

# OPONENTNÍ POSUDEK DIPLOMOVÉ PRÁCE

Název práce: **Fialův termofyziologický model tepelného komfortu**  
Autor: Bc. Jan ŠIŠOLÁK  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Technika životního prostředí  
Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír ZMRHAL, Ph.D.  
Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní ČVUT v Praze

## Téma diplomové práce (DP)

Podle zadání se měl diplomant zaměřit na princip Fialova termofyziologického modelu lidského těla a popsat postup výpočtu přenosu tepla mezi jednotlivými částmi lidského těla a mezi tělem a okolním prostředím. Dále měl za úkol sestavit rovnice pro výpočet v zjednodušené formě modelu, provést jejich numerické řešení a porovnat výsledky s dostupnými údaji z Fialovy práce.

Zadané téma je mimořádně náročné, podle mého názoru až příliš náročné pro účel DP. Diplomant musel splnit tři poměrně těžké úkoly: nastudovat a pochopit Fialův model (Fialova disertační práce v angličtině má včetně příloh 293 stran), zvládnout metodu konečných diferencí pro numerické řešení soustavy rovnic popisujících sdílení tepla a konečně pro toto řešení reprogramovat funkční výpočetní nástroj.

## Postup řešení a dosažené výsledky

Diplomantovy úpravy Fialova modelu spočívají ve sjednocení teploty okolních ploch (vliv sálání), zanedbání vlivu natočení částí těla (sjednocení sektorů označených anatomicky jako zadní, přední a vnitřní), úpravě diskretizace úlohy na povrchu těla a v zavedení konstantní teploty tepenné krve. Pro numerické řešení sestavil vlastní program v softwaru MATLAB.

Při řešení postupoval diplomant systematicky a všechny kroky jsou v DP řádně dokumentovány. V případě nejasností si vhodně vypomohl rozměrovou analýzou veličin (str. 48). Dílčí výsledky se snažil ověřit např. kontrolními výpočty. Sám jsem namátkou některé dílčí výsledky porovnal s dostupnými informacemi a považuji je za správné.

Jako konečné výsledky autor prezentuje součinitele přestupu tepla na povrchu těla (tab. 12), toky tepla sdíleného tělem různými mechanismy s okolím (tab. 13) a teploty kůže a hypotalamu (tab. 14). Svoje výsledky porovnává s výsledky z Fialovy disertační práce. Zatímco součinitele přestupu tepla vyšly poměrně blízko hodnotám Fialovým, tepelné toky jsou až o 84 % vyšší (pro konvekci) než ve Fialově původní práci. Střední teplota kůže vypočtená diplomantem je sice vyšší jen o 7 %, avšak vezme-li se v úvahu, že tepelný tok je určen rozdílem této teploty vůči teplotní okrajové podmínce 30 °C, odchylka od Fialova řešení vzroste na 55 %. Diplomant se snažil posoudit citlivost modelu na volbu teploty tepenné krve a různé okrajové podmínky. Došel k závěru, že problém je v teplotě tepenné krve. Správně by tato teplota měla být proměnná a tedy být součástí numerického řešení, avšak v této části se diplomantovi nepodařilo dosáhnout uspokojivého výsledku (viz str. 62), a proto musel volit teplotu tepenné krve konstantní (37 °C).

Možný zdroj odchylky jsem našel v rovnici (40) pro přenos tepla sáláním na str. 36. Zde totiž Fiala uvažuje teplotu okolních ploch a jejich emisivitu, kdežto diplomant počítá se střední radiční teplotou, a tedy emisivitou okolních ploch rovnou 1. Dalším důvodem odchylky může být i způsob diskretizace úlohy na povrchu těla (diplomantův přístup se zde liší od Fialova). To lze však posoudit jen při zpracování úlohy oběma přístupy.

V tab. 11 jsou chybně uvedeny jednotky objemu. Numerické výsledky v tab. 15 by měly být zaokrouhleny. Z Fialových testů totiž vyplývá nejistota model v řádu desetin (minimálně setin) °C. Není mi jasné, proč graf vypočtených teplot na obr. 16 vykazuje pro element II (asi obličej) řádově vyšší rozsah teplot než pro ostatní části lidského těla.

## Hodnocení obsahu diplomové práce

DP je prezentována na 78 stranách včetně obrázků, tabulek, grafů a seznamu použité literatury. Je rozdělena do pěti hlavních částí věnovaných postupně úvodu, přehledu modelů tepelného komfortu, popisu Fialova modelu, vlastní implementaci zjednodušeného Fialova modelu a závěru. Příloha na CD obsahuje zdrojové kódy programů sestavené v MATLABu.

V celé DP se porůznu projevují problémy s terminologií. První sporné termíny jsou v seznamu použitého označení, který na více než 4 stranách uvádí symboly pro 129 různých veličin, což mj. naznačuje, o jak složitou problematiku se jedná (i když by šel výčet zkrátit rozdělením na základní symboly a na indexy). Jako příklady nevhodné terminologie lze uvést *odpor kožní tkáně proti průchodu vodní páry* [ $\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{W}^{-1}$ ], který je spíše *odporem proti přenosu latentního tepla*, dále *perfuzi* [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ], což je spíše *měrná perfuze* nebo *objemová hustota (intenzita) perfuze* (v textu DP je dále chybně uváděna jako *rychlost perfuze*). Na str. 8 jsou symboly pro 3 různé měrné tepelné kapacity, poslední z nich má zvláštní jednotku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. *Fyzická činnost* není veličina (str. 9). Výkon vztažený na 1  $\text{m}^3$  je objemovou hustotou výkonu (str. 9), pokud je vztažený na 1  $\text{m}^2$ , jedná se o plošnou hustotu výkonu. *Setpoint* lze snad přeložit jako žádanou nebo nastavenou hodnotu.

V části věnované základům tepelného komfortu (TK) a přehledu modelů pro hodnocení nebo predikci TK autor klasifikuje modely jako *psychologické*, *fyzilogické* a *racionální* (s. 15, kap. 1.1), jiné uváděné rozdělení je na *empirické*

a racionální modely (s. 15, kap. 1.2). I když byly tyto klasifikace pravděpodobně převzaty z literatury, mám výhrady vůči kategorii *racionální* v obou uvedených případech. Znamená to snad, že jsou ostatní kategorie neracionální? V prvním případě by snad bylo vhodnější nazvat třetí kategorii modelů *fyzikální* (pokud jsou založené na tepelné bilanci a fyzikálních veličinách) a v druhém případě je protikladem empirického *analytický* model. Je škoda, že tyto klasifikace nejsou systematicky uvedeny u modelů popsanych v kap. 1.3. Zároveň chybí zařazení Fialova přístupu do celé hierarchie modelů TK.

V kap. 1.2 autor začíná komplikovat terminologii související s rozdělením lidského těla na různé části. V celé DP jsou pak pro tyto účely použity celkem 3 termíny – *element*, *segment*, *sektor*, o jejichž významu je třeba zbytečně přemýšlet. Přitom by stačil jediný obrázek, který by tyto termíny jednoznačně ilustroval.

Kapitola 2 je věnována popisu Fialova modelu (FM). Zde se autor DP dopustil chyby v tom, že už do popisu FM míchá svoje vlastní úpravy, což je na některých místech poněkud matoucí. Lepší by bylo popsat FM tak, jak byl sestaven, a ve zvláštní kapitole přehledně uvést vlastní modifikace. Pro vliv oděvu byl Fialou zaveden faktor  $f_o$ , který však na rozdíl od tvrzení na str. 32 může nabývat hodnoty menší než 1 (např. osoba v plavkách) a pro nahé tělo bude  $f_o = 0$ . Tepelný odpor se týká nejspíše *citelného* tepla, nikoliv *suchého* tepla (str. 32).

V kap. 3 se autor věnuje vlastnímu řešení, tj. implementaci FM a jeho numerickému řešení. Autor se zaměřil na stacionární model bez vlivu akumulčního členu. Různé údaje pro jednotlivé elementy (části) těla jsou uvedeny v tabulkách, kde jsou však části těla většinou označeny římskými číslicemi. Slovní popis by byl přehlednější. Úvodní tabulka č. 2 na str. 44 sice obsahuje slovní popis částí těla, ale zase bez jejich číselného označení, takže je čtenář donucen si jednotlivé elementy odpočítávat. Geometrické *parametry* jsou prostě jen *rozměry* a fyzikální *parametry* jsou *vlastnosti* (str. 46). Kapitola 3 obsahuje také výsledky numerického řešení stacionárního modelu a jejich diskusi, podle mého názoru by si tato část DP zasloužila vlastní kapitolu. Poslední část kap. 3 je věnována diferenčním rovnicím pro nestacionární model, jehož numerické řešení už nebylo provedeno.

V závěru DP autor shrnuje postup řešení, adekvátně hodnotí dosažené výsledky a navrhuje kroky pro další postup pro případné navazující řešení této problematiky.

### Jazyková a grafická úprava diplomové práce

Text práce je srozumitelný, gramatické chyby (neshoda větných členů středního rodu, vynechávání čárek v souvětích) se vyskytují pouze zřídka. Symboly veličin by v textu měly mít obdobný styl jako v rovnicích, takže by měly být psány kurzívou. Po grafické stránce nemám zásadní připomínky, grafy dostatečně podrobně a srozumitelně ukazují získané výsledky. Postrádal jsem schematické znázornění částí lidského těla (elementy, segmenty a sektory), na které navazuje prostorová diskretizace úlohy.

### Celkové hodnocení

Zadání DP bylo splněno. Řešení je prezentováno srozumitelně a přehledně, i když mám určité výhrady ke struktuře textu DP. Poměrně četné problémy s terminologií vyplývají z nedostatku české literatury zaměřené na danou oblast, autor asi musel vycházet především z vlastního překladu z angličtiny. Gramatické chyby se v textu vyskytují pouze ojediněle. V teoretické části bych uvítal systematičtější klasifikaci modelů TK. K postupu vlastního řešení stacionárního modelu a hodnocení výsledků nemám podstatné připomínky.

Autor prokázal schopnosti, které podle mého názoru významně převyšují běžnou úroveň absolventa oboru TŽP – nastudoval rozsáhlou problematiku, samostatně aplikoval metodu konečných diferencí a naprogramoval vlastní numerické řešení modelu v MATLABu. Diplomová práce v každém případě splňuje požadavky kladené na absolventa magisterského studia na ČVUT v Praze a doporučuji přihlásit ji do soutěže Zvoničkovy nadace FS.


Navrhuji celkové hodnocení diplomové práce známkou

**A (výborně).**

### Otázky pro diplomanta

1. Jaká je úplná klasifikace Fangerova modelu a Fialova modelu v rámci kategorií uvedených na str. 15?
2. Kam byste zařadil Fialův model v rámci hierarchie modelů tepelného komfortu?
3. Proč graf vypočtených teplot na obr. 16 vykazuje pro element II (obličej?) řádově vyšší rozsah teplot než pro ostatní části lidského těla?
4. Je možné použít Fialův model pro posouzení tepelného komfortu v kabině vozidla, kde budou využity prvky kontaktního ohřevu nebo chlazení (např. ohřev volantu, ohřev/chlazení sedadla)?

V Praze 17. srpna 2018

  
Ing. Martin Barták, Ph.D.  
Ústav techniky prostředí  
ČVUT v Praze, Fakulta strojní