}{2} \quad (4.1)$$

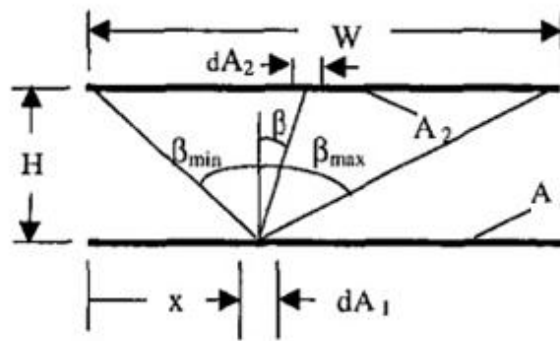
Řekněme, že chceme zjistit jaká část záření elementu dA_1 plochy A_1 dopadá na celou plochu A_2 . Pomocí klasického výpočtu tuto část dostaneme integrací přes plochu, na kterou záření dopadá. Dostaneme tento vztah

$$\begin{aligned} F_{d1-2} &= \int_{A_2} dF_{d1-d2} = \int_{\beta=\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \frac{d(\sin\beta)}{2} \\ &= \frac{1}{2} (\sin\beta_{\max} - \sin\beta_{\min}) \\ &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{W-x}{[(W-x^2)+H^2]^{1/2}} + \frac{x}{(x^2+H^2)^{1/2}} \right\}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

kde β_{\min} je v tomto případě záporné. Pro případ, kde $W=2$, $H=1$ a $x=0,5$, je výsledek rovnice (4.2) $F_{d1-2}=0,6396$.

Nyní pro nalezení hodnoty F_{d1-2} aplikujeme metodu Monte Carlo. Představme si velké množství paprsků, které opouští plochu A_1 a většina z nich dopadá na plochu A_2 . Vytvoříme model, ve kterém nahradíme velké množství těchto paprsků menším počtem přímeek, které odpovídají chování paprsků. Pohledový faktor je pak roven pravděpodobnosti, že energie opouštějící plochu A_1 dopadne na plochu A_2 . Podle této definice můžeme tedy tvrdit, že tato pravděpodobnost je rovna velikosti pohledového faktoru.

$$dP = dF_{d1-d2} = \frac{d(\sin\beta)}{2} \quad (4.3)$$



Obr. 4-1 Geometrie pro pohledový faktor mezi částí plochy a rovinou
(Zdroj: Monte Carlo Method in radiative Heat Transfer[22])

Při simulaci přenosu tepla zářením je možné uvažovat radiační energii jako oddělené pakety energie vyzařované plochou dA_1 . Určením frakce těchto paketů, které dopadnou na jinou plochu dA_2 , dostaneme pohledový faktor. Metodou Monte Carlo v tomto případě vygenerujeme veliké množství paketů energie směřujících od plochy dA_1 a následně určíme, jaká část těchto paketů dopadne na A_2 . Při generování paprsků směřujících z plochy dA_1 je potřeba uvažovat správný směr paprsků, odpovídající zákonům radiace. Výběr náhodných hodnot pro metodu Monte Carlo lze zapsat vztahem

$$R = \int_{\xi^*=-\infty}^{\xi} dP(\xi^*), \quad (4.4)$$

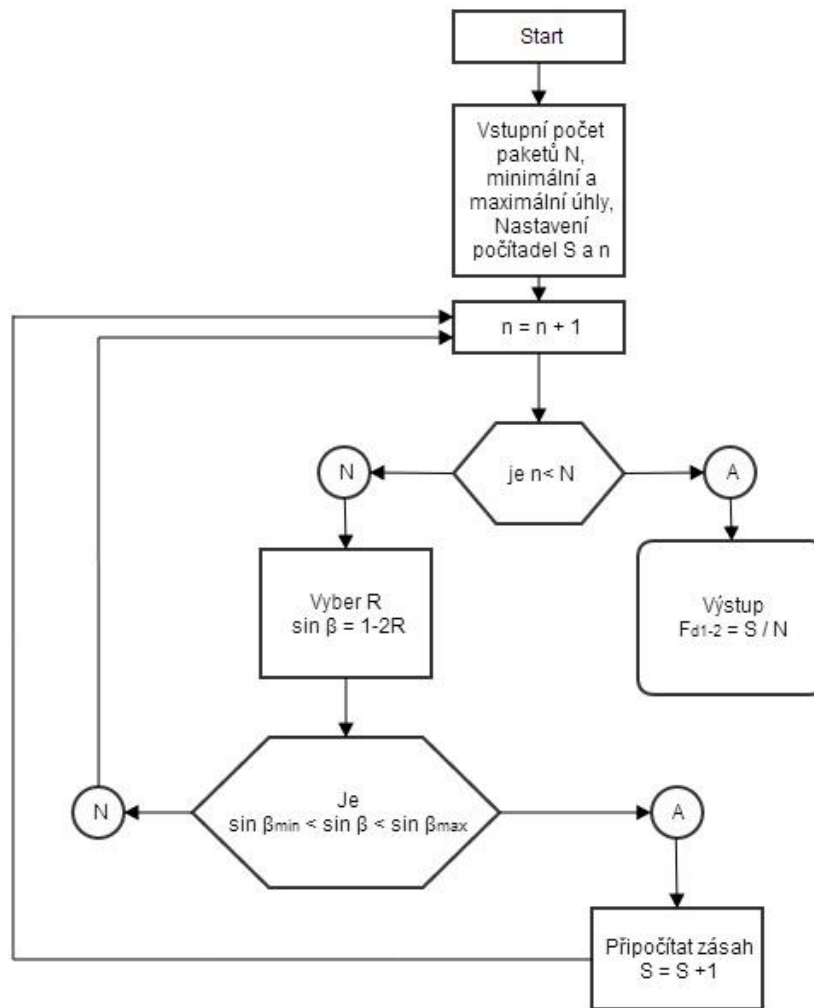
kde hodnota R odpovídá náhodně vybranému číslu z rozsahu $0 < R < 1$. Pokud je známa pravděpodobnost výskytu libovolného jevu, pak na základě tohoto rozložení mohou být vybrány náhodné vzorky proměnné ξ do rovnice (4.4). Pokud je vybrán dostatečný počet hodnot ξ , a hodnoty mají zaručenu pravděpodobnost rozložení $dP(\xi)$, pak pro uvedený příklad platí

$$R = \int_{\beta_{min}=-\pi/2}^{\beta} dP(\beta^*) = \int_{\sin \beta^*=-1}^{\sin \beta} \frac{d(\sin \beta^*)}{2} = \frac{1}{2}(\sin \beta + 1). \quad (4.5)$$

Tedy úhel β pro každý paket energie opouštějící plochu dA_1 může být vybrán náhodným číslem R po přeformulování vztahu (4.5) takto

$$\sin \beta = 2R - 1. \quad (4.6)$$

Pokud je směrem od plochy dA_1 odesláno dostatečné množství paketů, je možné určit pohledový faktor F_{d1-2} tak, že procházíme všechny pakety energie a určíme, zda dopadnou na plochu A_2 . Pro uvedený příklad pokud hodnota úhlu β určeného rovnicí (4.6) nabývá hodnot mezi β_{min} a β_{max} . Algoritmus metody Monte Carlo pro výpočet pohledového faktoru je zobrazen v diagramu na Obr. 4-2.



Obr. 4-2 Schematický diagram určení pohledového faktoru metodou Monte Carlo dle J. R. Howella
(Úprava dle zdroje: Monte Carlo Method in radiative Heat Transfer [22])

Přesnost algoritmu je závislá na počtu paketů (paprsků) N vybraných pro simulaci dané situace. V tabulce Tab. 3 jsou zobrazeny výsledky několika testů. Analytické řešení zvolené prostorové konfigurace je $F_{d1-2}=0,6396$.

Tab. 3 Výsledek simulací metody Monte Carlo pro výpočet Pohledového faktoru realizované J.R. Howellem
(Zdroj: Monte Carlo Method in radiative Heat Transfer[22])

Počet paketů energie, N	Průměrná hodnota pohledového faktoru F_{d1-2}
100	0,65
1 000	0,64
10 000	0,6302
100 000	0,6395

Výsledky těchto simulací zobrazují charakteristické chování metody Monte Carlo. Zvýšení přesnosti výsledku dosáhneme zvýšením počtu paketů energie, což vyplývá ze statistické povahy této metody. Nevýhodou je, že k dosažení uspokojivého výsledku je zapotřebí velký počet vzorků, pro které je potřeba určit polohu oproti uvažované ploše, což zabere mnoho výpočetního času. Výhodou je, že je možné určit nejistotu výsledku (směrodatnou odchylku) oproti jiným deterministickým metodám.

Čím bude hodnota poměru H/W větší, tím menší bude pohledový faktor F_{d1-2} , protože část paketů, které dopadnou na plochu A_2 bude menší, nejistota γ která je vyjádřena ze směrodatné odchylky se pro daný počet paketů zvětší. Tedy vhodnost použití metody Monte Carlo pro výpočet pohledového faktoru závisí na geometrické konfiguraci řešené úlohy.

Další vlastností metod Monte Carlo je, že se zvyšujícím se počtem pokusů roste přesnost a to s druhou mocninou (střední kvadratická odchylka); např. pokud je výpočet proveden čtyřnásobným počtem paketů, výsledek bude mít o polovinu nižší nepřesnost ve výsledku.

V uvedeném příkladu však ještě není zohledněna jedna velmi důležitá vlastnost metod Monte Carlo. Každá událost je nezávislá na předchozích paketech. Pokud například plocha A_2 nebude mít charakteristiku černého tělesa, je v některých případech žádoucí určit následující chování daného balíčku odraženého od plochy. Je možné určit úhel odrazu od plochy A_2 a nalézt tak cílové místo, kam balíček dopadne (zpět na plochu A_1 či do prostoru mezi plochami). Pokud plocha 2 má vlastnost rozptýleného odrazu tepelné energie, směr odrazu bude vybírán nezávisle na úhlu dopadu, protože odrazivost plochy s rozptýleným odrazem je nezávislá na směru dopadu. Můžeme tedy úhel odrazu vybrat pomocí vztahu (4.4) k určení úhlu odrazu jako náhodného čísla. Tato nezávislost daných událostí na předešlých událostech je charakteristická pro řešení s použitím metod Monte Carlo.

Poznamenejme, že posloupnost následujících událostí je závislá na použití náhodných čísel vybraných v rozsahu $0 < R < 1$. Při implementaci využíváme zpravidla generátory náhodných čísel, které jsou k dispozici v knihovnách použitých jazyků. Většina programovacích jazyků obsahuje vlastní aritmetický generátor náhodných čísel, který poskytuje sekvenci náhodných čísel. Tyto generátory jsou volány stejným způsobem jako jakákoliv jiná funkce jako je sinus či přirozený logaritmus. Generátory

bývají otestovány tak, aby výsledkem byla sekvence náhodných čísel, která splňuje požadavky pro náhodná čísla. Nejprve je potřeba otestovat, zda je výsledkem posloupnost čísel, která je rovnoměrně rozložena (libovolná část mezi nulou a jednou má přibližně stejný díl náhodně vygenerovaných čísel). Generátory náhodných čísel také musí splňovat další požadavky jako například shodné rozdělení lichých a sudých čísel, či rovnoměrné rozdělení sady generovaných čísel v každé vteřině. K výslednému tvrzení, že daný generátor generuje opravdu náhodná čísla, je zapotřebí, aby prošel značným počtem zkušebních testů.

Hayes [42] publikoval rešerši různých přístupů ke generování náhodných čísel na počítači. V práci uvedl různé vztahy mezi rozsáhlými výpočetními úlohami a jejich vlivem při použití konkrétních generátorů náhodných čísel. Howel [22] dále zmiňuje, že pro problémy s použitím standardních generátorů čísel pro řešení úloh přenosu tepla zářením nejsou doposud zmiňovány v literatuře. Z tohoto nám vyplývá, že je při použití statistických metod, kde generátory náhodných čísel mají významnou roli, je třeba vzít v úvahu také případné nerovnoměrné rozložení sady vygenerovaných hodnot. Zpravidla se při zvýšeném počtu vzorků také zvyšuje případná nepřesnost způsobená nedokonalým generátorem náhodných čísel.

Na obrázku Obr. 4-2 je znázorněna hlavní charakteristika přístupu metody Monte Carlo. Především je to nahrazení vysokého stupně matematické sofistikovanosti jednodušším vztahem, který je mnohokrát opakován. Toto nám umožňuje snadno naprogramovat i komplexnější fyzikální úkoly. Na úkor jednoduchosti zde však vystupuje časová náročnost vlastního výpočtu. Tato náročnost se však snižuje výkonností počítačů. Realizací výpočtu na paralelních výpočetních architekturách je možné snížit nevýhodu spojenou s délkou výpočtu, protože metody Monte Carlo jsou snadno paralelizovatelné.

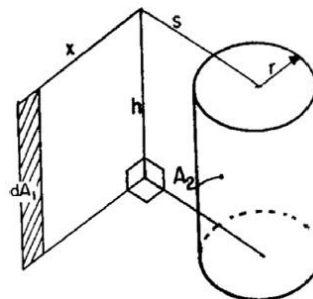
Matematické vztahy popisující přenos tepla zářením bývají komplexní a složité pro přesné řešení. Kromě toho má na přenos tepla zářením vliv také mnoho dalších fyzikálních jevů (např.: spektrální závislost plochy a vlastností přenosového média, anizotropní rozdělení rozptylu, směrové vlastnosti povrchu, změna vlastností s polohou a teplotou), které komplikují výpočty založené na deterministických matematických modelech.

Deterministické metody, které jsou používány pro řešení matematických modelů

přenosu tepla záření, jsou obvykle závislé na různých stupních aproximace. Hlavní výhodou metody Monte Carlo, oproti deterministickým metodám, je schopnost začlenit všechny důležité vlivy přenosu tepla záření bez aproximace.

Howell se ve svém příspěvku [22] dále věnuje rozsáhlé rešerši literatury, které se věnují obecně problematice metod Monte Carlo. Popisuje zde především různé publikace autorů, kteří se věnují problematice přenosu tepla záření. Rešerše je rozdělena na několik částí, v první jsou popsány různé publikace, které se věnují aplikaci a porovnání metod Monte Carlo při modelování přenosu tepla záření. Jsou zde zmíněny různé modifikace základní metody včetně vlivu změn na kvalitu výsledku.

Výpočtem pohledových faktorů metodou Monte Carlo se dále zabývali například M. Mirhosseini a A. Saboonchi v publikaci [18], ve které je popsána problematika přenosu tepla sáláním. Modelují zde systém, ve kterém je ohřívána válcová plocha pomocí rovinného objektu. Pro výpočet pohledového faktoru zde volí metodu Monte Carlo a zhodnocují zde vhodnost použití této metody pro výpočet pohledového faktoru vzhledem k náročnosti výpočtu a přesnosti výsledného pohledového faktoru.

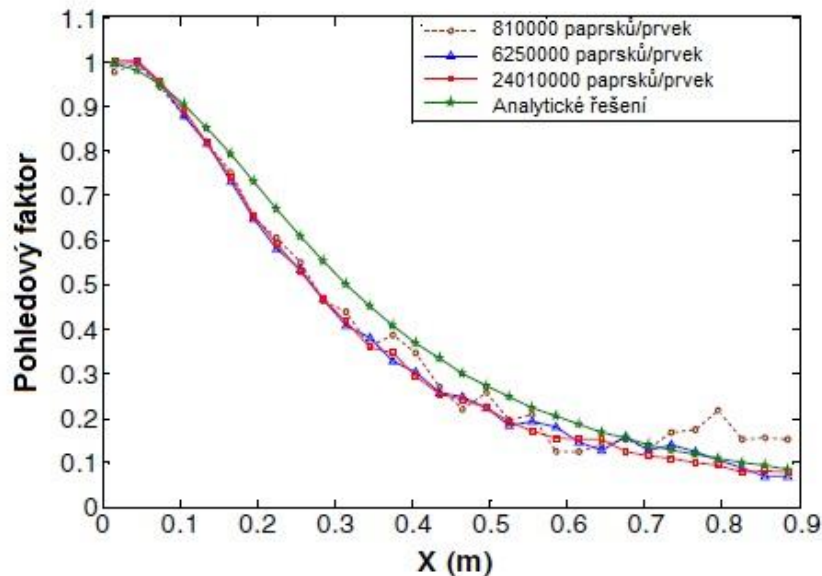


Obr. 4-3 Znáznornění modelové situace
(Zdroj: *International Communications in Heat and Mass Transfer* [18])

Autoři tohoto výzkumu se zabývali problematikou, jaký počet náhodně vyzářených paprsků zvolit tak, abychom dostali co nejpřesnější údaj o velikosti pohledového faktoru. Pohledový faktor při přenosu tepelné energie záření mezi dvěma plochami lze popsat jako frakci energie vyzářené jednou plochou a zachycené plochou druhou. Hlavní myšlenkou při použití metody Monte Carlo při určování pohledových faktorů je, že náhodně (pseudonáhodně) vedeme paprsky vyzářené energie z plochy, ze které určujeme pohledový faktor. Pohledový faktor pak určíme poměrem počtu vedených paprsků vzhledem k počtu paprsků, které jsou zachyceny druhým tělesem. Autoři zvolili jednoduché tvary, které je možné řešit analytickým způsobem.

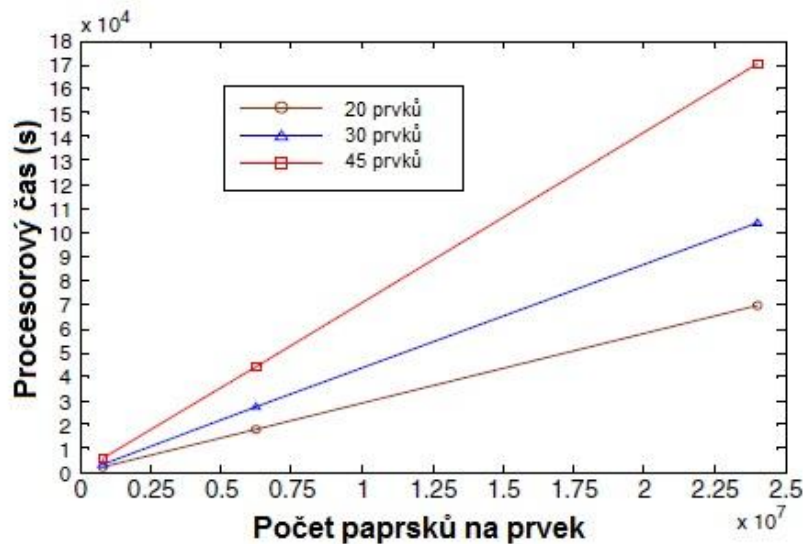
Výpočty jsou porovnány pro různé hodnoty vzdálenosti x (viz. Obr. 4-3) a různé

počty paprsků. Autoři [18] ve zveřejněné práci zkoušeli v modelu využívat různý počet ploch, na které je model rozdělen, a mezi těmito plochami pomocí metody Monte Carlo počítali pohledové faktory s různým počtem vyzářených paprsků. Na obrázku Obr. 4-4 je vidět porovnání výsledku tohoto testu, kde je vidět, že s nejmenším počtem vyzářených paprsků je dosaženo větší nepřesnosti u pohledových faktorů blízcích se k nulové hodnotě.



Obr. 4-4 Vypočítané pohledové faktory pro 45 ploch s různým počtem paprsků vyzářených z každé plochy v závislosti na koeficientu x dle Obr. 4-3
(Zdroj: International Communications in Heat and Mass Transfer [18])

V druhé části této studie [18] bylo provedeno měření časové náročnosti v závislosti na počtu prvků a počtu paprsků vyzářených z každého prvku. Z výsledného grafu je vidět, že náročnost metody Monte Carlo je značně vysoká, tedy není vhodné pro použití při optimalizaci, kdy se rozložení prvků modelu v čase mění. Graf na Obr. 4-5 zobrazuje lineární závislost časové náročnosti na počtu prvků dané úlohy.



Obr. 4-5 Doba výpočtu tří typů rozdělení počtu paprsků na prvek
(Zdroj: International Communications in Heat and Mass Transfer [18])

Výsledkem studie [18] je následující shrnutí vhodnosti použití metody Monte Carlo:

1. Můžeme řešit složité problémy v rámci přenosu tepla záření.
2. Problematiku lze řešit bez hlubších znalostí problematiky matematických postupů (plošná integrace pro složitější tvary). Metodu Monte Carlo lze použít pro mnoho praktických případů, také pokud potřebujeme znát rychlou odpověď bez potřeby matematické analýzy.
3. Metoda vrací velmi dobrý výsledek, pokud je použit dostatečný počet paketů energie.

V této studii bylo dokázáno, že:

1. Menší prvky (ozařované prvky o velikosti menší, než prvek vyzařující) vyžadují větší úsilí pro zajištění dobrého výsledku pohledových faktorů pro každý prvek. Neuvážené používání velkého počtu prvků (vysoká míra diskretizace) vede při výpočtu jednotlivých pohledových faktorů každého prvku k špatně předvídatelnému snižování přesnosti výpočtu.
2. Ve studii byly hodnoty analytického výpočtu vyšší než hodnoty získané pomocí metody Monte Carlo kromě jednoho pokusu, který obsahoval nejmenší počet ploch.

4.2 *Deterministické metody pro výpočet pohledového faktoru bez překážky*

Další prací, která se podrobně zabývá problematikou numerického řešení

pohledových faktorů, je práce George Waltona [23]. V této práci je popsáno použití adaptivní integrace pro výpočet pohledových faktorů mezi jednoduchými polygony se stíněním. Popisovaná metoda adaptivní integrace je zde porovnána s dalšími používanými metodami. Uvádí zde také porovnání náročnosti jednotlivých přístupů pro výpočet stíněných pohledových faktorů.

Úvodem zavádí problematiku tvorby modelu přenosu tepla zářením, kde je jako hlavní problém vyzdviženo právě řešení pohledových faktorů. Jako úvaha je zde zaveden obecný model, který čítá N ploch (obecně polygonů). Každá plocha potenciálně může ovlivňovat každou jinou plochu daného modelu, což je N^2 interakcí (pohledových faktorů), respektive $N(N-1)/2$, pokud uvažujeme vzájemný vztah mezi dvěma plochami a fakt, že pohledový faktor není třeba uvažovat pro stejný prvek. Pokud je známo, že mezi plochami je možný výskyt překážky (stínění či otvor), je potřeba ověřit pro všechny kombinace ještě $N-2$ ploch (potencionální překážky), které mohou ovlivňovat pohledový faktor mezi dvěma plochami. Z toho vyplývá, že při výpočtu je potřeba ověřit $N(N-1)(N-2)/2$ možných překážek při výpočtu pohledového faktoru, což vede na algoritmus s asymptotickou složitostí $O(N^3)$. Je tedy zřejmé, že výpočet pohledových faktorů s možností překážky je výrazně výpočetně složitější, než výpočet pohledového faktoru se zanedbáním překážek mezi dvěma plochami.

Na začátku práce [23] George Walton popisuje numerické metody pro výpočet pohledových faktorů bez překážek, což je první krok k výpočtu pohledových faktorů s překážkou. V této části je dále popsáno následujících pět přístupů k numerickému výpočtu pohledového faktoru:

1. Dvojnásobná plošná integrace
2. Dvojnásobná křivková integrace
3. Jednoduchá plošná integrace
4. Jednoduchá křivková integrace
5. Analytická křivková integrace

Dvojnásobná plošná integrace (2AI)

Tato metoda vychází ze základního vzorce (3.19). Na Obr. 4-6 a ve vztahu jsou použity parametry g_1 a g_2 pro úhly β_1 a β_2 pro úhly svírající normálu diferenciálních

prvků se spojnicí r těchto ploch. Autor zde zmiňuje možnost nahrazení výrazu pro případ plochých polygonů za vektorové operace následovně. Platí rovnost $\vec{r} \cdot \vec{n} = r \cdot \cos(g_1)$, proto lze vyjádřit $\cos(g_1) = \vec{r} \cdot \vec{n}_1 / r$ a obdobně $\cos(g_2) = -\vec{r} \cdot \vec{n}_2 / r$, kde je nezbytné přidat znaménko mínus, protože vektor $\mathbf{r} (\equiv \vec{r}_{1-2})$ směřuje v druhém případě k opačné ploše. V tomto vzorci je \mathbf{r} vektor propojující středy ploch dA_1, dA_2 a vektor \vec{n}_i je normálový vektor jednotlivých ploch (viz. Ob. 4-6). Podle těchto tvrzení je možné nahradit výraz $\frac{\cos(g_1)\cos(g_2)}{r^2}$ výrazem $\frac{-(\vec{r} \cdot \vec{n}_1)(\vec{r} \cdot \vec{n}_2)}{(\vec{r} \cdot \vec{r})}$, který nám výpočet zjednoduší na prosté aritmetické operace – hodnoty g_1, g_2 a r v tomto případě není potřeba počítat. Obecnou rovnici výpočtu pohledového faktoru (1.19) je možné numericky integrovat rozdělením ploch na malé konečné části plochy, jak je zobrazeno na Obr. 4-6.

$$F_{1-2} \approx \frac{-1}{\pi A_1} \sum_i \sum_j \frac{(\vec{r} \cdot \vec{n}_1)(\vec{r} \cdot \vec{n}_2)}{(\vec{r} \cdot \vec{r})^2} \Delta A_i \Delta A_j \quad (4.7)$$

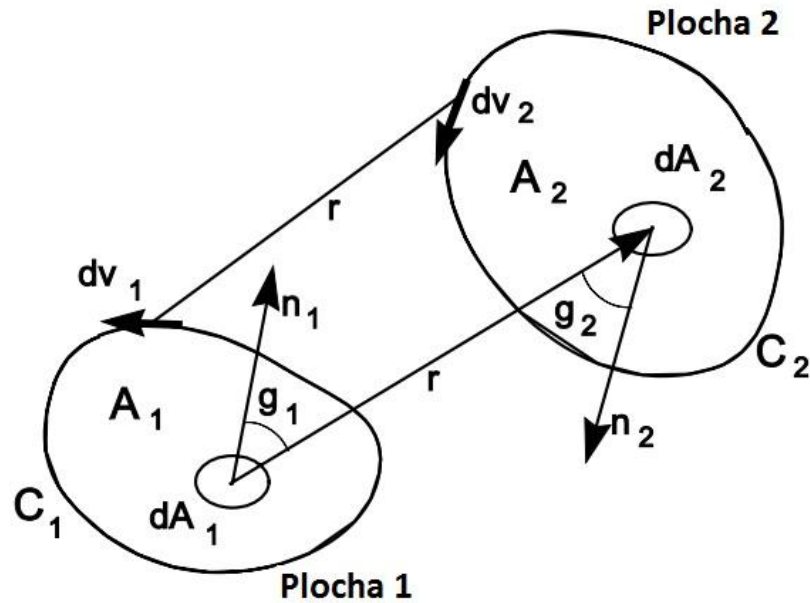
Uvažujme tento příklad jako řešení s jednoduchými obdélníkovými plochami (\vec{n}_1 a \vec{n}_2 jsou pak konstantní pro jednotlivé plochy) a každý obdélník rozdělený na N^2 částí (tzn. N částí pro každou hranu obdélníka). Pro tento výpočet je zapotřebí N^4 sumací vnitřního výrazu, tzn., že se jedná o algoritmus o asymptotické složitosti $O(N^4)$. Se zvyšujícím se N dosáhneme zvýšení náročnosti výpočtu, ale také přesnosti výsledku.

Dvojnásobná křivková integrace (2LI)

Podle Stokesova teorému je rovnice (3.19) převedena do podoby využívající křivkových integrálů

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi A_1} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \ln(r) d\vec{v}_1 \cdot d\vec{v}_2, \quad (4.8)$$

kde C_1 a C_2 jsou okrajové křivky ploch, r je vzdálenost mezi $d\vec{v}_1$ a $d\vec{v}_2$, což jsou vektorové diferenciální prvky v těchto křivkách. Tyto prvky jsou zobrazeny na Obr. 4-6.



Obr. 4-6 Geometrie a popis výpočtu 2AI a 2LI
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

V rovnici (4.8) lze zjednodušit $\ln(r)$ za shodný výraz $\ln(\vec{r} \cdot \vec{r})/2$. Skalární součin křivkových vektorů $d\vec{v}_1 \cdot d\vec{v}_2$ je roven výrazu $\Delta v_1 \Delta v_2 \cos(\Phi)$, kde Δv_i je délka $d\vec{v}_i$ a Φ je úhel mezi těmito dvěma elementy. Rovnice (3.8) pak může být aproximována numerickou integrací

$$F_{1-2} \approx \frac{1}{4\pi A_1} \sum_{p=1}^{E_1} \sum_{q=1}^{E_2} \cos(\phi_{pq}) \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \ln(\vec{r} \cdot \vec{r}) \Delta v_1 \Delta v_2, \quad (4.9)$$

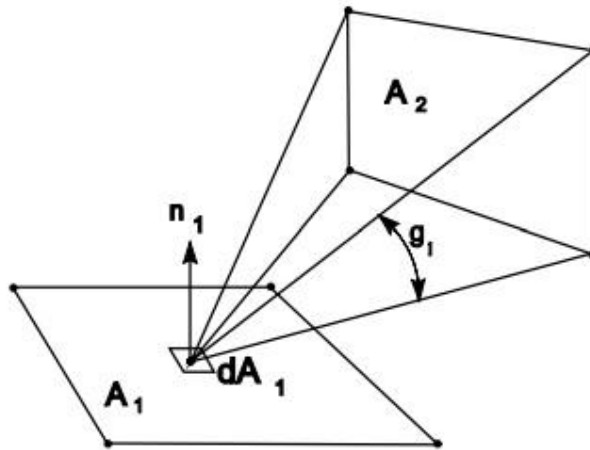
kde E_1 a E_2 jsou počty hran polygonů 1 a 2, které jsou rozděleny na N_1 a N_2 krátkých vektorů. V tomto příkladě budeme uvažovat opět obdélník $E_1 = E_2 = 4$ a mějme $N_1 = N_2 = N$. Za těchto podmínek 2LI algoritmus nabývá asymptotické složitosti $O(16N^2)$.

Jednoduchá plošná integrace (1AI)

Hottel a Sarofim [46] zveřejnili vzorec výpočtu pohledového faktoru mezi nekonečně malou plochou dA_1 a plochou A_2 následujícím vztahem

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi A_1} \int_{A_2} \sum_{i=1}^{E_2} \vec{g}_i \cdot \vec{n}_1, \quad (4.10)$$

kde \vec{n}_1 je jednotkový normálový vektor polygonu A_1 a \vec{g}_i je vektor, jehož velikost je rovna úhlu dané hrany na ploše A_2 . Geometrie tohoto řešení je znázorněna na Obr. 4-7.



Obr. 4-7 Jednoduchá plošná integrace
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

Rovnice (4.10) může být následně upravena do jednoduché vektorové podoby. Pokládejme a a b za dva po sobě jdoucí vrcholy plochy A_2 a p bod reprezentující plochu dA_1 . Mějme vektor \vec{b} z bodu p do bodu b , a vektor \vec{a} z bodu p do bodu a . Dále mějme $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$, $e = |\vec{c}|$ a $d = \vec{a} \cdot \vec{b}$. Potom směr g dostaneme pomocí \vec{c}/e a velikost je $\text{tg}(g) = e/d$. Substitucí do rovnice (4.10) dostaneme

$$F_{1-2} = \frac{1}{2\pi A_1} \int_{A_2} \sum_{i=1}^{E_2} \frac{\vec{c}_i \cdot \vec{n}_1}{e_i} \arctg\left(\frac{e_i}{d_i}\right) \Delta A_j \quad (4.11)$$

V případě, že d nebo e je rovno nule, není rovnice (4.11) definována. Hodnota e je rovna nule pokud $a=0$, $b=0$, $g=0$ nebo $g=\pi$. Žádná z těchto podmínek nemůže nastat, pokud je dA_1 nad A_2 . Hodnota d je rovna nule pokud $a=0$, $b=0$ nebo $g=\pi/2$. Je samozřejmě možné mít $g \approx \pi/2$, však v tomto případě je vhodnější nahradit $g = \arctg(e/d)$ za $g = \frac{\pi}{2} - \arctg(d/e)$, což je definováno pro všechny přijatelné geometrie. Je zde pro výpočet použita funkce \arctg , protože je pro některé úhly méně citlivá k zaokrouhlovacím chybám než jsou funkce \cos^{-1} či \sin^{-1} . Nahrazením integrace sumací přes konečné plochy pak dostaneme vztah

$$F_{1-2} \approx \frac{1}{2\pi A_1} \sum_{j=1}^{N^2} \sum_{i=1}^{E_2} \left(\frac{\vec{c}_i \cdot \vec{n}_1}{e_i} \left[\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{d_i}{e_i}\right) \right] \right) \Delta A_j. \quad (4.12)$$

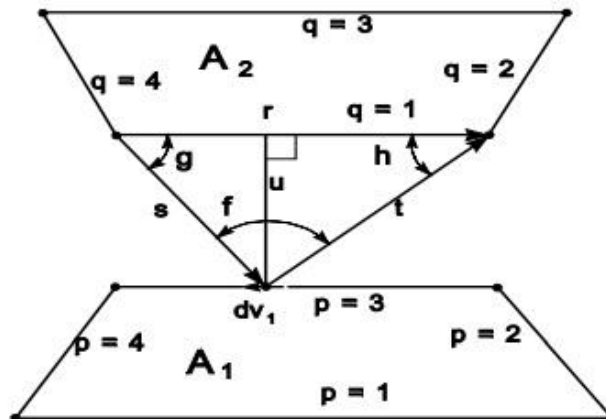
V uvedeném příkladě se jedná o algoritmus, jehož asymptotická složitost je $\mathbf{O}(4N^2)$.

Jednoduchá křivková integrace (1LI)

Mitalas a Stephenson [26] prezentovali metodu navazující na metodu dvojnásobné křivkové integrace tak, že jeden z křivkových integrálů v rovnici (4.8) je řešen analyticky:

$$F_{1-2} \approx \frac{1}{4\pi A_1} \sum_{p=1}^{E_1} \sum_{q=1}^{E_2} \cos(\phi_{pq}) \oint \left(s \cdot \cos(g) \ln(s) + u \cdot f - r \right) d\vec{v}_1, \quad (4.13)$$

kde vektory s, t a u a úhly f, g a h jsou funkce umístění $d\vec{v}_1$ na hranách plochy A_1 , jak je znázorněno na Obr. 4-8. Pro dva obdélníky se jedná o úlohu asymptotické složitosti $O(16N)$.



Obr. 4-8 Jednoduchá křivková integrace
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

Analytická křivková integrace (OLI)

Autoři Schröder a Hanrahan [40] vyvinuli analytické řešení dvojitých křivkových integrálů, pro libovolný pár hran polygonů. Toto řešení závisí na geometrii hran a je vcelku jednoduché pro paralelní hrany, ale velmi složité pro šikmo položené hrany. V tomto případě nedochází k žádné numerické integraci mezi jakýmkoliv dvěma hranami.

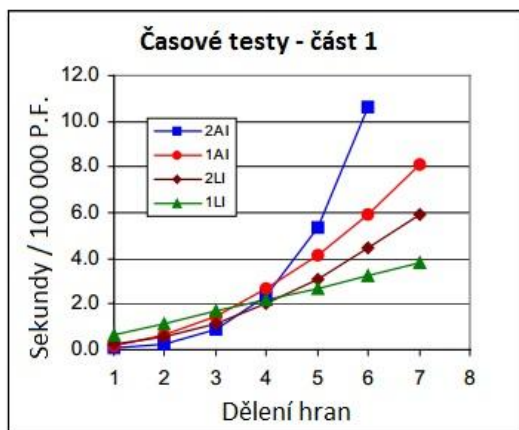
Použití numerických metod v dostupných aplikacích

Všechny metody zmíněné v kapitole 4.2 byly implementovány autory G. Walton a J. Pye do aplikace View3D [30]. Metoda **OLI** je zahrnuta pro následující porovnání výkonnosti, ale nebyla použita ve srovnávacích testech v aplikaci View3D. Výsledky jednotlivých testů jsou převzaty z publikace G. Waltona o výpočtu pohledového faktoru s překážkou [23].

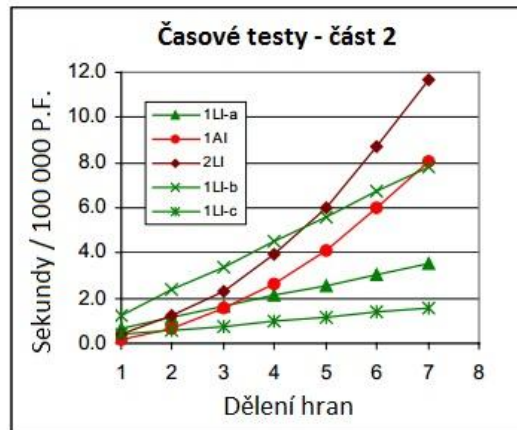
Časová náročnost výpočtu

Grafy na Obr. 4-9 a Obr. 4-10 zobrazují časy potřebné k výpočtu 100 000 pohledových faktorů (počítáno na počítači typu Pentium 866 MHz) s použitím různého počtu ploch, počtu dělení hran pro různé algoritmy a různé tvary povrchu. Na Obr. 4-9 jsou použity dvě čtvercové plochy na opačné straně krychle s osmi páry paralelních

hran pro metody využívající křivkové integrály. Uvedený graf zobrazuje výkonnostní křivky pro tyto algoritmy: 2AI - $O(N^4)$, 2LI - $O(8N^2)$, 1AI - $O(4N^2)$ a 1LI - $O(8N)$. Řešení 0LI v tomto případě potřebovalo k vyřešení 2,5s, což odpovídá časové náročnosti pro $N=4$ u všech čtyř metod.



Obr. 4-9 Časové testy - protilehlé strany krychle (Zdroj: [23])



Obr. 4-10 Časové testy - další konfigurace (Zdroj: [23])

Graf na Obr. 4-10 zobrazuje výsledky výpočtu pro jiné geometrické konfigurace. Tabulka Tab. 4 obsahuje popis jednotlivých konfigurací hodnocených v grafu na Obr. 4-9. Tabulka dále obsahuje v porovnání časové náročnosti algoritmu **0LI** pro jednotlivé geometrické konfigurace.

Tab. 4 Porovnání časové náročnosti jednotlivých algoritmů

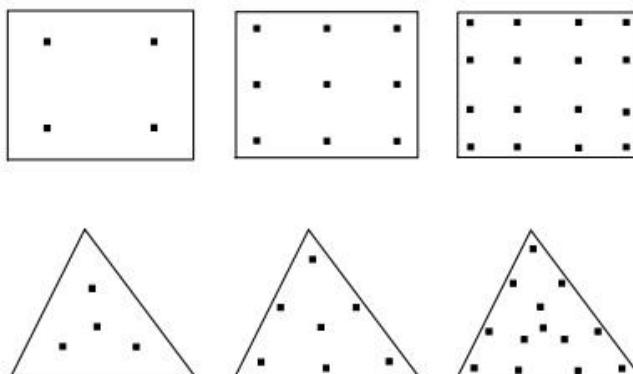
Křivka	Popis	Čas pro 0LI
1AI	dva čtverce bez paralelních hran	dtto 1LI-b
2LI	dva čtverce bez paralelních hran	dtto 1LI-b
1LI-a	dva čtverce sdílející hranu, které svírají určitý úhel	28s
1LI-b	dva čtverce bez paralelních hran	218s
1LI-c	dva kolmé čtverce, které sdílí hranu	1,5s

Časová náročnost metody 0LI vzroste dramaticky, pokud se nevyskytuje žádná paralelní hrana, protože pro tyto případy je potřeba použít speciální funkce pro toto numerické řešení.

Porovnání přesnosti jednotlivých algoritmů

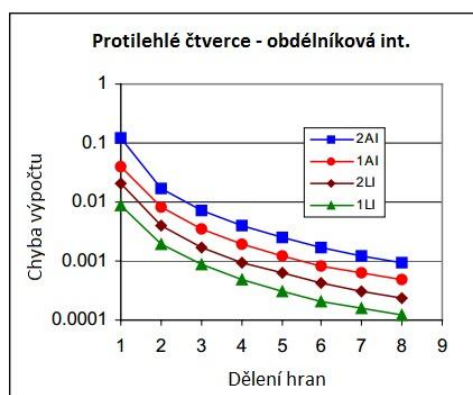
Předchozí práce Waltona [41] pojednává o vyšší přesnosti numerické integrace křivkových integrálů, pokud se použije Gaussovská integrace. Při Gaussovské integraci, neboli „kvadratuře“, je funkce řešena namísto rovnoměrně rozmístěných bodů v bodech, které jsou speciálně vybrány. Metoda výběru bodů je popsána v mnoha

textech, které se věnují úvodu do numerické analýzy. Nerovnoměrné rozdělení bodů může být použito také pro plošnou integraci. Na Obr. 4-11 je znázorněna ukázka takového rozložení pro obdélníky a trojúhelníky.

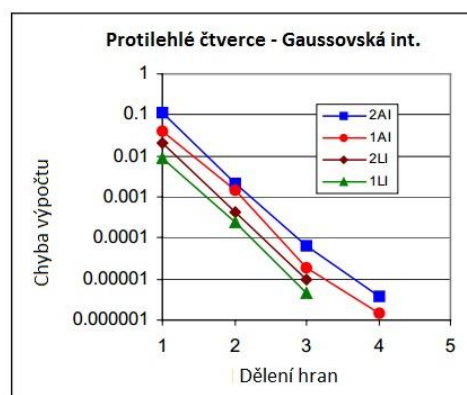


Obr. 4-11 Body pro Gaussovskou plošnou integraci
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

Body a váhy pro Gaussovskou integraci obdélníků a rovnoběžníků jsou získány použitím dvou, tří, a čtyř bodových rozdělení jednotlivých paralelních hran. Koeficienty pro Gaussovskou integraci trojúhelníků jsou komplikovanější. Více se tomu věnuje např. Moan[24].



Obr. 4-12 Chyba pro výpočet obdélníkovou metodou
(Zdroj: [23])



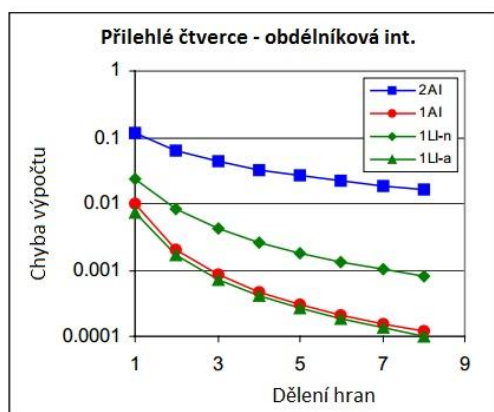
Obr. 4-13 Chyba pro výpočet Gaussovskou metodou
(Zdroj: [23])

Graf na Obr. 4-12 jsou zobrazeny hodnoty chyb při použití rovnoměrně rozmístěných bodů (Obdélníková integrace). Graf na Obr. 4-13 zobrazuje porovnání stejného výpočtu, ve kterém byly místo rovnoměrně rozmístěných bodů vybrány body pro Gaussovskou integraci. Oba tyto grafy zobrazují výpočet pohledových faktorů mezi dvěma čtverci na protilehlých stranách krychle.

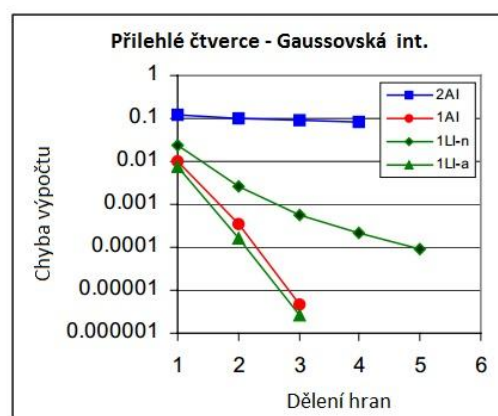
Výhody plynoucí z použití Gaussovské integrace jsou v tomto případě velmi

podstatné. Rozdíl mezi analytickou hodnotou pohledového faktoru (0,199825) a hodnotou vypočítanou je menší než 10^{-6} při $N=4$ pro metody 1LI, 2LI, 1AI a $N=5$ pro metodu 2AI, kde N představuje počet bodů plochy vystupující ve výpočtu. Takové přesnosti není dosaženo u obdélníkové integrace ani s hodnotou $N=10$.

Na Obr. 4-14 a Obr. 4-15 jsou vidět hodnoty odchylek pro pohledový faktor mezi dvěma přilehlými stěnami krychle.



Obr. 4-14 Chyba pro výpočet obdélníkovou metodou – přilehlé čtverce (Zdroj: [23])



Obr. 4-15 Chyba pro výpočet Gaussovskou metodou – přilehlé čtverce (Zdroj: [23])

Pro porovnání výpočtů na dvou přilehlých hranách krychle nebyla použita metoda 2LI, protože hodnota r pro některé integrační body nabývá nulové hodnoty. Metoda 1LI-n používá pro společnou hranu numerickou integraci, oproti tomu 1LI-a využívá analytické řešení a je proto přesnější. V tomto případě Gaussovská integrace funguje velmi dobře pro metody 1LI-a a 1AI, které obsahují chybu menší než 10^{-6} pro $N=4$. Metoda 2AI je pro tento případ nejméně přesná a pro některé hodnoty dokonce horší než obdélníková integrace.

Při výpočtu je důležité použít vhodnou míru diskretizace určené k numerické integraci. Malý počet dílů vede ke snížení přesnosti výpočtu pohledového faktoru, velký počet naopak bude mít za důsledek vysokou časovou náročnost. Tento rozpor může být nahrazen adaptivní integrací, při které je výpočet zahájen s jedním rozdělením plochy [$k=1$] a postupným počítáním pohledových faktorů za zvyšování počtu dělení plochy dokud rozdíl mezi dvěma výpočty nebude menší než požadovaná tolerance ε .

$$|AF^{[k+1]} - AF^{[k]}| < \varepsilon A_{min} \quad (4.14)$$

V uvedeném vzorci (4.14) vyjadřuje hodnota k počet iterací adaptivní integrace.

Tímto způsobem lze volit menší hodnotu k pro situace, kde je malé k očekáváno (např. pokud jsou plochy od sebe relativně daleko). Náročnost tohoto postupu by měla být za běhu komplexnějších úloh navrácena lepším poměrem času a přesnosti.

4.3 Algoritmy pro výpočet pohledového faktoru s překážkou

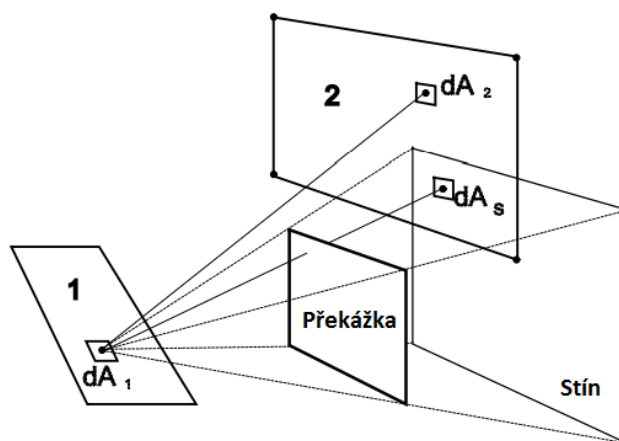
Problematika numerického výpočtu pohledových faktorů s překážkou se zabývá situacemi, které nastanou vložím další plochy mezi dvě plochy, pro které je určován pohledový faktor tak, že částečně či zcela omezí pohledový faktor mezi dvěma plochami. Výpočet částečně stíněného pohledového faktoru mezi dvěma plochami lze dosáhnout modifikací metody pro plošnou integraci.

Dvojnásobná plošná integrace s překážkou

Rovnici (4.7) můžeme upravit tak, že jí rozšíříme o jednoduchý výraz b_{ij}

$$F_{1-2} \approx \frac{-1}{\pi A_1} \sum_i \sum_j \frac{(\vec{r}_i \cdot \vec{n}_1)(\vec{r}_j \cdot \vec{n}_2)}{(\vec{r}_i \cdot \vec{r}_j)^2} b_{ij} \Delta A_i \Delta A_j, \quad (4.15)$$

kde b_{ij} je faktor stínění, který nabývá hodnot 0 a 1 , kdy nulová hodnota nastane v případě, že viditelnost mezi prvky ΔA_i a ΔA_j je narušena třetí plochou a v opačném případě je pak rovna jedné, v případě plné viditelnosti. Tyto podmínky jsou znázorněny v obrázku Obr. 4-16, kde paprsky mezi plochami dA_1 a dA_2 nejsou blokovány, zatímco mezi plochami dA_1 a dA_s jsou. Vícenásobné stínění je určeno tak, že je každý paprsek testován oproti každé možné překážce.



Obr. 4-16 Částečně blokový pohled
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

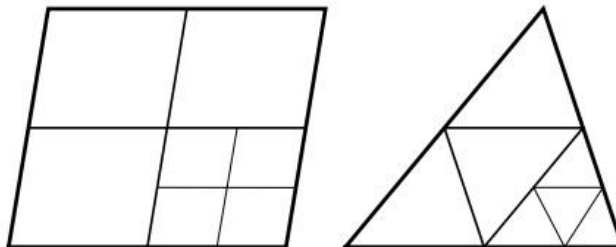
Jednoduchá plošná integrace s překážkou

Další variantou řešení výpočtu pohledového faktoru s překážkami je projekce „stínu“ překážky na povrch druhé plochy. Obrázek Obr. 4-16 pro tuto metodu zobrazuje

stín překážky, který zde zasahuje pravou dolní část plochy 2. Pohledový faktor F_{1-2} lze pak vyjádřit rovnicí (4.12), ve které je vnitřní sumace aplikována přes hrany nezastíněné části plochy 2. Tato metoda dosahuje lepších výsledků než předchozí metoda, protože z daného pohledu eliminuje zastíněnou část. Tato metoda je použita v aplikaci View3D [30] pro výpočet pohledových faktorů s překážkou.

Adaptivní integrace pro pohledové faktory s překážkou

Adaptivní integrace je používána k obsluze bodů používaných v metodě 1AI. Jsou vypočítány dva pohledové faktory s devítibodovým a šestnáctibodovým rozložením pro rovnoběžníky (resp. se sedmi a třináctibodovým rozložením pro trojúhelníky) jak je znázorněno na Obr. 4-17. Pokud tyto výsledky vyhovují rovnici (4.14), je použit výsledek z integrace ve vyšším řádu. V opačném případě je plocha rozdělena do čtyř kongruentních ploch, jak je zobrazeno na Obr. 4-11 a pohledový faktor je následně vypočten pro každý díl tohoto rozdělení. Tato procedura je rekurzivně opakována (jak je naznačeno na Obr. 4-17) dokud není vyhověno podmínce (4.14) nebo nedojde-li k dosažení maximální hloubky rekurze. Pohledové faktory částí plochy jsou následně pro získání celkového pohledového faktoru F_{1-2} sečteny.



Obr. 4-17 Adaptivní dělení polygonů
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

Tato metoda dělení plochy poskytuje automaticky větší jemnost pro plochy, které ji vyžadují.

Vyloučení možné překážky

Při řešení problému s N plochami, může nastat stínění až $N-2$ plochami pro každou dvojici ploch. Je velmi podstatné, aby byl před výpočtem snížen počet potenciálních překážek na minimum. Například v aplikaci View3D [30] je to řešeno vytvořením seznamu ploch podezřelých ze stínění tak, že jsou vyjmuty plochy, které nikdy nemohou blokovat pohled, jako jsou plochy tvořící obálku krychle. Plocha nemůže stínit jinou plochu, pokud jsou všechny ostatní plochy před ní. Tento test a ještě

několik dalších musí určit vztah mezi vrcholy popisující jednu plochu a rovinou obsahující jinou plochu. Vzdálenost vrcholů před (+) či za (-) plochou dostaneme pomocí

$$d = v_x s_x + v_y s_y + v_z s_z - s_w, \quad (4.16)$$

kde $(v_x, v_y$ a $v_z)$ jsou souřadnice bodu a $(s_x, s_y, s_z$ a $s_w)$ jsou vlastnosti roviny: s_x, s_y a s_z jsou směrové kosiny vektorové normály roviny a $s_w = s_x p_x + s_y p_y + s_z p_z$, kde $\vec{p}(\vec{0p})$ je libovolný bod roviny.

Prvky ze spodní části matice pohledových faktorů F_{ij} jsou počítány po řádcích pro $i=1$ až $i=N$ a s každým řádkem pro $j=1$ až $j=i-1$ (pozn. $F_{ii}=0$ pro rovinnou plochu). Ze seznamu ploch, které mohou být potencionální překážkou, jsou vždy odebrány plochy, které se nachází zcela za plochou i .

Pohled mezi dvěma plochami i a j může být blokován vlastní pozicí či orientací. To může nastat, pokud je například plocha i zcela za plochou j nebo opačně, z čehož dostaneme pohledový faktor $F_{ij}=0$. Je také možné, že nastane situace, kdy plocha je jen částečně za rovinou jiné plochy. V takovém případě je nutné odstranit, či zmenšit danou část plochy, která zasahuje za rovinu druhé plochy. Zmenšení plochy musí být provedeno před vlastním výpočtem pohledového faktoru. Toto zmenšení plochy může plochu rozšířit o jednu hranu.

Sérií dalších testů je postupně zredukována sada ploch, které mohou v modelu tvořit překážku. Nejprve jsou odstraněny všechny plochy, které nejsou uvnitř koule obklopující plochy i a j . Tento test využívá vektorového součinu. Pokud mají plochy i a j výrazně rozdílné velikosti, je pro tento test vhodnější použít kužel, namísto koule. V dalším kroku je stanovena minimální obálka obsahující obě plochy i a j . Pokud je některá plocha zcela mimo tuto obálku, nemůže se jednat o plochu, která tvoří překážku. Tato metoda dosahuje nejlepších výsledků pro plochy, které jsou zarovnané vzhledem ke kartézskému souřadnému systému [41]. Při hledání překážek mezi dvěma plochami může dojít ke třem situacím, které popisují vztah mezi těmito plochami:

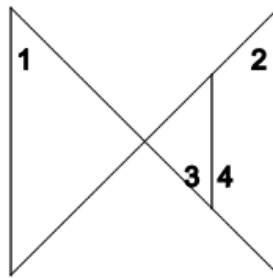
- Plocha k je zcela za plochou j (j nevidí na k)
- Plochy i a j jsou zcela před plochou k
- Plochy i a j jsou zcela za plochou k

Zmíněné situace významně eliminují seznam potencionálních ploch, které mohou

stínit. Pokud odstraní všechny plochy, může být pohledový faktor F_{ij} vypočítán pomocí některé z metod pro výpočet pohledového faktoru bez překážky. V opačném případě musí být vytvořena projekce stínění (jednou či více plochami) z plochy i na plochu j . Tento test je založen na pozorování (viz dále), kdy jsou pohledové faktory obvykle počítány projekcí překážky na nejbližší plochu. Následně jsou ve směru projekce odstraněny plochy, které vidí pouze na blokující plochu a jsou odstraněny ze seznamu. Na závěr je vypočítána hodnota pohledového faktoru F_{1-2} metodou jednoduché adaptivní integrace s projekcí překážky.

Analytický řešení pro stínění pohledového faktoru

Sharpio [31] představil ve své práci analytické řešení pohledového faktoru se stíněním. Tento řešení obsahující dva jednotkové čtverce je znázorněn na Obr. 4-18. Čtverce jsou umístěny proti sobě (plocha 1 a 2) a jsou umístěné v jednotkové vzdálenosti. Mezi těmito plochami je dvojice ploch (plocha 3 a 4), které jsou umístěny zády k sobě, o rozměru 0,5 x 0,5. Plochy 3 a 4 jsou umístěny paralelně k plochám 1 a 2 ve $\frac{3}{4}$ vzdálenosti směrem od plochy 1 k ploše 2. Z plochy 4 není viditelnost na plochu 1 a z plochy 3 není viditelnost na plochu 2 (odvrácené plochy), tedy pohledový faktor je pro tento případ nulový. Na Obr. 4-18 je tato modelová situace zobrazena z bočního pohledu.



Obr. 4-18: Příklad analytického řešení

Analytické řešení pro pohledové faktory bez překážky:

$$F_{3-1} = 0,33681717; F_{1-3} = 0,084204294; F_{4-2} = 0,79445272; F_{2-4} = 0,19861318$$

$$F^*_{1-2} = F^*_{2-1} = 0,19982490 \text{ (pro situaci bez stínění - plochy 3 a 4 nejsou uvažovány)}$$

Analytické řešení pohledových faktorů s uvažovanou překážkou je tedy:

$$F_{1-2} = F^*_{1-2} - F_{1-3} = 0,11562061$$

Walton pro toto prezentované analytické řešení porovnal s výsledky výpočtu

aplikace View3D. V tabulce 4 je zanesena zadaná tolerance adaptivní integrace ε (vzorec 4.14), hodnota vypočítaného pohledového faktoru F_{1-2} , chyba v porovnání k analytickému řešení a počet projekčních bodů, které byly při výpočtu použity.

**Tab. 5 Porovnání analytického řešení s výsledky výpočtu pomocí aplikace View3D
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])**

ε	F_{1-2}	chyba	Použité body
10^{-3}	0,11563653	0,00015924	25
10^{-4}	0,11562055	-0,00000006	125
10^{-3}	0,11473675	-0,0008838	525
10^{-4}	0,11526465	0,00035596	925
10^{-5}	0,11553235	-0,00008826	2925
10^{-6}	0,11560305	-0,00001756	8125
10^{-7}	0,11561626	-0,00000435	18525

První dva řádky tabulky Tab. 5 zobrazují hodnoty, kterých bylo dosaženo výpočtem projekce směrem od plochy 1. Pro první výpočet bylo potřeba celkem 25 bodů projekce k dosažení přijatelného výsledku, tedy pro řešení byla použita jedna devítibodová a jedna šestnáctibodová numerická integrace. Posledních pět řádků tabulky Tab. 5 zobrazuje výpočet pohledového faktoru projekcí směrem od plochy 2, a následně bylo použito pravidlo reciprocit k určení pohledového faktoru F_{1-2} . Jak je možné z tabulky 5 vyčíst, pro výpočet pohledového faktoru se stíněním, kde plocha tvořící stínění je umístěna blíže, je pro výpočet potřeba vyšší citlivosti adaptivního algoritmu. Dále je možné vidět předpokládaný vývoj hodnot chyb, který se snižuje s hodnotou ε .

Stejná modelová situace byla dále testována algoritmem využívajícím dvojitou plošnou integraci se stíněním (vzorec 4.15). Výsledky (Tab. 6) byly získány s využitím aplikace Chaparral [23]. Vzorkovací místa pro výpočet byly vybírány jak rovnoměrně, tak náhodně (s použitím Monte Carlo) s počtem bodů definovaným na začátku každého výpočtu. Tento výsledek demonstruje slabou konvergenci tohoto algoritmu při zvýšení diskretizace pro numerickou integraci.

Tab. 6 Porovnání analytického řešení s metodou 2AI
(Zdroj: Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [23])

Počet vzorků	Chyba - rovnoměrné	Chyba – náhodné
25	0,001691	-0,003032
100	0,011172	0,017821
400	0,003847	0,001563
2 500	0,003289	-0,007019
10 000	0,000414	-0,000892
40 000	0,000111	-0,000775
250 000	0,000315	-0,000253
1 000 000	0,000154	-0,000271

Další numerickými postupy při výpočtu použili Lillian Dobrowolski de Carvalho Augusto, Bruno Giacomet a Nathan Mendes ve studii [2], která se zabývá numerickými metodami výpočtu pohledových faktorů mezi dvěma plochami. Popisují zde aproximaci vzorce (3.19) z kapitoly 3.1.3 pomocí dvojitého Riemannova integrálu, kterou lze zapsat takto:

$$F_{i-j} = \frac{1}{A_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (4.17)$$

V tomto případě jsou plochy, pro které je počítán pohledový faktor rozděleny na trojúhelníkovou síť. Vzdálenost r pak určíme jako vzdálenost r mezi středy trojúhelníků s indexy i a j . Hodnoty $\cos(\theta_i)$ a $\cos(\theta_j)$ jsou pak dány vzorcí (4.18), kde x_i, y_i a z_i jsou souřadnice středů trojúhelníků, k_i, l_i a m_i jsou pak souřadnice jednotkových normálových vektorů jednotlivých trojúhelníků. Celkovou velikost plochy A_i a A_j získáme součtem všech částí trojúhelníkové sítě.

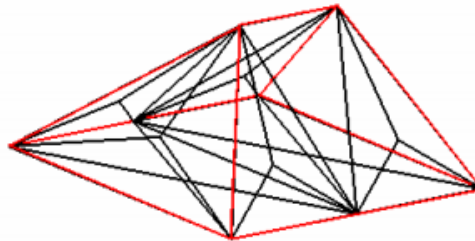
$$\cos \theta_i = \frac{l_i(x_j - x_i) - m_i(y_j - y_i) - n_i(z_j - z_i)}{r} \quad (4.18)$$

$$\cos \theta_j = \frac{l_j(x_i - x_j) - m_j(y_i - y_j) - n_j(z_i - z_j)}{r}$$

Dále v této práci [2] seznamují s problematikou výpočtu pohledového faktoru s překážkou mezi plochami. Nejprve jsou uvažované plochy převedeny na jejich plošné rovnice (normálový vektor a vektory procházejícími vrcholy trojúhelníku). Pro řešení problematiky hledání potenciálních překážek využívají barycentrický souřadný systém.

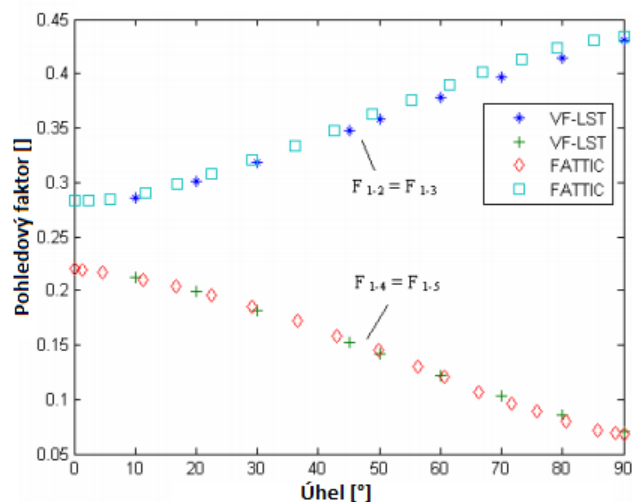
Popsaný přístup k řešení pohledových faktorů s překážkou je použit v aplikaci ViewFactor-LST a byl otestován na několika modelových příkladech. První představený

příklad je výpočet dvou pohledových pohledů z modelu představujícího střechnu složenou z trojúhelníků Obr. 4-19. Byly měněny hodnoty úhlů v rozmezí $0^\circ - 90^\circ$. Výsledky byly porovnány s řešením, které představil Hoyas [27], jenž se ve své práci zabývá řešením pohledových faktorů pro objekty tvaru střechny.



Obr. 4-19 Stříška složená z trojúhelníkových ploch
(Zdroj: Numerical method for calculating view factor between two surfaces [2])

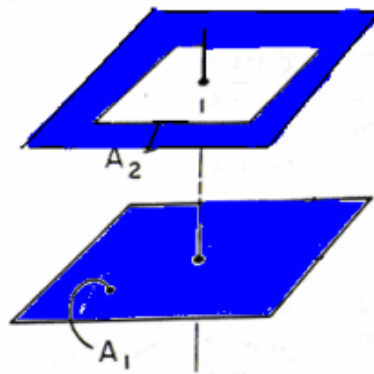
Na grafu Obr. 4-20 jsou pak vidět hodnoty porovnávající představované řešení s výsledky, které uvádí Hoyas [27]. Obě metody mají shodné hodnoty, pouze s drobnými rozdíly jsou způsobenými zaokrouhlovací chybou numerických metod.



Obr. 4-20 Porovnání metody ViewFactor-LST [2] a FATTIC [27] pro výpočet pohledových faktorů trojúhelníků stříšky s měněným úhlem ploch
(Zdroj: Numerical method for calculating view factor between two surfaces [2])

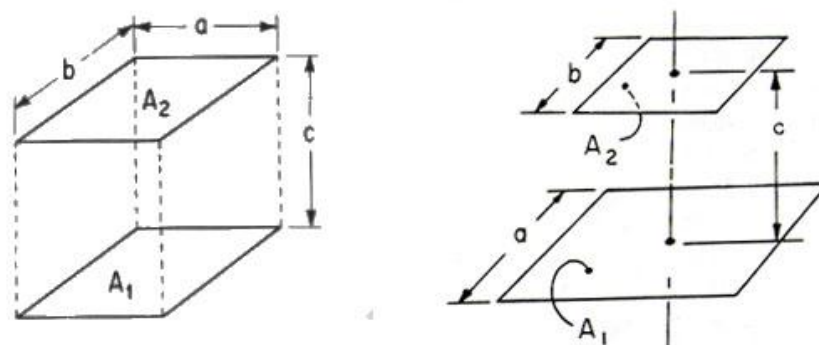
Dále autoři v [2] uvádějí příklad hodnotící výsledek určování pohledových faktorů mezi dvěma plochami, kde jedna plocha obsahuje otvor. Toto uspořádání je vidět na Obr. 4-21. Výpočet probíhal v několika variantách, kdy proti sobě byly umístěny dva téměř identické čtverce o rozměru 2000×2000 a vzdálenosti těchto ploch 2000. Velikost otvoru byla měněna (malá, střední, velká a v jednom případě byly vytvořeny dva

otvory). Toto uspořádání je zobrazeno na Obr. 4-21.



Obr. 4-21 Konfigurace pro výpočet pohledového faktoru s plochou obsahující otvor
(Zdroj: Numerical method for calculating view factor between two surfaces [2])

Výsledek byl následně ověřen analyticky tak, že byla vypočtena hodnota pohledového faktoru plochy A_2 bez uvažovaného otvoru, následně byla určena hodnota pohledového faktoru mezi plochou A_1 a otvorem v ploše A_2 . Výslednou hodnotu pohledového faktoru pak je možné získat odečtením pohledového faktoru otvoru od pohledového faktoru bez uvažovaného otvoru (viz. Obr. 4-22).



Obr. 4-22 paralelní identické plochy a soustředné neidentické plochy
(Zdroj: Thermal Radiation Heat Transfer [28])

V tabulce Tab. 7 jsou zobrazeny výsledky numerického řešení představeného v [2] a analytického řešení. Pro určení analytického řešení byly použity odvozené vztahy pro předem definované konfigurace ploch. Tyto odvozené vztahy lze nalézt například v publikace J. R. Howella [28]. Konfigurace z Obr. 4-22 vlevo má analytické řešení vyjádřené rovnicí (4.19) a konfigurace zobrazená v pravé části rovnice pak pomocí rovnice (4.20). Výsledky této techniky byly ověřeny s velmi dobrým výsledkem, kde relativní chyba byla do 0,06% od hodnoty analytického řešení.

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \begin{aligned} & \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{\frac{1}{2}} + X\sqrt{1+Y^2} \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \\ & + Y\sqrt{1+X^2} \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) - X \operatorname{arctg}(X) - Y \operatorname{arctg}(Y) \end{aligned} \right\}, \quad (4.19)$$

kde $X=a/c$; $Y=b/c$ (viz Obr. 4-22 vlevo).

$$F_{1-2} = \frac{1}{\pi A^2} \left\{ \begin{aligned} & \ln \left[\frac{A^2(1+B^2)+2}{(X^2+2)(Y^2+2)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ & + (Y^2 + 4)^{\frac{1}{2}} \left[Y \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{(Y^2+4)^{\frac{1}{2}}} \right) - X \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{(Y^2+4)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \\ & + (X^2 + 4)^{\frac{1}{2}} \left[X \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{(X^2+4)^{\frac{1}{2}}} \right) - Y \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{(X^2+4)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

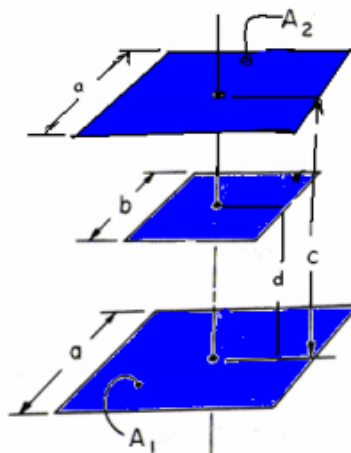
$$\text{pro } A < 0,2 \quad F_{1-2} = \frac{(AB)^2}{\pi},$$

kde $A = a/c$; $B = b/a$; $X = A(1 + B)$; $Y = A(1-B)$ (viz Obr. 4-22 vpravo).

Tab. 7 Porovnání výpočtu hodnot numerickou a analytickou metodou
(Zdroj: Numerical method for calculating view factor between two surfaces [2])

	Malý	Střední	velký	Dvojitý
Plocha otvoru	4	10 ⁶	3,99x10 ⁶	250 000
F ₁₋₂ Numerický výpočet	0,199829	0,142796	0,000331	0,15436
F ₁₋₂ Analytický výpočet	0,199824	0,142709	0,000331	-

Autoři [2] dále v publikaci prezentují výsledek algoritmu ViewFactor-LST aplikovaný na problém stínění, kdy je mezi dvě plochy, pro které je určována hodnota pohledového faktoru vložena plocha třetí (viz. Obr. 4-23). Výsledek této modelové situace je v tabulce Tab. 8. Analytické řešení bylo získáno stejným způsobem jako v předchozím případě. Výsledky oproti předchozí variantě byly mírně horší a to do absolutní odchylky 0,006194 oproti analytickému řešení. Autoři dále uvádějí, že bylo dosaženo oproti předchozí variantě lepších časových výsledků, z důvodu menšího počtu použitých trojúhelníků. Na základě pozorování dospěli k závěru, že vyšší počet trojúhelníků je v tomto případě potřebný se zvyšující se plochou stínícího elementu.



Obr. 4-23 Konfigurace pohledového faktoru se stíněním
(Zdroj: Numerical method for calculating view factor between two surfaces [2])

Tab. 8 Porovnání hodnot pohledového faktoru pro stíněné plochy (numerické a analytické řešení)
(Zdroj: Numerical method for calculating view factor between two surfaces [2])

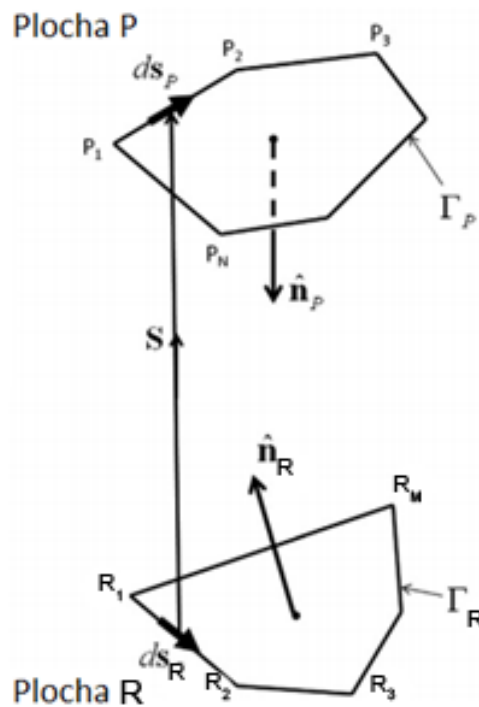
Počet trojúhelníků	Vzdálenost c	Vzdálenost d	Plocha překážky	F_{1-2} VF-LST	F_{1-2} Analytický
3000	4	2	160 000	0,060469	0,059083
6200	2	1	4	0,199837	0,199824
12400	2	1	3 992 004	0	0,000331
3100	4	2	10^6	0,009043	0,011747
3500	6	3	10^6	0,048731	0,042537

4.4 Výpočet pohledového faktoru pro dva libovolné mnohoúhelníky

Autoři Mazumder a Ravishankar [33] v publikaci zmiňují numerické řešení výpočtu pohledových faktorů se zaměřením na typické konfigurace. Dále uvádí stručnou rešerši aplikací, které mají tyto algoritmy implementovány. Autoři ve své práci navazují na předchozí výsledky Hollandse [45], který v několika publikacích prezentoval nevýhody použití křivkového integrálu pro plochy při definované hranici s libovolným tvarem. Hollands [45] navrhl ke zmírnění tohoto problému použití parametrické reprezentace ploch, což se prokázalo účinné pouze u ploch, které byly pravidelné. V další práci se Hollands [48] zmiňuje o použití nerovnoměrné racionální B-Spline na reprezentaci plochy při řešení pohledových faktorů. Tato řešení však vyžadují částečné analytické řešení daného problému, pro které je možné využít řešení autorů Schrodera a Hanrahana [25], kteří ve své práci popisují matematicky parametrické vyjádření libovolných tvarů pomocí semi-analytického řešení. Autoři Mazumder a Ravishankar [33] prezentují na základě těchto poznatků vlastní metodu,

kteřou následně porovnali oproti analytickému řešení (pokud bylo k dispozici) a statistické metodě Monte Carlo.

Autoři [33] publikovali matematickou formulaci (4.21) výpočtu pohledového faktoru mezi dvěma rovinnými libovolně orientovanými (vzájemně se ovlivňujícími) plochami. Tato konfigurace je zobrazena na Obr. 4-24. Každá plocha může obsahovat libovolný počet hran. Jak je vidět z obrázku, plocha P obsahuje N hran oproti tomu plocha Q obsahuje hran M .



Obr. 4-24 Schematické znázornění dvou mnohoúhelníkových ploch

(Zdroj: General procedure for calculation of diffuse view factors between arbitrary planar polygons [33])

V práci odvozují matematické vyjádření pohledového faktoru, který vychází ze vzorce (4.8).

$$F_{P-R} \approx \frac{1}{4\pi A_R} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_0^1 \int_0^1 \ln \left(\begin{array}{c} \lambda_R^2 |\mathbf{r}_{m,m+1}|^2 + \lambda_P^2 |\mathbf{p}_{n,n+1}|^2 \\ -2\lambda_R \overline{R_m P_n} \cdot \mathbf{r}_{m,m+1} \\ -2\lambda_P \overline{R_m P_n} \cdot \mathbf{p}_{n,n+1} \\ -\lambda_R \lambda_P \mathbf{p}_{n,n+1} \cdot \mathbf{r}_{m,m+1} \\ + |\mathbf{p}_{n,n+1}|^2 \end{array} \right) \mathbf{p}_{n,n+1} \cdot \mathbf{r}_{m,m+1} d\lambda_R d\lambda_P \quad (4.21)$$

kde λ_P respektive λ_R jsou představující frakci délky vektoru z celkové délky obvodu plochy P respektive plochy R , $\mathbf{r}_{1,2}$ respektive $\mathbf{p}_{1,2}$ jsou vektory spojující body plochy

R_1 a R_2 respektive body P_1 a P_2 . Pro výpočet tedy je potřeba znát souřadnice všech bodů obou ploch P a R , které určují jejich hranici. Vnitřní část vzorce (4.21) je vyjádřena tedy konstantami, které se mění pouze s indexy vnějších sumací. Integrace je v tomto případě tedy nelineární funkcí λ_P a λ_R . Poznamenejme také, že hodnota následujícího bodu ploch P a R je v případě dosažení posledního bodu zároveň bodem prvním $m=1$ pro hodnoty $m=M+1$ a $n=1$ pro $n=N+1$ (vrcholy tvoří uzavřenou smyčku).

Speciální situace nastane v případě, kdy plochy sdílejí hranu. V tomto případě je délka vektoru $\overrightarrow{R_m P_n}$ nulová, a je třeba tuto hranu vhodně zpracovat. Autoři Ambirajan a Venkateshan uvádějí analytické řešení takové, že příspěvek do sumace ve vzorci (3.21) je nahrazen vzorcem

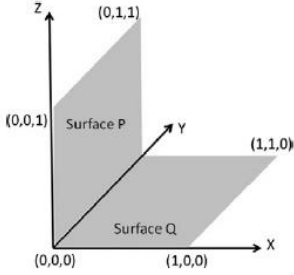
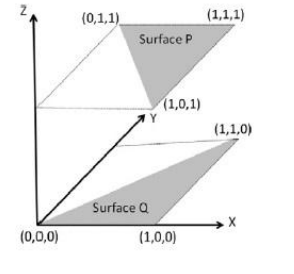
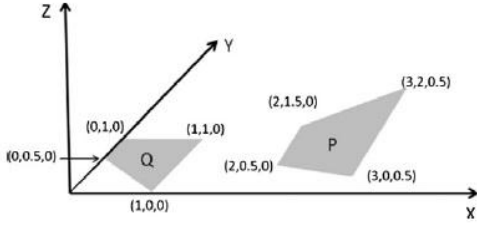
$$\Delta F_{RP|sdílená\ hrana} = |\mathbf{r}_{sdílená\ hrana}|^2 \left\{ \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \ln(|\mathbf{r}_{sdílená\ hrana}|^2) \right\}, \quad (4.22)$$

kde $|\mathbf{r}_{sdílená\ hrana}|$ je délka sdílené hrany.

Takovýmto způsobem je tedy možné určit pohledový faktor libovolného rovinného mnohoúhelníku ohraničeného sadou bodů, tvořících rovinné hrany. Toto je hlavní předností tohoto řešení oproti jiným používaným metodám, které využívají metody křivkových integrálů.

Autoři [33] porovnávají výsledky s metodou Monte Carlo. Některé z výsledných hodnot těchto testů jsou zobrazeny v tabulce 9. Výsledky těchto testů zobrazují hodnoty analytického řešení (pokud bylo dostupné), výsledek metody Monte Carlo a prezentovaná metoda s využitím deseti a dvaceti bodového Gaussova-Legendrova kvadraturního pravidla. Výsledek se shodoval také s analytickým řešením (u dostupných variant).

Tab. 9 Výsledky výpočtu pohledového faktoru s použitím metody křivkových integrálů pro dva mnohoúhelníky
 (Zdroj: General procedure for calculation of diffuse view factors between arbitrary planar polygons [33])

Případová studie	Analytické řešení	Monte Carlo	10-bodový Gauss	20-bodový Gauss
	0,200044	0,200142 (0,06%)	0,200044	0,200044
	0,099912	0,100043 (0,11%)	0,099912	0,099912
	Není	3,701x10 ⁻³ (0,44%)	3,637x10 ⁻³	3,637x10 ⁻³

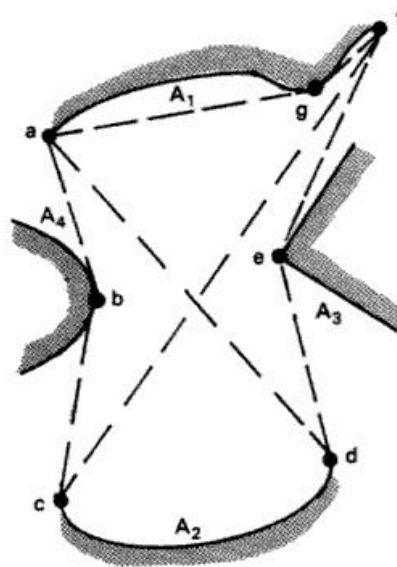
4.5 Výpočet pohledových faktorů ve 2D

Zjednodušený přístup k výpočtu představil J. Howell v [16]. Jelikož pro výpočet pohledových faktorů je zapotřebí plošná integrace, není často snadné nebo možné využít analytický přístup. J. Howell navrhl zjednodušené řešení této úlohy na 2D problém. Uvažujme model, kde je jedna dimenze stejná v nekonečné délce, tedy třetí rozměr se dá vytvořit rozšířením paralelními hodnotami původního rozmístění.

Na obrázku Obr. 4-25 je vidět jedno konkrétní rozložení pro výpočet pohledových faktorů u dvourozměrného problému. Předpokládejme, že chceme zjistit pohledový faktor mezi plochami A_1 a A_2 , mezi kterými jsou další plochy A_3 a A_4 kolizní pro přenos tepla zářením. K určení pohledového faktoru F_{1-2} uvažujme, že plocha A_1 je v tomto případě vydutá. Na obrázku je znázorněno, jak se v tomto konkrétním případě zvolí

pomyslné lomené čáry (struny), které obepínají případné kolizní objekty. Výpočet takového pohledového faktoru lze vypočítat pomocí vzorce, kde se počítá pouze s délkami natažených strun (přerušovaná čára) a délkou plochy, pro kterou počítáme frakci dopadajícího záření. Velikost pohledového faktoru je pak rovna součtu překřížených strun, od kterých je odečtena délka strun na okrajích a vydělené dvojnásobkem plochy, která na jinou plochu září. Ve vzorci (4.23) je názorně předveden výpočet pohledového faktoru z Obr. 4-25.

$$F_{1-2} = \frac{A_{cf} + A_{ad} - A_{abc} - A_{def}}{2A_1} \quad (4.23)$$



Obr. 4-25 Howellova metoda skřížených strun pro výpočet pohledového faktoru
(Zdroj: Thermal radiation heat transfer [16])

V této kapitole byly představeny různé přístupy určování pohledových faktorů. Pro některé typy úloh řešení přenosu tepelné energie zářením je vhodné použití zjednodušení na dvourozměrný geometrický problém. Takovéto zjednodušení lze popsat, pokud sledujeme charakteristické chování tepelného toku v závislosti na konfiguraci prvků umístěných v uvažovaném modelu. Jiný typ úloh, kde je pak naopak cílem přesněji identifikovat tepelný tok v jednotlivých místech tak, aby odpovídal co nejvíce realitě, je potřeba vytvořit prostorový model a použít tedy i vhodné prostředky pro určení prostorového pohledového faktoru. Na základě provedené rešerše je pro problematiku identifikace tepelného toku nejvhodnější použít deterministické numerické metody založených na dvojnásobné integraci. Z hlediska časové náročnosti je tato metoda jedna z nejefektivnějších a v případě použití adaptivní integrace je pak

možné snadněji řešit daný problém s vysokou přesností závislou na nastaveném parametru přesnosti dané adaptivní integrace.

Pro snadnou identifikaci celkového přenosu tepelné energie se z rešerše zdá být také vhodné použití představeného řešení pro určení pohledového faktoru metodou výpočtu přes libovolné mnohoúhelníky, která je však vhodnější při obecnějším popisu řešené úlohy. Pro přesnější identifikaci je pak vhodnější vyšší míra diskretizace, kde není již tato metoda tak výhodná.

Představeny dále byly přístupy určení pohledového faktoru stochastickým přístupem (Monte Carlo), jejichž technika vychází z fyzikální podstaty záření, a to simulace vlastních tepelných paprsků vyzářených danou plochou. Tento přístup je výhodnější při řešení problémů založených více na optické podstatě problematiky a lze snadněji ovlivnit odrazy paprsků na základě úhlu jejich dopadu a například zkoumat snadněji chování paprsků v celém modelu. Nevýhodou je však nutnost generování dostatečného počtu paprsků, které vyhovují požadavku na rovnoměrnost vyzářené energie z dané plochy.

Dostupné aplikace, které obsahují implementaci některých metod zmíněných v této kapitole jsou např. VISRAD [29], View3D [30], FACET [31] a MONT3D [32]. VISRAD využívá transformace souřadnic k výpočtu dvojnásobného křivkového integrálu. View3D obsahuje řešení pohledových faktorů pouze pro plochy trojúhelníkových a čtyřúhelníkových tvarů a implementuje jak metodu využívající dvojnásobný plošný integrál, tak také jako alternativu metodu s dvojnásobným křivkovým integrálem. Aplikace FACET obsahuje implementaci metod s dvojnásobným křivkovým a dvojnásobným plošným integrálem (2AI, 2LI), navíc je zde implementována metoda autorů Mitalase a Stephenson [26]. Aplikace MONT3D využívá metody Monte Carlo.

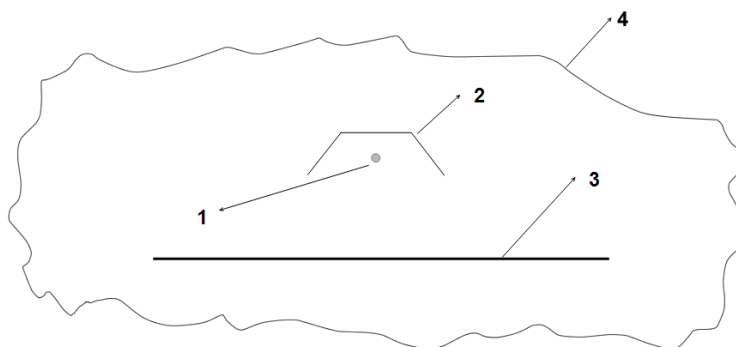
5 Návrh modelu přenosu tepla zářením

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.

5.1 Model tepelného toku

Uvažujeme reálný systém (Obr. 5-1) 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. 5-1 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

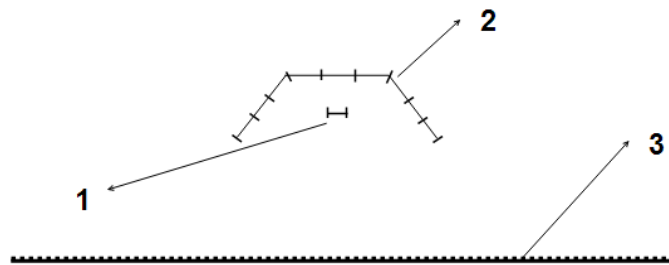
- emisivita $\varepsilon(-)$,
- teplota $T(K)$,

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

Naším cílem je výpočet okamžité hodnoty funkce tepelného toku q (Wm^{-2}) jako

funkce (x,y,z) , která splňuje rovnici (3.3).

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. 5-2 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 popsáný 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. 5-1 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 (5.2) získáme hodnoty zářivosti B_i (Wm^{-2}) jednotlivých elementů. Hodnoty B_i (Wm^{-2}) jsou následně zpětně dosazeny do rovnice (3.17) 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 kapitole 4 Element představující obalovou plochu e_{N+1} modelu slouží jako doplňující element, jehož pohledový faktor lze vyjádřit ze vztahu (3.20) následovně

$$F_{i-(N+1)} = 1 - \sum_{k=1}^N F_{i-k} . \quad (5.1)$$

Vztahy mezi jednotlivými plochami lze popsat kombinací dvou vztahů a to (3.17) a (3.18). 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.

$$\frac{e_{bi}-B_i}{(1-\varepsilon)/(\varepsilon A_i)} = \sum_{j=1}^n \frac{B_i-B_j}{1/(A_i F_{i-j})}; i \neq j. \quad (5.2)$$

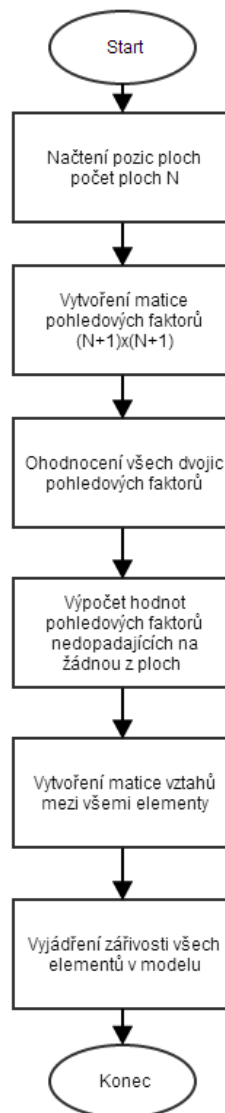
Vztahy (3.17) a (3.18) je možné využít pro sestrojení soustavy rovnic (5.2). Výsledkem řešení soustavy rovnic jsou zářivosti B_i na jednotlivých elementech. Rovnici (5.2) je možné upravit do maticové podoby, kde na levé straně jsou neznámé hodnoty zářivosti \vec{B}

$$\mathbf{G} \cdot \vec{B} = \vec{e}_g. \quad (5.3)$$

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

$$G_{ij} = F_{i-j}(1 - \varepsilon_i), \quad (5.4)$$

Následným dosazením hodnot B_i do vztahu (3.17) 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. 5-3 zobrazuje postup výpočtu konkrétní simulace, a hodnotí rozložení tepelné radiace pro všechny prvky daného modelu.



Obr. 5-3 Základní postup simulace přenosu tepla zářením

5.2 Následné využití modelu

Na základě uvedeného modelu tepelného toku v systému definovaném v kapitole 5.1 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

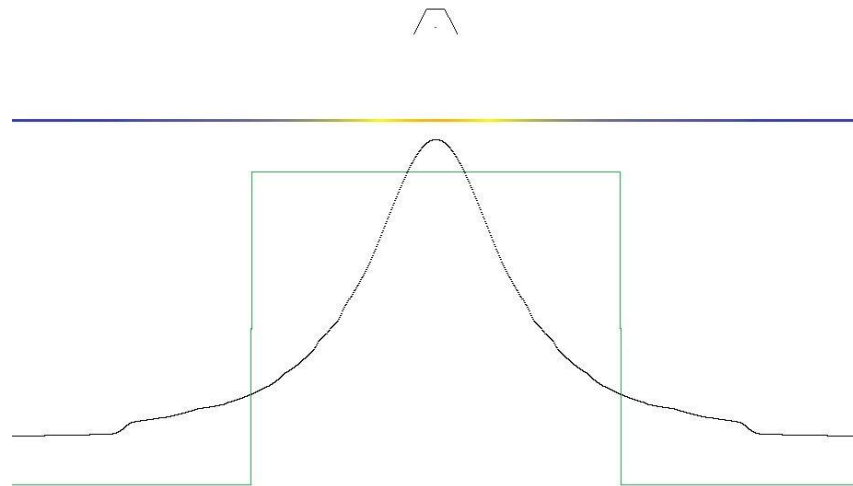
$$\min \sum_{\bar{e}} (q_{sim}(u_i) - q_{opt}(u_i))^2, \quad (5.5)$$

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“ [10]. 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. 5-5 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 [56], 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.

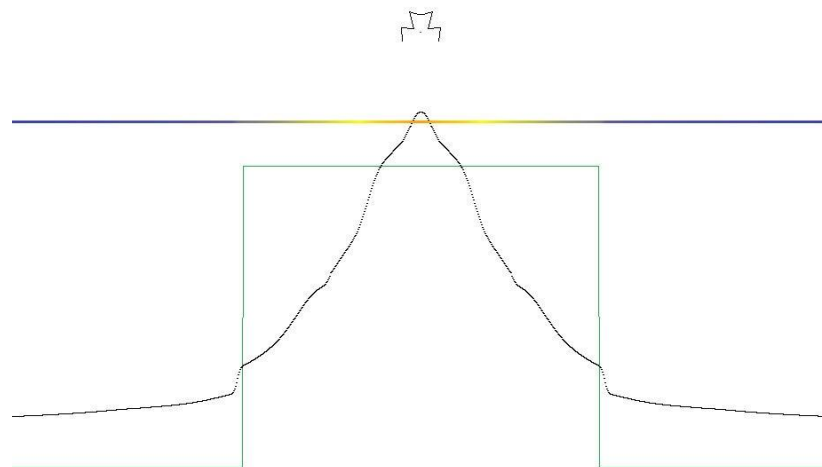
Výstupní hodnoty modelu se optimalizují k předem definované distribuční funkci řešené úlohy (např. rovnoměrné ozáření plochy, směřování tepelného toku do určitého místa pod zářičem atp.). Uvedený postup je možné alternativně použít také pro optimalizaci pozice zářiče nad plochou. Optimalizační úloha 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.

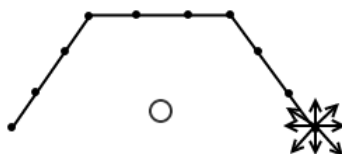


Obr. 5-4 Funkce ozáření – rozložení tepelného toku dopadajícího na ozařovanou plochu (černá křivka) a požadovaný průběh rozložení tepelného toku na ozařované ploše (zelená obdélníková funkce)



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

Na obrázku Obr. 5-7 je schematicky znázorněn optimalizační algoritmus aplikovaný na uvažovaný model. 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. 5-4 a Obr. 5-5 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 5.5). 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. 5-6. 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. 5-6). Z těchto variant je následně vybrána nejvhodnější, která je použita jako výchozí pro další krok optimalizačního algoritmu.

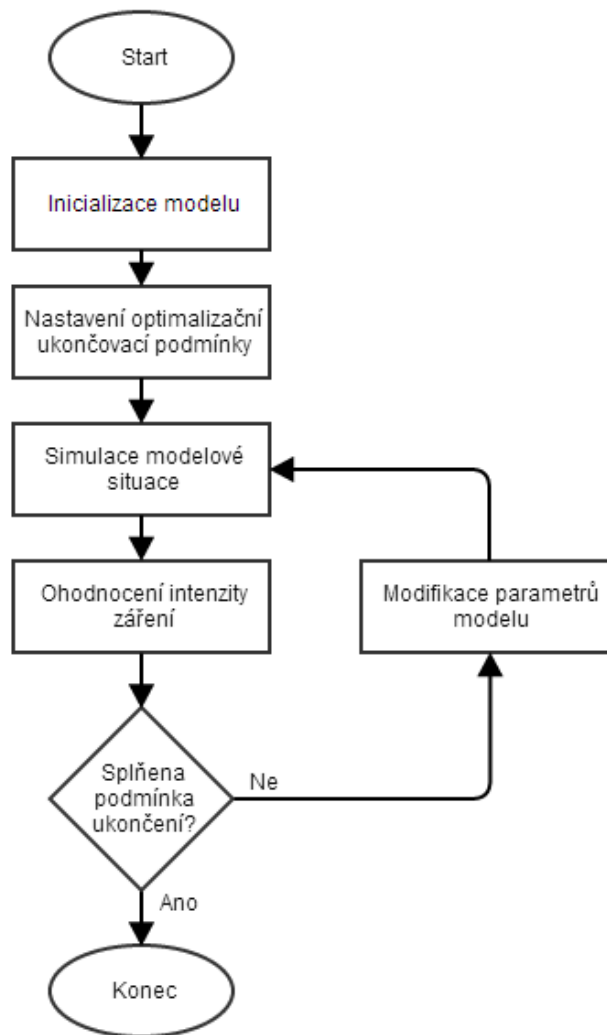


Obr. 5-6 Optimalizace tvaru reflektoru

Optimalizace na 2D modelu, která je prezentována na obrázku Obr. 5-6 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 [10], 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 [35], 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.



Obr. 5-7 Optimalizace modelu přenosu tepla zářením

V páté 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.

6 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 (kapitola 4). 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.

6.1 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. Tato kapitola popisuje tři různé způsoby měření charakteristik. Tyto tři přístupy jsou v praxi používány, však každý je vhodný pro různé použití.

1) Měření na experimentální lince firmy Magna Exteriors & Interiors

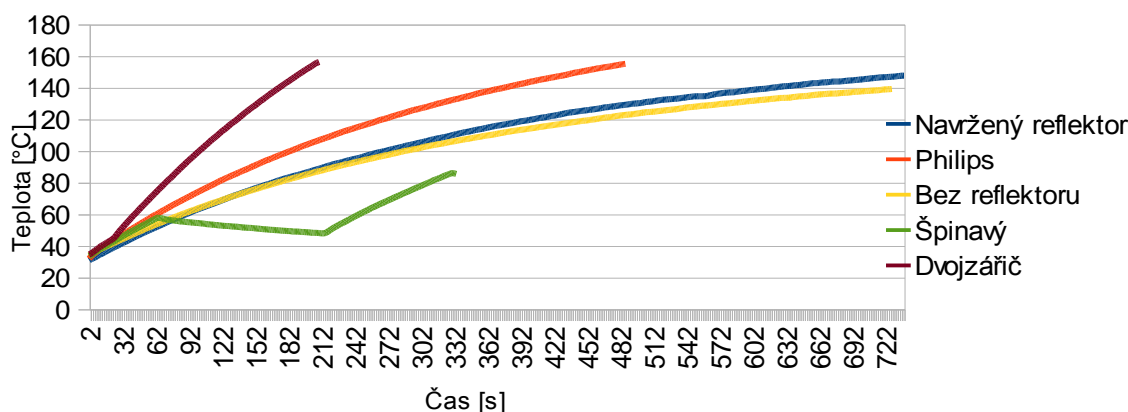
Na experimentální lince firmy Magna Exteriors & Interiors (kapitola 2.3) byla provedena měření, jejichž cílem bylo zjistit vývoj teploty v čase na jednotlivých termočláncích umístěných na desce, která je vyrobena ze stejného materiálu, ze kterého jsou vytvořeny formy pro tvorbu měkčených plastů. Použité termočlánky byly navrženy v předchozích částech projektu MPO FR-TI1/266 [20]. Způsob jejich zapojení je popsán v [4].

Měření byla provedena pro pět typů reflektorů:

1. Optimalizací navržený tvar reflektoru (neleštěný)
2. Používaný vysoce leštěný reflektor Phillips IRZ500
3. Samotná trubice zářiče – bez reflektoru

4. Reflektor opotřeбенý běžným používáním (zašpiněn spečeným PVC práškem)
5. Klasický reflektor Philips se dvěma infrazářiči

Pro ilustraci je na Obr. 6-1 uveden graf s průběhem ohřevu na jednom z měřených čidel, který je výsledkem měření. Každé měření bylo zahájeno na téměř vychladlé desce. Při prvním měření se tato deska ohřívala ze zcela chladného stavu. V dalších měřeních se nechávala deska vychladnout na teplotu přibližně 30°C a znovu byl spuštěn neregulovaný proces ohřevu galvanické formy. První měření, které proběhlo na zcela studené formě, zaznamenávalo charakteristiku navrženého reflektoru. Při měření použitého reflektoru s nánosem připečeného PVC došlo k neočekávaně výraznému spékání tohoto PVC, tedy pokus byl pozastaven, následně po mírném vychladnutí opět spuštěn, ale nebylo možné překročit teplotu 100°C na nejteplejším měřeném termočlánku.



Obr. 6-1 Zobrazení průběhů teplot na termočlánku č. 7

2) Měření charakteristik pomocí termokamery FLIR

Pro bezdotykové snímání teplotních polí je možné využít dvou základních principů, a to buď opticko-mechanický rozklad obrazu, nebo lze použít maticový detektor. Kamery, využívající opticko-mechanický rozklad obrazu, jsou velmi náročné na výrobu a tak se v praxi se téměř nepoužívají. Jako maticové senzory se používají zejména mikrobolometrické a kvantové detektory, které jsou obvykle chlazeny pomocí Stirlingova chladiče nebo pomocí Peltierova jevu. Měřené záření je v infračervené oblasti, takže je pro lidské oko neviditelné. Moderní termovizní kamery proto uměle přiřazují teplotám barevnou škálu. Jejich programové vybavení obvykle umožňuje využívat on-line zpracování dat okamžitě během měření (hledání bodu s nejvyšší

teplotou, zvýrazňování izoterm apod.) i offline zpracování dat později po připojení k počítači.



Obr. 6-2 Termovizní infракamera značky FLIR - vlevo,
Snímek termokamerou pro používaný zářič Philips - vpravo
(Zdroj: FLIR [<http://www.flir.com>])

Bezdotykové snímání teplotního pole je z provedených měření, pro potřeby odčítání hodnot pro účely porovnávání hodnot se simulací, nejméně vhodný. Jedná se spíše o orientační pohled na tepelné rozložení. Snímky infракamerou byly pořízeny v průběhu měření na experimentální lince a to při teplotě 160°C pro všechny typy reflektorů zmíněné v předchozí kapitole. Takovéto měření je vhodné spíše pro zjištění neproteplených míst pro formu osvětčovanou sadou zářičů.

3) Měření tepelného toku senzorem intenzity záření Hukseflux SBG01

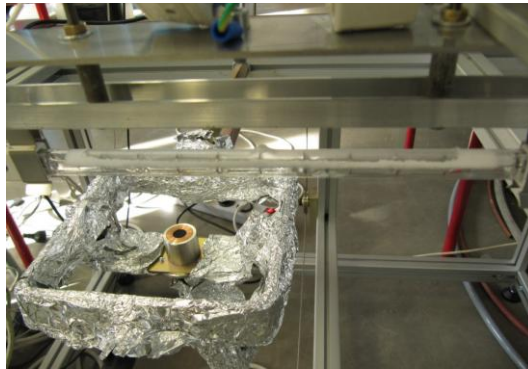
Měření pomocí senzoru tepelného toku nám poskytl nejpřesnější informaci o charakteristikách zářičů s různými typy reflektorů. K měření byl použit vodou chlazený senzor Hukseflux SBG01, které slouží k měření tepelného toku do 200kWm⁻². Udávaná emisivita tohoto senzoru je větší než 0,95, tedy senzor se chová téměř jako černé těleso (absorbuje většinu dopadajícího tepelného toku).



Obr. 6-3 Senzor tepelného toku Hukseflux SGB01 (Zdroj: Hukseflux Thermal Sensors [<http://www.hukseflux.jp/products/heatFlux/sbg01%20jp.html>])

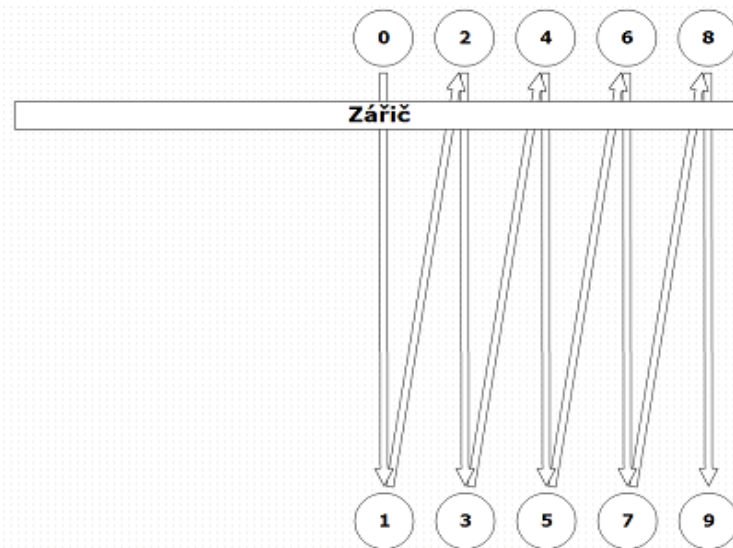
Měření tímto způsobem je výhodné pro porovnání se simulací přenosu tepla zářením, ve kterém není zohledněna dynamika systému (např. zvyšování teploty ozářením nebo vyrovnávání rozdílů teplot v důsledku přenosu tepla vedením). Senzor je

schopen zachytit intenzitu tepelného toku až do vlnových délek 50nm (viditelné světlo).



Obr. 6-4 Umístění senzoru intenzity tepelného toku

Bylo provedeno měření jednoho kvadrantu na přípravku firmy Lenam (Obr. 6-4), který umožňuje snímat intenzity tepelného toku pod zářičem. Byla zaznamenávána intenzita tepelného toku pod zářičem. Postup zaznamenání hodnot je naznačen na diagramu (Obr. 6-5). Pozice senzoru byla pomocí servomotorů měněna a jeho trajektorie procházela postupně body 0 až 9. Hodnoty hustoty tepelného toku jsou postupně zaznamenávány pomocí měřící ústředny. Naměřené hodnoty jsou zde ukládány v krátkých časových intervalech. Z tohoto diagramu jsou následně vyjmuty hodnoty intenzit v bodech, které poslouží jako model rozložení intenzity tepelného záření. Výslednou charakteristiku intenzit tepelného záření na ozařované ploše pak získáme separací hodnot v určených časech daného měření. Jelikož se dá očekávat, že tvar této charakteristiky bude stejný ve všech kvadrantech (měření byla prováděna pro osově souměrné zářiče), můžeme pro měření využít pouze jeden kvadrant a ten pro vizualizaci zrcadlit podle středu měřené charakteristiky. Obr. 6-5 znázorňuje zjednodušený pohled shora na měřící pracoviště. Čísla zde označují místa, ve kterých dochází ke změně pohybu snímacího čidla. Zpětný posuv čidla (např. z pozice 1 do pozice 2) je uskutečněn rychleji, jelikož hodnoty v tomto úseku nejsou pro charakteristiku zářiče použity.



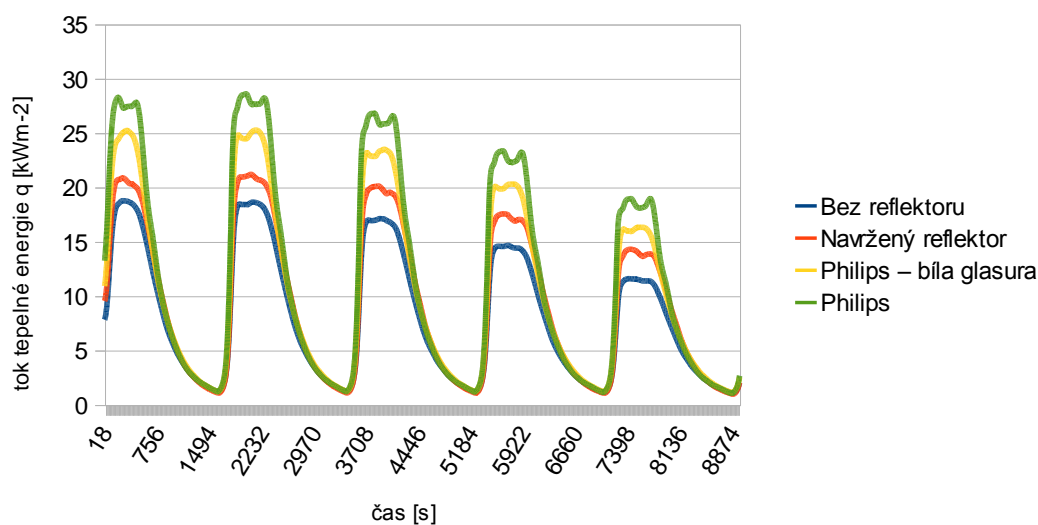
Obr. 6-5 Schematické znázornění postupu měření intenzity tepelného toku

Tato měření byla ze všech provedených nejpřesnější. Jednalo se o postupné snímání intenzity tepelného toku pod zářičem. Z tohoto měření byla následně vytvořena pro vybrané body měřené charakteristiky pravidelná síť hodnot, reprezentujících rozložení intenzity tepelného záření pod zářičem.

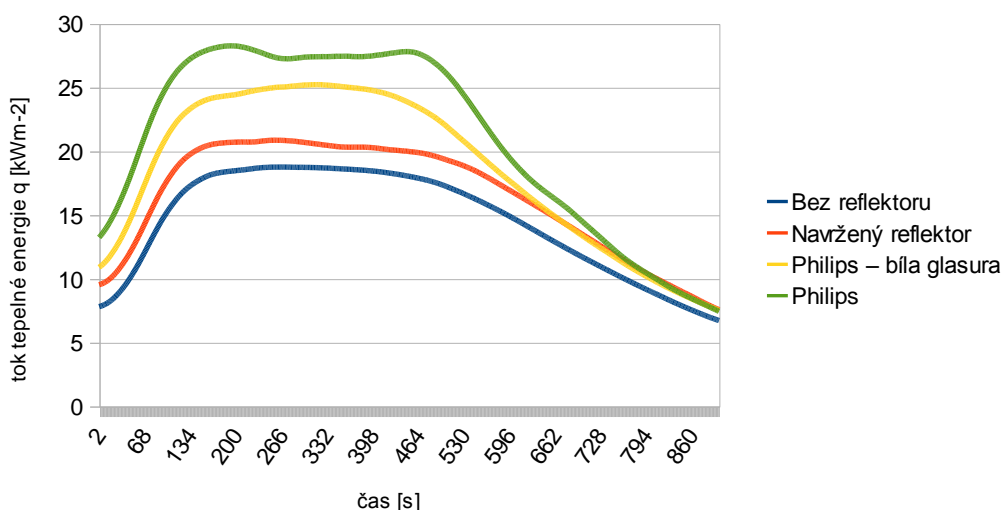
S použitím tohoto měřicího systému byla provedena měření pro následující typy reflektorů:

1. Zářič bez reflektoru
2. Zářič s reflektorem Philips
3. Zářič s reflektorem Philips glazurou natřen na bílou barvu
4. Zářič s navrženým tvarem reflektoru

Graf na Obr. 6-6 zobrazuje celý průběh měření mezi body 0-9. Na tomto grafu lze pozorovat postupné slábnutí intenzity tepelného toku ke stranám měřené oblasti, však charakteristický tvar osvitu zde zachovává stejné vlastnosti. Detailnější průběh měření mezi kroky 0 a 1 je vidět na Obr. 6-7.



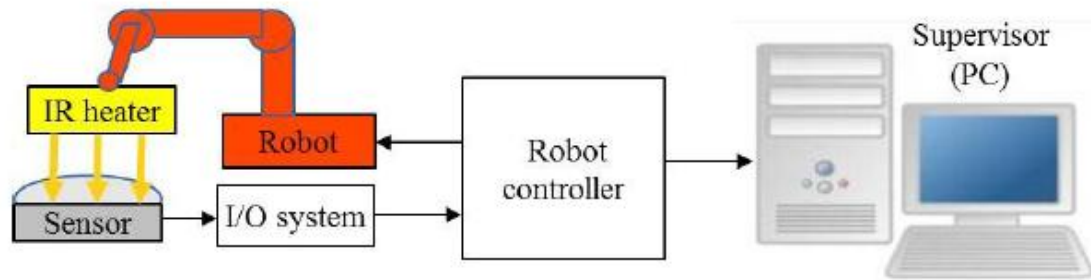
Obr. 6-6 Graf zaznamenaných hodnot pro všechny pokusy



Obr. 6-7 měření v úseku 0-1 (střed zářiče)

4) Automatické měření tepelného toku robotickým ramenem

Dalším způsobem, jak byla řešena metodika měření charakteristiky tepelného toku zářiče, byla představena v publikaci [39] autory J. Mlýnkem, T. Martincem a R. Srbem. Jedná se o automatické měření senzorem Hukseflux SBG01, kde oproti předchozí variantě byl senzor tepelného toku pevně umístěn a pomocí robotického ramene KR 16. Řídicí systém robotického ramene je vybaven jak ovládáním samotného ramene, tak i zpracováním dat naměřených senzorem. Na obrázku Obr. 6-8 je schematicky znázorněno zapojení celého měřicího systému.



Obr. 6-8 Automatický měřicí systém

(Zdroj: Heating of Mould in Manufacture of Artificial Leathers in Automotive Industry[39])

Naměřené hodnoty a pozice měřených bodů jsou ukládány do specifického textového formátu. Měření byla provedena také s různými náklony zářiče, čímž bylo dosaženo získání hodnot intenzity tepelného toku pro různé směry normály zářiče směrem k formě.

6.2 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.

6.2.1 Implementace modelu

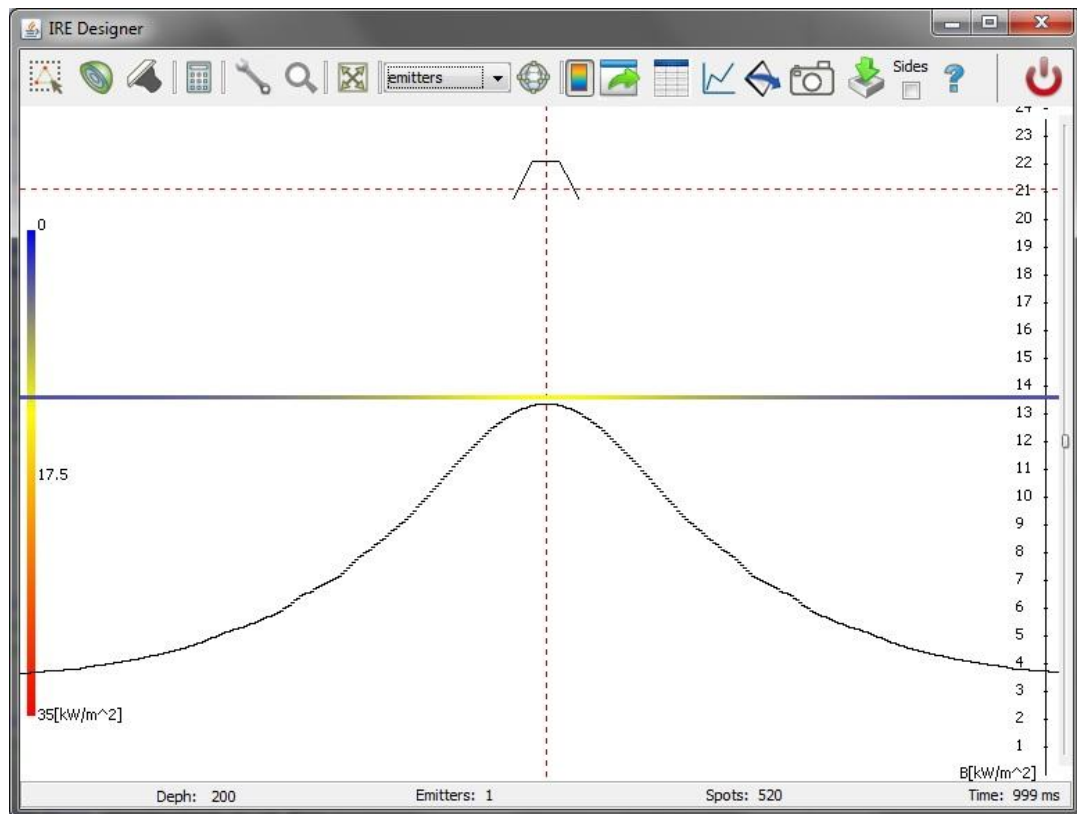
Aplikace IRE Designer byla vyvíjena za účelem bližšího zkoumání chování infrazářičů v různých konfiguracích (různá natočení, více zářičů atp.). Hlavní vlastností této implementace modelu přenosu tepelné energie zářením je zjednodušení dané problematiky na dvourozměrnou úlohu. Jednotlivé elementy modelu 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. 6-9). 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.

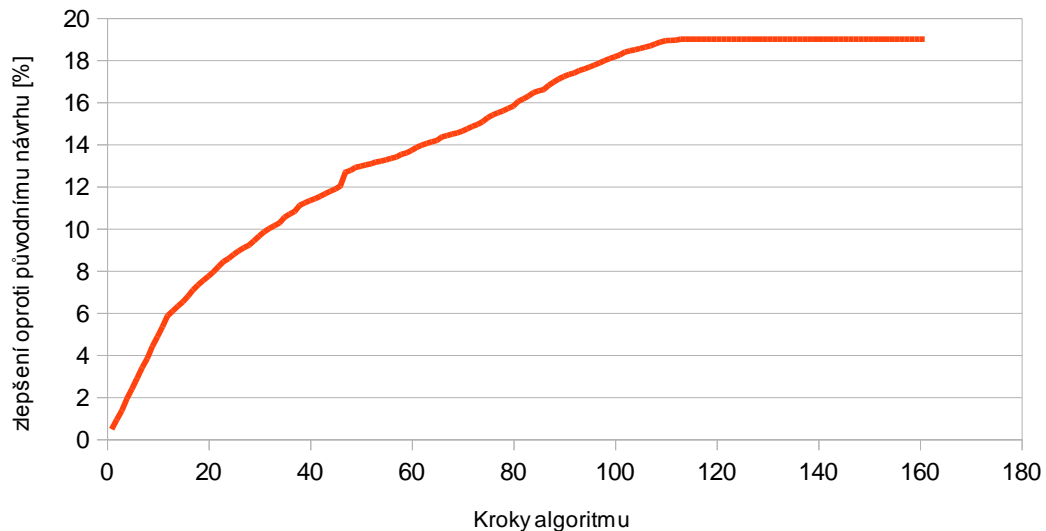


Obr. 6-9 Aplikace IRE Designer se zobrazenou simulací

6.2.2 Hledání alternativního tvaru

Jedno z možných využití tohoto nástroje je využití optimalizace s využitím simulace k návrhu alternativních tvarů reflektoru. V průběhu řešení projektu byly uvažovány různé tvary požadovaných charakteristik tepelného toku. Některé charakteristiky jsou naznačeny na ilustraci v příloze F. Optimalizační úloha v tomto případě minimalizuje rozdíl mezi simulovanou distribuční funkcí zářiče a požadovanou distribuční funkcí (5.5). 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. 6-10, 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. 5-4 a Obr. 5-5, 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 uváznutí 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.

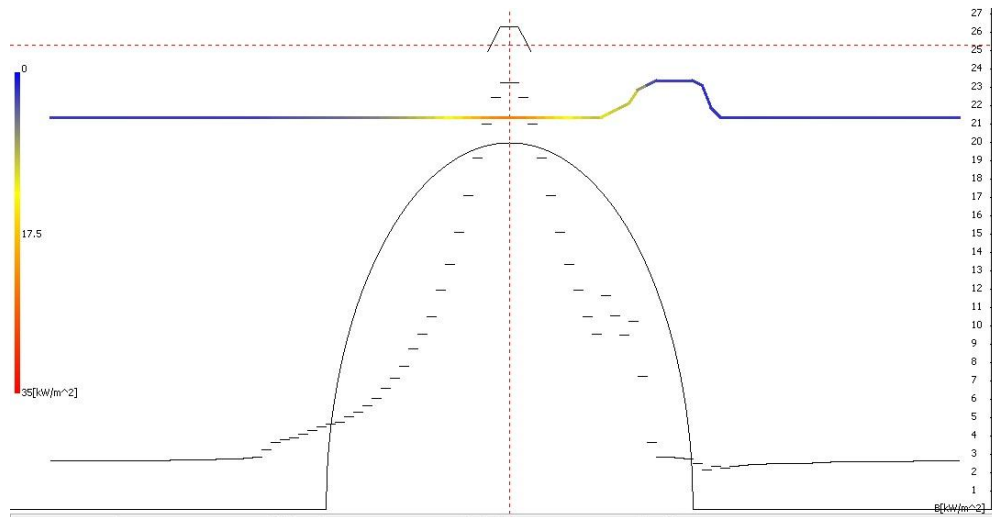


Obr. 6-10 Zobrazení účinnosti algoritmu pro vyhledání nového tvaru reflektoru

6.2.3 Hodnocení řešených úloh

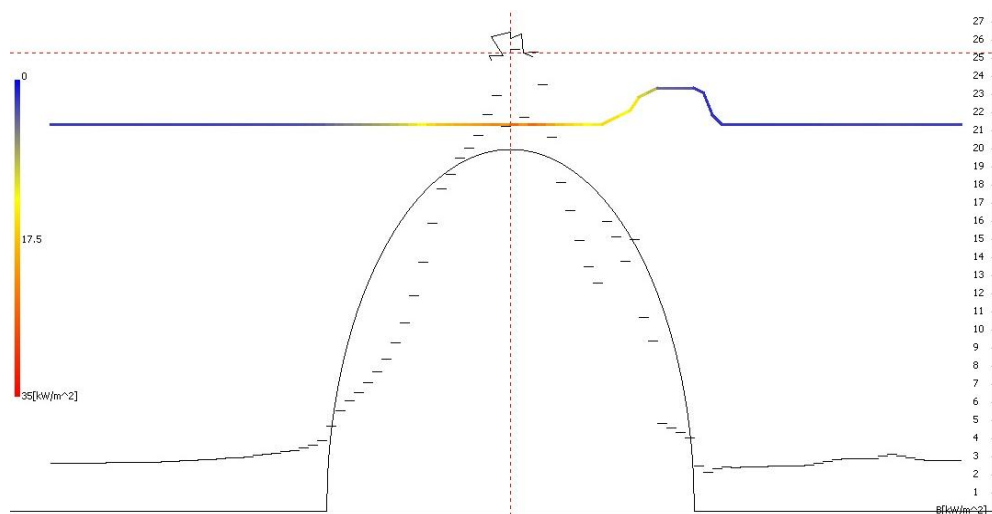
Na prezentovaném modelu je dále možné realizovat další dílčí úlohy různého charakteru. Optimalizační úlohy jsou v realizovaném modelu dvou typů – tvarová a polohová optimalizace (kapitola 5.2). Na obrázku Obr. 6-11 je zobrazen počáteční stav optimalizační úlohy, jejímž cílem bylo optimalizovat tvar reflektoru pro nerovnou ozařovanou plochu. Pro potřeby průmyslového ohřevu to pak může být úloha požadující cílené směřování tepelné energie do těžko přístupných míst.

Požadovaná distribuční funkce tepelného toku může mít různý charakter (některé uvažované charakteristiky jsou znázorněny v příloze F). Na příkladu z předchozí kapitoly (Obr. 5-5) byla požadována stopa s obdélníkovým průběhem. Následující příklady (Obr. 6-11 a Obr. 6-13) pak mají za cíl nalézt distribuční funkci tepelného toku s eliptickým průběhem nad plochou obsahující nerovnost na ozařované ploše.



Obr. 6-11 Optimalizace tvaru reflektoru, který okrajově ozařuje zakřivenou plochu

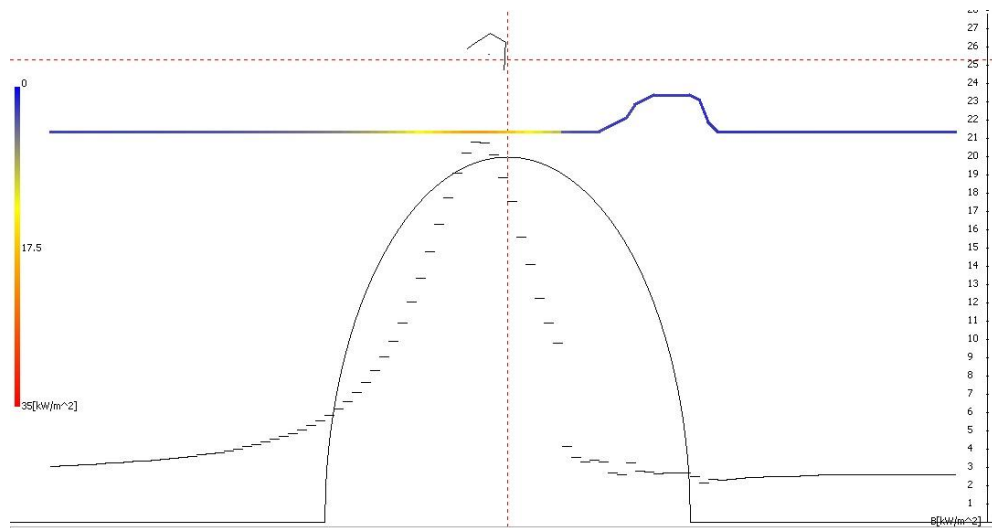
Obrázek Obr. 6-12 zobrazuje výsledek předchozí úlohy. Z uvedených ilustrací je dobře vidět, že optimalizační úloha (5.5) dopadla s uspokojivým výsledkem. V uvedeném příkladu nejsou nastaveny požadavky pro zachování částí reflektoru sloužící k uchycení reflektoru a také zde není brána v úvahu minimální vzdálenost mezi trubicí zářiče a stěnou reflektoru.



Obr. 6-12 Výsledek optimalizace tvaru reflektoru s částečným ozářením zakřivené plochy

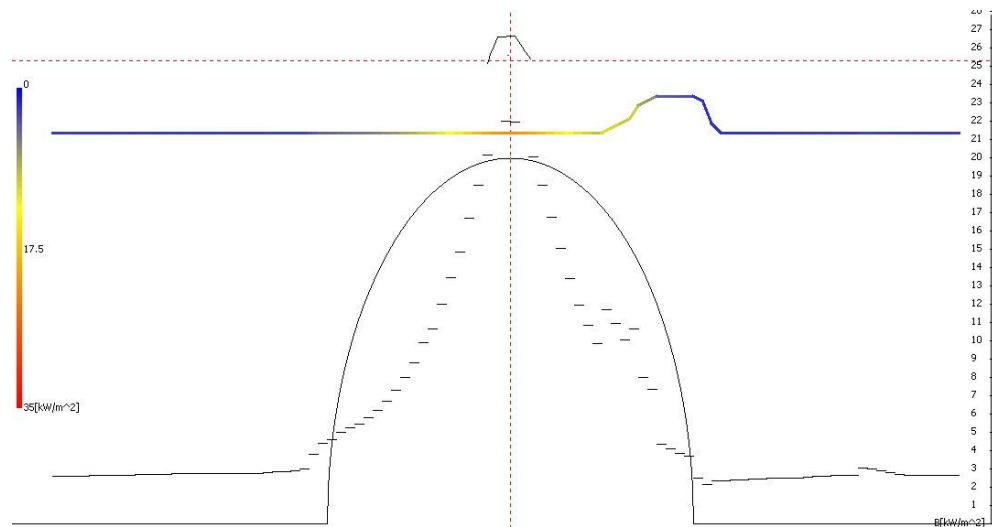
Dalším typem úloh optimalizace tepelného toku infrazářiče je optimalizace pozice zářiče nad plochou. Algoritmus je v tomto případě ponechán stejný s rozdílem, že stupně volnosti vycházející z bodů popisujících tvar zářiče byly nahrazeny posunem celého zářiče v prostoru a jeho natočením oproti původní pozici. Výsledek simulace na obrázku Obr. 6-13 zobrazuje počáteční umístění a natočení zářiče s požadovanou výslednou distribuční funkcí, která odpovídá eliptické stopě shodné s předchozím

příkladem.



Obr. 6-13 Optimalizace pozice reflektoru pro zakřivenou plochu

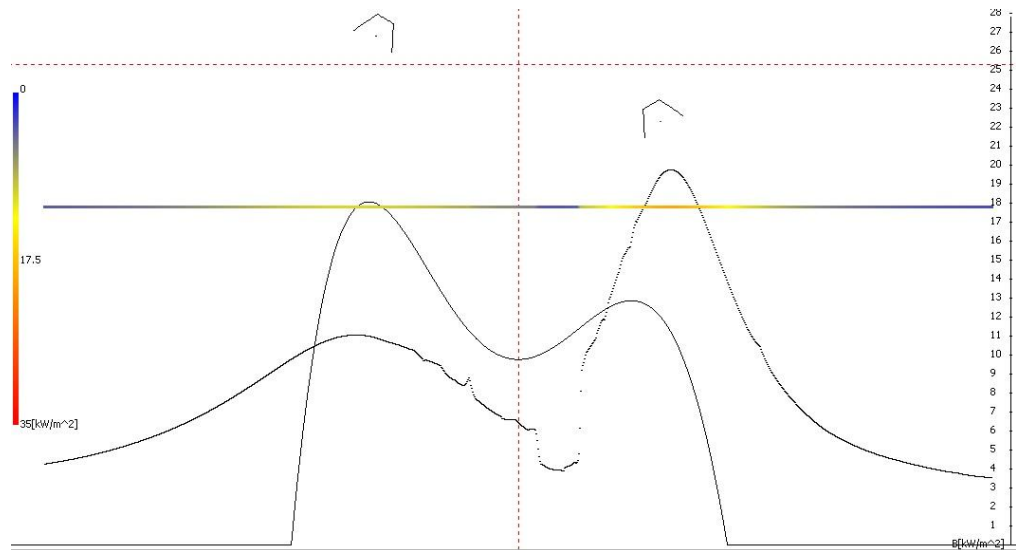
V tomto modelovém příkladu došlo dle předpokladu k srovnání natočení zářiče oproti ozařované ploše a pozice tak, aby výsledek minimalizace zadání (kapitola 5.2) pomocí gradientního algoritmu našel své lokální minimum odpovídající požadovanému osvětlení.



Obr. 6-14 Výsledek optimalizace pozice reflektoru pro zakřivenou plochu

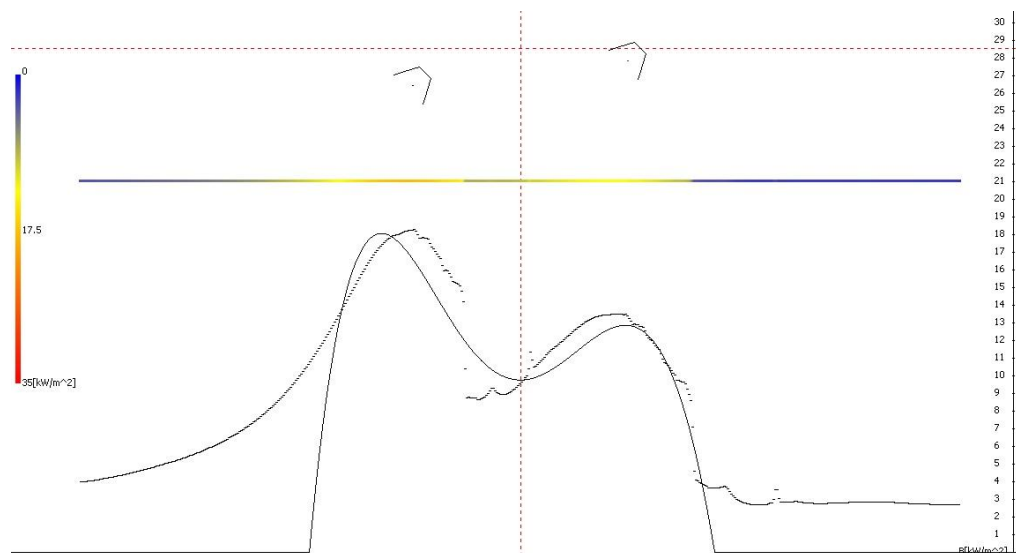
Předchozí příklad demonstroval použití optimalizace pozice reflektoru. Stejným způsobem lze použít tento typ optimalizační úlohy i pro více zářičů. Na obrázku Obr. 6-15 je zobrazena počáteční konfigurace optimalizační úlohy, kde požadovaný průběh distribuční funkce osvětlení je popsán pomocí Lagrangeova 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 distribučními funkcí.



Obr. 6-15 Optimalizace pozice více reflektorů nad rovinnou ozařovanou plochu

Po několika krocích optimalizačního algoritmu bylo nalezeno výsledné lokální minimum pro tuto konkrétní konfiguraci (Obr. 6-16). Na obrázcích Obr. 6-15 a Obr. 6-16 je na simulované distribuční viditelný šum, který je způsoben použitým algoritmem pro určení velikosti stínění ploch.



Obr. 6-16 Výsledek optimalizace pozice více reflektorů nad rovinnou ozařovanou plochu

6.3 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

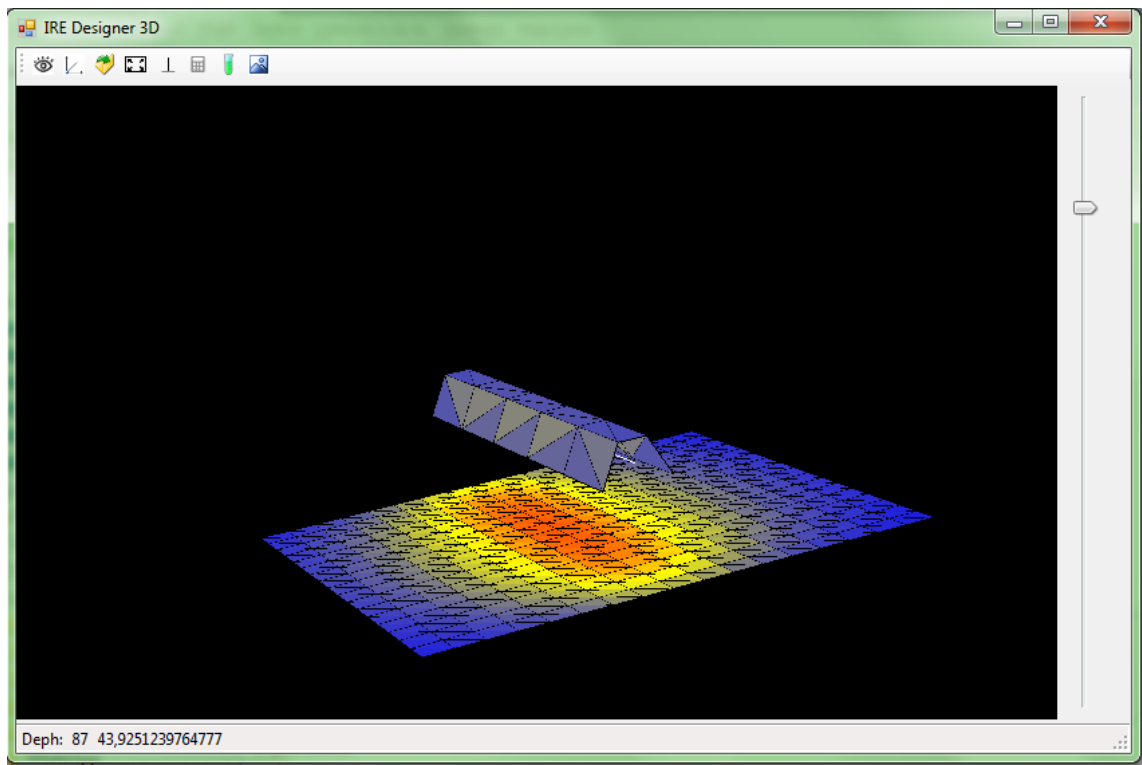
- 1) Pohledový faktor – pro trojrozměrný model je nutné zpracovat vhodnou variantu řešení integrálního vztahu (3.19). Rešerše možných řešení této rovnice je uvedena v kapitole 3. IRE Designer využívá pro výpočet pohledových faktorů Hottelovo pravidlo zkřížených strun, které významně celý výpočet usnadňuje. 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.

6.3.1 Implementace modelu

Na Obr. 6-17 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. 6-17 IRE Designer 3D

Aplikace je navržena tak, aby bylo snadné implementovat různé algoritmy pro řešení pohledových faktorů, jejichž řešení je popsána v kapitole 4. Postupy řešení se dají rozdělit do dvou základních skupin:

- Statistické metody
- Integroční metody

6.3.2 Určení pohledových faktorů metodou Monte Carlo

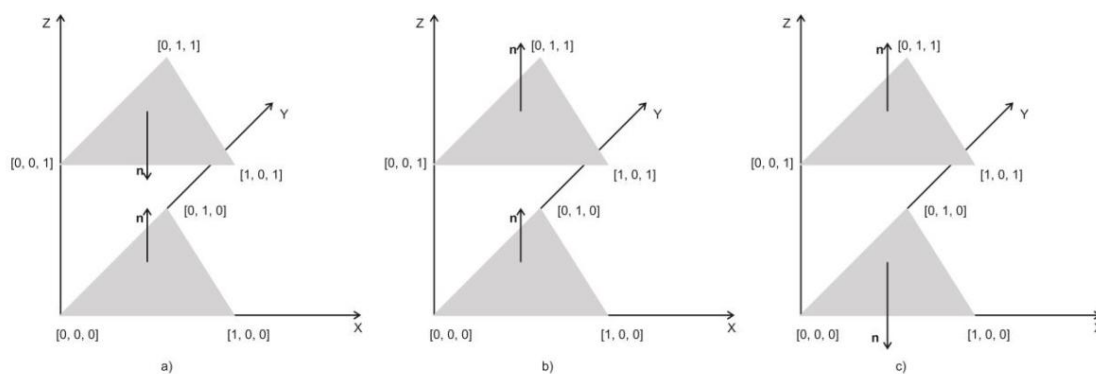
V rámci práce byla implementována statistická metoda Monte Carlo pro určování pohledových faktorů. Hlavní myšlenkou této metody je fyzikální podstata pohledového faktoru, který nám určuje frakci veškeré radiační energie vyzařované jednou plochou, dopadající na jinou plochu. Výhodou metody Monte Carlo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

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.

Pro přenos záření jsou nutné dvě základní entity – zářiče a ozařovaného objektu. V nejjednodušším případě je v této soustavě pouze jeden zářič a jeden ozařovaný objekt. Tuto soustavu je možné později rozšiřovat o další zářiče a další tělesa, kde může docházet i k vzájemným interferencím.

Pro snadnější pochopení problematiky uvažujme soustavu sestávající se ze dvou trojúhelníkových elementů, kde jeden bude reprezentovat zářič a druhý bude reprezentovat ozařovaný objekt. Po tomto zjednodušení se můžeme začít uvažovat nad vzájemnou polohou těchto ploch. Každá plocha je definována třemi body, které jednoznačně určuje polohu v prostoru. Pro modelovou situaci ještě musíme určit, kterým směrem zářič emituje záření a ze kterého směru je ozařovaná plocha schopna toto záření přijímat. Tyto definice nám zajistí normálový vektor přiřazený ke každému trojúhelníku síť reprezentující těleso v prostoru. Tím se model zjednoduší na použití stejné entity jak pro trojúhelník zářiče, tak pro trojúhelník ozařovaného útvaru. Dále je možné uvažovat nad jejich vzájemnou polohou v prostoru.

Na obrázku Obr. 6-18 jsou vyobrazeny varianty polohy zářiče a ozařované plochy. Vektorem \vec{n} jsou znázorněny normálové vektory obou ploch. Trojúhelník, který se nachází níže, z pohledu osy Z (s body $[0, 0, 0]$, $[1, 0, 0]$ a $[0, 1, 1]$), je zářič.



Obr. 6-18 vzájemná poloha dvou trojúhelníků v prostoru

V modelovém případě *a*) dochází k přenosu záření, protože normálové vektory ploch vymezujících poloprostor mají neprázdný průnik. Zde zářič emituje záření na ozařovanou plochu ve směru, kterým je plocha schopna toto záření přijímat. Oproti

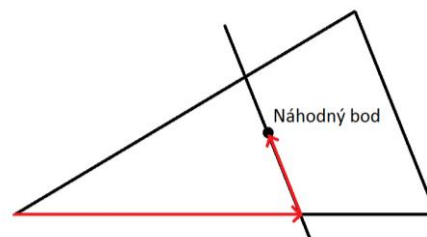
tomu v modelovém případě b), kde vzniká opět průnik poloprostorů, který je neprázdný, k přenosu záření nedochází. V tomto případě zářič ozařuje předmět ze strany, kterou předmět není schopen přijímat záření. V posledním modelovém případě c) také nedochází k přenosu záření, protože průnik poloprostorů vymezených plochami a jejich normálovými vektory je prázdný. Je tedy možné tvrdit, že zářič emituje záření jiným směrem než je ozařovaná plocha.

Reprezentace záření v simulaci

Záření v uvažovaném případě si lze představit jako nekonečně mnoho paprsků, které vycházejí z celé plochy zářiče do celého poloprostoru vymezeného plochou a jejím normálovým vektorem. V reálných podmínkách nelze počítat s nekonečně mnoha paprsky, a proto je třeba zvolit počet generovaných paprsků, které zaručí požadovanou přesnost.

Tuto problematiku je možné převést na geometrickou úlohu, kde počátky paprsků budou náhodně generované body nacházející se na daném elementu. Emitované paprsky je možné chápat jako polopřímky v prostoru. Tyto polopřímky jsou jednoznačně definované počátečním bodem a směrovým vektorem této polopřímky, který musí směřovat do stejného poloprostoru jako normálový vektor daného elementu.

Generování náhodných bodů uvnitř trojúhelníku je možné dosáhnout náhodnou změnou velikosti dvou vektorů charakterizujících tento trojúhelník. Jestliže máme souřadnice všech vrcholů trojúhelníku, můžeme vytvořit šest navzájem různých vektorů. Pro generování bodů je postačující jeden z nich. Tento vektor je zmenšen náhodně vygenerovanou konstantou v rozsahu od nuly do jedné včetně. Poté je možné posunout jeden z bodů (vrchol trojúhelníku) ve směru tohoto vektoru. Dále je vytvořen další vektor, který je rovnoběžný s druhým vektorem trojúhelníku a je vymezen nově vzniklým bodem a průsečíkem rovnoběžky se stranou trojúhelníku s třetí stranou trojúhelníku. Tato metoda je zobrazena na Obr. 6-19.



Obr. 6-19 Generování náhodných bodů v trojúhelníku

Paprsky, které si lze představit, jako polopřímky je vhodné definovat parametrickým vyjádřením přímky. V tomto vyjádření je požadován nějaký bod polopřímky (výše uvedeným způsobem náhodně vygenerované body v trojúhelníku – počátky paprsků) a směrový vektor této polopřímky. Vektory všech polopřímek budeme generovat náhodným otočením normálového vektoru trojúhelníku kolem dvou os o úhel v rozmezí $-\frac{\pi}{2}$ až $\frac{\pi}{2}$ včetně. Tím bude zajištěno, že všechny vygenerované vektory budou směřovat do stejného poloprostoru jako normálový vektor trojúhelníku.

Jestliže je vygenerováno dostatečné množství náhodných bodů a ke každému z nich dostatečné množství polopřímek, pak je možné s dostatečnou přesností vypočítat velikost pohledového faktoru.

Realizace metody

Pro metodu Monte-Carlo je podstatné znát, kolik vyzářených paprsků dopadlo ze zářiče na ozařovanou plochu. Tedy u každého paprsku je potřeba určit, jestli paprsek prochází ozařovanou plochu vymezenou trojúhelníkem či nikoliv.

Pro zmenšení časové náročnosti algoritmu je nejprve určena vzájemná poloha zářiče a ozařované plochy. Tento problém je možné vyřešit vytvořením pomyslné spojnice mezi geometrickými středy trojúhelníků. Z této spojnice jsou vytvořeny dva navzájem opačné vektory. Dále je spočítán úhel mezi normálovým vektorem \vec{n} jednoho z trojúhelníků a vektorem spojnice \vec{u} , který směřuje ke druhému trojúhelníku.

$$\cos \alpha = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} \quad (6.1)$$

To samé se určí i pro druhý trojúhelník s druhým vektorem spojnice. Jestliže oba úhly jsou v rozmezí nula až $\frac{\pi}{2}$ včetně, pak lze říci, že dojde k interakci mezi zářičem a ozařovanou plochou a tedy je možné dále pokračovat ve výpočtu velikosti pohledového faktoru.

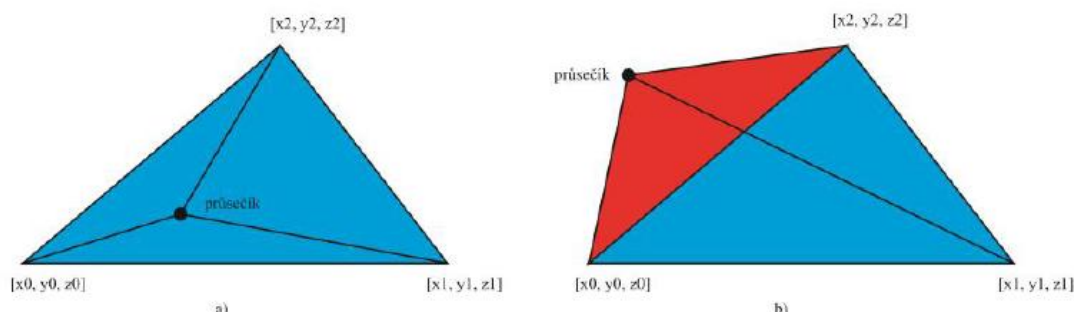
V dalším kroku je testováno, zdali vyzářený paprsek dopadne na ozařovanou plochu omezenou trojúhelníkem či nikoliv. Každé tři body trojúhelníku jednoznačně vymezují rovinu v prostoru. Tedy prvním úkolem je zjistit souřadnice průsečíku takto charakterizované roviny s vyzářeným paprskem. Ten získáme dosazením parametrického vyjádření přímky do obecné rovnice roviny definované třemi body. Po dosazení obdržíme rovnici:

$$a(x_0 + t \cdot v_x) + a(y_0 + t \cdot v_y) + a(z_0 + t \cdot v_z) + d = 0 \quad (6.2)$$

V rovnici (6.3) jsou neznámé a , b , c a d koeficienty obecné rovnice roviny, které lze dopočítat vyřešením soustavy rovnic, která vznikne postupným dosazením známých bodů roviny (vrcholy trojúhelníku) do obecného tvaru rovnice roviny. Ostatní proměnné (až na parametr t) jsou známy z parametrického vyjádření přímky reprezentující paprsek záření. Z této rovnice vyjádříme parametr t , který dosadíme do parametrického vyjádření přímky a tím určíme souřadnice bodu společného pro přímku a rovinu.

$$t = \frac{ax_0 + by_0 + cz_0 + d}{av_x + bv_y + cv_z} \quad (6.3)$$

Po těchto výpočtech je nutné určit, zda nalezený bod je uvnitř oblasti vymezené trojúhelníkem či nikoliv. Tento problém je řešen výpočtem obsahu oblasti vymezené trojúhelníkem a součtem obsahů trojúhelníků, které vzniknou spojením vrcholů původního trojúhelníku s nalezeným průsečíkem. Jestliže jsou tyto obsahy rovny, pak lze tvrdit, že průsečík leží v oblasti vymezené trojúhelníkem a tudíž vyzářený paprsek dopadl na ozařovanou plochu.



Obr. 6-20 Vzájemná poloha trojúhelníku a bodu na ploše

Na obrázku Obr. 6-20 jsou dvě modelové situace, kdy průsečík se nachází uvnitř trojúhelníkové oblasti (případ a) a kdy je průsečík mimo (případ b). V případě b bude součet obsahů větší než obsah původního trojúhelníku o červeně vyobrazenou oblast. Obsah trojúhelníku lze určit pomocí vzorce

$$S = \frac{|\vec{u} \times \vec{v}|}{2}, \quad (6.4)$$

kde \vec{u} a \vec{v} jsou dva libovolné vektory popisující strany trojúhelníka.

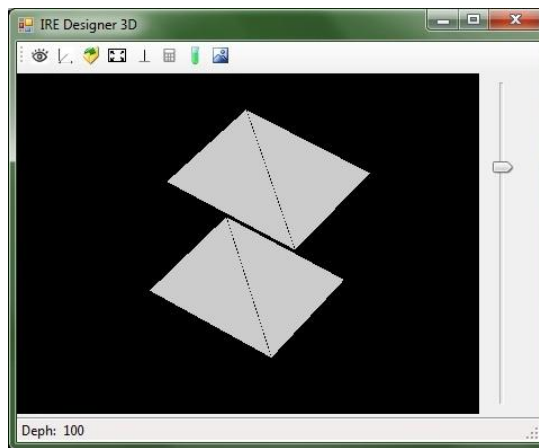
Výpočet a zhodnocení algoritmu

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. 6-21), 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. 6-21 Testovací konfigurace pro určování pohledového faktoru

Analytické řešení odpovídá rovnici (4.19). 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

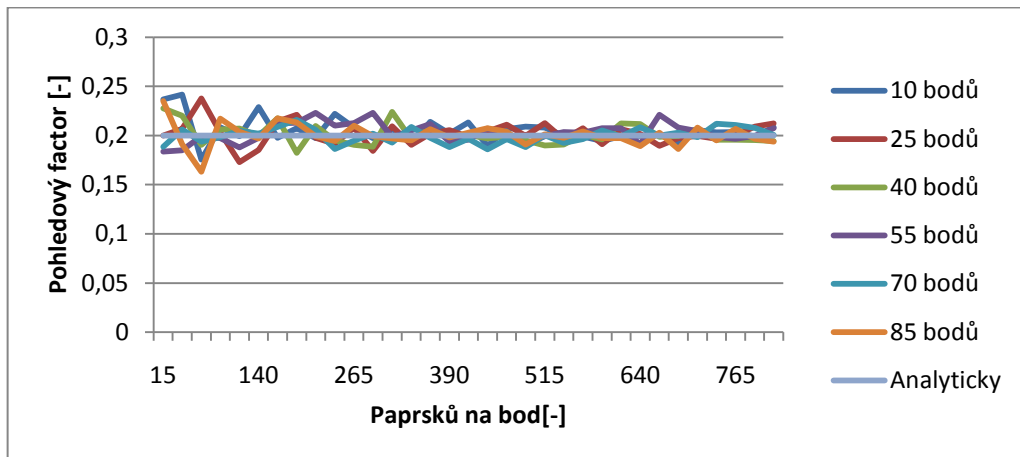
$$F_{1-2} = F_{1-2a} + F_{1-2b}. \quad (6.5)$$

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

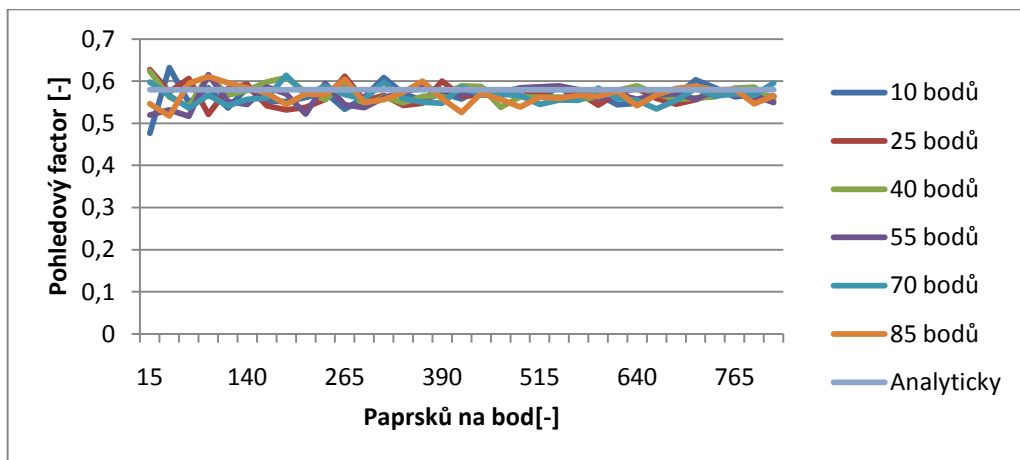
$$F_{1-2} = \frac{A_1 F_{1a-2} + A_2 F_{1b-2}}{A_1 + A_2}. \quad (6.6)$$

Kombinací vzorců (6.5) a (6.6) tak získáme vzorec určující pohledový faktor F_{1-2} pro

uvažovanou modelovou situací. Grafy na Obr. 6-22 a Obr. 6-23 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. 6-22 Určení pohledového faktoru metodou Monte Carlo (vzdálenost 10[-])

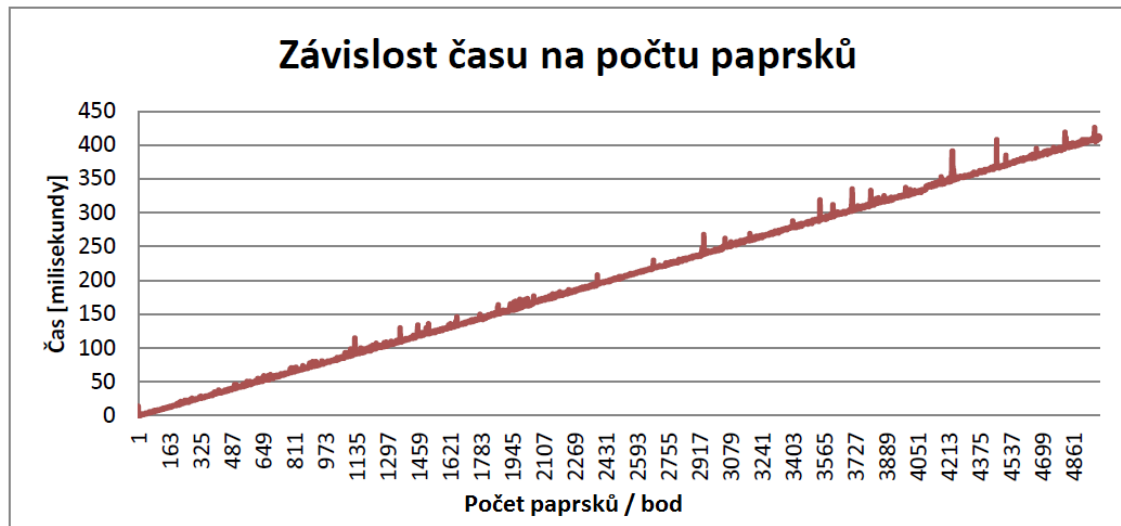


Obr. 6-23 pohledového faktoru metodou Monte Carlo (vzdálenost 3[-])

Z dosažených výsledků zobrazených na grafech Obr. 6-22 a Obr. 6-23 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.

Na obrázku Obr. 6-24 je zobrazena časová závislost počtu paprsků vygenerovaných z deseti bodů vyzařované plochy. Z grafu je znatelná značná časová náročnost tohoto algoritmu, což jej současně s poměrně vysokou nepřesností. Monte

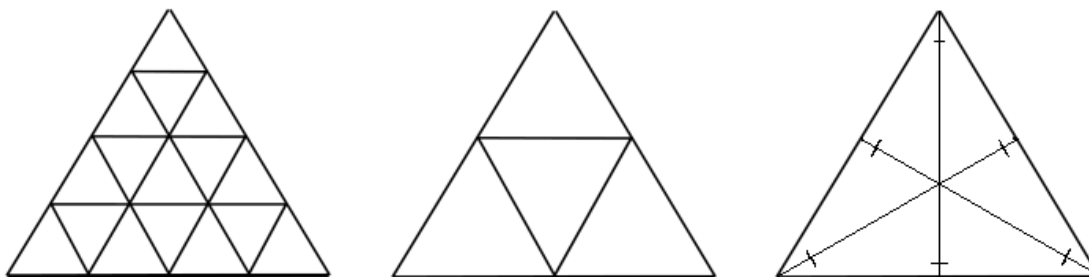
Carlo se tedy jeví jako vhodnější při zkoumání odrazu paprsků, kde nejsou stěžejní pouze hodnoty pohledových faktorů, ale také směr odrazu (zkoumání chování paprsků). Nárůst časové náročnosti má dle očekávání lineární průběh, obsahuje zde však nepatrné výkyvy, které jsou způsobeny přiděleným procesorovým časem pro řešení každého konkrétního výpočtu.



Obr. 6-24 Časová závislost počtu paprsků generovaných z 10 bodů

6.3.3 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 v kapitole 4. Pro porovnání výsledků byl použit stejný model jako při ověřování vhodnosti algoritmu Monte-Carlo v kapitole 6.3.2, kde jsou umístěny dvě čtvercové plochy proti sobě (viz. Obr. 6-21). Měřené hodnoty byly zaznamenány pro různé typy diskretizace pro numerickou integraci. Toto rozdělení je vidět na obrázku Obr. 6-25. 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 [24], kde na každé ose stran trojúhelníka jsou umístěny dva body, poslední sedmý bod je pak umístěn v těžišti trojúhelníku.



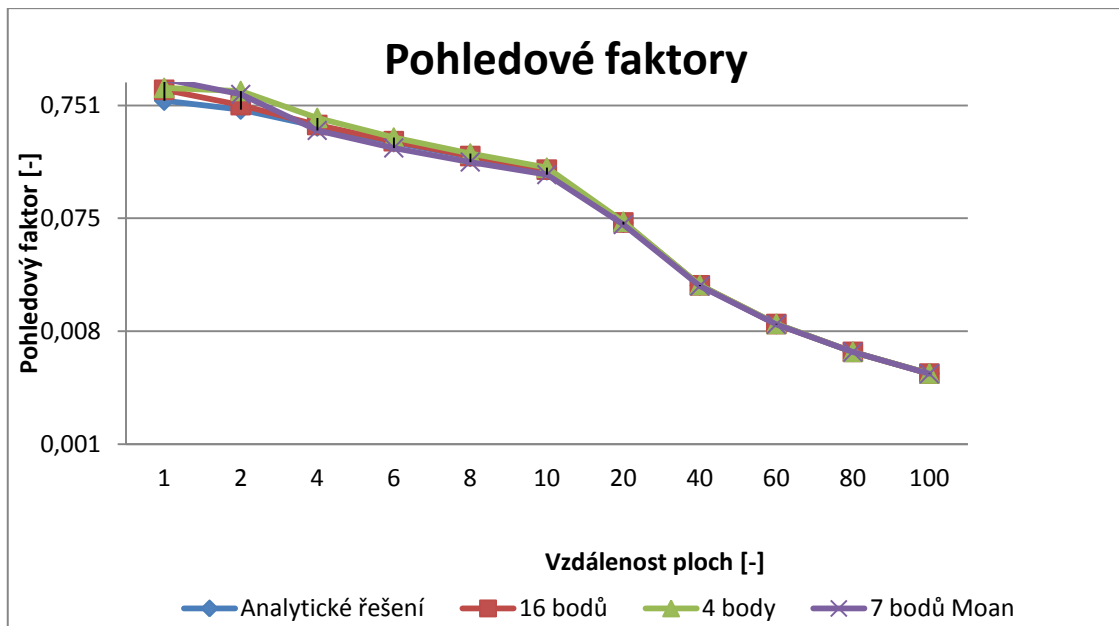
Obr. 6-25 Diskretizace trojúhelníkových prvků pro numerickou integraci

V tabulce Tab. 10 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. 10 Porovnání hodnot pohledového faktoru modelové situace

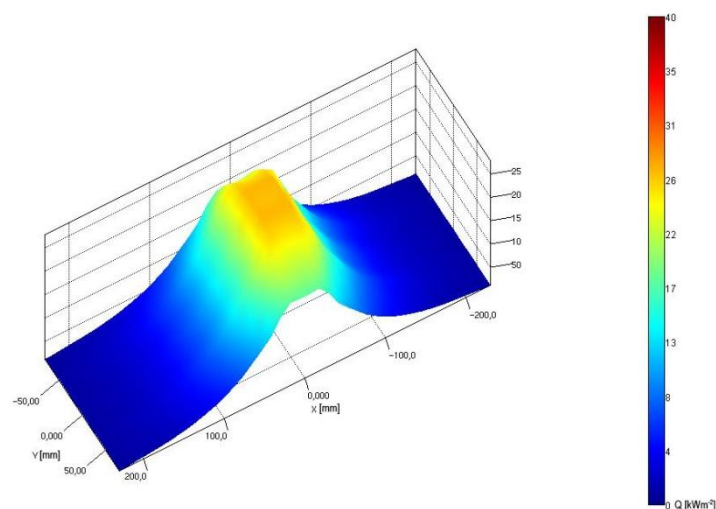
Vzdálenost [-]	Analytické řešení	16 bodů	4 body	7 bodů - Moan
100	0,003162057	0,003162924	0,003165532	0,00315584
80	0,004922461	0,004924556	0,004930862	0,004907457
60	0,008681966	0,008688436	0,008707961	0,008635688
40	0,019106958	0,019137691	0,019231059	0,018887984
20	0,068589589	0,068952708	0,070085254	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. 6-26. 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 [41], který ve své práci představil výpočet pohledového faktoru s použitím adaptivní integrace.

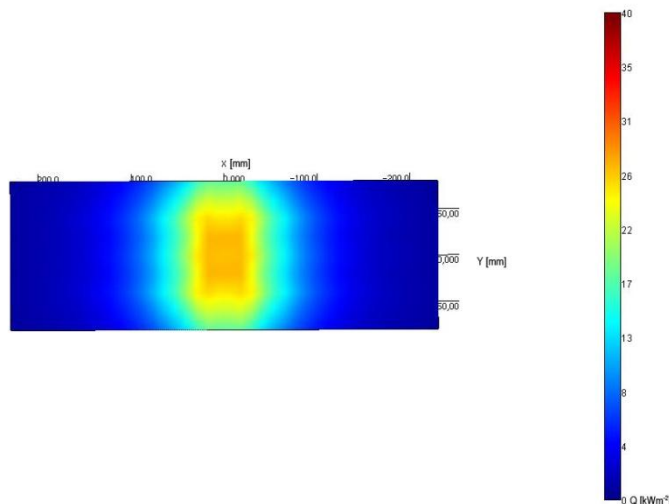


6.4 IRE Plotter

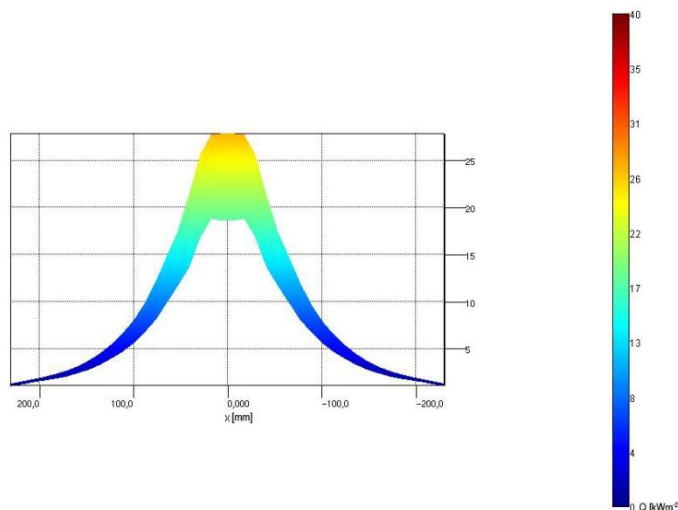
Pro účely vizualizace byla vytvořena aplikace IRE Plotter, která využívá naměřených dat pomocí senzoru intenzity tepelného záření firmy Hukseflux, popsané v kapitole 6.1. Měření bylo provedeno pod jednou čtvrtinou ozařované plochy, jelikož je předpoklad, že rozložení této tepelné stopy bude osově souměrné. Měřené body tvoří pravidelnou obdélníkovou síť. Hodnoty mezi měřeními body jsou proloženy jednoduchou bilineární interpolací. V aplikaci jsou pohledy na prostorový model stopy a je zde nastaven pevný rozsah intenzity záření tak, aby výsledný grafický výstup této aplikace byl jednoduše porovnatelný.



Obr. 6-1 Rozložení tepelného záření reflektoru Phillips ve výšce 100mm – prostorový pohled



Obr. 6-2 Rozložení tepelného záření reflektoru Phillips ve výšce 100mm – pohled shora



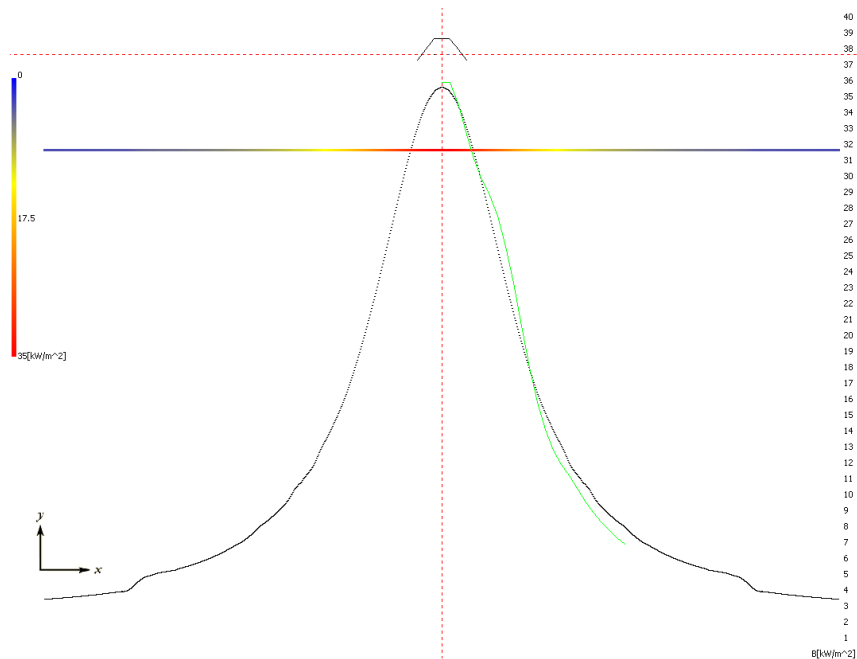
Obr. 6-3 Rozložení tepelného záření reflektoru Phillips ve výšce 100mm pohled z boku

6.5 Kalibrace modelu

Základní kalibrace popisovaného modelu byla provedena v aplikaci s dvourozměrnou implementací modelu přenosu tepelné energie. Na obrázku Obr. 6-27 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.

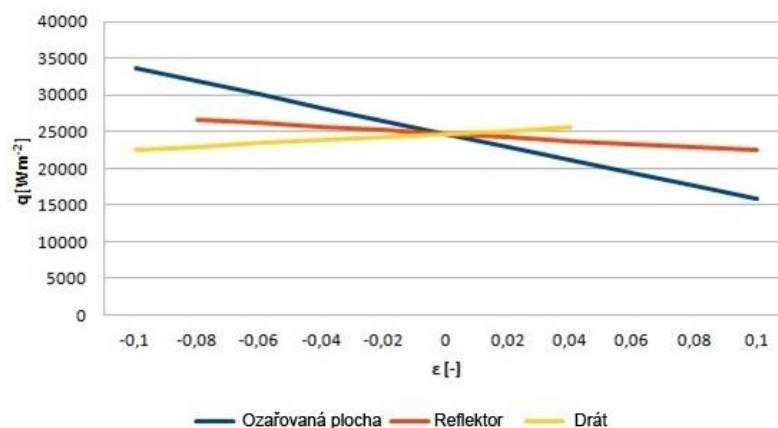


Obr. 6-27 Kalibrace modelu oproti naměřeným hodnotám. Měřené hodnoty jsou zobrazeny zelenou křivkou a simulované hodnoty pak černou křivkou.

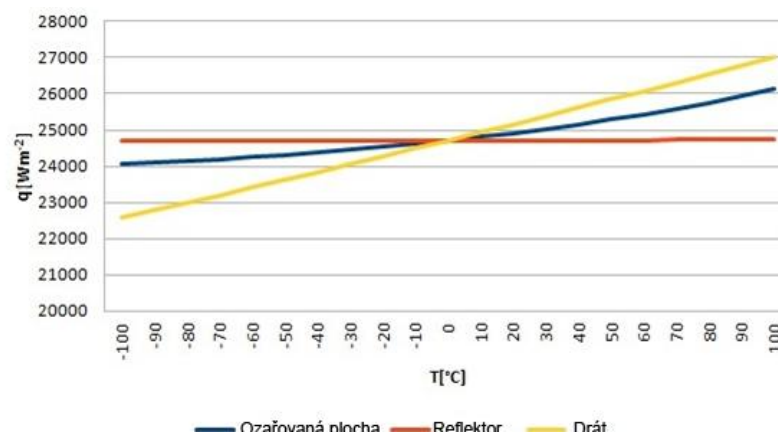
Grafy Obr. 6-28 a Obr. 6-29 zobrazují citlivostní charakteristiku vstupních parametrů – teploty a emisivity, která slouží k nastavení modelu. Na vertikální ose je zobrazena maximální hodnota tepelného toku pro danou simulovanou situaci. Horizontální osa pak zobrazuje posun dané veličiny (emisivita, teplota) 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 této 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. 6-28 Závislost maximální hodnoty tepelného toku na emisivitě jednotlivých elementů modelu



Obr. 6-29 Závislost maximální hodnoty tepelného toku na teplotě jednotlivých elementů modelu

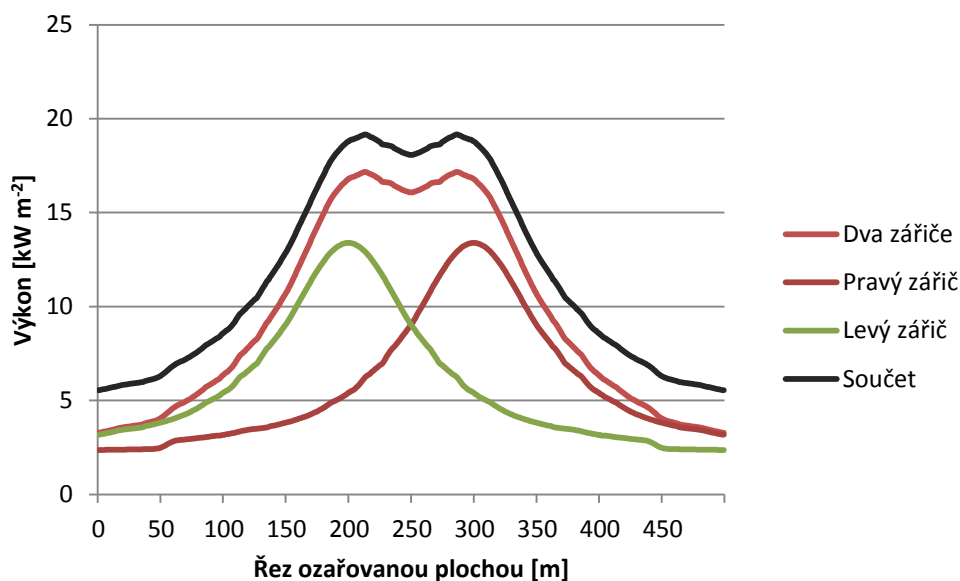
6.6 Tepelné pole při použití více zářičů ve virtuálním ohřevu

Při návrhu modelu přenosu tepla zářením (kapitola 5) 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. 6-30). Bylo vytvořeno několik dílčích simulací (jednotlivé zářiče, oba zářiče).



Obr. 6-30 Plocha ozařovaná dvěma shodnými zářiči

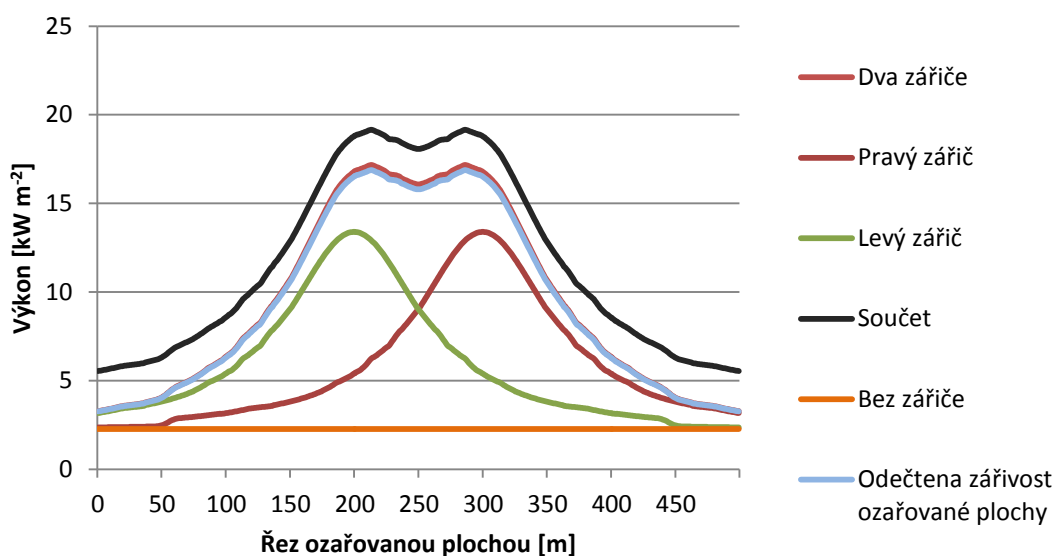
Výsledné charakteristiky provedených simulací (Obr. 6-31) při použití principu superpozice obsahují rozdílné charakteristikami osvitů pro součet jednotlivých zářičů a hodnotu distribuční funkce obou zářičů.



Obr. 6-31 Charakteristiky simulací tepelného toku – ozáření plochy více zářiči

Jak je v grafu vidět, křivky těchto dvou charakteristik jsou téměř shodné, jen posunuté v ose výkonu vyzářené energie. Jak vychází ze Stefan-Bolzmannova zákona (3.5), každé těleso neustále vyzařuje určitou tepelnou energii v závislosti na teplotě a povrchových vlastnostech daného tělesa. Byla tedy vytvořena charakteristika záření,

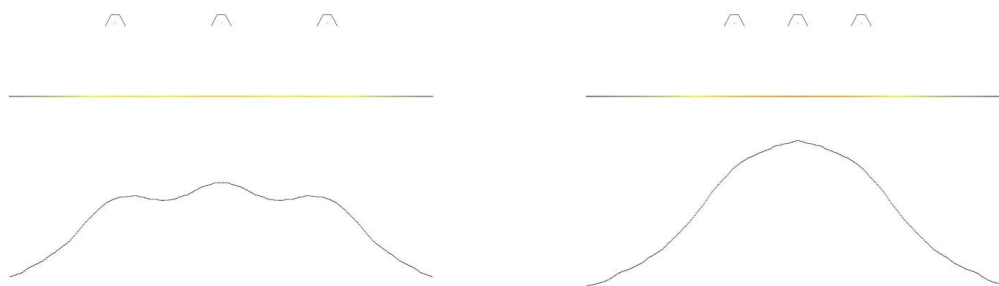
kteřá odpovídá neozařované ploše se stejnými parametry (teplota, emisivita) jako v předchozím případě. Hodnoty odpovídající vlastní zářivosti ozařované plochy byly následně odečteny od hodnot určených prostým součtem. Z grafu na obrázku Obr. 6-32 je pak zřejmé, pro výsledek celkové energie v místě, které ovlivňuje více zářičů, je potřeba uvažovat také vlastnosti ozařované plochy a do výsledné hodnoty tepelného toku tyto hodnoty vhodně započítat.



Obr. 6-32 Ozáření plochy více zářiči - odečtena vlastní zářivost ozařované plochy

Modelové situace pro skládání různých tvarů charakteristik ozáření

V průběhu práce byly uvažovány různé varianty charakteristik tepelného toku. V příloze F 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. 6-33.



Obr. 6-33 Simulace skládání tepelného toku více zářičů

7 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 „směrovat“ 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 ohřívanou 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 jevílo 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] BARHAGHI, Darioush G. a Lars DAVIDSON. Large-eddy simulation of mixed convection-radiation heat transfer in a vertical channel. *International journal of heat and mass transfer*. Oxford: Pergamon Press, 2009, č. 52, s. 3918-3928.
Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793100900204X>
- [2] DE CARVALHO AUGUSTO, Lílian Dobrowolski, Bruno GIACOMET a Nathan MENDES. Numerical method for calculating view factor between two surfaces. In: *Numerical method for calculating view factor between two surfaces* [online]. 2007 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z:
http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2007/p757_final.pdf
- [3] AIT-TALEB, T., A. ABDELBAKI a Z. ZRIKEM. Numerical simulation of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in hollow structures heated from below or above [online]. 2011 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193311000674>
- [4] MARTINEC, Tomáš. Měření teplotních polí pomocí kontaktních metod měření. Liberec, 2009. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] ŠKOLNÍK, Petr. Řízení teplotních polí pomocí ohřevu infračervenými zářiči. Liberec, 2010. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [6] LENAM. Inovace technologie výroby umělých kůží. 2009. Dostupné z:
http://www.lenam.cz/projekty/Ukoly_InovaceSlush_AnP_090922.pdf
- [7] 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.
- [8] THE TPU CENTER. The TPU Center [online]. 2002 [cit. 2011-03-22].
- [9] DVOŘÁK, Tomáš. Teplotní pole v programu ANSYS. Vysoké učení technické v Brně [online]. 2006 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=11543
- [10] 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
- [11] ZÍTEK, Pavel. Simulace dynamických systémů. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990, 418 s. ISBN 80-030-0330-X.
- [12] KŘEMEN, Jaromír. Spojitý dynamický systém a jeho simulace na počítači. Praha: SNTL, 1981. ISBN 04-014-81.

- [13] TONDL, Ladislav a Karel BERKA. Teorie modelů a modelování. Praha: Svoboda, 1967.
- [14] NOVÁK, Vladimír a Pavel ZÍTEK. Praktické metody simulace dynamických systémů. Praha: SNTL, 0982. ISBN 04-017-82.
- [15] VAŠKO, Antonín. Infračervené záření a jeho užití. Praha: Infračervené záření a jeho užití. 1963.
- [16] SIEGEL, Robert a John R HOWELL. Thermal radiation heat transfer. 4th ed. New York: Taylor, 2002, 868 s. ISBN 15-603-2839-8.
- [17] VOJÁČEK, Antonín. Thermopile sensors = radiační pyrometry. V: Automatizace.hw.cz [online]. 2005-10-14 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005101401>
- [18] MIRHOSSEINI, Mojtaba. a Ahmad SABOONCHI. International Communications in Heat and Mass Transfer. International communications in heat and mass transfer [online]. Elmsford: Pergamon Press, 2011, č. 38 [cit. 2012-03-27]. ISSN 0735-1933. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193311000674>
- [19] KraussMaffei Technologies GmbH. Slush moulding machines.[online]. 2007 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: http://www.kraussmaffei.com/en/Divisions/Reaction-Process-Machinery/Systems__769/?itid=171&artikel=33&produkte_finden=1&artikel_finden_button=1
- [20] 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).
- [21] MODEST, Michael F.: Radiative heat transfer 3rd ed. ISBN 01-238-6944-7.
- [22] HOWELL, John R. The Monte Carlo Method in radiative Heat Transfer. Journal of heat transfer. 1997
- [23] WALTON, George N. Calculation of Obstructed View Factors by Adaptive Integration [online]. Dostupné z: <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/NISTIR-6925.pdf>
- [24] 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.

- [25] SCHRODER, Peter a Pat Hanrahan, 1993. A Closed Form Expression for the Form Factor Between Two Polygons. Department of Computer Science, Princeton University, Technical Report CS-404-93.
- [26] MITALAS, G.P. a Donald G. STEPHENSON. 1966. "FORTRAN IV Programs to Calculate Radiant Interchange Factors," National Research Council of Canada, Division of Building Research, Ottawa, Canada, BDR-25.
- [27] HOAYS, H. S., 1990, Fattic: Um programa generalizado para a determinação dos atores de forma em áticos, Encit 1990, Itapema, Santa Catarina, Brasil.
- [28] HOWEL John R., Robert SIEGEL a M. Pinar. Mengüç. Thermal Radiation Heat Transfer, 5th ed. Taylor and Francis, New York, 2010. ISBN 1-4398-0533-4
- [29] MACFARLANE Joseph J. VISRAD - A 3D view factor code and design tool for high energydensity physics experiments, J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer 81 (2003)287.
- [30] WALTON, George N. a John PYE, (2011) View3D, Dostupné z: <http://view3d.sourceforge.net/>
- [31] SHAPIRO, Arthur B. FACET – A radiation view factor computer code for axisymmetric, 2d planar, and 3d geometries with shadowing, Lawrence Livermore National Laboratory Report UCID-19887, 1983.
Online: <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nesc9578/>
- [32] ZEEB, Charles.N., Patrick J. BURNS, Klemens BRANNER a John. S. DOLAGHAN, User's manual for MONT3D—version 2.4, Colorado State University, Fort Collins, CO, 1999.
- [33] MAZUMDER, Sandip a Mahesh RAVISHANKAR. General procedure for calculation of diffuse view factors between arbitrary planar polygons, International journal of Heat Mass Transfer (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.066>
- [34] TESAŘOVÁ, Barbora. Globální optimalizace využitím softwaru Mathematica. [cit. 2013-08-25]. Dostupné z: http://home.pf.jcu.cz/~upvvm/2011/sbornik/clanky/40_UPVM11_Tesarova.pdf
- [35] 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/>
- [36] BIDLO, Michal, Formální model ontogeneze [online]. 2004. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/~meduna/mti/2004_05/bidlom.pdf

- [37] GOSSELIN, Louis, Maxime TYE-GINGRAS a François MATHIEU-POTVIN. Review of utilization of genetic algorithms in heat transfer problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009.
- [38] TVRDÍK, Josef. Stochastické algoritmy pro globální optimalizaci. Ostrava, 2010. [cit. 2013-08-28] Dostupné z: http://www1.osu.cz/~tvrdik/down/files/STAGO_10.pdf
- [39] MLÝNEK, Jaroslav, Tomáš MARTINEC a Radek SRB. Heating of Mould in Manufacture of Artificial Leathers in Automotive Industry. *Mechatronics 2013*. Brno Czech Republic.
- [40] SCHRÖDER, Peter a Pat HANRAHAN. On the Form Factor between Two Polygons. Princeton University, 1993. [cit. 2013-08-20] Dostupné z: <http://www.multires.caltech.edu/pubs/ffpaper.pdf>
- [41] WALTON, George N., Algorithms for Calculating Radiation View Factors Between Plane Convex Polygons With Obstructions, National Bureau of Standards, NBSIR 86-3463 .
- [42] HAYES, Brian. *The Science of Computing: The Wheel of Fortune.*, American Scientist, Vol. 81.
- [43] COHEN, Michael F. a Donald P. GREENBERG. 1985. "The Hemi-Cube - A Radiosity Solution for Complex Environments," *ACM SIGGRAPH*, Vol 19, No 3.
- [44] SHEWCHUK Jonathan R., Triangle: A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator., University of California at Berkeley, 2003. [cit. 2013-10-12] Dostupné z: <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>
- [45] HOLLANDS, Kenneth.G.Terry. Application of parametric surface representation to evaluating form factors and like quantities, Publikováno: *Proceedings of the International Radiation Symposium (Rad-IV)*, Istanbul, Turkey, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1615/ ICHMT.2004.RAD-4.80>
- [46] HOTTEL, Hoyt C. a Adel F. SAROFIM, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York NY. 1967.
- [47] 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
- [48] DAUN, Kyle J. a Kenneth.G.Terry HOLLANDS. Infinitesimal-area radiative analysis using parametric surfaces through NURBS, *J. Heat Transfer* 123 (2001), str. 249-256

- [49] GLASS, M.W. 2001. "CHAPARRAL v2.x: A Library for Solving Enclosure Radiation Heat Transfer Problems" (draft), Sandia National Laboratories.
- [50] ABRAMOWITZ, Milton a Irene A. STEGUN. Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York, 1965.
- [51] FENECH Henri J. Heat Transfer and Fluid Flow in Nuclear Systems, Pergamon Press, Inc., Elmsford, New York, 1981.
- [52] RICHARDS, Galen H., John.N.HARB, Larry L.BAXTER, Sankar P. BHATTACHARYA, Rajender P. GUPTA a Terry F. Wall. Radiative heat transfer in pulverized-coal-fired boilers—Development of the absorptive/reflective character of initial ash deposits, Symposium (International) on Combustion, Volume 25, Issue 1, 1994, Pages 511-518, ISSN 0082-0784, [http://dx.doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80680-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80680-6).
- [53] MANABE, Syukuro a Fritz MÖLLER. On the Radiative Equilibrium and Heat Balance of the Atmosphere. Publikováno: Monthly Weather Review, vol. 89, issue 12, p. 503
- [54] J. T. BEVANS a D. K. EDWARDS. Effect of polarization on spacecraft radiation heat transfer, AIAA Journal, Vol. 3, No. 7 (1965), pp. 1323-1329. doi: 10.2514/3.3131
- [55] DUFFIE, John A a William A. BECKMAN. Solar engineering of thermal processes. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2013, xxvi, 910 p. ISBN 978-0-470-87366-3.

Publikační činnost

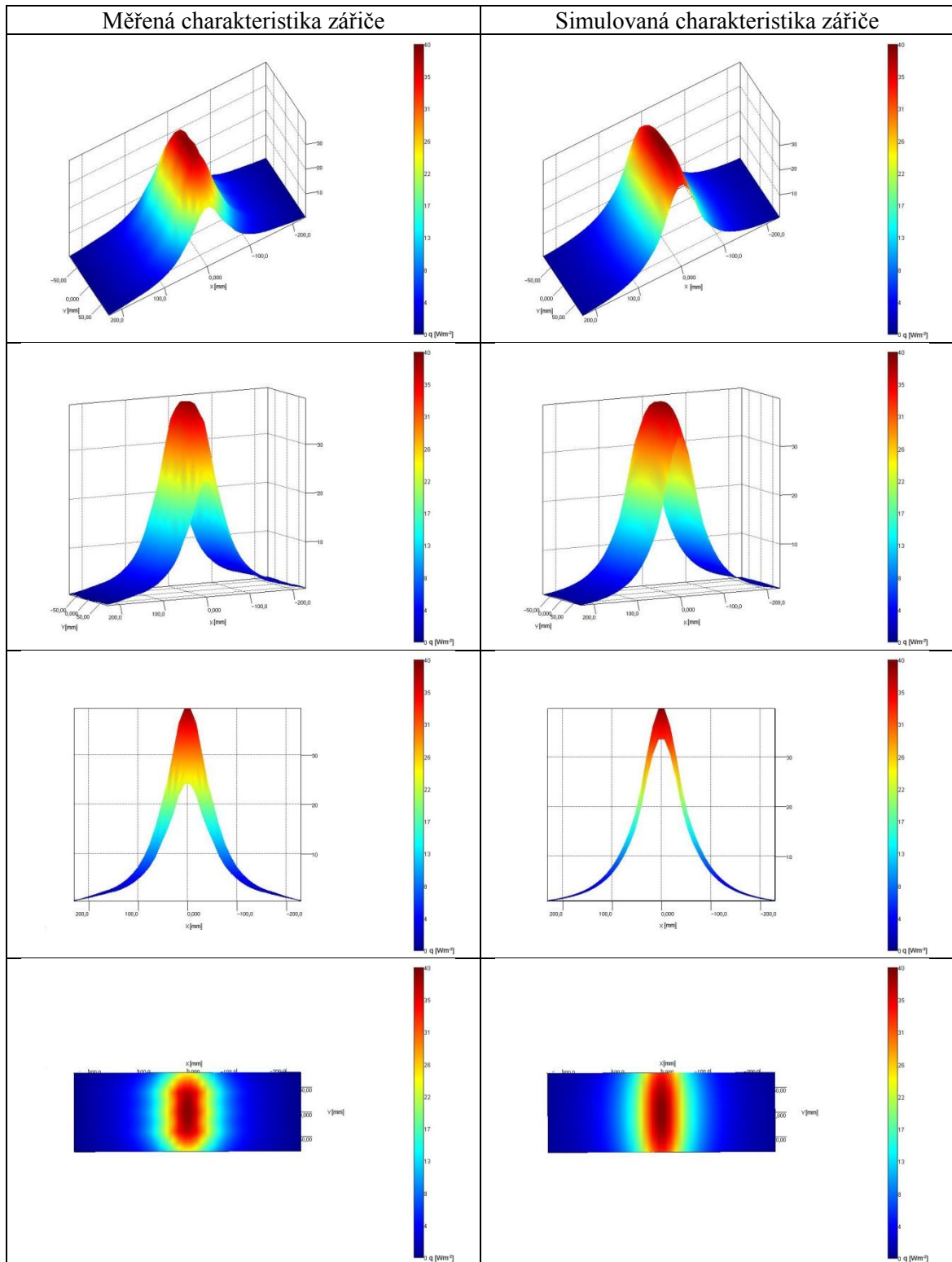
Práce související s tématem disertační práce

- [56] 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.
- [57] 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, ISBN 978-94-007-5124-8
- [58] 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
- [59] 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
- [60] 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.

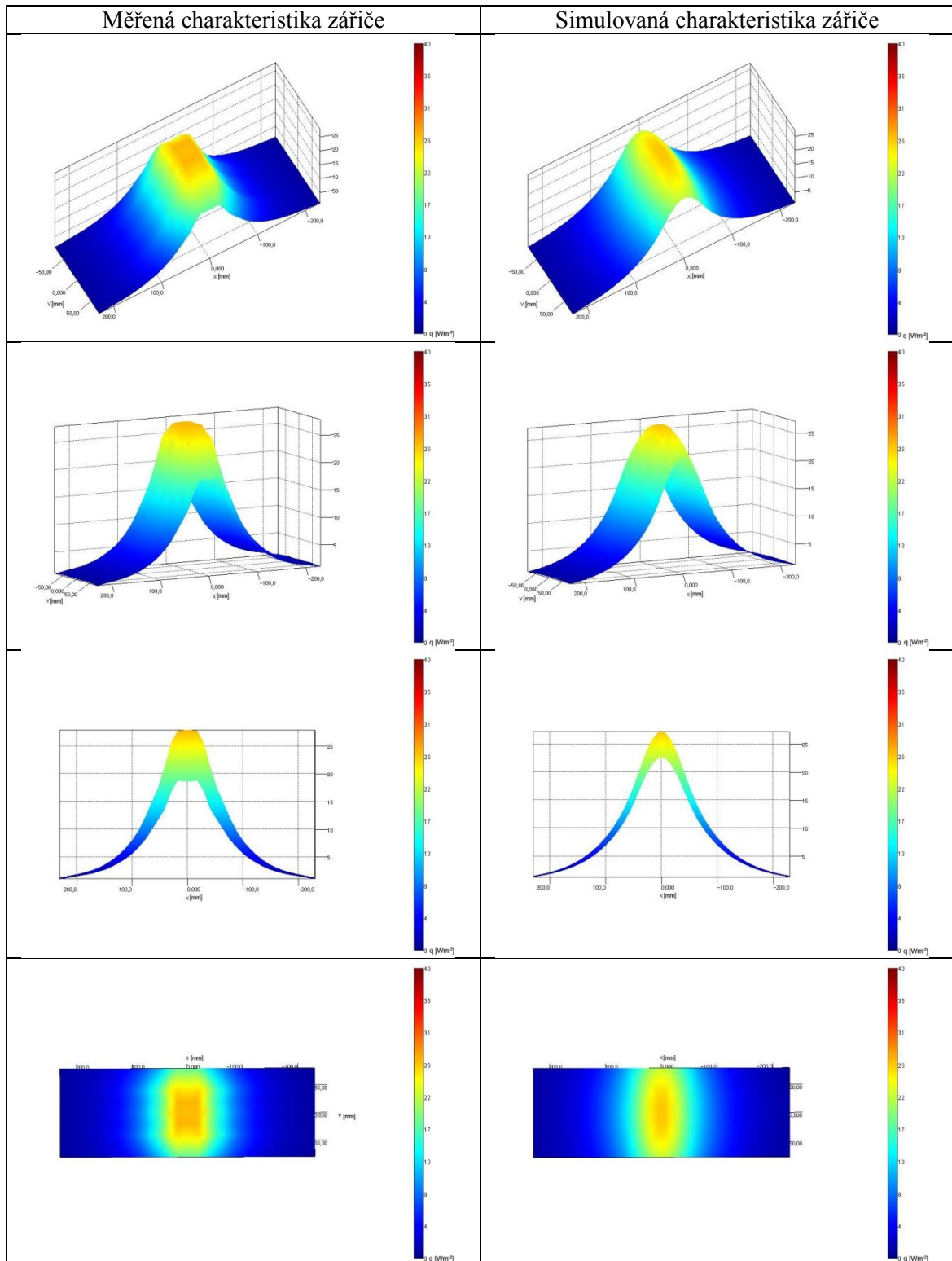
Další práce autora

- [61] LOUFEK, Jan. Systém správy sítě s využitím SNMP. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. 2007.
- [62] LOUFEK, Jan. Zásuvný modul pro matching ontologií v systému Protégé. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. 2009.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.

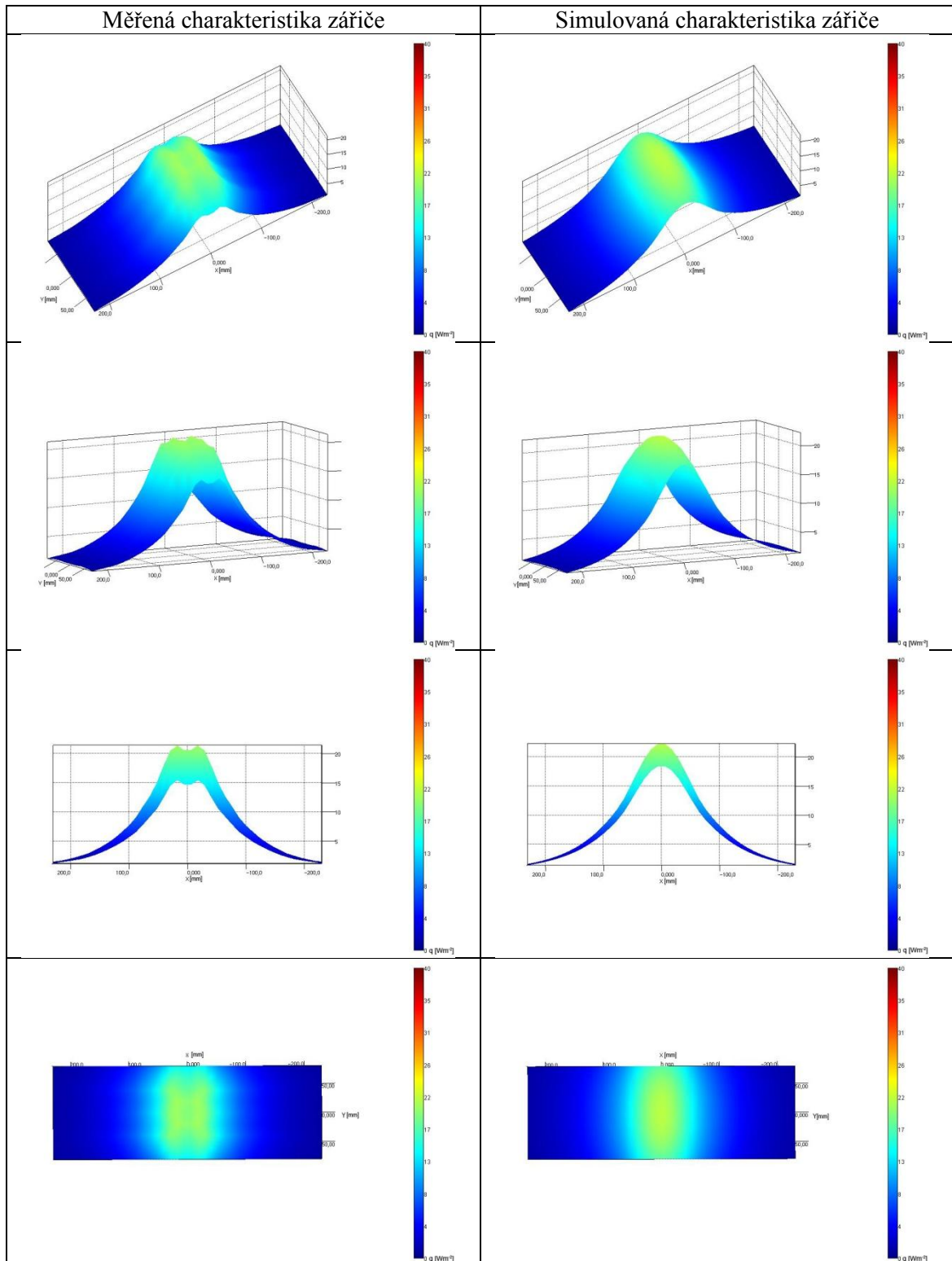
Přílohy

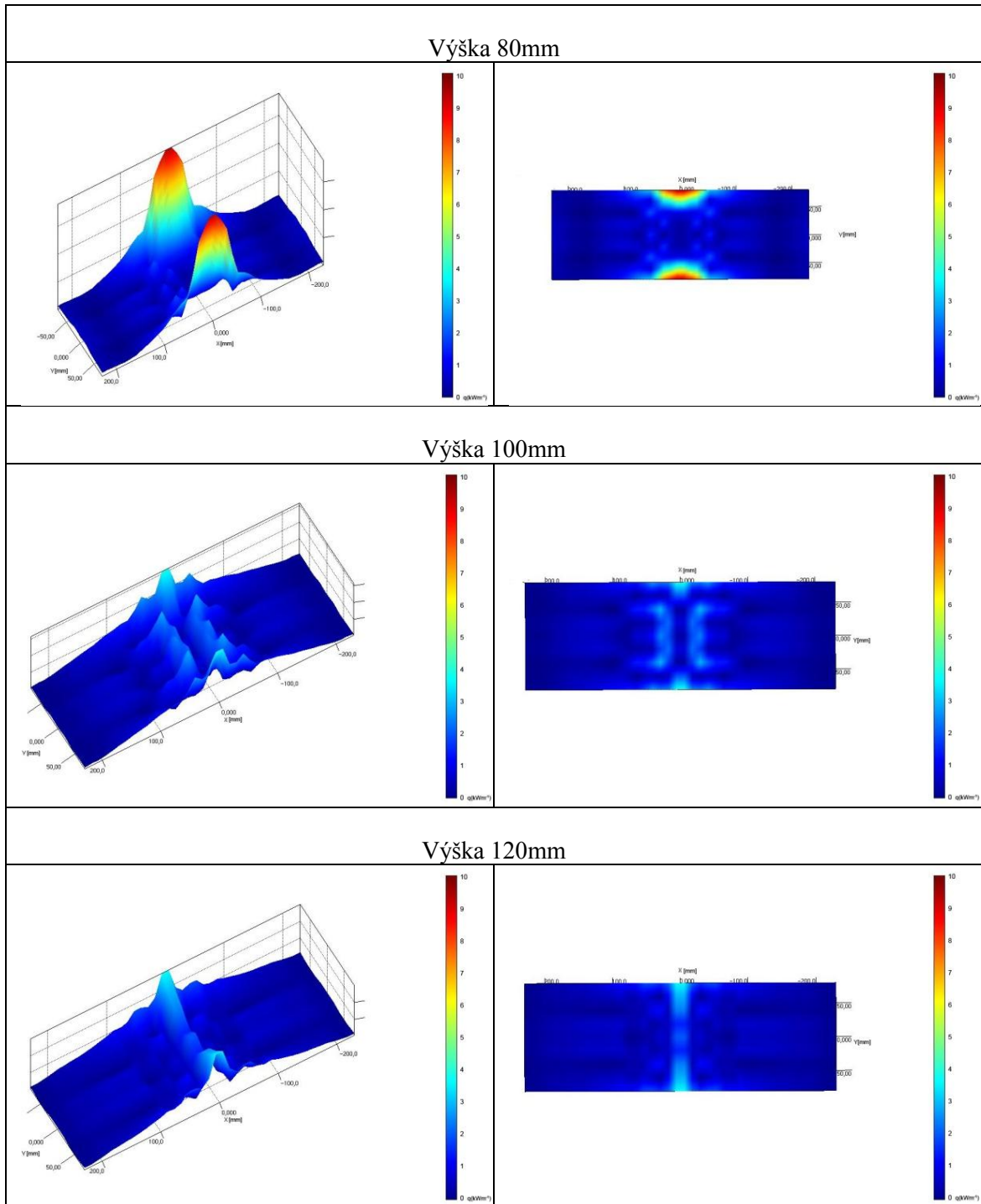
A: Porovnání měřené a simulované charakteristiky zářiče umístěného ve výšce 80mm nad rovinnou plochou

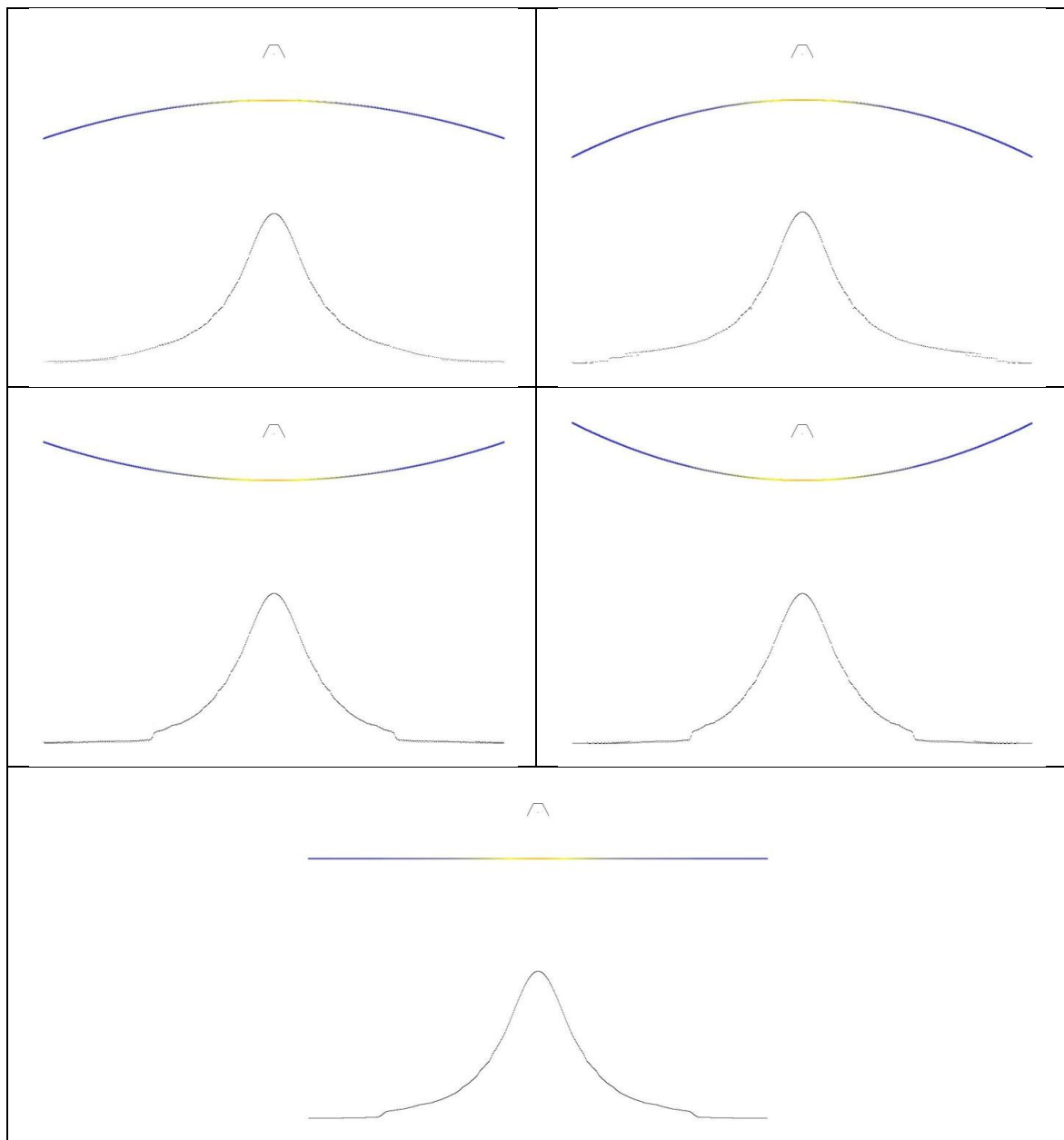
B: Porovnání měřené a simulované charakteristiky zářiče umístěného ve výšce 100mm nad rovinnou plochou



C: Porovnání měřené a simulované charakteristiky zářiče umístěného ve výšce 120mm nad rovinnou plochou



D: Rozdíl tepelného toku mezi měřenou a simulovanou charakteristikou

E: Simulované charakteristiky pro různě zakřivené ozařované plochy

F: Modelové situace se třemi zářiči s případovými charakteristikami ozáření (obdélníková, Gaussova, lichoběžníková a trojúhelníková funkce)

