

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 609

ISSN 1213-418X

Michal Pohanka

**ROZVOJ INVERZNÍCH METOD
VEDENÍ TEPLA
A JEJICH APLIKACE**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Laboratoř přenosu tepla a proudění

Ing. Michal Pohanka, Ph.D.

**ROZVOJ INVERZNÍCH METOD VEDENÍ TEPLA
A JEJICH APLIKACE**

**DEVELOPMENT OF INVERSE HEAT TRANSFER METHODS
AND THEIR APPLICATIONS**

**ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU
APLIKOVANÁ MECHANIKA**



BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Inverzní úloha, přenos tepla, tepelné zpracování, ocel, odkujování, teplota

KEYWORDS

Inverse task, heat transfer, heat treatment, steel, descaling, temperature

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Laboratoř přenosu tepla a proudění

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2

616 69 Brno

© Michal Pohanka, 2018

ISBN 978-80-214-5666-2

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD.....	5
1.1 Motivace a cíle práce	5
2 ROZVOJ INVERZNÍCH METOD VEDENÍ TEPLA.....	6
2.1 Sekvenční identifikace pro výpočet časově proměnných okrajových podmínek	6
2.1.1 Princip udržování časově závislých okrajových podmínek.....	7
2.1.2 Sekvenční identifikace – obecná inverzní metoda pro výpočty časově proměnných okrajových podmínek	8
2.1.3 Problematika počtu dopředných kroků v sekvenčních inverzních metodách.....	11
2.2 Způsob a zařízení ke stanovení polohy teplotního čidla	17
2.3 Vývoj inverzní sub-doménové metody pro výpočet okrajových podmínek vedení tepla..	26
2.3.1 Celodoménová metoda s regularizací.....	26
2.3.2 Sekvenční metoda s regularizací.....	28
2.3.3 Porovnání celodoménové a sekvenční metody.....	29
2.3.4 Sub-doménová metoda	30
2.4 Inverzní úloha pro stanovení termofyzikálních vlastností okují na substrátu za zvýšených teplot	34
2.5 Využití paralelizace na grafických kartách	34
3 APLIKACE INVERZNÍCH METOD VEDENÍ TEPLA	34
3.1 Kontinuální tepelné zpracování	34
3.2 Efekt nehomogenního chlazení na výslednou mikrostrukturu oceli	34
3.3 Přechlazení v místě překryvu vodních paprsků během hydraulického odstraňování okují	35
3.4 Efekt rychlosti pohybu povrchu a impaktního tlaku na chlazení při odkujení	35
3.5 Vliv teploty vody na intenzitu chlazení při hydraulickém odstraňování okují	35
4 ZÁVĚR.....	36
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	37
ABSTRACT	39

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Autor vystudoval obor Mechatroniky na VUT v Brně a v dizertační práci na téma Inverzní úlohy mechaniky s vazbou na technický experiment, se již aktivně zabýval problematikou inverzních úloh vedení tepla. Již v roce 2001 působil na The University of Alabama v USA během osmiměsíční stáže na projektu pro získávání parametrů pro odlévání



Al-Be slitin s využitím inverzních metod. Je autorem výpočetního SW pro německého výrobce trysek Lechler GmbH, který s využitím numerických modelů simuluje chlazení v provalcích a pracovních válcích během kontinuálního zpracování oceli. Účastnil se řady domácích i evropských projektů (GAČR, TAČR, COST, RFCS), přičemž některé z nich koordinoval za VUT v Brně. Podílí se na výzkumných projektech pro průmyslové partnery, kde například už od roku 2012 koordinuje dlouholetou spolupráci s korejskou firmou POSCO. Vede a provádí laboratorní měření v oblasti chlazení a odkujování se zaměřením na hutnický průmysl. Autor aktivně publikuje, v databázi Thomson Reuters má 25 publikací (z toho 12 v impaktovaných časopisech), které jsou 72 krát citovány (h-index = 6). V databázi Scopus má 33 publikací, které jsou 116 krát

citovány (h-index = 7). Je také autorem jednoho národního patentu a vypracoval 30 posudků pro veřejné soutěže ve VaVaI.

Autor se také dlouhodobě zabývá problematikou hydraulického odstraňování okujů při výrobě a zpracování oceli. Na toto téma opublikoval celou řadu publikací, aktivně spolupracuje s předními výrobci trysek jako např. Spraying Systems Co., Lechler GmbH, Delavan Spray Technologies, a dále pak pracoval na řadě výzkumných projektech týkajících se touto problematikou s průmyslovými partnery např. POSCO, ArcelorMittal, Tata Steel. V neposlední řadě se účastnil evropského projektu "High performance hot rolling process through steel grade-dependent influencing of the scale formation and flexible descaling control" sponzorovaného z "Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel", který je také zaměřen na problematiku hydraulického odstraňování okujů. Autor habilitační práce koordinoval tu část projektu, která byla řešena na VUT v Brně. Během tohoto projektu také aktivně spolupracoval s Ústavem geoniky AV ČR na vývoji nového typu hydrodynamické trysky určené pro hydraulické odstraňování okujů. Autor je také členem organizačního výboru mezinárodní konference Oxi2018 v Londýně, která se pořádá na toto téma.

Získané znalosti autor předává také studentům a to jak v bakalářském a magisterském studiu, tak i v doktorském studiu. Autor úspěšně vedl tři diplomové práce, jednu bakalářskou práci a byl také školitelem specialistou u pěti úspěšně obhájených doktorských prací. Nyní úspěšně vede studentku doktorského studia, která má doktorskou práci téměř dokončenou.

1 ÚVOD

Habilitační práce obsahuje přehled výsledků autorovi práce získaných v letech 2008–2018. Převážná většina byla publikována v článcích, jeden byl patentovaný a zbylé jsou obsahem smluvního výzkumu pro průmyslové partnery nebo grantových projektů. Práce se zaměřuje zejména na inverzní úlohy vedení tepla a jejich využití v hutním průmyslu.

Přestože výpočet přenosu tepla dosáhl vysoké úrovně a může být velmi užitečný v mnoha strojírenských a průmyslových aplikacích, stále je zapotřebí komplexního výzkumu v oblasti přenosu tepla, kde se setkáváme s modelováním dvoufázového proudění. V této práci je pozornost zaměřena na hledání okrajových podmínek popisujících přenos tepla v technických aplikacích při chlazení oceli a to i pro velmi vysoké teploty chlazeného povrchu. Podle teploty chlazeného materiálu probíhají na povrchu velmi odlišné způsoby chlazení. Nejlépe popsáný přenos tepla je pro nízké povrchové teploty, kde dochází ke smáčení povrchu a chladicí kapalina proudí po povrchu. Pro vyšší teploty ale začne docházet na povrchu k varu, který vede k velmi intenzivnímu odvodu tepla. Při dalším zvyšování povrchové teploty přestává kapalina postupně smáčet povrch a začne se vytvářet parní vrstva, která začne oddělovat kapalinu od chlazeného povrchu. Pro velmi vysoké teploty je parní vrstva natolik silná, že se kapalina nedostane do kontaktu s povrchem v kapalném stavu. Intenzita chlazení je závislá na mnoha parametrech, jako jsou např. teplota, drsnost a smáčivost povrchu, teplota, velikost a rychlost kapek, rychlost pohybu povrchu a doba v chladicí sekci. Jedná se tedy o velmi komplexní problematiku. Typickými průmyslovými aplikacemi jsou sekundární chlazení při kontinuálním odlévání kovů, odkujování, tepelné zpracování, válcování za tepla a za studena, kde se setkáváme s komplexním dvoufázovým prouděním na povrchu voda-vzduch.

Numerické modely pro návrh a řízení v metalurgickém průmyslu vyžadují přesný popis přenosu tepla na povrchu chlazeného tělesa. Komplexní informace o přenosu tepla nejsou doposud k dispozici pro chlazení horkých pohyblivých ploch pomocí vodních sprejů nebo laminárních proudů. Proto je nutné potřebné okrajové podmínky získat experimentálně, což vede při vyhodnocování k řešení špatně podmíněných inverzních úloh vedení tepla.

Inverzní úloha vedení tepla je obtížná zejména kvůli vysoké citlivosti na chyby měření. V přímé nestacionární úloze, kde se počítají teploty uvnitř tělesa, dochází k útlumu výchylek okrajových podmínek, kdežto u inverzní úlohy je tomu naopak. Šum v zaznamenané teplotní historii měřené uvnitř tělesa vede při výpočtu okrajových podmínek ke značnému zesílení a často dochází až k divergenci výpočtu. Proto je potřeba zavádět různé typy regularizace, či jiné způsoby stabilizací, které často vedou k velmi náročným výpočtům.

V nestacionární přímé úloze vedení tepla, která se používá při simulacích a v on-line řízení, se na základě známých okrajových podmínek, geometrie, materiálových vlastností a známého počátečního rozložení teplot počítá rozložení teplot jako funkce času. V inverzní úloze, kterou se budeme zejména zabývat, se na základě změřeného průběhu teplot v jednom nebo ve více bodech uvnitř tělesa vypočítá časový průběh okrajových podmínek. Výhodou tohoto přístupu oproti měření přímo povrchové teploty je ten, že se nezmění parametry povrchu instalací povrchového čidla. Mimo to existují ještě další tři typy inverzních úloh: určení materiálových vlastností z naměřených průběhů teplot, určení geometrie tělesa a určení počátečních teplot.

1.1 MOTIVACE A CÍLE PRÁCE

Habilitační práce se zaměřuje na určování okrajových podmínek při různých typech chlazení při použití dvoufázového proudění voda-vzduch s využitím experimentálních technik. Tato problematika je spojena s nutností řešení dalších typů inverzních úloh, jako je určování vnitřní geometrie či materiálových vlastností. Jedná se tak o komplexní problematiku zahrnující řešení několika dílčích úkolů. Zvládnutí, zoptimalizování a vylepšení této problematiky umožní získání přesnějších okrajových podmínek, lepšímu pochopení chlazení pomocí dvoufázového média

voda-vzduch, přesnějším simulacím výrobních procesu a následně k jejich lepší optimalizaci a to jak z hlediska produktivity, tak z hlediska kvality, či energetické a materiální náročnosti.

Inverzní výpočty jsou většinou také velmi časově náročné. Proto je pozornost zaměřena také na akceleraci výpočtů např. s využitím výkonných grafických karet. Nově získané poznatky mohou být také využity v on-line řízení, kde je kladen velký požadavek na rychlost výpočtu. Rychlejší výpočty umožní v omezeném čase zpracovat detailnější modely, prozkoumat větší množinu předpokládaných situací a zoptimalizovat tak lépe výrobu, či efektivněji reagovat na výjimečné či havarijní stavy.

To vše by mělo ve výsledku vést k možnostem lepšího zefektivnění průmyslových aplikací, k vyšší produktivitě nejen hutního průmyslu, úspoře energie a nerostných surovin. Výsledky shrnuté v této habilitační práci by tak měli přispět k celkovému zlepšení v průmyslu tak i ke snížení dopadu průmyslové výroby na životní prostředí.

2 ROZVOJ INVERZNÍCH METOD VEDENÍ TEPLA

V této kapitole jsou popsány nové přístupy při řešení tří typů inverzních úloh, kde všechna jsou navázána na experimentální měření. Největší část se zabývá inverzní úlohou, kde se na základě změřené teplotní historie počítají okrajové podmínky, které jsou proměnné v čase. Jsou zde popsány dva nové přístupy, kdy první se zaměřuje na případy, kdy je pomocí inverzní úlohy nutné počítat přímo součinitel přestupu tepla. Druhý se pak zaměřuje na případy, kdy se zkoumají velmi dynamické okrajové podmínky a přitom se jedná o dlouhé záznamy dat. Na tyto přístupy navazuje patentovaný přístup pro určení vnitřní geometrie zabudovaných teplotních čidel v tělese a nový přístup při zabudovávání teplotních senzorů do zkoumaných těles s využitím průmyslové tomografie. Posledním typem nové inverzní úlohy popsané v této kapitole je určování termofyzikálních vlastností oxidických vrstev na povrchu oceli bez nutnosti oddělovat tuto vrstvu od substrátu. Protože se všechny tyto úlohy vyznačují velkou výpočtovou náročností, věnuje se poslední kapitola akceleraci výpočtů vedení tepla na grafických kartách.

2.1 SEKVENČNÍ IDENTIFIKACE PRO VÝPOČET ČASOVĚ PROMĚNNÝCH OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Efektivní, přesné a stabilní numerické metody pro řešení inverzních problémů přenosu tepla mají velký význam v mnoha aplikacích. Tyto výpočtové metody jsou často doplňkem experimentálního výzkumu. Přestože výpočet přenosu tepla dosáhl určité úrovně a může být velmi užitečný v mnoha strojírenských a průmyslových aplikacích, je stále potřebný komplexní výzkum při určování okrajových podmínek, zejména součinitele přestupu tepla. Situace na povrchu je často nevhodná pro instalaci snímače přímo na zkoumaný povrch. Velmi často je snazší měřit teplotu jako funkci času uvnitř zkoumaného tělesa. Když se okrajové podmínky mají určit ze zaznamenaného průběhu teplot v jednom nebo v několika bodech zkoumaného tělesa, je nutné použít inverzní úlohu vedení tepla. Při měření je impuls na povrchu tělesa rozptýlen v zaznamenaných datech v časovém směru. Když porovnáme obtížnost přímého problému a inverzní úlohu, je mnohem obtížnější vyřešit inverzní úlohu. Tyto úlohy jsou extrémně citlivé na chyby měření a malá chyba ve vstupních datech způsobuje obvykle velké chyby ve výsledcích.

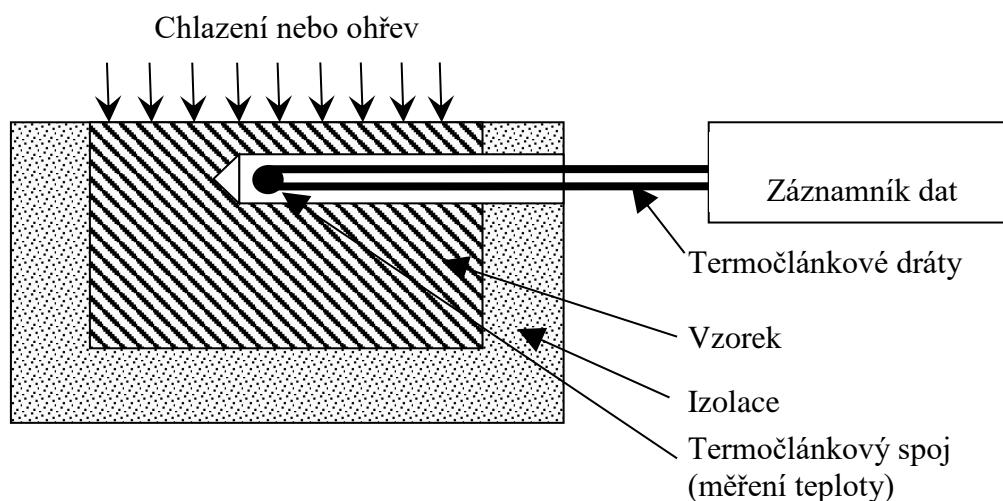
Pro řešení tohoto typu inverzních úloh byly publikovány mnohé techniky, ovšem žádné z nich nejsou zcela obecně použitelné a to buď z důvodu daných předpokladů, za kterých byly formulovány, nebo pro jejich velkou výpočtovou náročnost. Pro snížení citlivosti špatně podmíněných problémů na chyby měření zavedl Tikhonov metodu regularizace [1]. Techniky dekompozice jedné hodnoty [2] jsou matematické techniky pro řešení soustavy špatně podmíněných algebraických rovnic, které mohou být také použity pro inverzní úlohy vedení tepla. Přístup používající Duhamelovu větu, která je ovšem omezena na problémy popsané soustavou lineárních rovnic, je možné také použít [3]. Některé techniky používají Laplaceovy transformace,

ale ty jsou také omezeny pouze na lineární soustavy [4]. Numerické postupy, u nichž je použito konečných diferencí [5] nebo konečných prvků [6], jsou využívány v inverzních úlohách, kvůli jejich schopnosti řešit složité systémy. Fourierova regularizační metoda byla porovnána se zjednodušenou Tikhonovovou metodou na obecné parabolické rovnici Fudem [7]. Metoda Downhill Simplex byla úspěšně použita pro řešení dvourozměrného inverzního problému pro výpočet součinitelů přestupu tepla při přesném odlévání hliníku [8]. Kombinovaný přístup, který používá sekvenční přístup a aproximaci pomocí funkce, je popsán v [9]. Metody umělé inteligence jako je genetický algoritmus [10] a neuronové sítě [11], [12] byly také úspěšně použity k výpočtu okrajových podmínek z naměřeného průběhu teploty v blízkosti povrchu. Liu řešil nelineární parabolické parciální diferenciální rovnice pomocí identifikace koeficientů [13]. Numerický algoritmus založený na metodě prediktor-korektor byl popsán a testován Dengem [14].

Pro měření, kde instalovaný termočlánek uvnitř vyšetřovaného tělesa může narušovat homogenitu povrchové teploty, protože je velmi blízko zkoumaného povrchu a kde je povrchová teplota blízká teplotě chladicí vody, musí být součinitel přestupu tepla vypočítán přímo inverzní metodou. Studium intenzity chlazení během technologie válcování za studena a za tepla [15], [16] je jednou z typických aplikací, kdy je zapotřebí inverzní výpočet součinitelů přestupu tepla na povrchu z naměřené teploty v chladícím těle. Klasický a velmi účinný sekvenční přístup s využitím regularizace navržený Beckem [17], který počítá tepelný tok namísto součinitele přestupu tepla, nelze v tomto případě použít z důvodu různorodé povrchové teploty způsobené zabudováním teplotního čidla do zkoumaného tělesa. Proto byla vyvinuta nová metoda založená na Sekvenční identifikaci [18], která může být použita pro řešení těchto problémů.

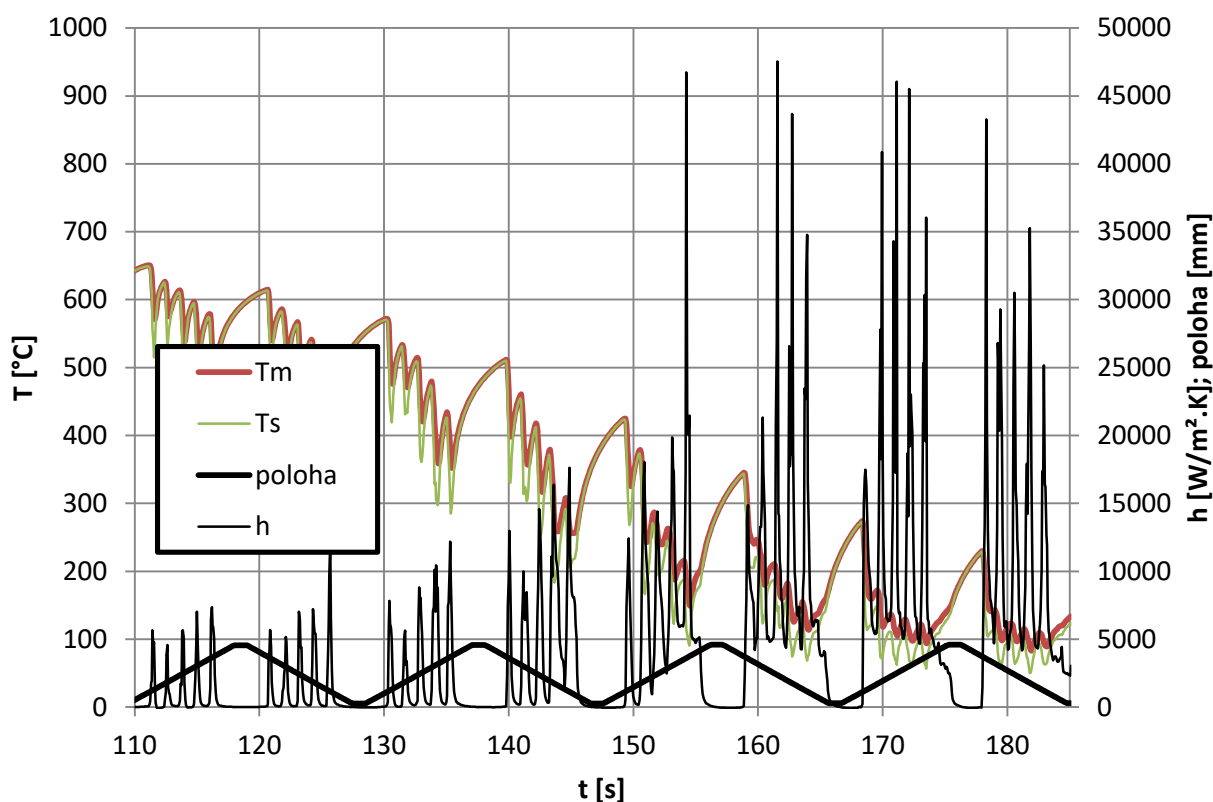
2.1.1 Princip udržování časově závislých okrajových podmínek

Pro zjednodušení bude uvažováno tuhé těleso, které má na počátku konstantní nebo jiné známé rozložení teploty. Termofyzikální materiálové vlastnosti (obvykle teplotně závislé) a geometrie je také známa. Jeden povrch je ochlazován nebo ohříván a ostatní jsou izolovány (viz obr. 1). Intenzita chlazení nebo ohřevu může být proměnná v čase. Termočlánek je instalován v blízkosti chlazeného/ohřívajícího povrchu uvnitř pevného materiálu. Termočlánek měří teplotní odezvu na změnu okrajových podmínek a historie teploty se zaznamenává pomocí systému pro přesný záznam dat. Časově proměnné okrajové podmínky (tepelný tok, součinitel přestupu tepla a povrchová teplota) jsou vypočteny pomocí inverzního výpočtu z naměřeného záznamu teploty. Příklad z reálného měření je znázorněn na obr. 2, kde byl vzorek vystaven chlazení, které bylo proměnné v čase.



Obr. 1 Chlazený nebo ohřátý vzorek s nainstalovaným termočlánekem

Neizolovaný povrch vzorku by měl být dostatečně malý, bylo možné předpokládat, že intenzita chlazení nebo ohřevu je stejná na celém neizolovaném povrchu. Pokud bude zkoumáno více ploch nebo pokud intenzita chlazení / ohřevu není homogenní na povrchu, musí se použít více termočlánků a inverzní úloha se stává obtížnější – mluvíme o vícerozměrném inverzním problému.



Obr. 2 Příklad změřené teploty T_m pod chlazeným povrchem; vypočítané povrchové teploty T_s a vypočítaného součinitele přestupu tepla h . V grafu je také zaznamenána poloha chlazené desky (teplotního čidla) vůči chladicí sekci.

2.1.2 Sekvenční identifikace – obecná inverzní metoda pro výpočty časově proměnných okrajových podmínek

Tento nově navržený přístup počítá součinitele přestupu tepla krok za krokem (časový krok) na zkoumaném povrchu s využitím naměřené teploty v chlazeném nebo ohřívaném pevném tělese. Tato metoda však může být velmi snadno změněna, aby bylo možné vypočítat jakýkoli druh okrajových podmínek, např. hustotu tepelného toku. Metoda je založena na postupném odhadu časově proměnných okrajových podmínek a využívá data z následujících časových kroků k stabilizaci špatně podmíněného inverzního výpočtu [19]. K určení součinitele přestupu tepla v konkrétním čase t_m jsou naměřené teplotní odezvy T_m porovnávány s vypočítanou teplotou T^* z přímého výpočtu vedení tepla pomocí n dopředných časových kroků

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+n} (T_i^* - T_{m_i})^2. \quad (1)$$

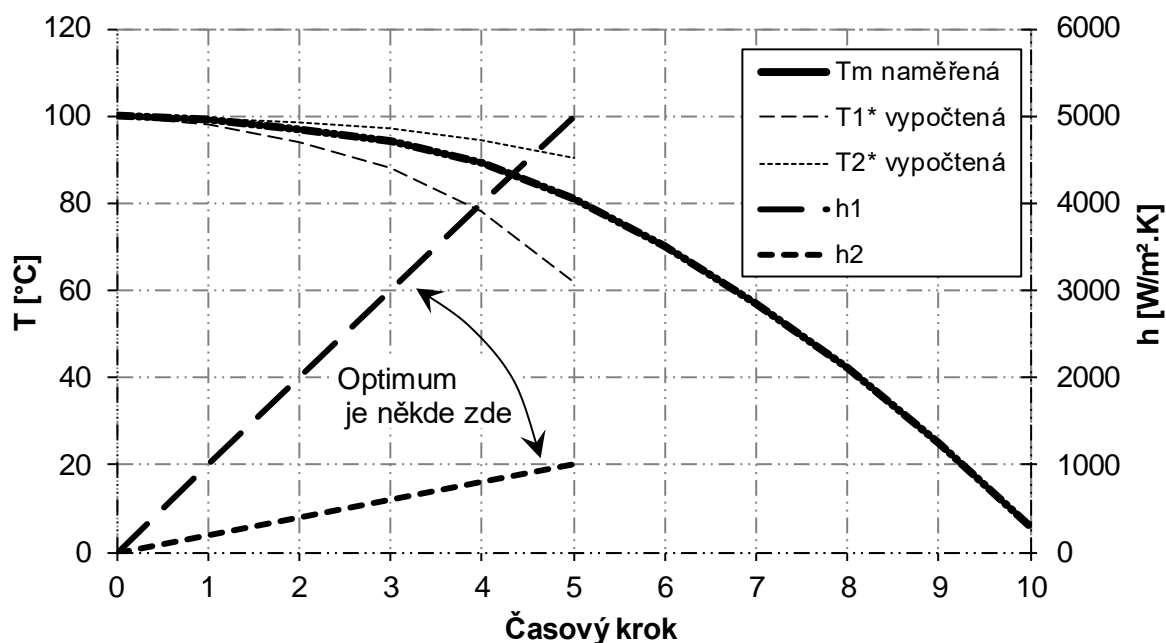
Může být použit jakýkoli přímý výpočet vedení tepla např. metoda konečných objemů popsaná Patankarem [20]. Výpočtový model by měl zahrnovat vrtaný otvor, celou vnitřní strukturu vloženého termočlánku a teplotně závislé materiálové vlastnosti.

Na počátku, kdy je ve vzorku homogenní teplota, je předpokládán nulový tepelný tok a tudíž i nulový součinitel přestupu tepla na všech površích. V opačném případě nemůže být teplota homogenní. Homogenní teplotu lze nastavit např. ohřevem v peci po dostatečně dlouhém čase. Není-li počáteční teplota homogenní, je nutné provést modifikaci algoritmu pro první časový krok.

Algoritmus začíná v časovém indexu nula, když je součinitel přestupu tepla roven nule (viz obr. 3). Algoritmus používá přímý výpočet vedení tepla a počítá teplotní odezvu v termočlánku pro lineárně se měnící součinitel přestupu tepla (viz h_1 a T_1^* vypočtená na obr. 3) v několika časových krocích. Tyto časové kroky se nazývají dopředné časové kroky a pět z nich se používá na obr. 3 a obr. 4. Minimální počet nezbytných dopředných časových kroků pro stabilizaci sekvenčního algoritmu je nutné zjistit zvlášť pro každou úlohu. Rozdíl mezi vypočteným a naměřeným průběhem teplot se vyhodnocuje pomocí kritériální rovnice (1), stejně jako pro sekvenční Beckův přístup. Směrnice v , lineárně se měnícího součinitele přestupu tepla h , definované jako

$$v = \frac{\partial h}{\partial i} \quad (2)$$

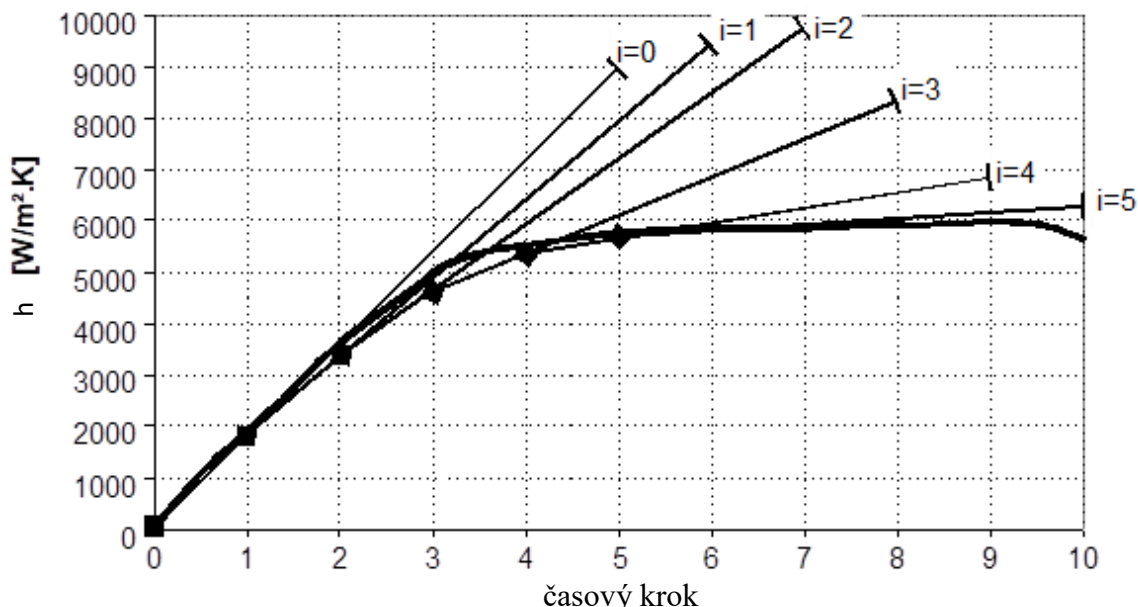
kde i je časový krok, by měla být měněna, dokud nebude nalezeno minimum kritériální funkce SSE v rovnici (1). Pro nalezené minimum platí, že vypočtený průběh teploty se nejlépe shoduje s naměřenou teplotní historií, právě při použití daného lineárně se měnícího součinitele přestupu tepla během n dopředných časových kroků.



Obr. 3 Naměřená teplotní historie a dvě vypočtené teplotní historie s použitím dvou různých směrnic součinitele přestupu tepla h pro n dopředných časových kroků

Když je nalezen nejlepší sklon součinitele přestupu tepla, použije se přímý výpočet vedení tepla k výpočtu teplotního pole v následujícím časovém kroku s použitím vypočítaných okrajových podmínek. Algoritmus se opakuje pro další časové kroky až do konce zaznamenané teploty (viz obr. 4). Pro k časových kroků je možné vypočítat okrajové podmínky pouze pro $k - n$ časových kroků z důvodu použití dopředných časových kroků. Tato metoda funguje velmi dobře, když je

skutečný průběh součinitele přestupu tepla téměř lineární. Pokud se směrnice náhle mění, vypočtený průběh součinitele přestupu tepla je něco hladší než skutečný průběh; čím více dopředných časových kroků je použito, tím hladší je průběh vypočteného součinitele přestupu tepla (větší rozdíl mezi vypočteným a skutečným součinitel přestupu tepla). Na druhou stranu je inverzní metoda stabilnější.



Obr. 4 Skutečný průběh součinitele přestupu tepla a šest optimálních směrnic ze šesti po sobě následujících časových kroků

Výpočet optimální směrnice součinitele přestupu tepla

Kriteriální funkce popsaná rovnicí (1) má pouze jedno minimum a závisí pouze na jedné proměnné – směrnici součinitele přestupu tepla (viz rovnice (2)). Průběh této kriteriální funkce je blízký průběhu parabolické funkce v blízkosti hledaného minima, protože je definována jako součet druhých mocnin teplotních rozdílů. Brentova optimalizační metoda [21], která využívá inverzní parabolickou interpolaci, je dokonalým kandidátem pro nalezení minima kriteriální funkce SSE popsané rovnicí (1).

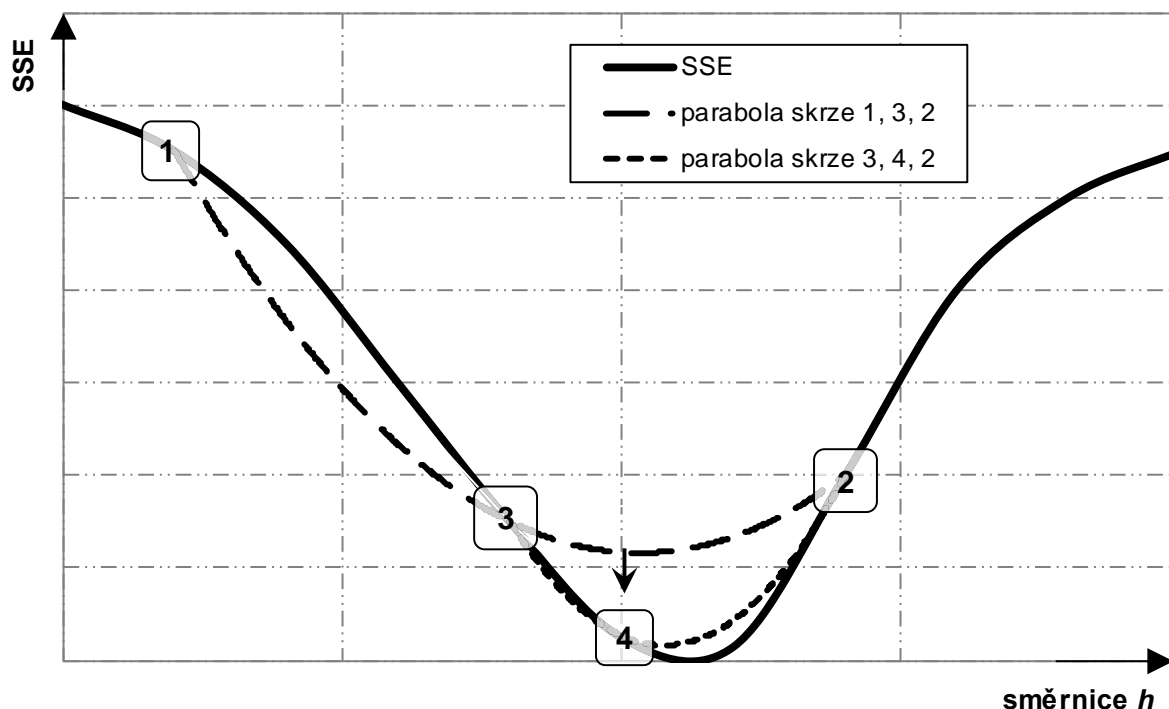
Brentova optimalizační metoda je založena na parabolické interpolaci a zlatém řezu. Hledané minimum musí být mezi dvěma body 1 a 2 (viz obr. 5). Konvergence k minimum je získáno inverzní parabolickou interpolací. Funkční hodnoty funkce SSE se vypočítají pouze v několika bodech. Parabola (přerušovaná čára) je proložena přes tři původní body 1, 3, 2 na funkci SSE (plná čára). Funkce SSE je vyhodnocena na minimum paraboly v bodě 4. Ten následně nahradí bod 1. Nová parabola (tečkovaná čára) je proložena body 3, 4, 2. Algoritmus se opakuje, dokud se nedosáhne minima s požadovanou přesností. Pokud jsou tři body kolineární, použije se namísto parabolické interpolace metoda zlatého řezu [21].

Urychlení výpočtu využitím predikce

Brentova metoda může být výrazně urychlena implementací predikce. Směrnice součinitele přestupu tepla se většinou nezmění náhle od jednoho časového kroku k druhému (viz obr. 4). Rozsah daný body 1 a 2, v němž musí být minimum, může být významně zmenšen, což výrazně

urychlí celkový výpočet. Pokud je vzdálenost mezi body 1 a 2 definováno jako 100%, nové počáteční body 1' a 2' mohou být vzdáleny např. pouze 1% od směrnice nalezené pro předchozí časový krok. Pokud je hodnota funkce SSE v bodě 3 mezi 1' a 2' nižší než hodnota funkce SSE v bodech 1' a 2', můžeme pokračovat s Brentovou metodou pomocí bodů 1', 3 a 2'. V opačném případě by měly být použity body 1, 1', 3 pro případ že je $1' < 2'$ nebo body 3, 2', 2 pro případ že je $1' > 2'$. Pokud je odhadovaný rozsah 1' až 2' příliš malý, optimalizace s predikcí se neuplatní a výpočetní rychlost bude přibližně stejná jako u původní Brentovy metody.

Použití předpovědi má ještě jednu výhodu – vyhýbá se výpočtu vedení tepla pro extrémní okrajové podmínky (směrnice součinitele přestupu tepla pro body 1 a 2). V takových případech může trvat výpočet vedení tepla velmi dlouho nebo může dokonce divergovat. I v případě, že je rozsah predikce příliš úzký, nemusí se počítat jedna hodnota funkce pro extrémní okrajové podmínky (bod 1 nebo 2). Brentova metoda s předpovědí funguje velmi dobře a průměrný počet použitých iterací je obvykle pouze 10 pro dosažení součinitele přestupu tepla s přesností 0,001%. To znamená, že musí být provedeno 10 přímých výpočtů vedení tepla pro 10 různých směrnic součinitele přestupu tepla s cílem najít nejlepší směrnici s přesností 0,001%. Z toho vyplývá, že je rychlost metody Sekvenční identifikace 3 až 5 krát pomalejší než sekvenční Beckův přístup [17].



Obr. 5 Hledání minima kriteriální funkce pomocí inverzní parabolické interpolace

2.1.3 Problematika počtu dopředných kroků v sekvenčních inverzních metodách

Sekvenční inverzní metody nelze použít pro zkoumání extrémně rychlých změn na povrchu tělesa kvůli zpoždění, se kterým se informace z povrchu dostane k teplotnímu čidlu [19]. Čím vzdálenější je snímač od povrchu, tím pomalejší změny mohou být zkoumány.

Pro jednoduchost předpokládejme, že žhavá ocelová deska o teplotě 1000 °C se chladí vodou o teplotě 0 °C. Rychlost ocelové desky je 1 m/s a chladicí impuls trvá 0,01 s. To odpovídá případu při hydraulickém odstraňování okují při kontinuálním válcování za tepla. Použité okrajové podmínky, vypočtená povrchová teplota a vypočtená teplota 2 mm pod ochlazeným povrchem pomocí numerické simulace jsou znázorněny na obr. 6. Je zřejmé, že teplota 2 mm pod

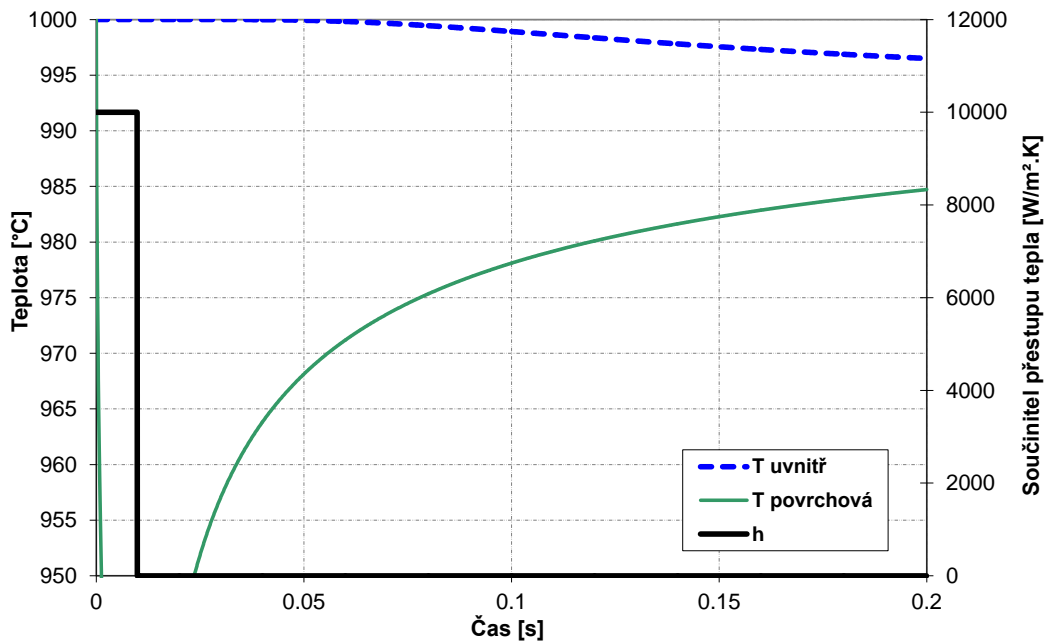
ochlazeným povrchem začne znatelněji klesat teprve 0,05 s po začátku chladicího impulsu. V konkrétním modelovém případě odstraňování okují by to znamenalo, že teplota začne klesat, když je měřicí snímač již 40 mm za hydraulickým ostřikem. Situace se ještě zhorší, pokud použijeme digitální záznamník dat, jak je znázorněno na modelovém případě na obr. 7.

Časové zpoždění změny teploty pod chlazeným povrchem můžeme vypočítat pomocí analytické rovnice [22]

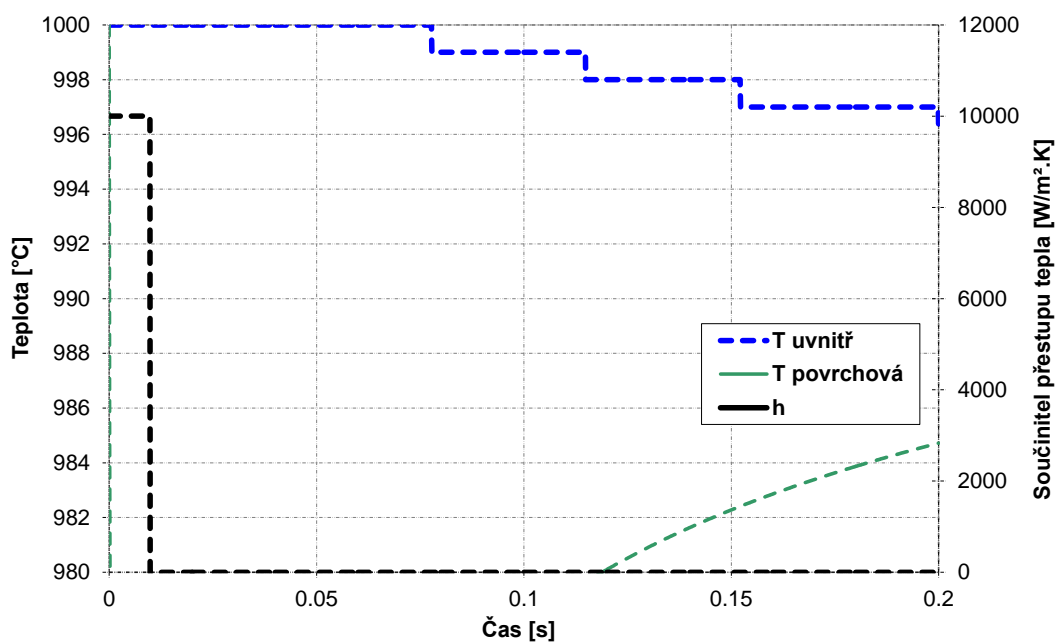
$$\frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin \zeta_n}{2 \zeta_n + \sin(2 \zeta_n)} \exp\left(-\frac{\zeta_n^2 \alpha t}{L^2}\right) \cos(\zeta_n x) \quad (3)$$

kde tloušťka desky je L . Tloušťka musí být malá vzhledem k šířce a výšce stěny. V tomto případě můžeme předpokládat, že vedení probíhá pouze ve směru x . Stěna má na počátku rovnoměrnou teplotu T_0 a náhle je vystavena konstantní hodnotě součinitele přestupu tepla h a konstantní teplotě okolí T_{∞} . Diskrétní hodnoty ζ_n jsou pozitivními kořeny transcendentální rovnice

$$\zeta_n \tan \zeta_n = \frac{h \cdot L}{k} \quad (4)$$



Obr. 6 Vypočtená teplotní historie pro povrchovou teplotu a teplotu 2 mm pod chlazeným povrchem

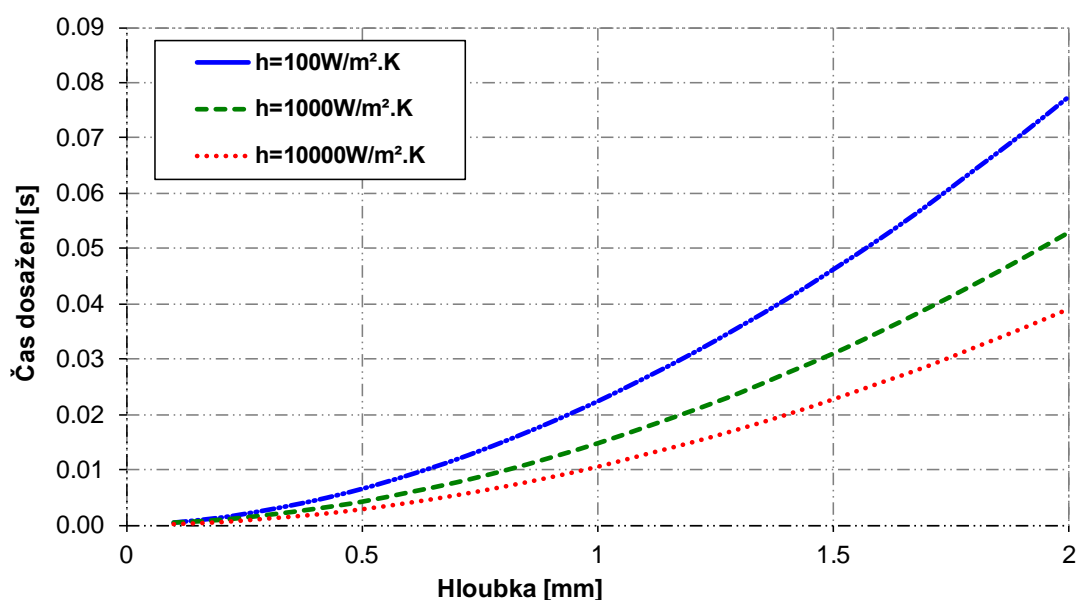


Obr. 7 Degradovaný záznam teploty uvnitř tělesa ($T_{\text{uvnitř}}$) desetibitovým digitálním záznamníkem dat s rozlišovací schopností $1\text{ }^{\circ}\text{C}$

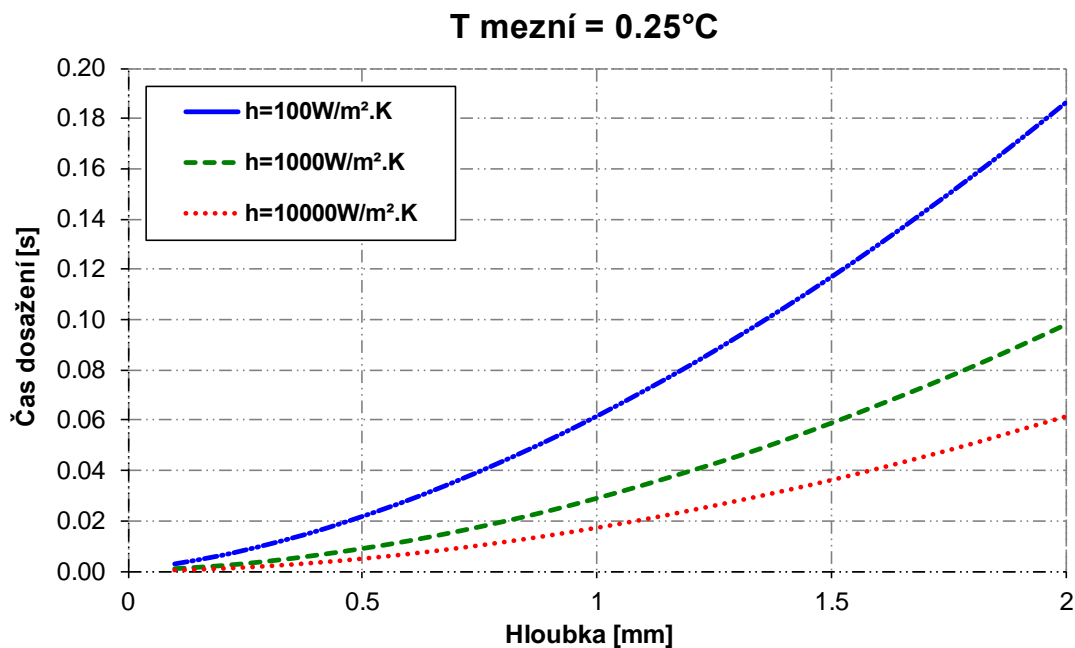
Doba propagace teplotního impulzu z povrchu k čidlu

Vypočtená časová prodleva, za kterou se projeví změna teploty na povrchu také v místě teplotního čidla, je pro nerezovou ocel shrnutá na obr. 8 a obr. 9. Teplotní práh $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ na obr. 8 je zvolen jako běžná přesnost přímých úloh vedení tepla. Nyní předpokládejme měřicí zařízení, které nám umožní měřit teplotní rozsah $0\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozlišením 12 bitů. To znamená, že maximální přesnost (teplotní krok) je $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Časové prodlevy pro tento teplotní práh jsou shrnuty na obr. 9.

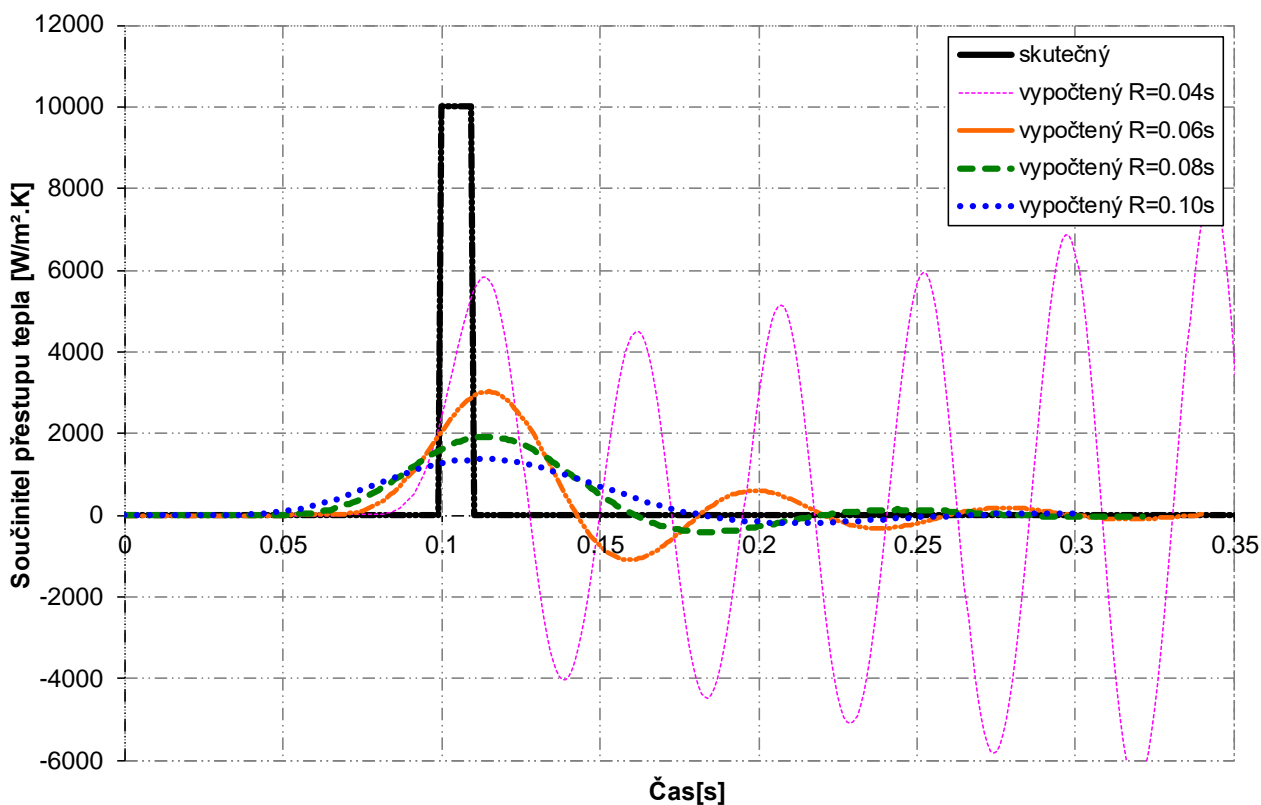
T mezní = $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$



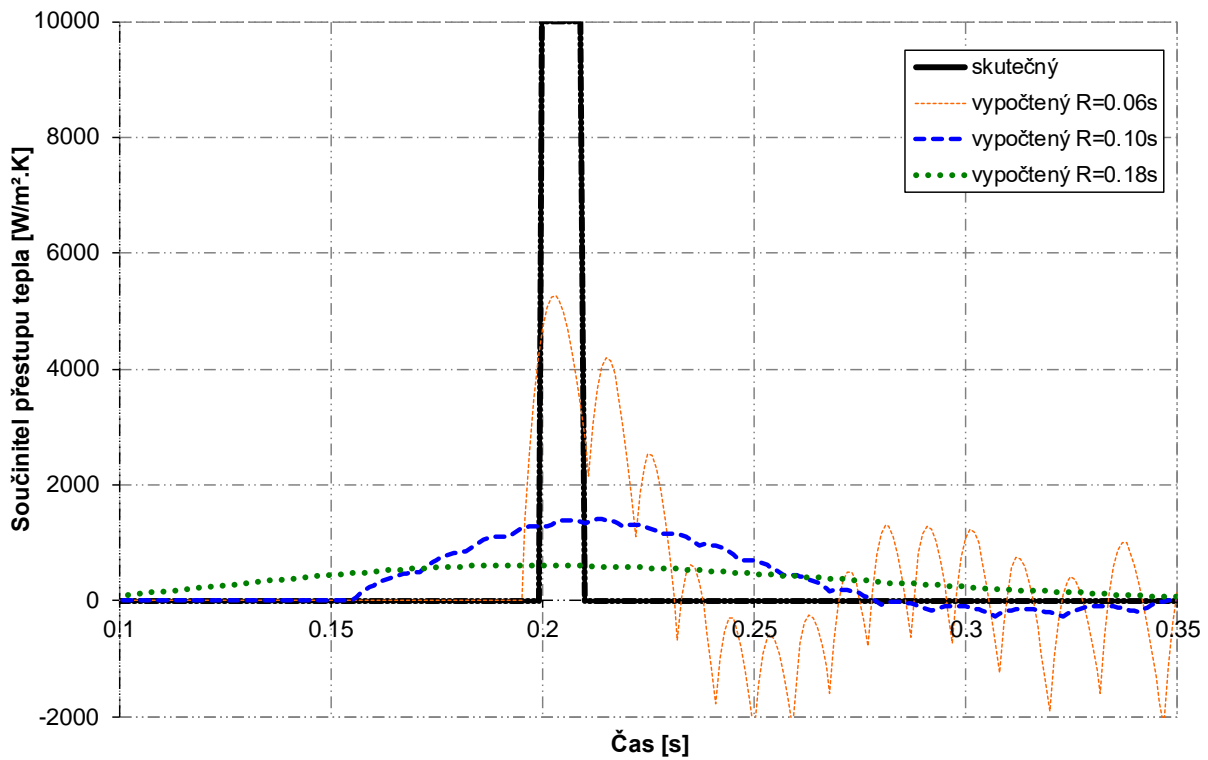
Obr. 8 Vypočtené časové zpoždění teplotního impulzu (Čas dosažení) pro prahovou hodnotu teploty $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tři hodnoty součinitele přestupu tepla jako funkce hloubky



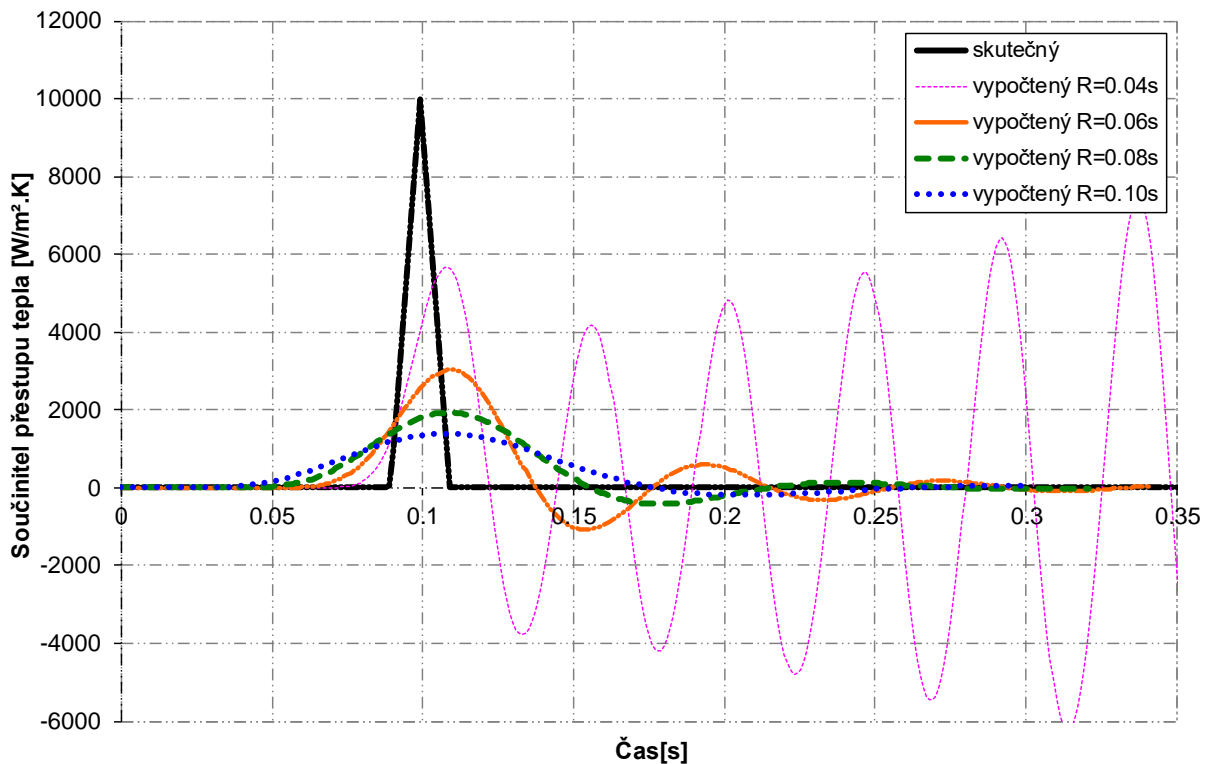
Obr. 9 Vypočtené časové zpoždění teplotního impulsu (Čas dosažení) pro prahovou hodnotu teploty 0,25 °C a tři hodnoty součinitele přestupu tepla jako funkce hloubky



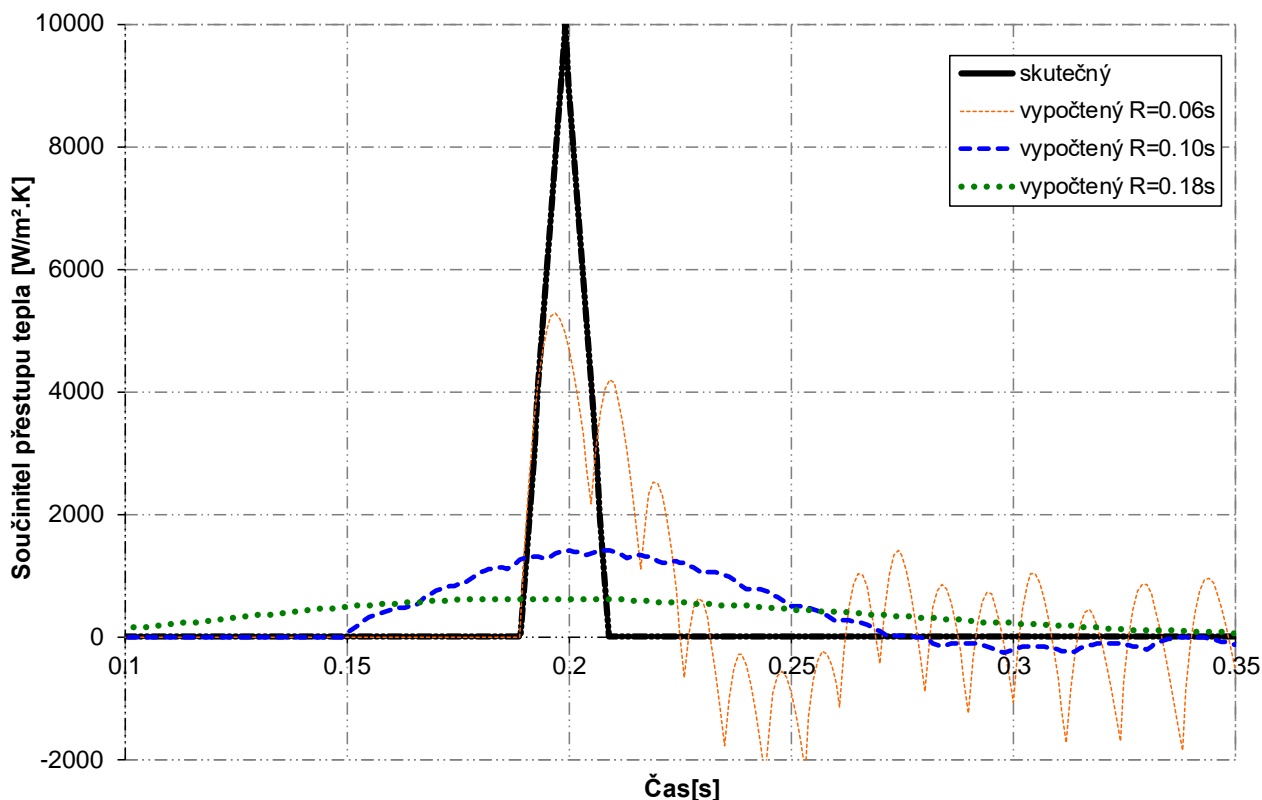
Obr. 10 Porovnání skutečné okrajové podmínky s okrajovými podmínkami vypočtenými sekvenční inverzní úlohou s použitím různého počtu dopředných časových kroků (přepočítaných na čas – parametr R) pro krátký konstantní impuls součinitele přestupu tepla



Obr. 11 Porovnání skutečné okrajové podmínky s okrajovými podmínkami vypočtenými sekvenční inverzní úlohou stejně, jak je znázorněno na obr. 10, ale historie vstupní teploty byla předpokládána z digitálního záznamníku s rozlišením 12 bitů



Obr. 12 Porovnání skutečné okrajové podmínky s okrajovými podmínkami vypočtenými sekvenční inverzní úlohou s použitím různého počtu dopředných časových kroků (přepočítaných na čas – parametr R) pro krátký trojúhelníkový impuls součinitele přestupu tepla



Obr. 13 Porovnání skutečné okrajové podmínky s okrajovými podmínkami vypočtenými sekvenční inverzní úlohou stejně, jak je znázorněno na obr. 12, ale historie vstupní teploty byla předpokládána z digitálního záznamníku s rozlišením 12 bitů

Odhad nezbytného počtu dopředných časových kroků

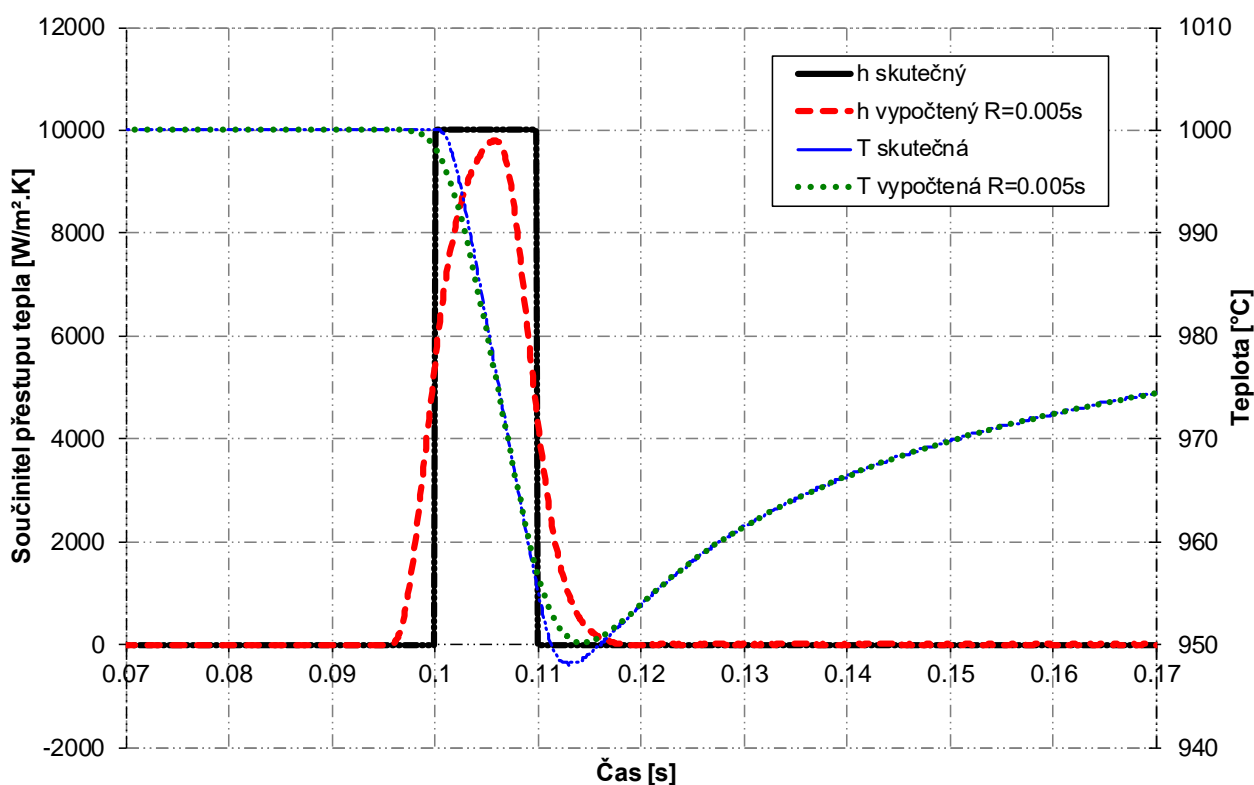
Počet dopředných časových kroků lze odhadnout z obr. 8. Například pokud se použije vzorkovací kmitočet 1000 Hz, musí být počet dopředných kroků nejméně 40 (0,04 s) pro senzor v hloubce 2 mm, aby se zabránilo divergenci inverzního algoritmus (viz obr. 10 a obr. 12). Jeli nutné zabránit výraznému podkmitu součinitele přestupu tepla, je třeba zvýšit číslo na 80–100 (0,08–0,1 s).

Pokud se používá měřicí zařízení s rozlišením 12 bitů, bude muset být počet dopředných kroků ještě vyšší. Z obr. 9 je vidět, že minimální počet se zvýší na 60 (0,06 s) a optimální číslo se blíží 180 dopředných časových kroků (0,18 s). Samozřejmě, že takové vysoké číslo není optimální pro rekonstrukci úzkého impulsu součinitele přestupu tepla (viz obr. 11 a obr. 13). Je však možné použít grafy na obr. 8 a obr. 9 pro nalezení maximální vzdálenosti teplotního čidla od ochlazeného povrchu, ve které se má čidlo zabudovat.

Odhad maximální přípustné vzdálenosti teplotního čidla od zkoumaného povrchu

Nejprve je nutné použít vzorkovací frekvenci pro záznam teplot, která je dostatečně jemná. Pro náš případ je vhodná vzorkovací frekvenci nejméně 1000 Hz, abych bylo 10 vzorků na jeden impuls součinitele přestupu tepla (viz obr. 14). Pro rekonstrukci chladičího impulsu je nutné zmenšit počet dopředných kroků tak, aby byl významně kratší než doba chladičího impulsu. To jest alespoň 0,005 s, což je polovina doby chladičího impulsu. Nyní je možné z obr. 8 vyčíst, že maximální vzdálenost teplotního čidla od ochlazeného povrchu by měla být přibližně 0,2 mm. Rekonstruovaný impuls součinitele přestupu tepla pro teplotní čidlo 0,2 mm pod povrchem je znázorněn na obr. 14. Pokud bychom potřebovali přesnější rekonstrukci chladičího impulsu, je

nutné umístit teplotní čidlo ještě blíže a pokud by bylo použito měřicí zařízení s rozlišením 12 bitů, vzdálenost musí být ještě menší.



Obr. 14 Porovnání skutečné okrajové podmínky s okrajovou podmínkou vypočtenou sekvenční inverzní úlohou pomocí dat z termočláňku umístěného 0,2 mm pod zkoumaným povrchem

Výpočtové experimenty ukázaly, že rovnici (3) lze použít pro odhad počtu dopředných časových kroků pro sekvenční inverzní algoritmy i pro výpočet maximální vzdálenosti teplotního čidla od zkoumaného povrchu. Samo-adaptační návrh výpočetních modelů a znalost přesnosti vypočítaných výsledků jsou nezbytné. Popsané přístupy umožňují vytvářet realističtější matematické modely fyzikálních procesů.

Problematické dopředných kroků se také věnuje článek [23], kde první autor je doktorand, kterého vede autor této habilitační práce jako školitel specialista. Tento článek popisuje dvě metody výpočtu doporučených počtů dopředných kroků pro modely nelineárního vedení tepla, kde se používají teplotně závislé materiálové vlastnosti. První metoda je založena na sledování citlivosti (ve vnitřním bodě měření) na Dirakov puls hustoty tepelného toku na povrchu. Druhá metoda určuje počet dopředných kroků z reziduální funkce vypočtené z hustoty tepelných toků získaných z inverzního výpočtu. V článku je porovnán vliv šumu a stability u těchto metod. Výsledky ukázaly, že první metoda je mnohem méně výpočetně náročná a poskytuje mírně vyšší hodnotu počtu dopředných kroků než druhá metoda.

2.2 ZPŮSOB A ZAŘÍZENÍ KE STANOVENÍ POLOHY TEPLTNÍHO ČIDLA

Tělesa se zabudovaným teplotním čidlem se používají k nepřímému měření okrajových podmínek vedení tepla (povrchové teploty, tepelného toku, součinitele přestupu tepla) tam, kde není možné měřit tyto okrajové podmínky přímo na povrchu. Teplotní čidlo změří časově závislou teplotní odezvu na aplikovanou okrajovou podmínku a pomocí inverzní metody se pak z

naměřeného průběhu teplot vypočítají časově závislé okrajové podmínky vedení tepla. Protože je inverzní metoda špatně podmíněná, malé chyby ve vstupních údajích způsobují velké chyby ve výsledcích. Jedním z podstatných údajů je přesná vzdálenost teplotního čidla od povrchu.

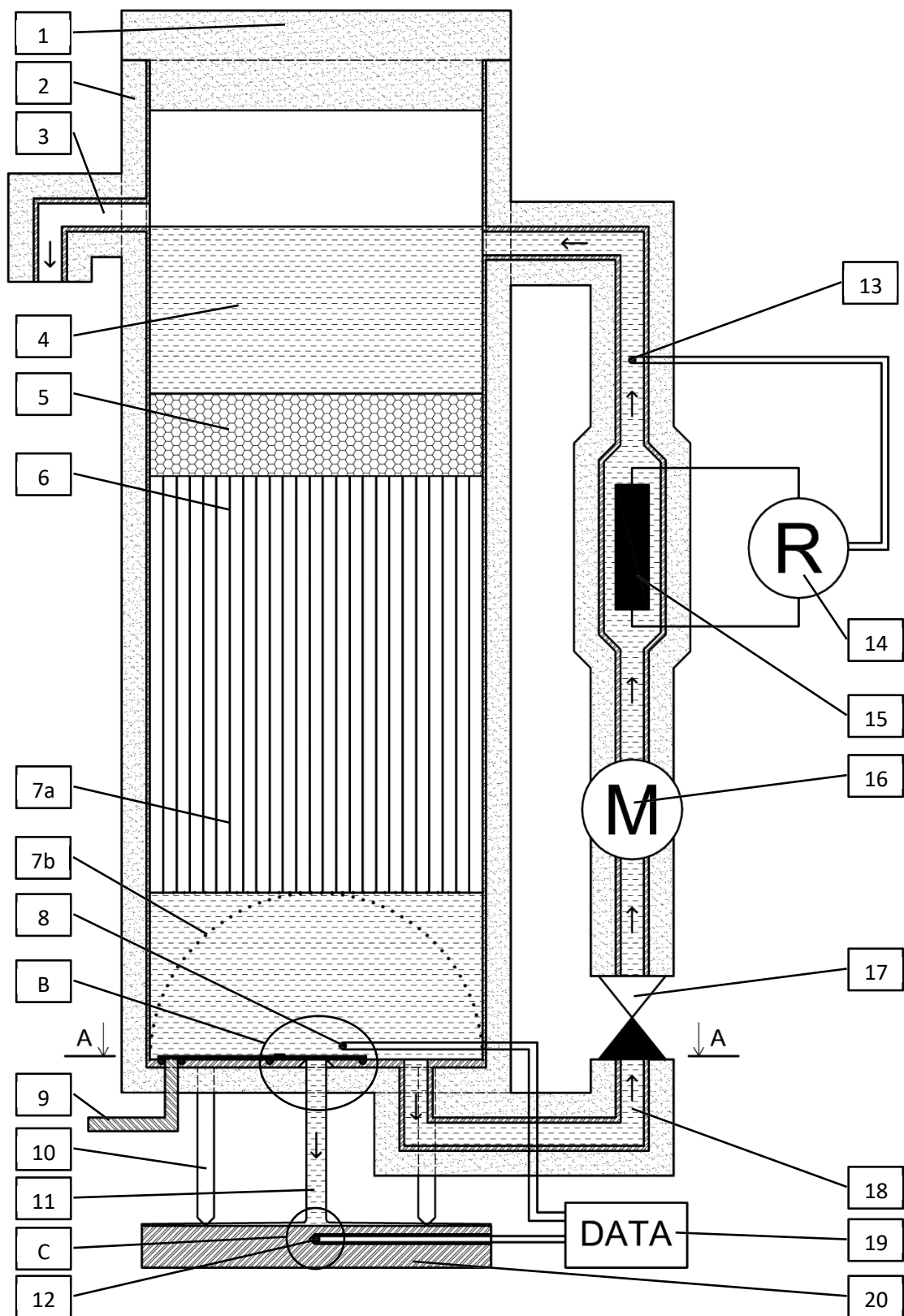
Proto byl vyvinut a patentován způsob a zařízení ke stanovení polohy teplotního čidla [24]. Zařízení slouží k nedestruktivnímu určení vzdálenosti teplotního čidla zabudovaného v tělese od povrchu tohoto tělesa. Zařízení je vhodné zejména pro teplotní čidla zabudované v desce a v tělesech s velkým poloměrem zakřivení povrchu.

Základní princip

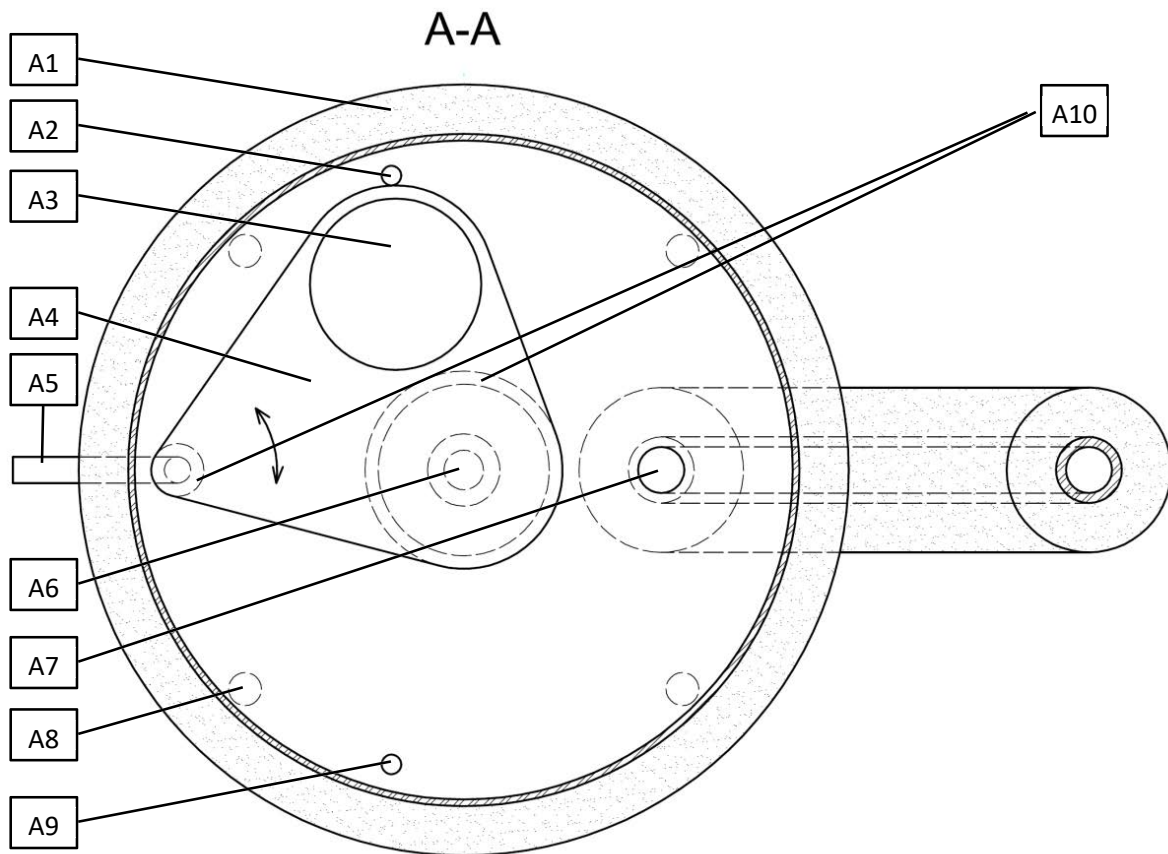
Celkové schéma experimentálního zařízení je na obr. 15–obr. 17. Na studenou desku (20) se zabudovaným teplotním čidlem (12, D5) se postaví nádoba s vodou tak, aby střed nádoby byl nad teplotním čidlem (12, D5). V nádobě se ohřeje voda na předepsanou teplotu (obvykle 85°C) pomocí topného okruhu (18). Ve spodní části nádoby se otevře klapka (A4, B3) a na desku začne vytékat z nádoby teplá voda (11, B4). Teplota vody změřená teplotním čidlem (8, B6) uvnitř nádoby a ohřev teplotního čidla (12, D5) v desce (20) se zaznamená do zařízení pro sběr dat (19). Příklad naměřeného průběhu teplot je zobrazen na obr. 20. Pomocí inverzní metody Sekvenční identifikace [18] a detailního matematického modelu teplotního čidla se vypočítá průběh součinitele přestupu tepla. Na obr. 21 je vidět, jak se hodnota součinitele přestupu tepla ustálí po 3 sekundách na správné hodnotě 16000 W/m².K pro broušený povrch a pro austenitickou nerezovou desku. Pokud by se hodnota ustálila na jiné hodnotě součinitele přestupu tepla, je nutné změnit vzdálenost teplotního čidla od ohřivaného povrchu desky ve výpočtovém modelu tak, aby se hodnota součinitele přestupu tepla ustálila na správné hodnotě. Pro nalezení správné vzdálenosti ve výpočtovém modelu je možné použít například iterační metodu založenou na lineární interpolaci. Z výpočtového modelu je pak možné odečíst přesnou vzdálenost teplotního čidla od povrchu desky.

Popis nádoby

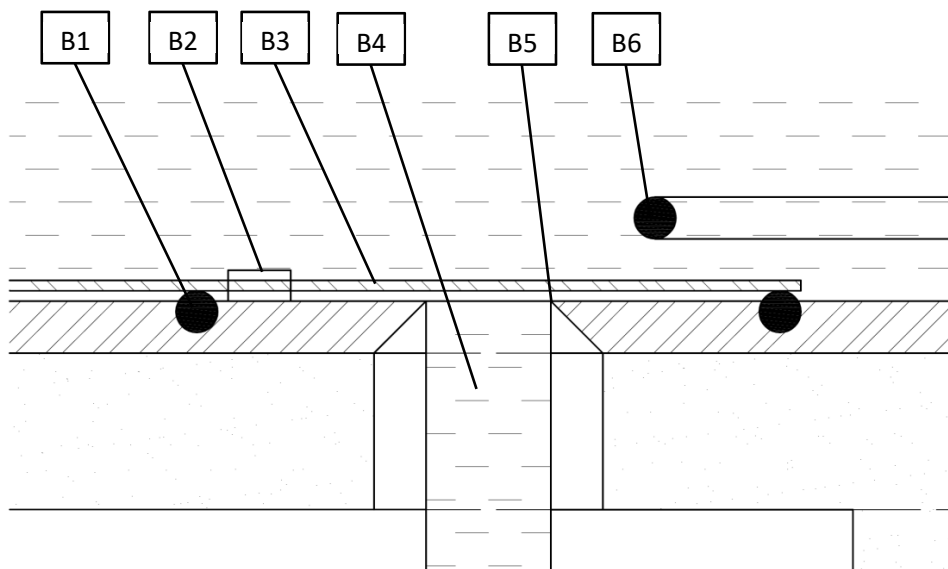
Nádoba (viz obr. 15) a potrubí je tepelně zaizolováno (1, 2, A1), aby nedocházelo k ochlazení vody (4) během ohřevu. Výška hladiny vody uvnitř nádoby se udržuje pomocí přepadu (3), kudy nadbytečná voda odeče (např. během ohřevu, kdy se voda rozpíná). Ke stabilizaci a usměrnění proudění slouží polypropylenová porézní hmota (5), vertikální rovnoběžný systém polypropylenových trubiček (6) s tenkou stěnou, který leží na nerezovém sítu (7a), pod kterým je umístěné druhé nerezové síto (7b) ve tvaru polokoule. Nádoba je na dně uzavřena tenkou klapkou (A4, B3), která leží na těsnících kroužcích (A10, B1). Klapka se může otáčet až k dorážecím kolíkům (A2, A9, B2). Klapka se ovládá z venčí pomocí páčky (9, A5). Pokud je klapka dorážena na kolík A2 je výtok z nádoby uzavřen a pokud je dorážena na kolík A9 je výtok z nádoby otevřen a voda (11, B4) proudí ven skrze otvor v klapce (A3) a trysku (A6, B5).



Obr. 15 Schéma kalibrační nádoby postavené na desce se zabudovaným teplotním čidlem



Obr. 16 Pohled A-A na vnitřní klapku uzavírající trysku v kalibrační nádobě



Obr. 17 Detail B v kalibrační nádobě – tryska

Tryska je kruhový otvor uprostřed dna nádoby, který se směrem ven rozšiřuje (viz obr. 17) a který má velmi ostrou hranu (B5), díky které má vytékající proud vody konstantní rychlostní profil.

Nádoba je opatřena nohami (10, A8). Nedílnou součástí nádoby je topný okruh (18), pomocí kterého se voda uvnitř nádoby jak ohřívá, tak homogenizuje teplota vody. Voda je hnaná topným okruhem pomocí čerpadla (16). Voda vstupuje do topného okruhu (18) na dně nádoby. Poté protéká zpětným ventilem (17), který zajišťuje, aby voda nevtékala do nádoby z topného okruhu při vypouštění nádoby tryskou (A6, B5). Voda se v topném okruhu ohřívá pomocí topení (15), které je regulováno regulátorem (14) na základě žádané teploty vody a skutečné teploty vody (13) změřené po průtoku topením.

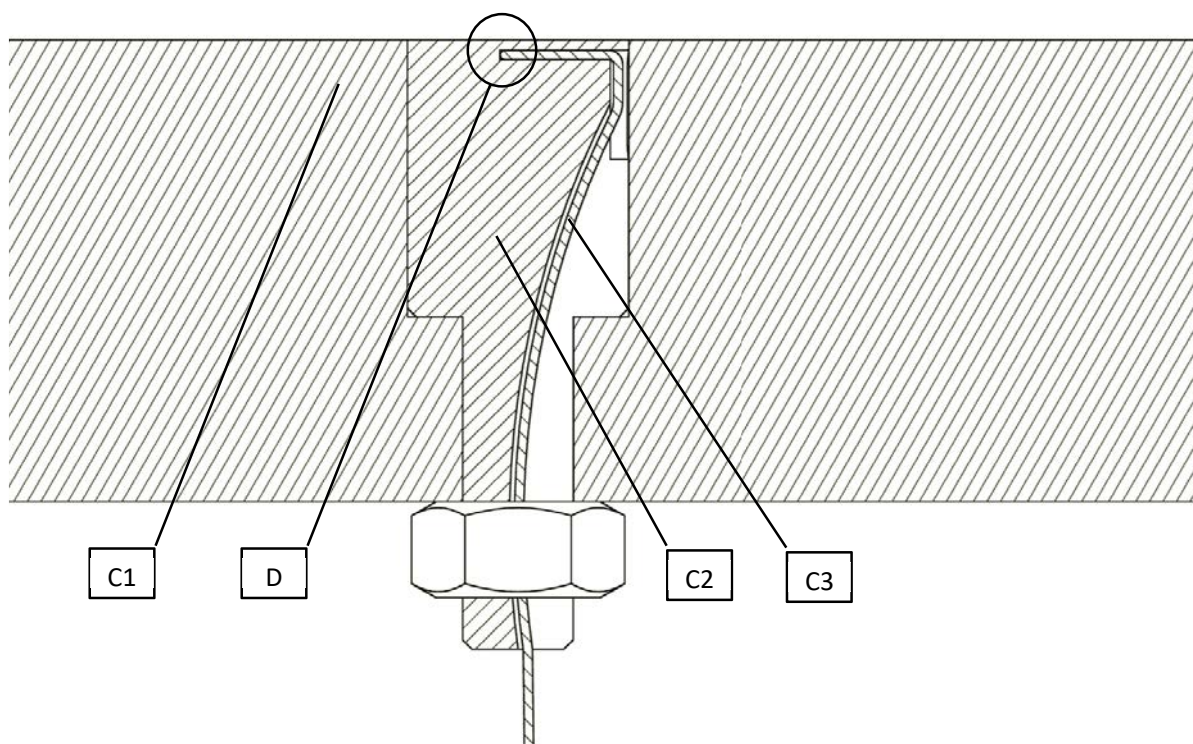
Popis modelu teplotního čidla

Matematický model musí co nejpřesněji popisovat skutečné teplotní čidlo zabudované v desce (C1). Proto je zapotřebí, aby třírozměrný numerický model používal také teplotně závislé materiálové vlastnosti a veškeré části, ze kterých se čidlo a deska skládá. Příklad zabudování teplotního čidla v desce je znázorněn na obr. 18 a obr. 19. Plášťový neuzemněný termočlánek (C3) je zasunut do díry v zátku (C2, D1), která je rovnoběžná s povrchem, a poté vyveden skrze zátku ven z desky. Je nutné, aby matematický model obsahoval vyvrtnou díru (D2), plášť termočláneku (D3), elektrickou izolaci (D4), termočlánekové dráty (D6) a termočlánekový spoj (D5).

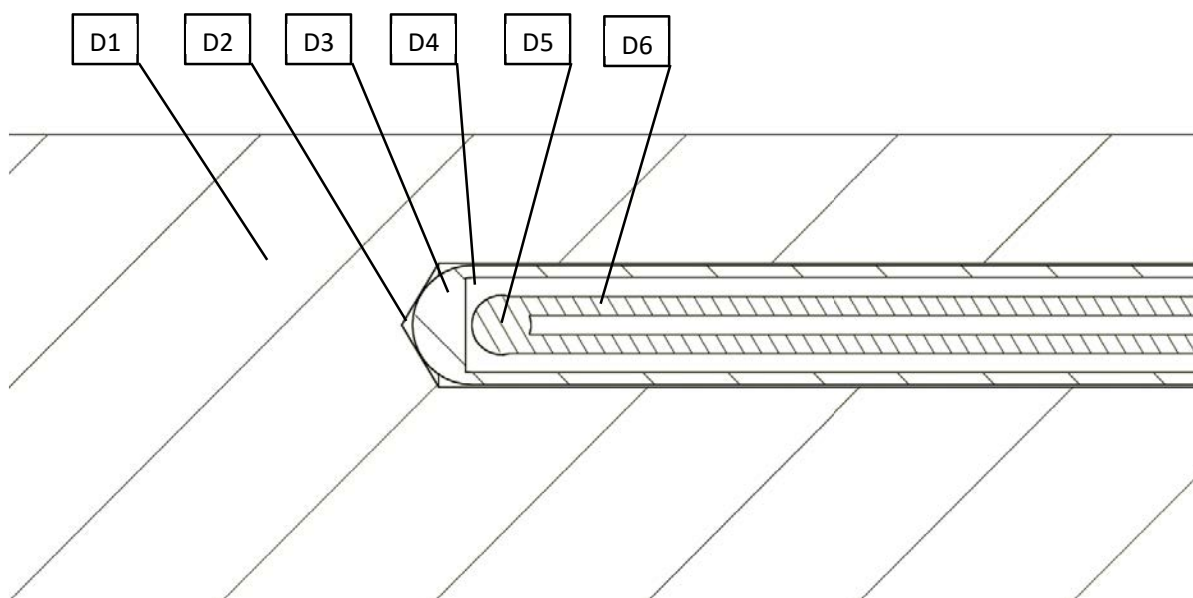
Popis inverzní metody k výpočtu součinitele přestupu tepla

Jedná se o sekvenční inverzní algoritmus popsany detailně v kapitole "Sekvenční identifikace ...". To znamená, že je nejdříve nalezena hodnota součinitele přestupu tepla mezi časovým krokem 0 a 1, s tím, že v časovém kroku 0 je hodnota součinitele přestupu tepla rovna nule, protože je soustava v ustáleném stavu (nulový tepelný tok na povrchu). Jakmile je známa hodnota součinitele přestupu tepla mezi časovým krokem 0 a 1, je proveden přímý výpočet vedení tepla v desce se zabudovaným teplotním čidlem, aby se získalo nové rozložení teplot v časovém kroku 1. Po té je nalezena hodnota součinitele přestupu tepla mezi časovým krokem 1 a 2, která se vzápětí použije pro přímý výpočet vedení tepla a celá operace je neustále opakována, až jsou postupně vypočteny hodnoty součinitele přestupu tepla pro celý časový úsek.

Hodnota součinitele přestupu tepla pro jednotlivé úseky je hledána na základě shody naměřené teploty v teplotním čidle a vypočtené teploty pomocí numerického modelu v místě teplotního čidla. Pokud je použita hodnota součinitele přestupu tepla v numerickém modelu správná, teploty se shodují. Správná hodnota součinitele přestupu tepla je hledána pomocí Brentovi optimalizační metody [25], kdy optimalizovanou hodnotou je směrnice součinitele přestupu tepla a kriteriální funkce je součet kvadrátů z rozdílů mezi naměřenou a vypočtenou teplotou v místě teplotního čidla. Vypočtené teploty jsou získány tak, že je proveden přímý výpočet vedení tepla, přičemž hodnota součinitele přestupu tepla je aplikována tak, že je zvolena její směrnice a vychází z poslední známé hodnoty součinitele přestupu tepla. Optimální směrnice je nalezena pomocí optimalizační metody.



Obr. 18 Detail C – teplotní čidlo (zabudování termočláňku v desce)



Obr. 19 Detail D – vnitřní struktura termočláňku

Nalezení správné vzdálenosti teplotního čidla od povrchu ve výpočtovém modelu

Průběh součinitele přestupu tepla vypočítaný z naměřeného průběhu teplot pomocí inverzní metody a detailního matematického modelu teplotního čidla je složen ze tří úseků U1 až U3 (viz

obr. 21). V úseku U1 ještě deska s teplotním čidlem nebyla ohřívána. Úsek U2 je přechodový stav, kdy voda začíná ohřívát desku s čidlem, postupně je smáčen povrch a součinitel přestupu tepla se ustaluje na maximální teplotě. V úsek U3 je součinitel přestupu tepla ustálený a kmitá kolem průměrné hodnoty. Kmitání je způsobené šumem v naměřených teplotních datech. Právě průměrná hodnota součinitel přestupu tepla v úseku U3 je pro nalezení správné vzdálenosti teplotního čidla od povrchu nejdůležitější.

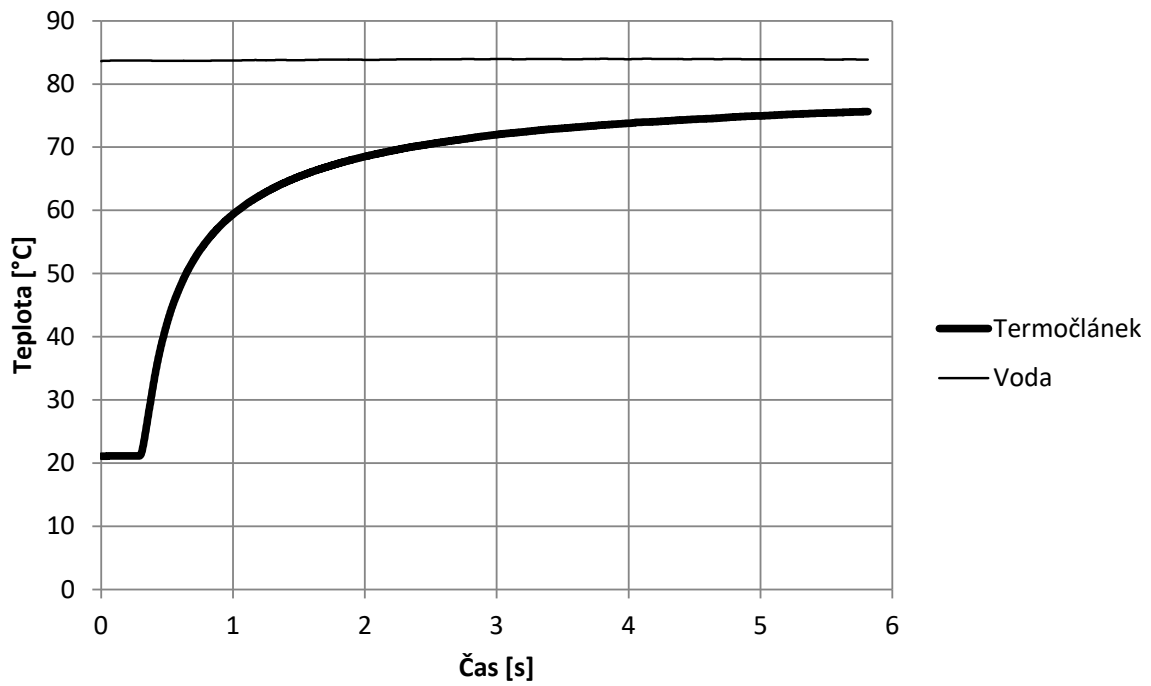
Pokud je změněna vzdálenost teplotního čidla od povrchu ve výpočtovém modelu, změní se i tato průměrná hodnota součinitel přestupu tepla v úseku U3. Cílem je nastavit takovou vzdálenost teplotního čidla od povrchu ve výpočtovém modelu aby se hodnota součinitel přestupu tepla v úseku U3 ustálila na požadované hodnotě. Příklady požadovaných hodnot jsou uvedeny níže v kapitole "Hodnoty součinitele přestupu tepla". Pokud je teplotní čidlo ve výpočtovém modelu od povrchu dále než ve skutečnosti, bude vypočtená průměrná hodnota součinitel přestupu tepla v úseku U3 vyšší než požadovaná a pokud je teplotní čidlo ve výpočtovém modelu u povrchu blíže než ve skutečnosti, bude vypočtená průměrná hodnota součinitel přestupu tepla v úseku U3 nižší než požadovaná. Tak je možné zjistit, zda je teplotní čidlo ve výpočtovém modelu dále nebo blíže u povrchu, než je tomu ve skutečnosti.

Pro nalezené správné vzdálenosti teplotního čidla od povrchu je postup následovný:

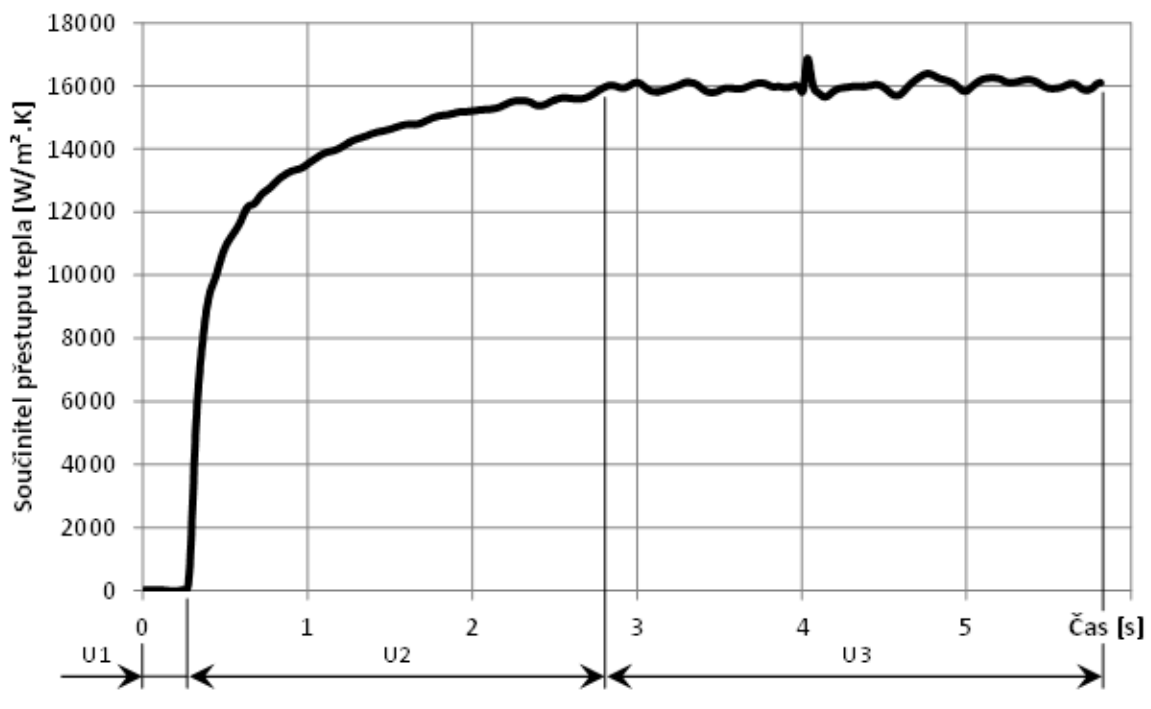
1. Je proveden výpočet průměrné hodnoty součinitel přestupu tepla v úseku U3 \bar{a}_1 a \bar{a}_2 pro dvě různé vzdálenosti teplotního čidla od povrchu ve výpočtovém modelu h_1 a h_2 . Vzdálenosti h_1 a h_2 je vhodné volit tak, aby skutečná vzdálenost ležela mezi těmito hodnotami.
2. Pomocí lineární interpolace je určen nový zpřesněný odhad skutečné vzdálenosti $h_3 = (\bar{a} - \bar{a}_1) \cdot (h_2 - h_1) / (\bar{a}_2 - \bar{a}_1) + h_1$, kde \bar{a} je požadovaná hodnota součinitele přestupu tepla v úseku U3.
3. Pro vzdálenost h_3 je vypočtena průměrná hodnota součinitele přestupu tepla v úseku U3 \bar{a}_3 .
4. Dvojice h_i a \bar{a}_i , pro kterou je největší odchylka $\varepsilon_i = |\bar{a}_i - \bar{a}|$, kde $i = \{1; 2; 3\}$, je odstraněna a zbylé dvě dvojice jsou přechíslovány na 1 a 2.
5. Pokud je $|h_2 - h_1|$ menší než požadovaná přesnost vzdálenosti teplotního čidla od povrchu, je nalezena skutečná vzdálenost s požadovanou přesností. V opačném případě se pokračuje opět od bodu 2.
6. Pro skutečnou vzdálenost teplotního čidla od povrchu s požadovanou přesností je použito to h_i , pro které je menší odchylka $\varepsilon_i = |\bar{a}_i - \bar{a}|$, kde $i = \{1; 2\}$.

Přesnost metody

Při použití plášťového termočládku o průměru 0,5 mm umístěného 0,6 mm pod povrchem je citlivost součinitele přestupu tepla větší než 3000 W/m².K na vzdálenost 0,1 mm pro austenitickou nerezovou ocel. Průměrná odchylka součinitele přestupu tepla je méně než 130 W/m².K. Z toho plyne, že rozlišovací přesnost metody je lepší než 0,005 mm. Se zvyšující se teplotní vodivostí materiálu desky se přesnost metody snižuje.



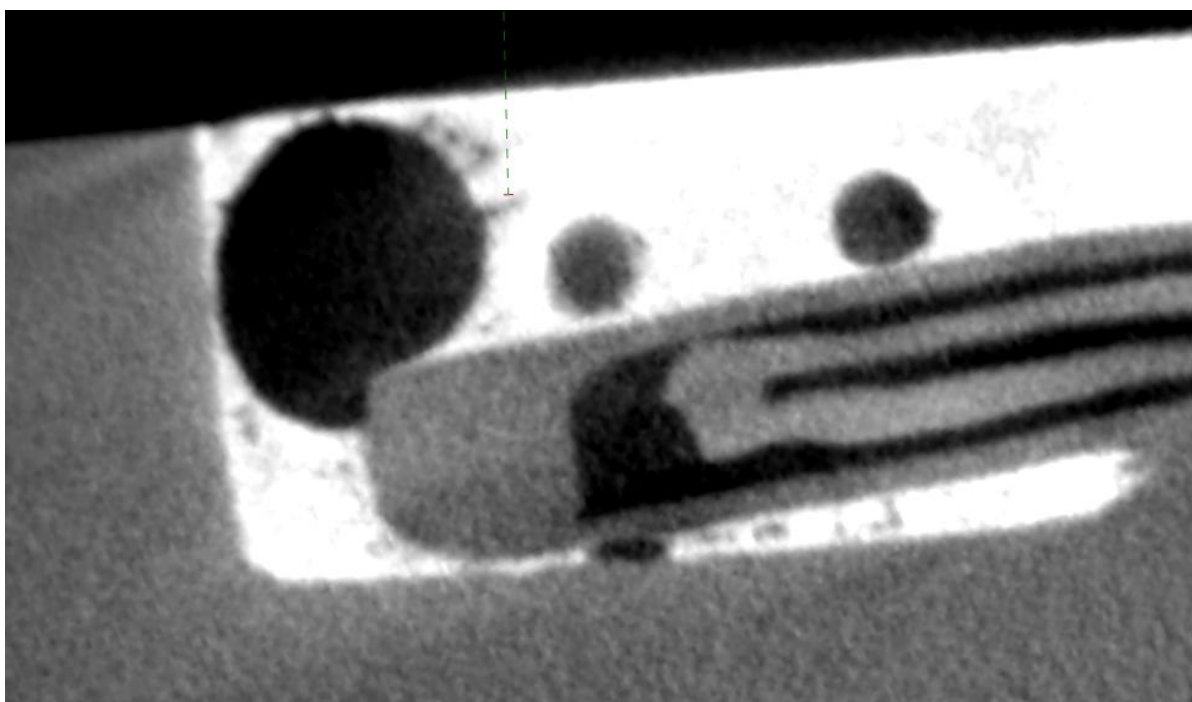
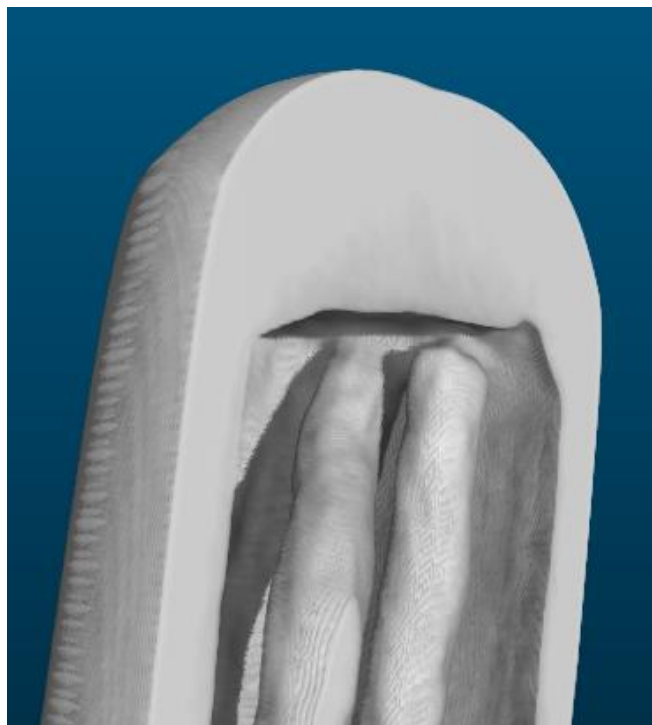
Obr. 20 Naměřený průběh teplot při kalibraci teplotního čidla



Obr. 21 Vypočtený součinitel přestupu tepla z dat získaných během kalibrace teplotního čidla

Hodnoty součinitele přestupu tepla při kalibraci

Broušený povrch pro austenitickou nerezovou ocel má $16000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a válcovaný povrch pro austenitickou nerezovou ocel má $19500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pro průměr nádoby 200 mm, výšku vodní hladiny 500 mm, průměr trysky 12 mm a vzdálenost trysky od desky 100 mm. Pro ostatní případy se doporučuje provést výpočet správného součinitele přestupu tepla s použitím modelu, jehož parametry mohou být určeny například z průmyslového tomografu (obr. 22).



Obr. 22 Detail uzemněného plášťového termočlánku (nahore) a vyřezaného teplotního čidla se špatně zapájeným neuzemněným termočlánkem (dole) z průmyslového tomografu

2.3 VÝVOJ INVERZNÍ SUB-DOMÉNOVÉ METODY PRO VÝPOČET OKRAJOVÝCH PODMÍNEK VEDENÍ TEPLA

V průmyslových aplikacích, jako je například hydraulické odstraňování okují, dochází k extrémně rychlým změnám okrajových podmínek. Během několika milisekund se hodnota součinitele přestupu tepla mění o více než 50000W/m².K. Pro přesnější výpočet okrajových podmínek z naměřeného průběhu teplot se může jevit jako vhodnější použít inverzní metodu pro výpočet celé domény oproti sekvenčním metodám. V dnešní době je ovšem používanější sekvenční metoda, což lze přisuzovat zejména její výpočetní efektivitě. Díky výpočtu krok po kroku a použití pouze několika dopředných kroků jsou doby výpočtu neporovnatelně kratší oproti metodě pro výpočet celé domény. Její slabinou je velká nepřesnost pokud se okrajové podmínky rychle mění. Oproti tomu metoda pro výpočet celé domény není vhodná pro výpočet, kde je velké množství naměřených dat. Úloha pak vede na nestabilní a výpočtově náročnou úlohu velké inverzní matice. Z hlediska výpočtové náročnosti se může jevit pro praxi jako zcela nevyužitelná, pokud je nutné zpracovávat dlouhý teplotní záznam.

Proto byla navržena nová inverzní metoda, která kombinuje výhody sekvenční metody a metody pro výpočet celé domény. V sub-doménové metodě dochází k vyzdvižení výhod a naopak potlačení nevýhod obou zmíněných metod. Nová metoda byla testována, jak na uměle vygenerovaných datech, tak na datech z reálných měření. Byla zkoumána a porovnáována jak výpočtová náročnost, tak přesnost s jakou je metoda schopná vypočítat okrajové podmínky. Dále byla tato nová metoda porovnáována s oběma známými metodami, a to jak vzhledem k přesnosti výsledku, tak i vzhledem k výpočtové náročnosti. V současné době je připravován článek o této nové metodě pro impaktovaný časopis.

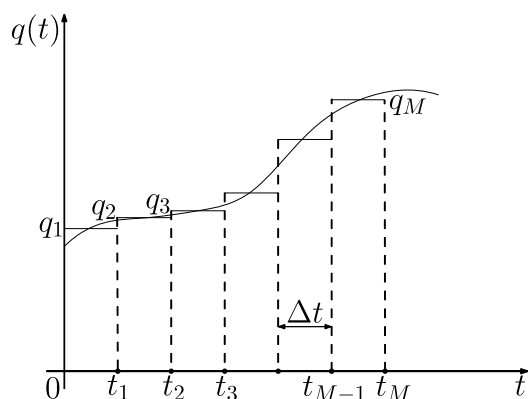
2.3.1 Celodoménová metoda s regularizací

Regularizační metody slouží k modifikaci původních přístupů, především k zajištění stability špatně podmíněných úloh. Regularizace mají mnoho podob a forem a v praxi jsou velmi důležité. Většina publikací se však zabývá regularizační metodou pouze pro celodoménovou podobu inverzní úlohy vedení tepla, zatímco regularizace pro sekvenční přístup je v literatuře popsána jen minimálně.

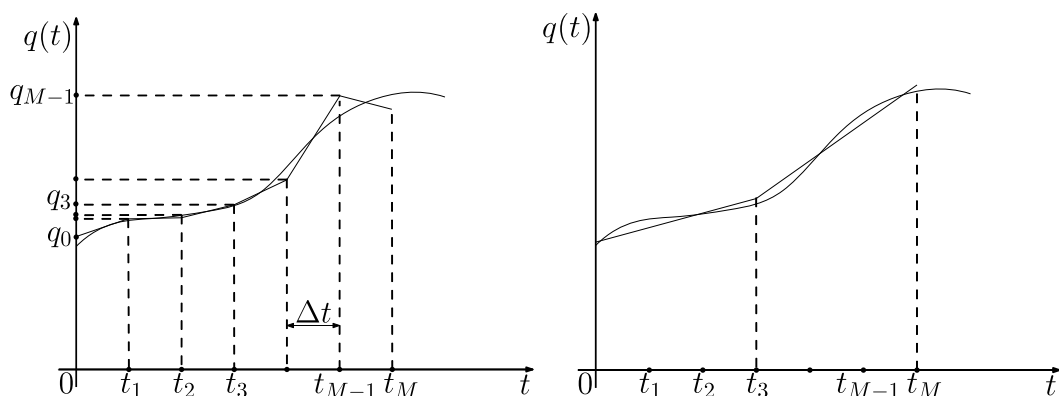
Původní celodoménová metoda je založena na minimalizaci součtu čtverců odchylek mezi naměřenými a odhadovanými teplotami v místě senzoru. Regularizace pro zajištění stability a jednoznačnosti řešení vkládá do tohoto součtu jeden nebo více členů. Obecně lze celodoménovou metodu s regularizací zapsat ve tvaru

$$S = \sum_{i=1}^n (Y_i - T_i)^2 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n q_i^2 + \alpha_1 \sum_{i=1}^{n-1} (q_{i+1} - q_i)^2 + \alpha_2 \sum_{i=1}^{n-2} (q_{i+2} - 2q_{i+1} + q_i)^2 + \dots \quad (5)$$

kde α_1 , α_2 , a α_3 jsou tzv. regularizační parametry. Velikost těchto parametrů má významný vliv na řešení. Existuje mnoho metod, jak hodnoty těchto parametrů vhodně zvolit, několik z nich lze najít např. v [26]. Jednotlivé komponenty q_i , $i = 1, \dots, n$ mohou být v jednotlivých časových krocích stejně jako u klasické celodoménové metody konstantní (obr. 23), lineární (obr. 24), atd.



Obr. 23 Po částech konstantní aproximace průběhu hustoty tepelného toku $q(t)$



Obr. 24 Po částech lineární aproximace průběhu hustoty tepelného toku $q(t)$

Jestliže je v rovnici (5) $\alpha_0 \neq 0, \alpha_1 = \alpha_2 = 0$, pak bývá minimalizace S nazývána regularizací nultého řádu. Podobně při $\alpha_1 \neq 0, \alpha_0 = \alpha_2 = 0$ jde o regularizaci prvního řádu. Obdobně je možné pokračovat i do řádů vyšších. Nejčastěji je však používána regularizace nultého řádu, která na rozdíl od vyšších řádů nevyžaduje žádné diferencování, viz [17]. Regularizace nultého řádu zahrnuje minimalizaci funkce

$$S = \sum_{i=1}^n (Y_i - T_i)^2 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n q_i^2 \quad (6)$$

vzhledem ke $q_i, i = 1, \dots, n$. Volbou $\alpha_0 = 0$ dochází ke ztrátě regularizačního členu. Naopak pro velké α_0 je hustota tepelného toku zredukována limitně až na $q_i = 0, i = 1, \dots, n$. Obdobně při regularizaci prvního řádu

$$S = \sum_{i=1}^n (Y_i - T_i)^2 + \alpha_1 \sum_{i=1}^{n-1} (q_{i+1} - q_i)^2 \quad (7)$$

volba vysokého α_1 způsobí $q_i = konst., i = 1, \dots, n$, kde konstantou může být jakákoli kladná i záporná hodnota.

Tikhonovova regularizace nultého řádu

Účelovou funkci pro Tikhonovovu regularizaci nultého řádu je možno napsat v maticovém tvaru

$$S = (\mathbf{Y} - \mathbf{T})^T(\mathbf{Y} - \mathbf{T}) + \alpha_0 \mathbf{q}^T \mathbf{q}. \quad (8)$$

Při minimalizaci vzhledem k neznámému vektoru hustoty tepelného toku je teplotní pole \mathbf{T} vyjádřeno rovnicí

$$\mathbf{T} = \mathbf{X}\mathbf{q} + T_0 \mathbf{1} \quad (9)$$

a hledaný odhad hustoty tepelného toku lze vyjádřit jako

$$\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha_0 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T (\mathbf{Y} - T_0 \mathbf{1}) = \mathbf{F} (\mathbf{Y} - T_0 \mathbf{1}); \mathbf{F} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha_0 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T. \quad (10)$$

Matrice \mathbf{F} bývá nazývána Tikhonovův filtr a má několik zajímavých vlastností. Symbolicky ji lze zapsat

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_0 & f_{-1} & f_{-2} & \cdots & f_{2-n} & f_{1-n} \\ f_1 & f_0 & f_{-1} & \cdots & \cdots & f_{2-n} \\ f_2 & f_1 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & f_{-1} & f_{-2} \\ f_{n-2} & f_{n-3} & \cdots & f_1 & f_0 & f_{-1} \\ f_{n-1} & f_{n-2} & \cdots & f_2 & f_1 & f_0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

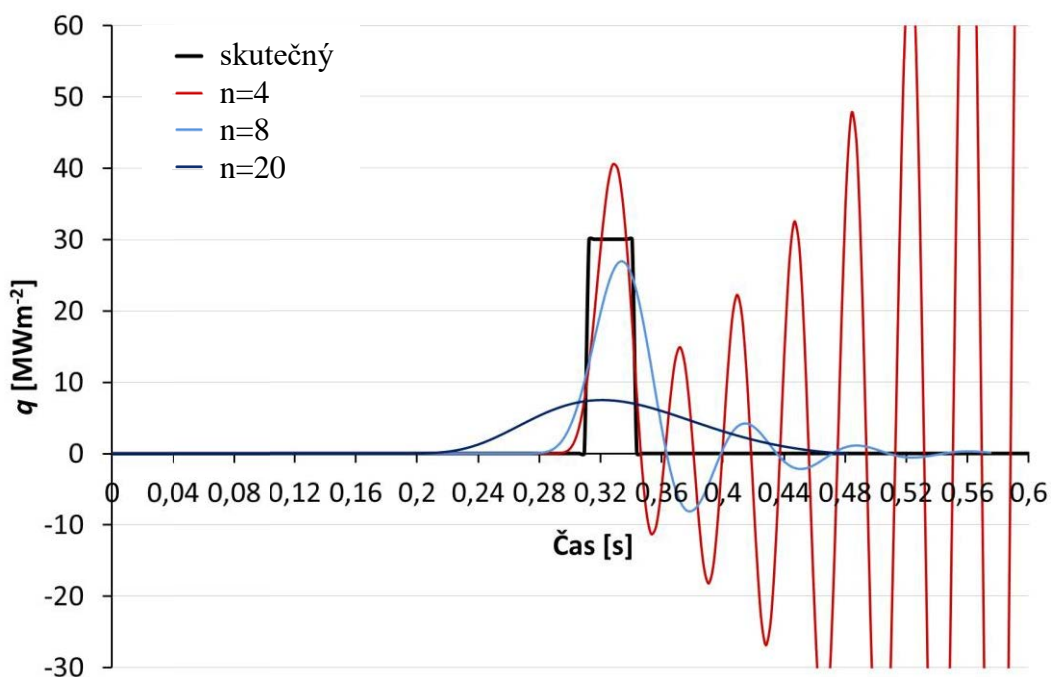
Jde o Toeplitzovu matici, tedy matici, která je konstantní podél každé své diagonály. Speciálně matice $n \times n$ je pak Toeplitzova právě tehdy, když pro všechna $1 < i, j \leq n$ platí $f_{ij} = f_{i-1, j-1}$. Toeplitzova matice navíc patří do třídy tzv. persymetrických matic, které jsou symetrické podle vedlejší diagonály, neboli $f_{ij} = f_{n-j+1, n-i+1}$, pro $i, j = 1, \dots, n$. [26]. V sub-doménové metodě je použita Tikhonovova regularizace nultého řádu a při výpočtech je voleno pevně $\alpha_0 = \varphi_1^2$, kde φ_1 je první koeficient citlivosti, což nezaručuje naprosto nejlepší řešení pro všechny případy, ale pro uvedené příklady je tato regularizace dostačující. Podrobnější popis lze nalézt v [1].

2.3.2 Sekvenční metoda s regularizací

Základní myšlenkou sekvenční metody výpočtu inverzní úlohy vedení tepla, je řešení krok po kroku. Pro zjištění odhadu hustoty tepelného toku \hat{q}_m v čase t_m jsou použity teploty T_m^* naměřené v odpovídajících časech, kde n je počet tzv. dopředných kroků. Pro tuto metodu hraje roli regularizačního parametru právě počet dopředných kroků, který špatně podmíněnou úlohu stabilizuje. Volba vhodného parametru n je v praktických úlohách zásadní, viz kapitola 2.1.3. S rostoucí hodnotou parametru n roste stabilita řešení, zatímco malá hodnota tohoto parametru může vést k nestabilitě a prudce oscilujícímu řešení. Velká hodnota naopak může vést k nežádoucímu přehlazení řešení. Tyto závěry lze pozorovat na obr. 25, kde jsou porovnány výsledky výpočtů se třemi různými hodnotami parametru ($n = 4, 8$ a 20 kroků) a skutečný průběh hustoty tepelného toku, který byl použit pro generování průběhu teplot použitých jako vstup do inverzních úloh. V příkladu je uvažována nerezová deska o tloušťce 10 mm s termočlánkem zabudovaným 2 mm pod povrchem. Silná oscilace ve vypočtené hustotě tepelného toku pro malé $n = 4$ je zřejmá, je tedy nutné použít vyšší hodnotu. Zvyšující se n s sebou však přináší dvě nevýhody:

1. S rostoucím n přirozeně stoupá i výpočtová náročnost, a tím roste čas potřebný k dosažení řešení.
2. Zvyšováním parametru n dochází k většímu vyhlazování řešení, prudké změny jsou rozmazány v čase a vysoké hodnoty hustoty tepelného toku jsou výrazně utlumeny. Pro 20 dopředných kroků je dokonce vypočtené maximum hustoty tepelného toku jen asi ve 25% skutečné hodnoty.

Z uvedeného příkladu jasně plyne, že není možné stanovit konkrétní hodnotu n tak, aby vyhovovala všem situacím. Potřebný počet dopředných kroků se bude lišit s každým výpočtovým modelem. Obecně tento počet závisí na mnoha parametrech, zejména pak na materiálových vlastnostech, vzdálenosti senzoru od povrchu a vzorkovací frekvenci. Základní idea pro volbu vhodného počtu dopředných kroků je taková, že je potřeba nastavit n dostatečně velké tak, aby bylo zabráněno nežádoucím oscilacím v řešení a aby bylo zaručeno, že změna v hustotě tepelného toku na povrchu bude mít dostatek času k tomu, aby se projevila v teplotní odezvě v místě senzoru. Zároveň je však třeba nevolit zbytečně velký počet dopředných kroků, aby řešení nebylo oproti skutečnosti výrazně utlumeno. Detailněji se této problematice věnuje kapitola 2.1.3.

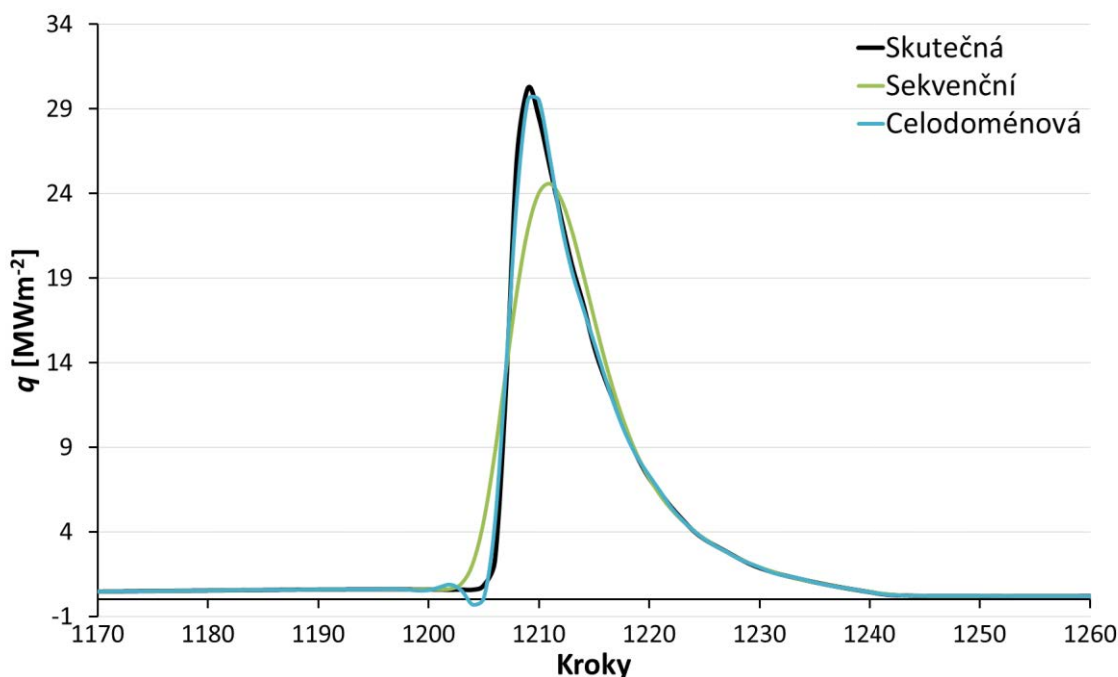


Obr. 25 Vliv počtu dopředných kroků v sekvenční Beckově metodě

2.3.3 Porovnání celodoménové a sekvenční metody

V dnešní době je používanější sekvenční metoda, což lze přisuzovat zejména její výpočetní efektivitě. Díky výpočtu krok po kroku a použití pouze několika dopředných času jsou doby výpočtu výrazně kratší oproti celodoménové metodě. Celodoménová metoda se v mnoha případech může z hlediska výpočtové náročnosti jevit pro praxi zcela nevyužitelnou. Dalším, pro praxi často důležitějším faktorem, je přesnost výpočtu. Na obr. 26 je porovnání vypočtené hustoty tepelného toku pomocí obou metod s předpokládanou skutečnou hustotou tepelného toku. Data odpovídají experimentu s deskou z austenitické nerezové oceli o tloušťce 25 mm a s termočlánkem zabudovaným 0,7 mm pod povrchem. Na první pohled je z obrázku viditelné, že z hlediska přesnosti může celodoménová metoda dosahovat výrazně lepších výsledků. Sekvenční metoda nedokáže tak dobře zachytit zpoždění v teplotní odezvě a tlumicí efekt jako to dokáže celodoménová. Čím víc se sekvenční metoda snaží tyto problematické vlivy do výpočtu zahrnout, tím roste počet použitých dopředných kroků. Pak ovšem dochází k velkému vyhlazení prudkých změn skutečné hustoty tepelného toku v čase. Tato vyhlazení vyústí ve velké chyby ve vypočteném teplotním poli v tělese oproti realitě. V důsledku výše popsaných skutečností se pro

praxi jeví využitelnější celodoménová metoda. Výpočtové časy jsou ale ve velké míře extrémně dlouhé. Příklad na obr. 26 je složen z 2100 vzorků s vzorkovací frekvencí 320 Hz, což odpovídá záznamu dlouhému přibližně 6,5 s. Čas potřebný k výpočtu sekvenční metodou byl 3,8 s. Čas potřebný pro celodoménovou metodu činil 247,4 s, tedy 65 krát déle. Skutečná měření probíhají mnohem déle. Typické experimenty v Laboratoři přenosu tepla a proudění simulující děje při kontinuálním zpracování oceli se pohybují v řádech jednotek až desítek minut. Výpočtová náročnost celodoménové metody je v takových případech extrémně velká a nelze ji použít.



Obr. 26 Porovnání sekvenční a celodoménové metody

2.3.4 Sub-doménová metoda

Myšlenka sub-doménové metody vznikla z důvodu hledání možností, jak efektivně využít přesnější celodoménovou metodu při výpočtech, kde je nutné zpracovat dlouhý teplotní záznam vzniklý při prudkých změnách okrajových podmínek, a snížit přitom výpočtovou náročnost. Základní ideou této metody je výpočet hustoty tepelného toku celodoménovou metodou pouze nad určitým počtem vzorků, tj. nad oknem určité velikosti, které je posouváno ve směru časové osy.

Prvním problémem, který bylo nutné překonat, byla homogenita teplotního pole v tělese v počátečním čase, se kterou celodoménová metoda počítá. Taková homogenita v případě sub-doménové metody nastává pouze v prvním okně. V dalších oknech je již výpočet posunut do časů, před kterými již nějaká výměna tepla proběhla, a teplotní pole v tělese bylo změněno.

Jednou z možností, jak výpočet upravit, bylo ponechat rovnici (10) a místo počáteční teploty T_0 dosazovat naměřenou teplotu na počátku daného okna. V tomto případě bylo nutné opětovně počítat koeficient citlivosti na začátku výpočtu každého okna za předpokladu nehomogenního teplotního pole vypočteného z předchozího okna, což nastává téměř vždy. Ukázalo se, že tento přístup není dostatečně efektivní, zejména vzhledem k nutnosti složitého přepočítávání

citlivostních koeficientů, a navíc nedosahuje požadovaných výsledků. Mnohem efektivnější je upravení rovnice (10) do tvaru

$$\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X} + \alpha_0 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}^T (\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{T}}|_{\mathbf{q}=\mathbf{0}}), \quad (12)$$

kde \mathbf{X} je matice koeficientu citlivosti, α_0 regularizační parametr, \mathbf{I} jednotková matice, \mathbf{Y} vektor naměřených teplot a člen $\hat{\mathbf{T}}|_{\mathbf{q}=\mathbf{0}}$ představuje vektor teplot, které odpovídají nulové hustotě tepelného toku během celého počítaného okna. Takto vypočtené teploty zachycují vliv hustoty tepelného toku z minulosti. Jejich odečtením od teplot naměřených je tedy odstraněna nehomogenita, koeficienty citlivosti je v takovém případě nutné počítat pouze jednou a využít v každém okně během výpočtu. Řády matic a počty složek vektorů v rovnici (12) odpovídají zvolenému počtu vzorků v okně.

Podle [26] a z provedených výpočtů lze odvodit, že v několika málo krocích na začátku a konci dané časové domény může vzniknout nestabilita. Kdyby byla tato nestabilita zahrnuta do výpočtu, s každým dalším oknem by narůstala chyba a nesrovnalost mezi naměřenými a vypočtenými teplotami v místě senzoru a v celém teplotním poli v tělese oproti skutečnosti. Z tohoto důvodu je výhodné, aby došlo k určitému překryvu jednotlivých oken. Díky překryvu dojde k přepsání nestabilních hodnot na začátku a konci každého okna. Ke stanovení velikosti překryvu oken byl použit postup podobný metodě hledání počtu dopředných kroků v sekvenční metodě. Na začátku výpočtu jsou pro danou velikost okna vypočteny koeficienty citlivosti. Mezi nimi lze nalézt maximální hodnotu, resp. maximální odchylku od nuly. Pořadí vzorku i udává počet kroků, které je nežádoucí v překryvu přepsat hodnotami z dalšího okna. Proto je možné uvažovat velikost překryvu p danou vztahem

$$p = 2(i + 2). \quad (13)$$

Přičítání hodnoty 2 je použito pouze pro větší bezpečnost, že maximální hodnota bude obsažena, a násobení dvěma umožňuje vyplnit první polovinu výsledného vektoru hustoty tepelného toku v časových krocích odpovídajících překryvu hodnotami z prvního okna a druhou polovinu hodnotami z druhého okna. Pro sub-doménovou metodu je důležitá i volba velikosti okna. Z hlediska přesnosti jsou rozdíly výsledku pro různé délky okna zanedbatelné, ale z hlediska výpočtových časů je vhodná volba počtu vzorků v okně zásadní.

Algoritmus sub-doménové metody lze pak shrnout do těchto kroků:

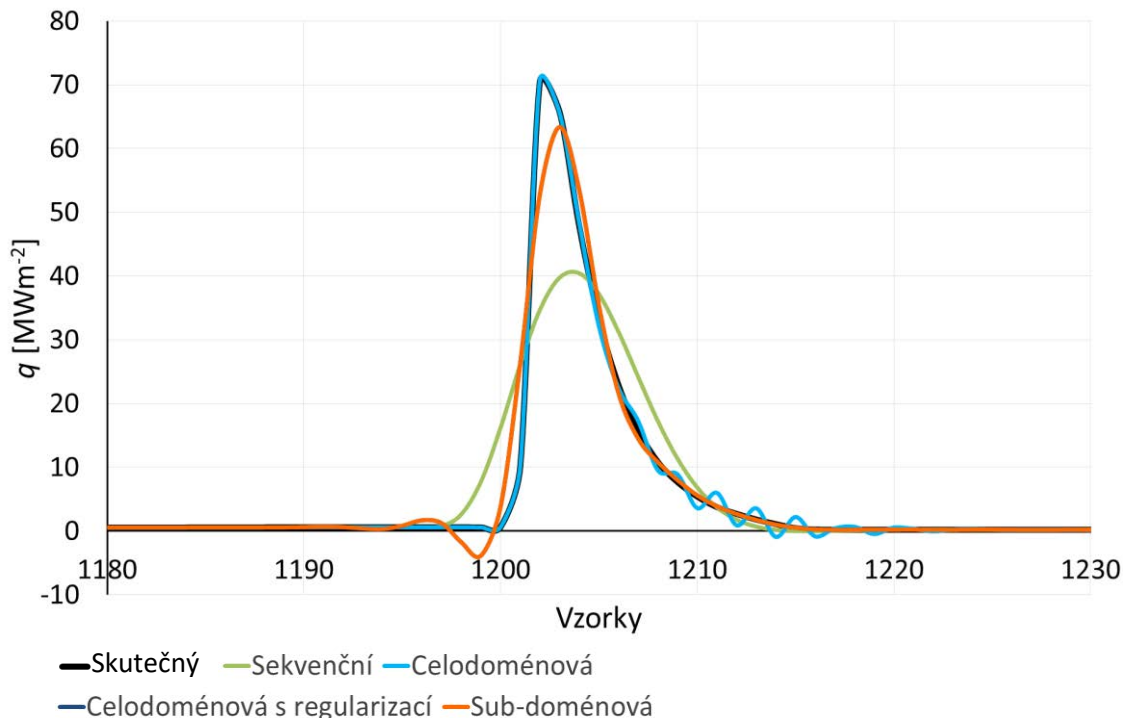
1. Nastavení velikosti okna.
2. Vypočtení koeficientů citlivosti.
3. Výpočet velikosti překryvu a počtu oken.
4. Vlastní výpočet hustoty tepelného toku: v prvním okně klasickou celodoménovou metodou, pro každé další okno je nutné nejprve vrátit výpočet o velikost překryvu zpět, vypočítat teplotní profil v tělese v tomto kroku a od něj začít další okno, kde je hustota tepelného toku vypočtena dle vzorce (12).
5. Do výsledného vektoru hustoty tepelného toku jsou zapsány hodnoty vypočtené pro odpovídající časové kroky, přičemž v místě překryvu je první polovina překryvu vyplněna hodnotami vypočtenými z prvního okna a druhá polovina hodnotami vypočtenými z druhého okna.

Sub-doménová metoda byla testována na datech získaných simulováním části reálného experimentu. Při experimentu byla použita deska z austenitické nerezové oceli 1.4828. Tloušťka desky byla 25 mm a termočlánek byl zabudován 0,7 mm pod povrchem. Před začátkem experimentu byla deska ohřata v elektrické peci na teplotu 865 °C. Po té deska projela skrze

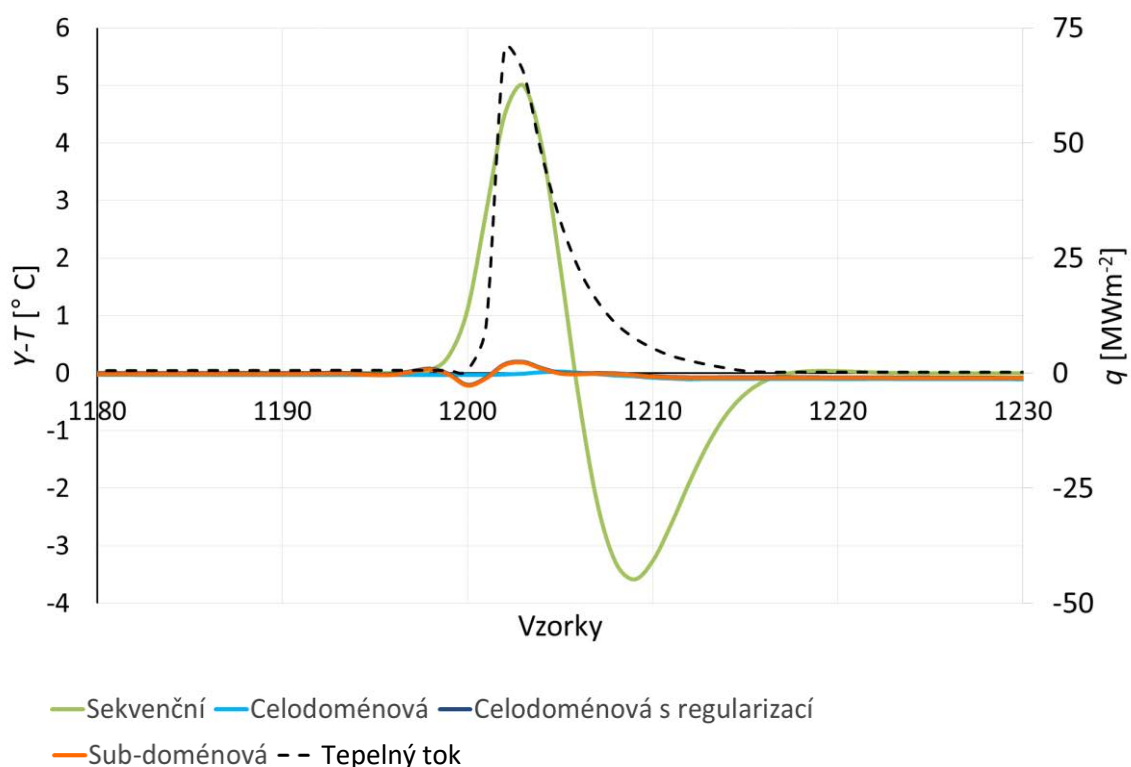
vysokotlaký vodní ostřík, který způsobil velmi krátké, ale velmi intenzivní ochlazení. Vzorkovací frekvence pro záznam teplot a polohy desky byla 320 Hz při rychlosti posuvu desky 2 m/s.

Vypočtené hodnoty hustoty tepelného toku jsou znázorněny pro různé metody na obr. 27. Při náhlé změně hustoty tepelného toku má velký význam tlumící efekt, který sekvenční metoda není schopna plně kompenzovat. Přímou z grafu lze pozorovat, že sekvenční metoda dává výsledky velmi vyhlazené v čase a maximální hodnota hustoty tepelného toku dosahuje pouze asi 50 % skutečné hodnoty. V tomto případě bylo možné použít obyčejnou neregularizovanou celodoménovou metodu, která pro tento konkrétní případ dosahuje nejpřesnějších výsledků. V jiných případech ovšem dochází k výraznějším oscilacím, a proto ji nelze obecně použít. Sub-doménová metoda se překrývá s celodoménovou metodou s regularizací. Při jejím použití dochází k chybám oproti skutečnosti, i když podstatně menším než u metody sekvenční. Je ale nutné zdůraznit, že byl regularizační parametr nastaven pevně. Zavedením některé z metod, která najde vhodný regularizační parametr před samotným výpočtem, by došlo k dalšímu vylepšení výsledku. Okamžitá výchylka může být způsobena pouze tím, že sub-doménová metoda nezareaguje na prudkou změnu naprosto přesně a hodnoty hustoty tepelného toku jsou velmi odlišné i ve dvou po sobě jdoucích časových krocích. Důležité je, že při použití sub-doménové metody nedochází k rozmazání informace v čase kvůli tlumícímu efektu a že nedochází k výraznému snížení maximální hodnoty hustoty tepelného toku, což bylo cílem vývoje této metody.

Na obr. 28 jsou znázorněny odchylky ve vypočtených průbězích teplot. Pro lepší názornost je do grafu přidána druhá osa pro průběh skutečné hustoty tepelného toku, aby bylo patrné, v které fázi dochází k největším chybám. Je zde jasně zřetelná nepřesnost sekvenční metody, která v podstatných fázích průběhu chlazení dává výsledky až o několik stupňů odlišné od měření. Odchylky celodoménových i sub-doménové metody jsou pouze v setinách až desetínách stupně, což je srovnatelné s citlivostí teplotních senzorů.



Obr. 27 Skutečné a vypočtené hodnoty hustoty tepelného toku



Obr. 28 Rozdíl mezi skutečnými a vypočtenými teplotami pomocí inverzních úloh

Velmi důležitým parametrem praktické použitelnosti metody je i rychlost výpočtu. Jak bylo uvedeno, sub-doménová metoda dosahuje stejné přesnosti jako celodoménová metoda s regularizací, kterou ovšem není možné v praxi využívat pro všechny výpočty z důvodu její vysoké výpočtové náročnosti. Např. výpočtový čas celodoménové metody s regularizací, tedy pro experiment trvající cca 7 sekund, činil přibližně 5 minut. Výpočet pomocí sub-doménové metody s oknem délky 100, která dosáhla stejných výsledků, trval už jen 3,2 s, což je dokonce o 0,7 s méně než výpočet pomocí sekvenční metody.

Tab. 1 Tabulka výpočtových časů pro různé metody inverzních výpočtů

Metoda	Okno [vz]	Čas [s]
Sekvenční	-	3,59
Celodoménová	-	7,93
Celodoménová s regularizací	-	261,08
Sub-doménová	50	4,01
	100	3,23
	200	3,99
	400	6,66
	800	29,87

Současná sub-doménová metoda je zatím omezena na modely, které jsou popsány soustavou lineárních rovnic. V reálných situacích jsou materiálové vlastnosti teplotně závislé a to vede na soustavu nelineárních rovnic. Proto je zapotřebí sub-doménovou metodu zobecnit tak, aby byla použitelná i pro nelineární modely a byla tak použitelná v běžné praxi.

2.4 INVERZNÍ ÚLOHA PRO STANOVENÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ OKUJÍ NA SUBSTRÁTU ZA ZVÝŠENÝCH TEPLŮT

Další typ inverzní úlohy, který byl vyvinut, se týká určení termofyzikálních materiálových vlastností okují přichycených na svém původním substrátu [27]. Spoluautor je studentem magisterského studia, který v rámci své bakalářské práce zpracovával data z těchto měření pod vedením autora této habilitační práce. V literatuře jsou jen velice omezené informace o vlastnostech okují, které se navíc téměř vždy týkají okují v sintrovaném stavu. Při zpracování oceli za vysokých teplot se ovšem v takovém stavu okuje nevyskytují. Okuje jsou výrazně porézní, což diametrálně mění jejich vlastnosti. Struktura se může výrazně lišit a závisí na mnoha faktorech, jako jsou teplota oxidace, doba oxidace, chemické složení oceli a složení okolní atmosféry. Článek [27] popisuje techniku, pomocí které je možné měřit vlastnosti okují při zachování jejich struktury.

2.5 VYUŽITÍ PARALELIZACE NA GRAFICKÝCH KARTÁCH

Pokud jsou v inverzních úlohách použity vícerozměrné numerické modely vedení tepla, výrazně je prodloužena doba výpočtu, která pak může být i v řádech několika dnů. Proto je důležité tyto numerické výpočty urychlit. Během několika posledních let překonaly grafické karty svým výkonem několikanásobně centrální procesorové jednotky (CPU) a také se staly jejich výpočtové jednotky mnohem univerzálně použitelnější. V aplikacích, kde se podařilo akcelarovat výpočty pomocí grafických karet je vidět výrazné zrychlení výpočtu a v některých případech dokonce několikanásobně. Možností akcelerace výpočtu vedení tepla na grafických kartách se zabývá článek [28]. Spoluautorkou článku byla doktorandka, která se ve své dizertační práci zabývala touto problematikou pod vedením autora této habilitační práce, který byl její školitel specialista. V článku je popsán nově navržený způsob výpočtu vedení tepla, který vychází z principu superpozice vedení tepla a je modifikovaný tak, aby byl vhodný pro paralelizovaný výpočet, což je vyžadováno při akceleraci na grafických kartách. Z uvedených srovnání dob výpočtů vyplývá, že pro velké modely může být dosaženo až desetinásobného zrychlení s využitím grafických karet.

3 APLIKACE INVERZNÍCH METOD VEDENÍ TEPLA

3.1 KONTINUÁLNÍ TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Výpočet vedení tepla je hojně využíván při návrhu a řízení tepelného zpracování oceli. Pro simulace jsou potřebné okrajové podmínky, které jsou často získávány z experimentálního měření s využitím inverzních úloh vedení tepla. Kapitola, která byla publikována v knize Heat Treatment: Conventional and Novel Applications [18], se detailně zabývá touto problematikou. Je v ní popsána strategie návrhu a problematika Leidenfrostovi teploty, která výrazně ztěžuje využití chlazení vodou za vysokých teplot. Dále pak pojednává o vlivu rychlosti na součinitel přestupu tepla, přičemž tyto údaje byly získány právě s využitím inverzních úloh vedení tepla. Popisuje také problematiku výpočtu vedení tepla, fázových změn a řešení pomocí inverzních úloh. Nakonec se zabývá zpracováním dat získaných inverzními úlohami a jejich využití při numerické simulaci tepelného zpracování. Autor této habilitační práce se zde podílel zejména na problematice spojené s inverzními výpočty, numerickými simulacemi a zpracováním dat.

3.2 EFEKT NEHOMOGENNÍHO CHLAZENÍ NA VÝSLEDNOU MIKROSTRUKTURU OCELI

Inverzní úloha vedení tepla byla použita při zkoumání homogennosti chlazení při kontinuálním tepelném zpracování oceli [29]. Při laboratorním měření bylo zjištěno, že nevhodně navržený

chladičí kolektor může způsobovat výrazně odlišné chlazení po šíře produktu. Pomocí experimentálně získaných dat s využitím inverzní úlohy vedení tepla bylo na základě numerické simulace zjištěno, že výsledný produkt může mít po šířce zcela odlišnou výslednou mikrostrukturu.

3.3 PŘECHLAZENÍ V MÍSTĚ PŘEKRYVU VODNÍCH PAPERŮ BĚHEM HYDRAULICKÉHO ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ

Při kontinuálním hydraulickém odstraňování okují za tepla je obvykle používána řada vysokotlakých trysek s velmi plochým paprskem. Aby bylo dosaženo odstranění okují po celé šířce produktu, vodní paprsky ze sousedících trysek se navzájem překrývají. Článek [30] pojednává o výrazně intenzivnějším nežádoucím chlazení v místě překryvu. Spoluautorka článku je doktorandkou, která se pod vedením autora této habilitační práce zaměřuje na optimalizaci hydraulického odstraňování okují. Na základě měření byla autorem habilitační práce navržena nová konfigurace, která výrazně snižuje efekt přechlazení v místě překryvu. V článku jsou prezentovány výsledky získané pomocí inverzní úlohy vedení tepla a získané výsledky jsou verifikovány pomocí řádkového infračerveného skeneru, pomocí kterého byly měřeny povrchové teploty experimentální desky za odkujovací sekci.

3.4 EFEKT RYCHLOSTI POHYBU POVRCHU A IMPAKTNÍHO TLAKU NA CHLAZENÍ PŘI ODKUJENÍ

Při kontinuálním hydraulickém odstraňování okují dochází k nežádoucímu intenzivnímu chlazení produktu. V rámci evropského projektu "High performance hot rolling process through steel grade-dependent influencing of the scale formation and flexible descaling control" sponzorovaného z "Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel" byl prováděn výzkum intenzity chlazení při hydraulickém odkujování v závislosti na rychlosti pohybu provalku a na impaktním tlaku. Autor habilitační práce koordinoval tu část projektu, která byla řešena na VUT v Brně a je autorem části finální zprávy popisující výsledky z tohoto výzkumu. Zpráva bude po obhájení projektu k dispozici široké veřejnosti.

3.5 VLIV TEPLoty VODY NA INTENZITU CHLAZENÍ PŘI HYDRAULICKÉM ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ

V rámci společného výzkumného projektu s firmou POSCO byl zkoumán vliv teploty vody na intenzitu chlazení při hydraulickém odstraňování okují a získané výsledky byly publikovány v OpenAccess časopisu [31]. Ukázalo se, že pokud je zvýšena teplota vody z běžných 20 °C na 50 °C, dojde k poklesu intenzity chlazení o více než 13%. Detailní informace jsou obsaženy v článku, který vznikl na základě spolupráce s korejským partnerem koordinované autorem této habilitační práce. Získané poznatky velmi dobře korelovali s provozními zkušenostmi na válcovací trati v korejské firmě POSCO.

4 ZÁVĚR

Inverzní úlohy jsou důležité pro získávání dat, které jsou následně použity při návrzích a optimalizacích průmyslových aplikacích, či finálních produktů. Tato práce je zaměřena zejména na inverzní úlohy vedení tepla, jejichž výsledky jsou aplikovány v hutním průmyslu při kontinuálním zpracování oceli. Práce byla rozdělena na dvě hlavní části, přičemž první je zaměřena na rozvoj inverzních metod vedení tepla a v druhé části byly popsány aplikace inverzních metod vedení tepla při kontinuálním zpracování oceli.

Jak bylo ukázáno, inverzní metody vedení tepla spadají do špatně podmíněných úloh. Převážná část uvedených inverzních úloh byla zaměřena na výpočet okrajových podmínek při nestacionárních dějích. V těchto úlohách dochází k výraznému utlumení signálu v místě teplotního čidla, které je zabudované uvnitř tělesa a snímá změny během měření, od působícího podmětu na povrchu tělesa. Také dochází ke zpoždění signálu a rozmazání informace v čase. Pro řešení těchto úloh byly popsány dva hlavní přístupy: sekvenční a celodoménový. V mnoha aplikacích nelze použít velmi rozšířenou sekvenční Beckovu metodu z důvodu různorodé povrchové teploty způsobené zabudováním teplotního čidla do zkoumaného tělesa. Z tohoto důvodu byla vypracována nová metoda Sekvenční identifikace, která je velmi univerzální. Lze ji použít jak pro výpočet součinitel přestupu tepla, tak hustoty tepelného toku. Navíc ji lze použít i pro nelineární modely, pod které spadají i modely s teplotně závislými materiálovými vlastnostmi. Nová metoda Sekvenční identifikace byla úspěšně použita pro kalibraci výpočtových modelů. Zařízení a postup použité k této kalibraci byly patentovány.

Pro úlohy, kde se velice rychle mění okrajové podmínky, může být vhodné použít celodoménovou metodu, protože dává přesnější výsledky, ale v případě že má úloha na vstupu větší teplotní záznam, výpočtové časy dosahují extrémních hodnot a stabilita výpočtu je taktéž zhoršena díky zaokrouhlovacím chybám. Proto byla vyvinuta sub-doménová metoda, která spojuje výhody sekvenční metody (rychlost) a celodoménové metody (přesnost). Ukázalo se, že při vhodné velikosti výpočtového okna sub-doménové metody může být rychlost výpočtu srovnatelná se sekvenční metodou, přičemž přesnost výpočtu je srovnatelná s celodoménovou metodou. Nevýhodou této metody zatím zůstává to, že je omezená na lineární modely, a proto bude nutné tuto metodu dále vyvíjet, aby byla univerzálně použitelná.

Mezi další nové inverzní metody, které byly v práci popsány, patří inverzní metoda pro stanovení termofyzikálních vlastností povrchové vrstvy na substrátu (například okují) za zvýšených teplot. Výpočty potvrdily, že tepelná vodivost poréznych okují je výrazně nižší než vodivost sintrovaných okují. Pro urychlení náročných inverzních výpočtů byl navržen nový algoritmus využívající principu superpozice a ten byl úspěšně akcelеровán na výkonných grafických kartách. Tím došlo v některých případech až k desetinásobnému urychlení výpočtu.

Nové inverzní metody byly úspěšně aplikovány v řadě výzkumných projektech. Mezi ně patří kontinuální tepelné zpracování, efekt nehomogenního chlazení na výslednou mikrostrukturu oceli, nadměrné chlazení v místě překryvu vodních paprsků, vliv rychlosti pohybu chlazeného povrchu a impaktního tlaku od vodního paprsku na intenzitu a časový průběh chlazení. Inverzní metody byly taktéž úspěšně použity při zkoumání vlivu teploty vody na intenzitu chlazení při hydraulickém odstraňování okují.

Přestože inverzní úlohy vedení tepla prošly velkým vývojem, jsou zde stále problémy, které je nutné do budoucna vyřešit. Velice slibná je například nová sub-doménová metoda, kterou je ovšem nutné zobecnit aby byla použitelná i na nelineární modely a mohla být použita tam, kde jsou používány teplotně závislé materiálové vlastnosti. Nově navržená metoda pro měření termofyzikálních vlastností okují na oceli nedává výsledky s velkou přesností a je extrémně citlivá na chybu ve vstupních datech. Stále je tedy co zlepšovat a nově získané poznatky otevírají možnosti pro další výzkum v této problematice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Tikhonov, A. N.; Arsenin, V. Y. *Solution of Ill-Posed Problems*. Washington, D.C.: Winston, 1977. ISBN 0470991240.
- [2] Mandrel, J. Use of the singular value decomposition in regression analysis. *Am. Stat.*, 1982, č. 36, s. 15–24.
- [3] Stloz, G. Jr. Numerical solutions to an inverse problem of heat conduction for simple shapes. *Int. J. Heat Transfer*, 1960, č. 82, s. 20–26.
- [4] Grysa, K.; Cialkowski, M. J.; Kaminski, H. An inverse temperature field problem of the theory of thermal stresses. *Nucl. Eng. Des.*, 1981, č. 64, s. 169–184.
- [5] Beck, J. V.; Litkouhi, B.; St. Clair, C. R. Jr. Efficient sequential solution of the nonlinear inverse heat conduction problem. *J. Numerical Heat Transfer*, 1982, č. 5, s. 275–286.
- [6] Bass, B. R. Applications of the finite element to the inverse heat conduction problem using Beck's second method. *J. Eng. Ind.*, 1980, č. 102, s. 168–176.
- [7] Fu, Ch. L. Simplified Tikhonov and Fourier regularization methods on a general sideways parabolic equation. *J. Comput. Appl. Math.*, 2004, Vol 167, s. 449–463.
- [8] Pohanka, M.; Woodbury, K. A. A Downhill Simplex method for computation of interfacial heat transfer coefficients in alloy casting. *Inverse. Probl. Eng.*, 2003, č. 11, s. 409–424.
- [9] Raudenský, M.; Pohanka, M.; Horský, J. Combined inverse heat conduction method for highly transient processes. In *Advanced computational methods in heat transfer VII*, Halkidiki: WIT Press, 2002, s. 35–42. ISBN 1-85312-9062.
- [10] Sláma, L.; Raudenský, M.; Horský, J.; Březina, T.; Krejsa, J. Evaluation of quenching test of rotating roll with unknown time constant of sensor using genetic algorithm. *Int. Conf. Mendel, Brno*, 1996.
- [11] Raudenský M.; Horský J.; Krejsa J. Usage of neural network for coupled parameter and function specification inverse heat conduction problem. *Int. Commun. Heat Mass*, 1995, Vol 22, s. 661–670.
- [12] Pohanka, M.; Raudenský, M.; Horský, J. Attainment of more precise parameters of a mathematical model for cooling flat and cylindrical hot surfaces by nozzles. In *Advanced computational methods in heat transfer VI*. Madrid: WIT Press, 2000, s. 627–635. ISBN 1 85312 818 X.
- [13] Liu, Z.; Wang, B. Coefficient identification in parabolic equations. *Appl. Math. Comput.*, 2009, č. 209, s. 379–390.
- [14] Deng, Z. Ch.; Yang L. An inverse problem of identifying the coefficient of first-order in a degenerate parabolic equation. *J. Comput. Appl. Math.*, 2011, č. 235, s. 4404–4417.
- [15] Raudenský, M.; Horský, J.; Pohanka, M. Optimal cooling of rolls in hot rolling. *Journal of material processing technology*. 2002, č. 125–126, s. 700–705.
- [16] Horský, J.; Raudenský, M.; Pohanka, M. Experimental study of heat transfer in hot rolling and continuous casting. *Mater. Sci. Forum*, 2005, č. 473–474, s. 347–354.
- [17] Beck, J. V.; Blackwell, B.; St. Clair, C. R. *Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems*. New York: Wiley, 1985. ISBN 0-471-08319-4.

- [18] Pohanka, M.; Kotrbáček; P. Design of Cooling Units for Heat Treatment, Heat Treatment – Conventional and Novel Applications, InTech, 2012, s 1–20, doi:10.5772/50492
- [19] Pohanka, M. Limitation of thermal inverse algorithm and boundary conditions reconstruction for very fast changes on boundary. In *Engineering mechanics 2007*. Svratka (Czech Republic), 2007, s. 229–230. ISBN 978-80-87012-06-2.
- [20] Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, 1980. ISBN 0-891-16522-3.
- [21] William, H. P.; Saul A. T.; William, T. V.; Brian, P. F. Numerical Recipes in C. 2nd ed. 1997. ISBN 0-521-43108-5.
- [22] Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. New York: Wiley, 1996. ISBN 0-471-30460-3.
- [23] Komínek, J.; Pohanka, M. Estimation of the number of forward time steps for the sequential Beck approach used for solving inverse heat-conduction problems, *Materiali in Tehnologije*, 2016, č. 50(2), s. 207–210, DOI: 10.17222/mit.2014.192
- [24] Pohanka, M.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: Způsob a zařízení ke stanovení polohy teplotního čidla. 305609, patent. (2015)
- [25] Brent, R.P. 1973, Algorithms for Minimization without Derivatives. Courier Corporation, 1973. ISBN 0-486-41998-3.
- [26] Woodbury, K. A.; Beck, J. V. Estimation metrics and optimal regularization in a Tikhonov digital filter for the inverse heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013, c. 62, s. 31–39. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.052.
- [27] Pohanka, M.; Chabičovský, m.; Ondruch, T. Thermophysical properties measurement of scale layer on steel substrate using flash method. 24th International conference on materials and technology. Ljubljana, 2016. s. 175–175.
- [28] Pohanka, M.; Ondroušková, J. Implicit numerical multidimensional heat-conduction algorithm parallelization and acceleration on a graphics card. *Materiali in tehnologije*, 2016, roč. 50, č. 2, s. 183–187. DOI: 10.17222/mit.2014.128
- [29] Ondroušková, J.; Pohanka, M. Nonhomogeneous cooling effect on metallurgical structure of material. In *Power System Engineering, Thermodynamics & Fluid Flow*. 2011. s. 10–16. ISBN: 978-80-261-0004- 1.
- [30] Pohanka, M.; Votavová, H. Overcooling in overlap areas during hydraulic Descaling. *Materiali in tehnologije*, 2016, roč. 50, č. 4, s. 575–578.
- [31] Pohanka, M.; Votavová, H.; Raudenský, M.; Hwang, J. Y.; You, J. W.; Lee, S. H. The effect of water temperature on cooling during high pressure water descaling. *Thermal Science*, 2017, č. 00, s. 163–173.

ABSTRACT

This work focuses mainly on the inverse tasks of heat conduction and their use in the metallurgical industry such as applications for continuous heat treatment, roll cooling and descaling. Numerical models for design and control in the metallurgical industry require a precise description of the heat transfer on the surface of the cooled material. Comprehensive heat transfer information is not yet available for cooling of hot surfaces by water sprays or laminar jets. Therefore, the necessary boundary conditions must be obtained experimentally, which leads to ill-posed inverse heat conduction problems. In the non-stationary direct heat conduction task used in simulations and in on-line control, temperature distribution as a function of time is calculated based on known boundary conditions, geometry, material properties, and known initial temperature distributions. In the inverse task that we are dealing with, the time dependent boundary conditions are calculated based on the measured temperature history at one or more points within the body. There are also three other types of inverse tasks: determination of material properties from measured temperature history, determination of body geometry and determination of initial temperatures. To solve these problems, two main approaches are described: sequential and whole-domain. This work deals with both of these approaches and introduces new ones. New Sequential identification approach is described and it is shown that it is more universal than widely used Sequential Beck's approach. Another new Sub-domain method for linear models is also described. This new method uses benefits from both approaches: the speed from sequential approach and accuracy from whole-domain approach. For determination of thermophysical properties of scale layer on steel new approach is described. This method is based on flash method and uses complex heat transfer and fluid flow model of measuring apparatus. The speed-up approach using acceleration on GPU is described and results shows that the computational time of heat conduction can be significantly shorten. The usage of new approaches is presented in research projects.