

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 718

ISSN 1213-418X

Jan Fišer

**METODY HODNOCENÍ TEPELNÉHO
KOMFORTU A JEJICH VYUŽITÍ
V EXPERIMENTÁLNÍ
A KONSTRUKČNÍ PRAXI**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

**METODY HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU
A JEJICH VYUŽITÍ V EXPERIMENTÁLNÍ
A KONSTRUKČNÍ PRAXI**

APPLICATION OF THERMAL COMFORT ASSESSMENT METHODS
ON EXPERIMENTAL AND DESIGN PRACTICE

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelný komfort, termofyziologie, tepelný manekýn, ekvivalentní teplota, kvalita vnitřního prostředí.

KEYWORDS

Thermal comfort, Human thermophysiology, Thermal manikin, Indoor environment quality.

MÍSTO ULOŽENÍ RUKOPISU HABILITAČNÍ PRÁCE:

Fakulta strojního inženýrství
Vysoké učení technické v Brně
Technická 2896/2
616 00 Brno

PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě bych rád poděkoval lidem, kteří se podíleli na vzniku této práce ať již přímo prostřednictvím rad a pomoci, či nepřímo osobní podporou autora. Na prvním místě patří velký dík manželce Lucii a dcerám Elen a Evě, které svou podporou a vyhrazením nutného času umožnily vznik této práce. Dále bych poděkoval mému otci Janu Fišerovi, který mě vedl k sociálním dovednostem, které byly důležitým pro rozvoj spolupráce s ostatními pracovníky v oboru.

Práce by nikdy nevznikla bez podpory a inspirace od mentora prof. Miroslava Jíchy. Svým náhledem na výzkum založený na propojení laboratorních experimentů a simulačních přístupů umožnil vznik a rozvoj teamu, který autor dále označuje jako Laboratoř tepelného managementu. Svým tolerantním vedením a zapojením autora do projektů týkajících se HVAC systémů kabin dopravních prostředků umožnil rozvoj dovedností a znalostí autora.

Poděkování dále patří kolegům a kolegyním z teamu Laboratoře tepelného managementu, v které se realizovala většina experimentů uvedených v práci. Prakticky všech projektů se účastnil kolega Jan Pokorný, který je hlavním autorem matematických modelů vyvinutých v laboratoři. Výroby laboratorních standů, prototypování nových zařízení a praktických měření v laboratoři i terénu se zhostili kolegové Ondřej Pech, Jiří Hejčík, Patrik Bouchal a Jan Šíp. K zásadnímu rozvoji mezinárodní spolupráce přispěli kolegové Miloš Fojtlín a Róbert Toma. Provoz laboratoře a celého teamu byl zajištěn také díky práci a aktivitě Barbory Kopečkové, jak v oblasti managementu projektů, tak matematického modelování přenosu tepla. Laboratoř také prošla celá řada studentek a studentů, kteří zpracovali řadu témat v oboru měření tepelných vlastností oděvů, měření a simulace prostředí.

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. TEPELNÝ KOMFORT	6
2.1. Tepelná rovnováha mezi lidským tělem a okolím	7
2.2. Psychologické aspekty tepelného komfortu.....	9
2.3. Kvantifikace vnímání a hodnocení tepelného stavu prostředí.....	11
2.4. Tepelný komfort jako optimalizační parametr	12
3. ADAPTAČNÍ STRATEGIE A ÚPRAVY PROSTŘEDÍ	13
3.1. Adaptabilita pasivní.....	13
3.2. Adaptabilita aktivní.....	13
3.3. Adaptabilita kreativní	14
4. HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU	17
4.1. Hodnocení tepelného komfortu na základě měření.....	17
4.2. Hodnocení tepelného komfortu na základě modelování.....	20
5. VYUŽITÍ POSTUPŮ V EXPERIMENTÁLNÍ A TECH. PRAXI	22
5.1. Simulace prostředí v kabině A380 projekt iSPACE	22
5.2. Tepelný komfort v kontaktní ploše sedačky s vyhříváním.....	23
5.3. Součinitele přenosu tepla radiací a konvekci z lidského těla.....	25
5.4. Pilotní ověření FMTK modelu na ochranných oděvech	25
6. TEZE PRÁCE	26
7. ZÁVĚR	28
POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY	30
LITERATURA	31
ABSTRACT	37

O AUTOROVI

OSOBNÍ ÚDAJE:

Jméno příjmení: Jan Fišer, Ph.D. Ing. Bc.
Datum narození: 08. 01. 1979 ve Vysokém Mýtě
Rodinný stav: ženatý



VZDĚLÁNÍ:

09/2004 – 11/2011 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
obor Konstrukční a procesní inženýrství, doktorské studium
Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel
09/2001 – 06/2004 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
obor Technika prostředí, magisterské studium
09/1997 – 06/2001 VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky
obor Elektronické součástky a systémy, bakalářské studium

PRAXE:

06/2015 – doposud Odborný asistent, Odbor termomechaniky a techniky prostředí,
Energetický ústav, FSI VUT v Brně
01/2012 – 06/2015 Postdok, Odbor termomechaniky a techniky prostředí,
Energetický ústav, FSI VUT v Brně

PEDAGOGICKÁ ČINNOST:

V současnosti vyučované předměty:

- Tepelný management automobilů
- Větrání a klimatizace
- Aplikace klimatizačních systémů
- Experimentální metody I a II

Vedoucí 12 obhájených bakalářských prací, 20 obhájených diplomových prací a školitel-specialista jedné obhájené disertační práce.

VĚDECKO-VÝZKUMNÁ ČINNOST:

Spoluautor 12 publikací v mezinárodních vědeckých časopisech s IF, celkem 28 publikací dle WoS a 30 publikací dle Scopus. Počet citací bez autocitací WoS: 71 / Scopus: 113. Odpovědný řešitel/spoluřešitel 6 grantových projektů (5× TAČR, 1× 7FPEU) a více jak 10 projektů s průmyslem.

1. ÚVOD

V současné době jsou vyvinuty četné metody pro hodnocení tepelného stavu prostředí a jeho účinků na lidské tělo [1]–[4]. Člověk, jenž jako druh patří do třídy savců, je vybaven aktivním mechanismem pro regulaci tělesné teploty, jehož hlavním účelem je udržet vnitřní teplotu těla v relativně úzkém rozmezí, které je nezbytnou podmínkou pro optimální průběh vnitřních biologických procesů [5]. Tento komplex biologických mechanismů je dle současného vědeckého poznání výsledkem adaptace lidského těla na prostředí, ve kterém se člověk vyvinul [6] a umožňuje mu aktivitu v širokém pásmu tepelných podmínek okolního prostředí [7]. Rovnováha mezi produkcí a přenosem tepla do okolí lidského těla je základní podmínkou pro dosažení tepelného komfortu, má ale také podstatný vliv na psychiku, kognitivní schopnosti, možnost soustředění a celkovou schopnost provádět mentálně obtížné či manuálně precizní činnosti (řízení vozu [8], tvůrčí činnosti a výuka [9], chirurgické výkony [10], přesná montáž, hra na hudební nástroje [11] atd.). Stavy tepelné nepohody jsou nejen nepříjemné, ale pokud se trvale vyskytují v prostředí, ve kterém člověk opakovaně pobývá (řidič v kabině vozu, pokladní v supermarketu) významně zvyšují pravděpodobnost vzniku trvalých zdravotních následků a nemocí z povolání [12]. Z tohoto důvodu se začínají v posledních letech intenzivněji využívat metody měření a predikce tepelného komfortu [13] s cílem omezit tato rizika na minimum a to již v návrhové a konstrukční fázi systémů [14] pro úpravu a řízení vnitřního prostředí tzv. HVAC systémů (z anglického Heating, Ventilation and Air Conditioning [15]). Neopominutelnou součástí řešení problematiky vnitřního prostředí je pak využití těchto postupů i při provozu a řízení HVAC systémů, kde se nachází stěžejní oblast nutná pro vytváření zdravého prostředí s minimem rizik a přímých i vedlejších nákladů spojených s provozem HVAC zařízení.

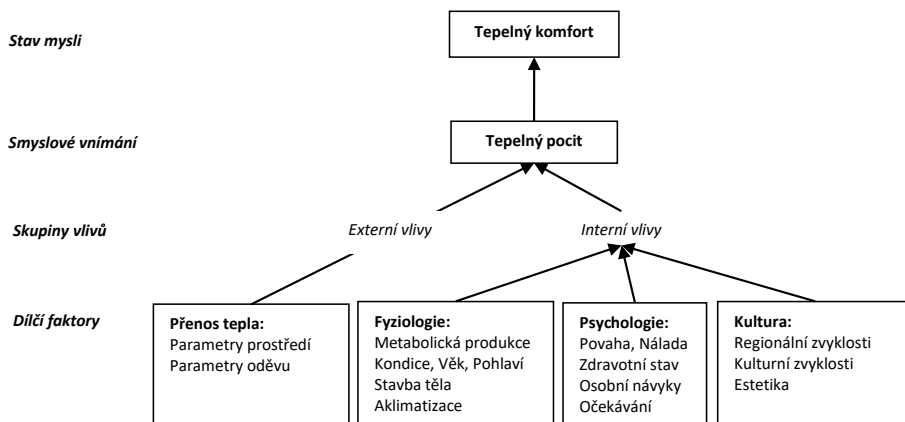
Tato práce přináší přehled současných nástrojů pro měření a predikci tepelného komfortu ve vnitřním prostředí a na příkladech ilustruje možnosti jejich využití v experimentální, konstrukční, projekční a provozní praxi. Dokumentuje i vývoj těchto nástrojů od metod založených na pasivním měření parametrů okolního prostředí k metodám založeným na aktivních senzorech napodobujících přenos tepla z povrchu lidského těla až po metody založené na komplexní počítačové simulaci lidské termofyziologie. Hlavním cílem užití těchto nástrojů je pak nejen kvalitní a zdravé vnitřní prostředí, ale také energetická efektivita HVAC systémů, která je při dnešní intenzitě využití energetických zdrojů a jejich dopadů na životní prostředí jednou ze zásadních výzev, před kterou lidstvo v 21. století stojí [16], [17].

2. TEPELNÝ KOMFORT

Pojem komfort lze obecně definovat jako „stav mysli vzniklý na základě subjektivního vnímání, vyjadřující spokojenost vzniklou ve spojení s určitým dostatkem. Komfort pak často vyjadřuje velký dostatek při uspokojování nějaké lidské potřeby.“[18]. Současná psychologie [19] a transkulturní psychiatrie [20] dokumentuje, že motiv dosažení dostatku nebo také komfortu se vyskytuje napříč různými lidskými kulturami. Dle principu Maslowovy pyramidy [21] je potřeba tepelného komfortu řazena do základních fyziologických potřeb člověka, jejichž alespoň částečné naplnění je nezbytnou podmínkou pro realizaci potřeb vyšších, mezi které lze řadit různé činnosti související s funkcemi lidské společnosti obecně. Potřeba dosahování stavu tepelného komfortu z pohledu biologie také vyplývá z principu tzv. homeostáze, což je schopnost systému (například organismu) udržet stálý stav nějaké veličiny (např. teploty těla), která je nezbytná pro jeho funkci, a to i v případě, že se okolní podmínky mění. Z pohledu biologie je tedy motivace k odstranění tepelného diskomfortu dána základní potřebou udržovat vnitřní parametry lidského těla v určitých limitech, které jsou nezbytné pro základní biologickou existenci člověka. S fenoménem tepelného komfortu a jeho hodnocení z pohledu psychologie je také úzce spjat pojem kvalita, neboť „Komfort souvisí s vnímáním kvality okolního světa.“ [25]. Zde však nastává zásadní problém, neboť kvalita je většinou posuzována na základě smyslového vnímání a hodnocení, zatímco kvantitu (množství) lze objektivně zjistit pomocí měření či počítání. Pokud tedy výše uvedené zúžíme na fenomén tepelného stavu prostředí a interakce lidského těla s ním, pak

TEPELNÝ KOMFORT lze definovat následovně: Tepelný komfort je stav mysli vyjadřující spokojenost s tepelným stavem okolního prostředí a je výsledkem subjektivního hodnocení [22].

Za vyjádření oné spokojenosti se obvykle považuje fakt, že na tepelný stav okolního prostředí nemá člověk potřebu nijak zásadně reagovat či upravovat své chování [14], [23] tak, aby odezvy termoregulačního systému lidského těla byly minimální. Vyrovnaná tepelná bilance systému tělo–okolí je tedy základní podmínkou pro dosažení tepelného komfortu, avšak existuje ještě mnoho dalších faktorů, které ovlivňují jeho dosažení (viz Obr. 1).



Obr. 1 – Základních skupiny faktorů, které ovlivňují tepelný komfort člověka.

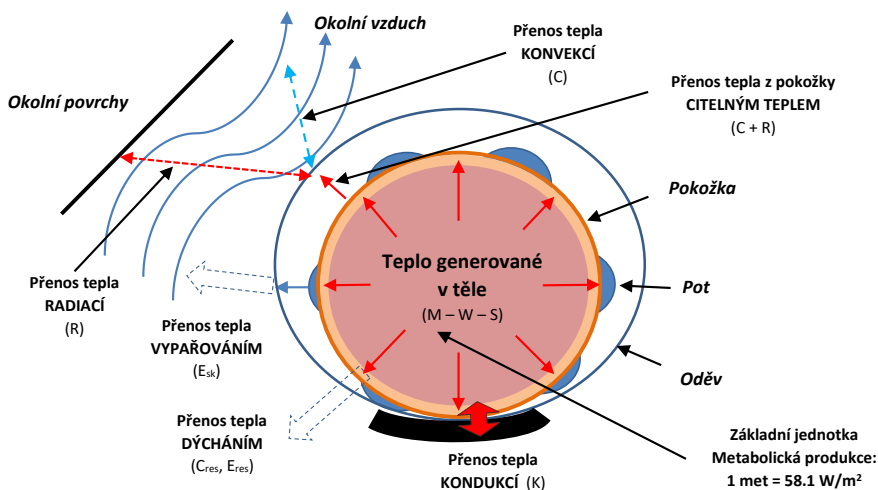
Lze je rozdělit do dvou základních skupin a to na Externí vlivy = faktory prostředí a Interní vlivy = faktory osobní, definující dispozice každého jedince. Mezi externí vlivy patří ty faktory, které ovlivňují přenos tepla a látky mezi tělem a okolím a do interních pak faktory z oblasti Fyziologie, Psychologie a Kulturních zvyklostí daného jedince.

2.1. Tepelná rovnováha mezi lidským tělem a okolím

U zdravého člověka je teplota jádra těla (dále jen tělesná teplota) udržována na stabilní hodnotě přibližně 37 °C, přičemž změna této teploty o ± 2 °C znamená vážné problémy pro organismus, o $\pm 3,5$ °C pak přímé ohrožení zdraví a následně i života v důsledku hypo/hypertermie [24], [25]. Pokud je přibližně zachována rovnováha tepelné bilance mezi tělem a prostředím, lze dosáhnout stavu tzv. tepelné pohody/tepelného komfortu a pouze při dodržení této rovnováhy je lidské tělo schopné dlouhodobě udržovat stálou tělesnou teplotu [15]. Protože se však okolní podmínky i fyzická činnost člověka může v závislosti na okolnostech značně měnit, je nezbytné pro udržení stálé tělesné teploty aktivní řízení mechanismů pro produkci či regulaci odvodu tepla z těla. Přenos tepla mezi lidským tělem a jeho okolím je realizován prostřednictvím tří obecně známých základních mechanismů přenosu tepla kondukcí (vedením), konvekcí (prouděním) a radiací (zářením). Jako čtvrtý mechanismus lze označit přenos tepla vypařováním, který je však kombinací přenosu tepla při současném přenosu hmoty (viz Obr. 2). Celkovou tepelnou bilanci tělo – okolí lze popsat rovnicí

$$M - W = S + q_{sk} + q_{res} = (S_{sk} + S_{cr}) + (C + R + K + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) \quad (2.1)$$

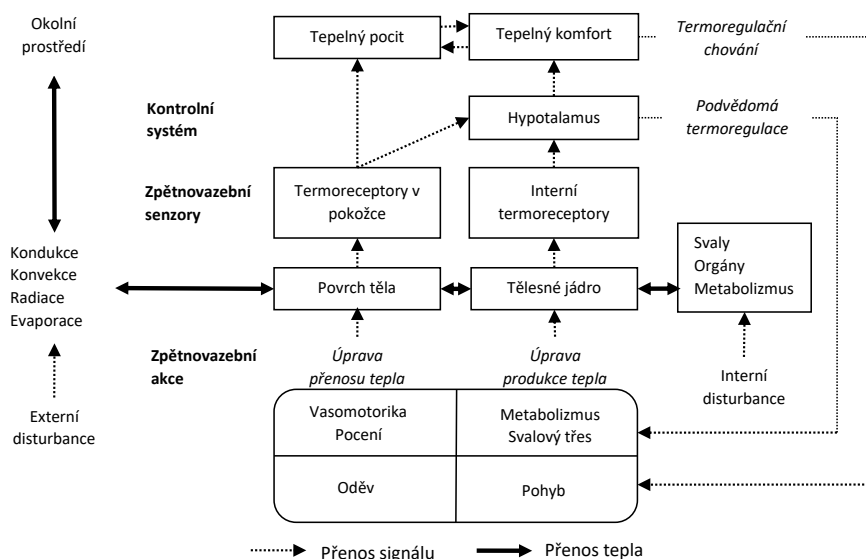
kde jsou všechny členy definovány v měrném rozměru [W/m²] vztaženém k povrchu těla a definovány jako: M – metabolická produkce, W – výsledná mechanická práce „energie využitá na překonání externích sil působících na tělo“, S – tepelný tok akumulovaný v těle, q_{sk} – celkový tepelný tok z povrchu těla, q_{res} – celkový tepelný tok přenášený dýcháním, C + R – suchý tepelný tok z povrchu těla, C – tepelný tok konvekcí, R – tepelný tok radiací, K – tepelný tok kondukcí, E_{sk} – tepelný tok vypařováním/kondenzací na kůži, C_{res} – tepelný tok dýcháním přenášený konvekcí, E_{res} – tepelný tok dýcháním přenášený vypařováním, S_{sk} – tepelný tok akumulovaný v pokožce, S_{cr} – tepelný tok akumulovaný v těle.



Obr. 2 – Znázornění fenoménů uplatňujících se u přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím. Převzato, upraveno a doplněno z [15].

Metabolické teplo se tvoří hlavně v jádře těla, tj. játrech, svalch a srdci. V případě, že teplota okolí je nižší než tělesná teplota, prostupuje teplo vedením na povrch skrz vrstvy tkání a odchází do okolí. Tuková vrstva omezuje tento prostup tepla díky svým izolačním vlastnostem a má vliv na redukci tepelných ztrát lidského těla [26]. Kromě přenosu tepla vedením, se v lidském těle uplatňuje i mechanismus přenosu tepla prouděním krve velkými cévami, které se dále rozvětvují do jemných kapilárních struktur umožňujících prokrvení tkání v blízkosti povrchu těla. Mechanismy pro produkci či regulaci přenosu tepla z těla však mají své limity,

při jejichž překročení (nadměrné zvýšení přenosu tepla z těla do okolí či naopak přenos tepla z okolí do těla) mohou nastat situace, které ohrožují zdraví a při dlouhodobém působení i život člověka. V důsledku takové situace je narušena rovnováha mezi generovaným a odváděným teplem popsaná v rovnici 2.1, což vede k akumulaci (člen S) nebo naopak nadměrným ztrátám tepla z těla (členy R, C, K, E) v důsledku čehož dojde ke změně tělesné teploty. Změny tělesné teploty kontinuálně vyhodnocuje řídicí centrum termoregulace, jímž je část mozku zvaná hypotalamus a podle signálů z povrchových (v kůži) a vnitřních termoreceptorů řídí odezvy jednotlivých termoregulačních mechanismů (viz Obr. 3) [25], [26]. Zdroj [27] také uvádí, že dle nového konceptu funkce termoregulace mohou signály termoreceptorů v pokožce přímo a lokálně iniciovat aktivaci některých termoregulačních procesů nezávisle na hypotalamu.



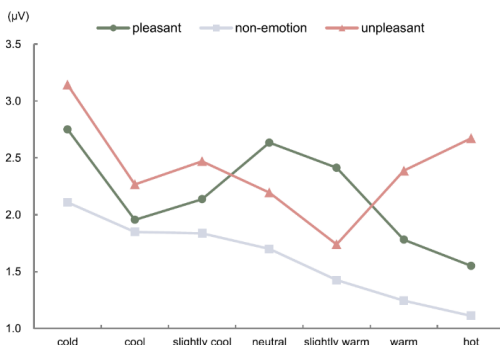
Obr. 3 – Schéma termoregulačního systému lidského těla s vyznačením hlavních prvků systému a signálních cest ovlivňujících podvědomé mechanismy a vědomé termoregulační chování člověka. Převzato, upraveno a doplněno z [14], [28].

Termoreceptory lze rozdělit na tělíska chladu a tepla, což jsou volná nervová zakončení, která zvyšují/snižují svoji aktivitu v závislosti na změně a absolutní hodnotě teploty tkáně, ve které jsou lokalizována. Hustota jejich rozmístění po celém těle je nepravidelná, přičemž počet tělísek chladu je cca 10krát vyšší než počet tělísek tepla [29], [30]. Tělíska chladu v případě podráždění vykazují vyšší aktivitu a chladné stimuly tak vyvolávají vyšší odezvu termoregulačního systému [31]. Statisticky významné rozdíly byly pozorovány u citlivosti na tepelné stimuly mezi pohlavími, kdy na všech sledovaných částech těla byly citlivější ženy než muži [32], [33]. Ve studii [29] z roku 2020 je však uvedeno, že rozdíly v citlivosti na tepelné stimuly byly na jednotlivých částech těla cca 2 až 3 krá větší mezi jednotlivými pokusnými osobami než mezi pohlavími. Systém termoregulace je tvořen několika funkčními celky, jejichž propojení je zobrazeno na Obr. 3. Tyto celky lze dále rozdělit do dvou základních skupin, které obsahují termoregulační mechanismy samotného těla a vědomé termoregulační mechanismy (termoregulační chování) [28]. Do této skupiny patří především užití oděvu (oblékání), změna pozice těla např. schoulení se, ukrytí se v závětrí či vědomý pohyb pro produkci tepla. V případě, že termoregulační chování nelze použít či jeho efekt nedostačuje pro udržení tepelné rovnováhy, jsou automaticky aktivovány mechanismy pro vyrovnání tepelné bilance mezi tělem a okolím [34] jako vasomotorika cév, pocení, chemická termogeneze a svalový třes (blíže viz plná verze habilitační práce).

2.2. Psychologické aspekty tepelného komfortu

Nejen tepelná bilance těla, ale i subjektivní vnímání, očekávání a celé řadě dalších, někdy velmi těžko popsatelných faktorů ovlivňuje výsledný tepelný komfort u konkrétního člověka [35]. Často se tedy můžeme setkat se situací, že v prostředí, které by na základě tepelně bilančního hodnocení mělo být komfortní, se vyskytuje jisté procento jedinců, kterým daný stav nevyhovuje a způsobuje jim tepelný diskomfort [36]. Tento stav je způsoben různorodostí lidí a jejich odlišným nastavením v oblastech psychiky, zvyklostí a kultury, z které pocházejí.

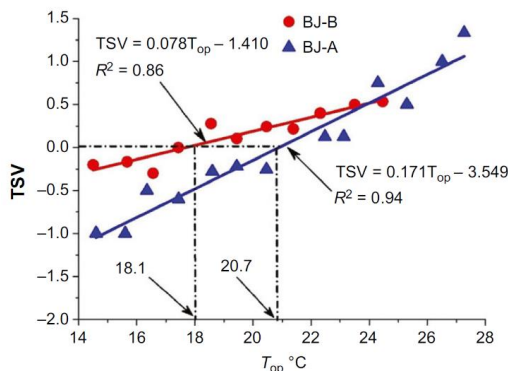
Povaha, nálada, emoce, alliestézie – Nálada je „emocionální stav, který v průběhu určitého času provází prožívání a lidskou činnost. Na rozdíl od základních emocí nemusejí mít jednotlivé nálady jasný předmět, nebývají přesně zacílené, nýbrž vyplývají z povahy člověka a z určitého sledu zážitků. Někdy ani sám jedinec přesně neví, proč má určitou náladu“ [37], [38]. Výsledky studie [39] naznačují, že objektivní tepelný stav prostředí nemá přímý vliv na emoce, ale zpracování emocí je závislé na subjektivním tepelném pocitu pokusné osoby (viz Obr. 4). Měřitelné odezvy pozitivních emocí byly nejvyšší, pokud pokusné osoby pociťovali prostředí jako tepelně neutrální či mírně teplé. U ostatních tepelných pocitů měly vyšší odezvu emoce negativní. Relevantních výzkumů v této oblasti je však velmi málo, neboť se jedná o zcela novou oblast využívající metody EEG (Elektroencefalografie mozku) pro objektivní určení emocí.



Obr. 4 – Odezva emočních stimulů v závislosti na tepelném pocitu. Pozitivní emoční stimuly (pleasant) vyvolávaly nevyšší odezvu (EEG signál, osa y) v případě, že pokusné osoby hodnotily prostředí jako neutrální či mírně teplé. V ostatních případech měly negativní stimuly vyšší odezvu než pozitivní. Převzato z [39].

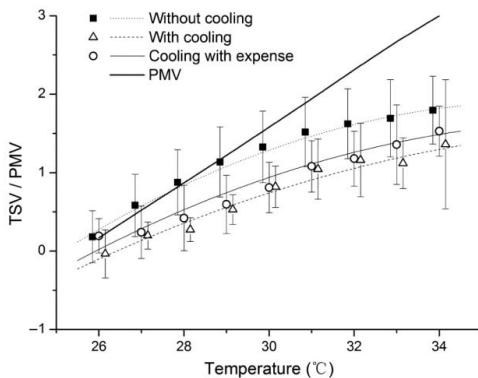
Pilotní výzkumy také naznačují, že při dobré/pozitivní náladě (na základě emocí jako je radost, důvěra, očekávání) je vyšší tolerance k odchylkám od optimálního stavu prostředí a obráceně [40]. V oblasti nálad a vnímání tepelného stavu prostředí je také definován pojem „Thermal boredom“ [41], který lze volně přeložit jako „tepelná nuda“. Používá se k popisu situace, kdy je lidské tělo dlouho vystaveno tepelně neutrálnímu prostředí, které vyvolává jen minimální tepelné vjemy a tím prakticky eliminuje zásahy termoregulačního systému (čili nic se neděje = nuda). Taková situace se například často vyskytuje v budovách s prostředím důsledně regulovaným strojními HVAC systémy [42], [43], avšak pro lidské tělo je absence jakýchkoliv změn a podnětů nepřirozeným stavem a může vést k „nevysvětlitelné“ nespokojenosti s prostředím, ačkoliv objektivní parametry prostředí jsou v komfortním rozsahu. Z toho lze tedy odvozovat, že jistá denní i sezónní variabilita ve vnitřním prostředí je žádoucí a může přispět ke spokojenosti na základě principu alliestézie (tj. míra vnímání příjemnosti/nepříjemnosti vnějších stimulů je závislá nejen na kvantitě a kvalitě stimulu, ale také na vnitřním stavu organismu [42]. Například: i relativně malá změna okolní teploty je vnímána jako příjemnější, pokud vrací tělo do rovnovážného stavu z předešlého stavu nerovnováhy než, když je stejná změna teploty aplikována v případě, že je tělo v rovnovážném stavu.) To však platí pouze za předpokladu, že osoby mohou využít termoregulačního chování (např. přizpůsobení oděvu) a adaptaci na změnu podmínek v průběhu dne/sezóny [41], [44].

Kontrola nad prostředím – pokud je uživateli umožněno kontrolovat nastavení vnitřního prostředí, obecně je poté dosaženo větší spokojenosti s kvalitou prostředí [45]–[47]. Navíc pokud mohou lidé regulací prostředí ovlivnit energetickou spotřebu a tím i finanční náročnost vytápění/chlazení je dle [35] pozorován posun směrem k úspornému chování a vyššímu využití termoregulačního chování (hlavně v zimním období, využití teplejšího oděvu). Dalším zajímavým faktem je zjištění, že pokusné osoby s možností aktivního řízení prostředí vykazují vyšší spokojenost s tepelným stavem prostředí i při nižší teplotě v interiéru [48] (viz Obr. 5).



Obr. 5 – Vliv možnosti aktivní regulace vytápění na hodnocení tepelného stavu prostředí. Skupina BJ-B měla možnost aktivně řídit vytápění, skupina BJ-A tuto možnost neměla. Výsledná optimální teplota v interiéru ($TSV = 0$) pak byla 18,1 °C pro skupinu BJ-B respektive 20,7 °C pro skupinu BJ-A. Převzato z [49].

Jiný experiment prokázal, že možnost aktivně kontrolovat prostředí při chlazení vnitřního prostředí zlepšuje hodnocení středního tepelného pocitu o 0,4 až 0,5 stupně škály a podobný vliv byl pozorován i na hodnocení tepelného komfortu [50]. Zajímavé zjištění byl i fakt, že pozitivní vliv na tepelný pocit přetrvával i v případě, že pokusná osoba mohla ovlivnit nastavení chlazení, ale za podmínky, že za užití termostatu musela "zaplatit jistou cenu". Změna chování však nastala v tom ohledu, že ačkoliv testovací osoby vnímaly prostředí stejně, zásah do nastavení chlazení realizovaly až při vyšším tepelném pocitu = byly ochotny zaplatit danou cenu až při vyšším diskomfortu (viz Obr. 6).



Obr. 6 – Vliv „pocitu“ kontroly nad prostředím na tepelný pocit. Ve všech případech klimakomora zvyšovala velmi pomalu teplotu z 26 na 34 °C a uživatel a) neměl žádnou kontrolu nad prostředím (Without cooling) b) měl fake termostat (With cooling) c) měl fake termostat, ale za jeho užití musel „zaplatit“ (Cooling with expense). Z dat je patrné, že jen pouhá přítomnost termostatu bez reálné funkce zlepšuje hodnocení tepelného stavu prostředí o cca 0,5 bodu. Převzato ze [50].

2.3. Kvantifikace vnímání a hodnocení tepelného stavu prostředí

Člověk nevnímá a nehodnotí tepelný stav prostředí dle hodnot fyzikálních veličin, ale na základě zpracování senzorických signálů podvědomými funkcemi mozku. Výsledkem toho zpracování jsou pocity, které následně zpracovávají vyšší mozkové funkce a z jejich výsledku pak plyne individuální hodnocení (ne)příjemnosti tepelného stavu okolí na tělo. Základem postupu je tedy provedení kvantifikace jednotlivých veličin a vytvoření škál, které mají většinou číselné a slovní vyjádření hodnocených stupňů. Dotazované osoby pak pomocí těchto škál kvantifikují (čili počítají/měří) a vyjadřují své subjektivní vnímání a hodnocení. Zásadním problémem při dotazovací metodě je fakt, že kvantifikovat a vyjádřit pocit (např. tepelný pocit) na určité škále je velmi složitý kognitivní proces vyžadující úsilí, znalost postupu a trénink/praxi [36], [43]. Samotné definování škál je základem pro kvantifikaci hodnocení prostředí pokusnými osobami a pro účely experimentu je nutné sestavit dotazník, kam budou zaznamenány jednotlivé odpovědi pokusných osob. Základní formy podoby dotazníků jsou uvedeny v normách [51], [52]. Příklad tištěného dotazníku užívaného v experimentální praxi autora je uveden na Obr. 7. Dotazník je vždy sestavován pro daný typ měření a volba škál a detailu hodnocení musí vždy odpovídat účelu a cíli konkrétního experimentu. Cílem je také vždy dosáhnout rozumného kompromisu mezi množstvím získaných informací a zátěží, kterou vyplňování dotazníku představuje pro pokusné osoby a tím i částečně ovlivňuje samotný průběh experimentu. Dotazník na Obr. 7 byl sestaven tak, aby vyhověl svojí detailností nehomogenitě prostředí v kabině vozidla, zohlednil dynamické jevy, a zároveň byl dostatečně jednoduchý, aby příliš nezatěžoval řidiče (v tom případě je dotazován další osobou).

Číslo měření	ČÁST TĚLA								GLOBÁLNÍ	
	Tvář		Záda		Hrud'		Paže		Dlaně	
	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort
-1										
0										
1										
2										
3										
4										
5										
	 Celkový komfort		 Žádána změna							

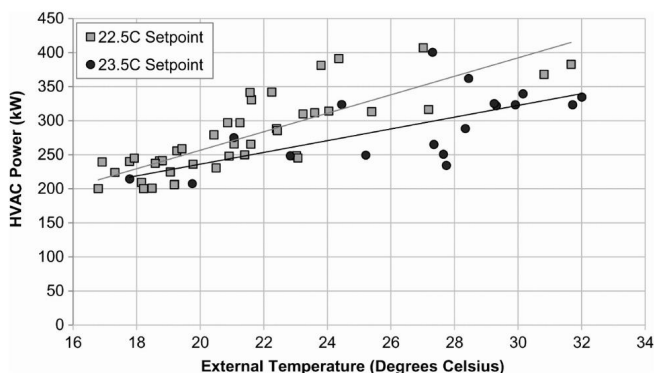
Obr. 7 – Dotazník užívaný při výzkum tepelného prostředí v kabině automobilu.

Z pohledu nejistoty měření je účelnější využít diskrétní škály s jemným dělením než škály spojitě. Standardní nejistota střední hodnoty subjektivních hodnocení prostředí klesla dle [53] až k hodnotě 3 % z rozsahu škály, pokud hodnocení prostředí nezávisle provedlo alespoň 40 pokusných osob. Směrodatná odchylka opakovaných hodnocení stejného prostředí jednou osobou byla do 10,7 % rozsahu škály, přičemž nejvyšší směrodatné odchylky bylo dosaženo u hodnocení vlhkosti prostředí pomocí spojitě 5ti stupňové škály (10,7 %), nejnižší pak u hodnocení tepelného pocitu diskrétní 7mi stupňovou škálou (5,9 %). Výše uvedené nejistoty a směrodatné odchylky jsou dostatečně nízké a subjektivní hodnocení prostředí pokusnými osobami lze tedy využít, jako nástroj pro metodu hodnocení kvality prostředí v inženýrské praxi. Je však nutné mít na paměti, že výsledky studií s využitím méně jak 20 pokusných osob jsou zatížené vyšší nejistotou měření a lze je doporučit pro pilotní měření a testování.

2.4. Tepelný komfort jako optimalizační parametr

Začneme otázkou: Pokud je vnitřní prostředí takové, že odpovídá stavu tepelného komfortu, bude dosaženo optimálního výkonu lidí, minimalizace spotřeby energie, minimalizace negativních vlivů prostředí na člověka, na jeho schopnosti a na pracovní výkon? Současný stav poznání je následující:

- I když se vztah mezi kvalitou prostředí a produktivitou práce zkoumá již celá desetiletí, nepanuje obecná shoda na tom, zda optimalizace kvality vnitřního prostředí přímo vede k optimalizaci produktivity práce. V tomto směru bylo značného pokroku dosaženo hlavně ve výzkumu kvality prostředí v administrativních budovách [12], [54]. Ztrátu pracovního výkonu u administrativních úkolů lze totiž snadno měřit a to, jak v reálném pracovním prostředí, tak v laboratorních podmínkách (např. v klimatické komoře) [46].
- Někteří autoři speciálně zmiňují důležitost personalizované kontroly pracovníků nad tepelným stavem pracovního prostředí, jako hlavní strategii, která přispívá k zlepšení míry tepelného komfortu a tím i ke zvýšení produktivity práce [43], [55].
- Většina autorů uvádí, že vyšší četnost výměny vzduchu na pracovišti je přínosná pro kvalitu vnitřního prostředí a lepší výkon pracovníků [46], [55].
- Shoda se vyskytuje v popisu příčin ztráty produktivity práce. Lze ji především najít v případech, kdy pracovníci pociťují horko (hypertermie) nebo obecněji pokud jsou vystaveni podmínkám mimo termoneutrální komfortní zónu. Toto však silně závisí na typu vykonávané práce [46].
- Zatímco někteří autoři se zaměřují na zvýšení produktivity práce, je možný i opačný přístup, a to sice pozitivní efekt prostředí s optimálním tepelným komfortem na snížení úrazů, krátkodobé nemoci a snížení výskytu syndromu SBS (Sick Building Syndrom, Syndrom nezdravých budov). Tento aspekt snížení nákladů na nemocnost a snížení ekonomických ztrát plynoucích z absence pracovníka má jednoznačně pozitivní ekonomický efekt, jak pro jednotlivé firmy, tak pro celou společnost [46], [56].
- Při zahrnutí všech socio-ekonomických přínosů tepelně komfortního prostředí, panuje mezi autory shoda, že výnosy převyšují ekonomické náklady jak na instalaci, tak na provoz takových zařízení. Vyčíslení těchto přínosů je však mezi jednotlivými autory velmi rozdílné a v současné době existuje jednotná metodika [46]. Ve studii [12] je uveden příklad, že zvýšení cílové teploty nastavení klimatizace (letní období) v kancelářské budově z 22 °C na 25 °C nepřinese žádné významné snížení výkonu pracovníků, ale může ušetřit cca 6 % energie na každý stupeň zvýšení teploty klimatizovaného prostoru [54] (viz Obr. 8).



Obr. 8 – Závislost příkonu HVAC zařízení kancelářské budovy v závislosti na nastavení termostatu v letním období. Při nastavení na teplotu 23,5 °C (černé body a linka) je příkon při teplotě okolí 30 °C nižší cca o 80 kW než při nastavení na teplotu 22,5 °C. Převzato z [54].

3. ADAPTAČNÍ STRATEGIE A ÚPRAVY PROSTŘEDÍ

Adaptace je evoluční mechanismus, kterým se organismus přizpůsobuje podmínkám, panujícím v jeho životním prostředí. Člověk i někteří jiní tvorové je však schopen vyvinout adaptační strategie s využitím nástrojů, oděvů, staveb a strojů. Schopnost organismu přizpůsobit se svému okolí se nazývá adaptabilita [57].

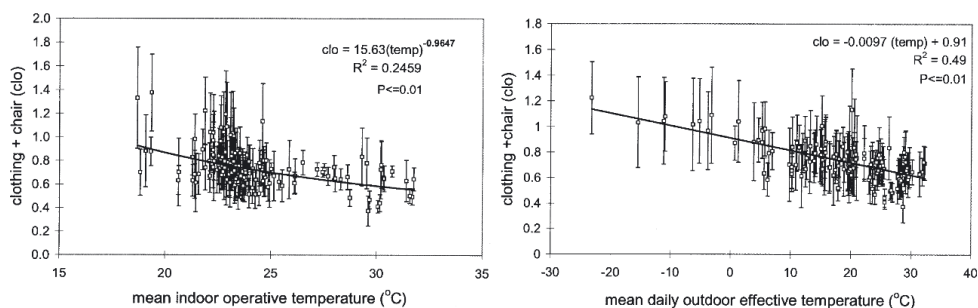
3.1. Adaptabilita pasivní

Je evoluční „přizpůsobování se“ okolí na základě evoluční výhodnosti. Z biologického hlediska se jedná o změnu stavby těla, biochemických procesů v těle, nebo chování živočišného druhu a to tak, aby byl lépe přizpůsoben podmínkám okolního prostředí. Do mechanismů vzešlých z evolučních procesů působících při vývoji člověka patří aklimatizace, což je proces, při kterém se organismus přizpůsobuje změněným podmínkám prostředí [58]. Aklimatizace probíhá v rámci hodin až týdnů, ale vždy se jedná o procesy v rámci života jednoho jedince. Aklimatizace může být krátkodobá, která odráží schopnost organismu reagovat na změny okolí, nebo může být aklimatizace součástí periodického cyklu přizpůsobení vlastností těla periodické změně počasí v průběhu roku (u savců například pravidelná změna hustoty srsti atd.). Krátkodobá i periodická aklimatizace zapadá do oblasti homeostatických principů, neboť umožňuje organismu udržovat stále podmínky vnitřního prostředí nutné pro jeho život. Subsystemy lidského těla a metabolismu jsou schopné aklimatizovat se na změněné podmínky (především termoregulace a metabolismus) nicméně i ty mají své limity, které nelze překonat žádným sebedělským tréninkem [59]. Schopnost aklimatizace na nové podmínky je u člověka zachována dodnes, například: aklimatizace na chlad, aklimatizace na teplo či aklimatizace na nízký tlak vzduchu a hypoxii (blíže viz plná verze habilitační práce).

3.2. Adaptabilita aktivní

Je záměrné vyhledávání nových způsobů, např. jak získat zdroje. Z pohledu techniky se například jedná o využití nástrojů pro získání přístupu k novým zdrojům potravy či využitím oděvů jako ochrany těla. V průběhu vývoje člověka byly nejprve pravděpodobně využívány různé přístřešky a úkryty pro ochranu před počasím, oheň jako zdroj tepla a světla, a dále pak byl vyvinut oděv, jako prostředek, který modifikuje intenzitu přenosu tepla v relaci tělo – okolí a poskytuje ochranné funkce [60]. Dle [60], [61] pocházejí první důkazy o využití oděvů s komplexní konstrukcí (střih, technologické zpracování materiálů jako řezání, krájení, sešívání) z období před cca 20 tisíci lety. Do té doby se člověk mohl rozšiřovat jen v prostředích, která odpovídala termofyziologickým možnostem jeho těla [7] nebo, kde stačila ochrana od jednoduchých oděvů. Funkce oděvů lze rozdělit do tří základních skupin:

Ochrana těla před tepelnými účinky prostředí – z pohledu ochrany před tepelnými účinky prostředí byly dány jasné požadavky a z nich plynoucí konstrukce v prostředích, kde extrémní klimatické podmínky vyžadovaly důkladnou ochranu lidského těla před okolím. Jednalo se především o oblasti vyšších zeměpisných šířek, pouštní a vysokohorské oblasti. Naopak v klimatech, která jsou mírná až teplá (s průměrnou teplotou 21 °C), nebylo potřeba vyvíjet oděvy s cílem ochrany těla před účinky okolí, neboť tato prostředí jsou pravděpodobně velmi blízká původnímu habitatu předků člověka [61]. Oděvy tedy měly spíše společenskou funkci a funkci ochrany před zraněním těla. V oblastech tropických, s vysokou roční průměrnou teplotou a vysokou vlhkostí, je naopak po většinu roku potřeba efektivní odvod tepla z lidského těla a oděv tedy není potřeba a spíše představuje bariéru proti přenosu tepla. V moderní společnosti žijící v urbanizovaném prostředí, převyšuje čas strávený ve vnitřních prostředích čas pobytu v prostředí venkovním [12], nicméně užití oděvu jako hlavního nástroje pro termoregulační chování lze dokladovat i v těchto současných populacích [62]. Na Obr. 9 je uvedena závislost izolačního odporu oděvu na operativní teplotě vnitřního prostředí (vlevo) a také souvislost tepelného odporu oděvu na efektivní teplotě vnějšího prostředí (vpravo), z kterých je patrné přizpůsobování izolačního odporu oděvu aktuálním podmínkám prostředí.



Obr. 9 – Závislost tepelného odporu oděvu (a křesla + 0,15 clo) na operativní teplotě (vlevo) a na vnější efektivní teplotě. Je patrné, že se snižující se teplotou roste průměrný tepelný odpor oděvu. Převzato z [62], [63].

Ochrana těla před fyzikálními účinky prostředí při práci člověka – funkce oděvu také souvisí s výkonem jistého povolání nebo činnosti. Velmi často kombinují nezbytnou funkcionalitu nutnou pro výkon dané činnosti s ochrannou funkcí. Většinou je účelem ochránit člověka před negativními vlivy okolí (protichemický oděv), ale někdy je účel i opačný a to sice chránit okolí/prostředí před „účinky“ člověka (oděvy do čistých prostorů). Pro některé speciální činnosti v extrémně nebezpečných prostředích jsou nezbytné ochranné oděvy chránící organismus před život přímo ohrožujícími účinky prostředí. Bez těchto oděvů není možný pobyt a práce/zásah člověka bez poškození zdraví či ohrožení jeho života v daném prostředí (hasičské oděvy, oděvy proti chladu, oděvy protichemické, oděvy protiradiační atd.).

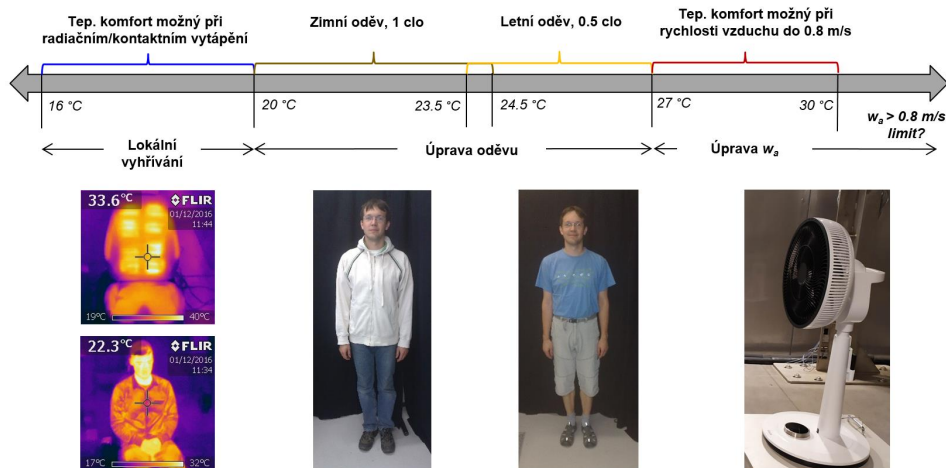
Společenské funkce – jsou všechny funkce, které oděv naplňuje v rámci lidského společenství a nejedná se o výše uvedené ochranné funkce. Při konstrukci oděvů se mohou uplatnit společenské fenomény, jako identifikace postavení jedince ve společnosti dle oděvu, užití oděvu k náboženským účelům, či preference různých barev, materiálů, střihů atd. dle aktuálního společenského konsenzu, jinak řečeno móda [64]. Ze studie [62] vyplývá, že pokud je vyžadován striktní dress code klesá variabilita tepelného odporu oděvu mezi jednotlivými jedinci, což omezuje termoregulační chování a často pak vede k zvýšenému požití HVAC systémů.

3.3. Adaptabilita kreativní

Kreativní adaptabilita je záměrné přetváření a vytváření okolního prostředí v prospěch daného druhu. Z pohledu tepelného komfortu se jedná o modifikaci okolního prostředí s cílem vytvořit optimální prostředí pro člověka a také vytváření tzv. vnitřních prostředí oddělených od vnějšího prostředí konstrukcí či obálkou, ve kterých lze aktivně řídit parametry prostředí pomocí HVAC systémů. Ty musí být v základu schopné zabezpečit řízení a kontrolu parametrů prostředí jako je teplota vzduchu t_a , rychlost proudění vzduchu w_a a z nich plynoucí charakteristiky proudění pro přenos tepla konvekcí, vlhkost vzduchu RH ovlivňující přenos tepla vypařováním, teplotu okolních povrchů t_r ovlivňující přenos tepla radiací a t_{surf} kondukcí. Historicky první doložená technologie/postup pro kreativní úpravu parametrů prostředí bylo využití ohně pro regulaci teploty prostředí. Oheň byl nejprve využíván v podobě otevřeného ohně, později pak i uvnitř obydlí v podobě různých otevřených ohnišť, topenišť, krbů atd. Nejstarší technologie určená pro cílené lokální vytápění obydlí ohněm nazývaná kang (v překladu „vyhřívána postel/podium“) je doložena z oblasti severní Číny a dále pak podlahové vytápění místnosti nazývané ondol (v překladu „vyhříváný kámen“) v oblasti Korejského poloostrova cca 5 000 let př.n.l. [65]. Na stejném principu pak fungovalo i hypokaustum (v překladu „spodní topení“) instalované v domech bohatých obyvatel antického Řecka/Rímské říše a také v lázních. Nejstarší doložené instalace jsou datovány do 4. století př.n.l. [65], [66]. Nový rozvoj vytápěcích systémů s využitím ohně nastal v 18. a 19. století v Evropě a USA. Ve Francii byl vyvinut první typ uzavřeného topeniště překrytý perforovaným plechem, což byl konstrukční základ pro pozdější první sporáky a kamna. Spalovací prostor topeniště tak byl

plně oddělen od vnitřního prostoru, což zlepšilo především účinnost vytápění a prakticky zamezilo průniku kouře do místnosti [67]. Devatenácté století bylo v Evropě i USA opět ve větší míře instalováno velkoplošné podlahové vytápění a byly vyvinuty první centrální systémy vytápění založené na využití vody a páry jako teplonosných médií [66]. Ve 20. století se pak systémy centrálního vytápění staly v Evropě a USA běžnou technologií především ve městech a v druhé polovině století i na venkově.

První systémy pro snížení teploty vzduchu založené na odpařování vody do vzduchu byly využívány v horkých a suchých oblastech Blízkého východu a Severní Afriky již ve středověku (kolem roku 1 000 n.l.) [68]. Princip spočíval v průchodu teplého a suchého vzduchu nad vodní hladinou či kolem vlhčených rohoží, kde docházelo k odparu vody. Energie nutná na odpaření vody byla odebírána z vnitřní energie proudícího vzduchu a v důsledku tohoto jevu se snižovala teplota vzduchu a rostla jeho relativní vlhkost [69]. Až do vynálezu strojního chlazení se využíval jako zdroj chladu vodní led, uschovaný ze zimního období, popřípadě transportovaný z míst s chladnějším podnebím. V 19. století aplikoval Jakob Perkins objevy Olivera Evanse týkající se termodynamiky par vody a éteru při změně tlaku [70] a v roce 1834 patentoval první zařízení pro strojní „výrobu ledu a chlazení tekutin“ [71]. První strojní zařízení pro chlazení prostředí v budovách sestavil a patentoval v roce 1851 americký lékař z Floridy Dr. John B. Gorrie [72]. Cílem bylo snížení teploty a vlhkosti vzduchu v nemocničních pokojích a poskytnutí úlevy pacientům trpícím horečnatými stavy v souvislosti s malárií a žlutou zimnicí. Velmi významnou postavou v historii klimatizační techniky byl Dr. Willis H. Carrier, který roku 1902 zkonstruoval zařízení pro kontrolu teploty a vlhkosti v tiskařské firmě v newyorském Brooklynu [73] a položil tak základy technologické klimatizace. Svá pozorování a výsledky z experimentů s vlhkým vzduchem posléze shrnul v práci „Rational Psychrometric Formulae“. HVAC zařízení poté začala být uplatňována i pro kontrolu prostředí v kancelářských budovách, obytných budovách a v kabinách dopravních prostředků. Počátek 21. století je spojen s hledáním průniku mezi aktivními a kreativními adaptačními postupy, které jsou schopny vytvářet vnitřní prostředí dle požadavků, ale při optimální energetické spotřebě [41]. Protože se mohou jednotlivé fenomény a způsoby přenosu tepla kombinovat při spolupůsobení různých psychologických a kulturních faktorů, je otázkou, které kombinace parametrů je možné považovat za komfortní/příjemné pro většinu osob. Ukázka možných úprav prostředí a termoregulačního chování v rozsahu teplot vzduchu od 16 °C do 30 °C pro sedícího člověka s metabolickou aktivitou 1 met je uvedena na Obr. 10.



Obr. 10 – Ilustrace možných úprav prostředí v závislosti na teplotě vzduchu. Platí pro sedícího člověka, metabolická produkce 1 met. Převzato a doplněno z [74].

V rozmezí teplot 16 až 20 °C je vhodnou cestou ke kompenzaci zvýšeného odvodu tepla z těla do okolí lokální radiační/kontaktní vytápění. V rozmezí teplot 20 až 27 °C je obvykle dosahováno tepelného komfortu prostřednictvím změny oděvu (termoregulační chování) přičemž dochází k změně oděvu z 1 clo na 0.5 clo přibližně v rozmezí teplot vzduchu 23.5 až 24.5 °C. Při teplotách nad 27 °C, je možné dále snížit tepelnou izolaci oděvu, ale takové chování lze využít jen tam, kde je možné odložení oděvu. Další možností je zvýšení přenosu tepla konvekcí v důsledku zvýšení rychlosti proudění vzduchu w_a . Toto zvýšení má však limit přibližně na úrovni 0.8 m/s, neboť vyšší rychlosti jsou většinou osob pocítovány jako průvan. Další možnosti kompenzací či ekvivalencí mezi parametry prostředí jsou uvedeny v Tabulce 1. Ekvivalence jsou odvozeny z experimentů, které provedli R. Goldman a P. Gagge při výzkumech lidské termofyziologie a oděvů pro americkou armádu [75]. Například pro kompenzaci teploty vzduchu úpravou rychlosti proudění vzduchu platí limit zvýšení rychlosti cca o 0.55 m/s neboť poté může docházet k nepříjemnému dráždění pokožky. Většinou také nepůsobí jednotlivé změny osamoceně, ale typicky dochází ke kombinaci změn např. zvýšení metabolické produkce M , je důsledkem změny činnosti člověka, čímž se většinou změní i rychlost proudění vzduchu w_a kolem těla a také často dochází při změně činnosti k změně/úpravě oděvu. Výsledné působení změn parametrů prostředí na člověka je tedy vždy nezbytné posuzovat celkově v kombinaci všech působících parametrů, neboť nejen tepelný stav okolí, ale i tepelný stav těla má zásadní vliv na dosažení tepelného komfortu.

Tabulka 1 – Ekvivalence mezi t_a a parametry ovlivňujícími přenos tepla z lidského těla. Převzato a upraveno z [75].

Parametr	Ekvivalence
RH	Zvýšení relativní vlhkosti RH o 18 % může být kompenzováno snížením t_a o 0.5 °C.
$\bar{w}_a$	Zvýšení rychlosti proudění vzduchu $\bar{w}_a$ o 0.18 m/s přibližně odpovídá snížení t_a o 1 °C. Max. kompenzace je cca 3 °C $\approx$ 0.55 m/s.
$\bar{t}_r$	Zvýšení střední radiační teploty $\bar{t}_r$ o 1 °C může být kompenzována poklesem t_a o 1 °C.
clo	Změna tepelné izolace oděvu o 0.18 clo má stejný efekt jako změna t_a o 1 °C při aktivitě do 2.5 met. U vyšší aktivity pak cca 2 °C.
M	Zvýšení metabolické produkce o 9.6 W/m ² (17.5 W) je přibližně ekvivalentní zvýšení t_a o 1 °C.

Jednotlivé typicky preferované tepelné pocity v závislosti na teplotě pokožky, tělesné teplotě a jejich změně jsou znázorněny na Obr. 11. Neutrální tepelný pocit je preferován většinou pouze v případě, že tělesná teplota i teplota pokožky je stabilní a na neutrální teplotě cca 34 °C. Dále je možných celkem osm kombinací, které vedou 4× k preferenci chladného pocitu a 4× k preferenci teplého pocitu. Z těchto preferencí lze odvodit jaký typ zásahu do prostředí je vhodný od HVAC technologie a její regulace, nicméně je nutné správně monitorovat preference lidí v prostoru ať již nepřímo či přímo pomocí ovládacích prvků regulace.

Průměrná teplota pokožky	Tělesná teplota	Nejvíce příjemný tepelný pocit
↓	↔	TEPLO
↑	↔	CHLADNO
↔	↑	CHLADNO
↔	↓	TEPLO
↓	↑	CHLADNO
↑	↓	TEPLO
↑	↑	CHLADNO
↓	↓	TEPLO
↔	↔	NEUTRÁLNĚ

Legenda

↓ klesá
↑ roste
↔ bez změny

Obr. 11 – Preferovaný tepelný pocit v závislosti na teplotě pokožky, tělesné teplotě a jejich změně. Převzato z [74].

4. HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU

Hodnocení tepelného stavu prostředí má za cíl kvantifikovat parametry fenoménů určujících intenzitu přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím. Základní měření na bázi sond, senzorů, čidel a manekýnů kvantifikují parametry či přímo intenzitu fenoménů přenosu tepla. Výsledný tepelný pocit a komfort je pak určen až v kombinaci s použitím modelů pro daný zkoumaný jev či situaci. Při měřeních a experimentech s využitím pokusných osob je situace jiná, neboť pokusné osoby jsou přímo exponovány prostředím, což vede k vytvoření tepelné bilance mezi tělem a okolím. Výsledný vjem/pocit pak pokusné osoby kvantifikují pomocí škál a dotazníků a přímo tak vyjadřují své hodnocení posuzovaného jevu/vjemu.

4.1. Hodnocení tepelného komfortu na základě měření

Jednotlivé přístupy k hodnocení a měření lze blíže rozdělit a definovat do těchto skupin.

Hodnocení na základě měření parametrů tepelného stavu okolního prostředí – je postup využívající pasivní sondy, senzory a čidla pro určení hodnot parametrů okolního prostředí, které jsou určující pro intenzitu přenosu tepla v relaci tělo–okolí. Při měření se využívají principy pro měření jednotlivých veličin, ale senzory nejsou konstruovány tak, aby napodobovaly přímo přenos tepla z povrchu lidského těla. Na intenzitu přenosu tepla se musí usuzovat až na základě přepočtových vztahů a regresních modelů např. model PMV–PPD dle Fanger [76].

Hodnocení na základě měření aktivními senzory – aktivní senzory pracují na principu napodobení přenosu tepla z povrchu lidského těla do okolí. Z tohoto důvodu jsou aktivně vyhřívány (většinou elektrickou energií) a výsledkem měření je tepelný tok z aktivní plochy senzoru do okolí nebo přepočtená veličina (např. t_{eq} – ekvivalentní teplota) reprezentující jeho velikost. Na základě regresních modelů je pak možné usuzovat na výsledný tepelný pocit a komfort průměrného člověka. Výhodou tohoto přístupu je i to, že umístění senzorů v prostoru většinou aproximuje pozici skutečného člověka a zahrnuje tak podstatné vlivy prostorového uspořádání na fenomény přenosu tepla [77], [78].

V současnosti je ekvivalentní teplota t_{eq} [°C] definována dle ISO 14505-2 následovně: „Teplota homogenního prostoru při střední radiační teplotě rovné teplotě vzduchu a nulové rychlosti proudění vzduchu, ve kterém osoba vymění stejnou tepelnou ztrátu konvekcí a radiací, jako ve skutečných podmínkách.“ [85].

Důležitá pro utčení t_{eq} a konstrukci měřicího zařízení je především podtržená část, neboť ta říká, že měřicí zařízení musí co nejvěrněji napodobit tepelnou ztrátu reálného lidského těla. Základní definice ekvivalentní teploty je použitelná pouze pro celé tělo [85].

Ekvivalentní teplota celého těla – stanovuje se pomocí změřením celkového tepelného toku z tepelného manekýna, který má povrchovou teplotu podobnou povrchové teplotě reálného člověka. Optimální je, aby byl manekýn rozdělen do více zón, jejichž teplota $t_{surf,n}$ je regulována nezávisle na ostatních zónách a výsledná ekvivalentní teplota $t_{eq,whole}$ a dílčí výpočty se realizují dle rovnic 4.1 – 4.3. Hodnota $h_{cal,whole}$ je určena kalibrací ve standardním prostředí.

$$t_{eq,whole} = t_{surf,whole} - \frac{\dot{Q}_{RC,whole}}{h_{cal,whole}} \quad (4.1)$$

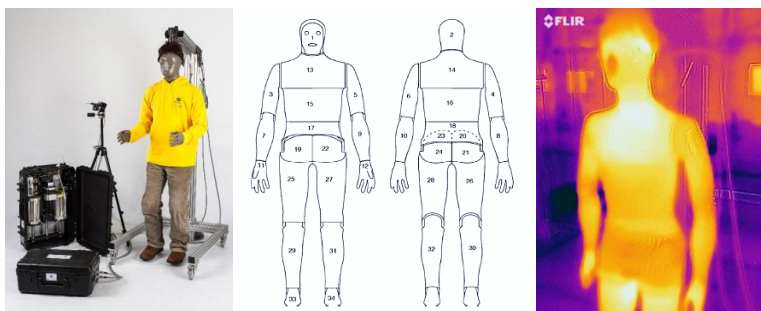
$$t_{surf,whole} = \frac{\sum(t_{surf,n} \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q}_{RC,whole} = \frac{\sum(\dot{Q}_{RC,n} \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (4.3)$$

Vzhledem k tomu, že při určování ekvivalentní teploty se snažíme změřit přenos tepla konvekcí a radiací z celého povrchu lidského těla, má tvar a orientace aktivní plochy senzorů či celého měřicího systému zásadní vliv na výsledky měření [79]. Dle normy ČSN EN ISO 14505-2 [85]. Ergonomie tepelného prostředí Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty rozlišujeme dále dle

použitého zařízení tyto specifické typy ekvivalentní teploty: Segmentová ekvivalentní teplota, Směrová ekvivalentní teplota, Všesměrová ekvivalentní teplota.

Hodnocení na základě měření s tepelnými manekýny – tepelní manekýni (thermal manikins) jsou měřicí zařízení využívající figurín, jejichž tvar i velikost napodobuje anatomii skutečného lidského těla [79] (viz Obr. 12). Detail, propracovanost a funkční vlastnosti figuríny pokrývají spektrum od velmi jednoduchých manekýnů imitujících pouze suchou tepelnou produkci průměrného člověka [80] až po vysoce sofistikovaná řešení s kompletním systémem pro simulaci lidské termofyziologie [81], [82]. Hlavním důvodem vzniku a využití manekýnů byla eliminace nejistot měření a rizik vyskytujících se při experimentech s pokusnými osobami [83]. Tepelní manekýni se primárně využívají v automobilovém výzkumu, výzkumu účinků vnitřního i vnějšího prostředí na lidské tělo a ve výzkumu civilních i vojenských oděvů [84]. Aktualizovaný přehled vývoje a hlavních vlastností tepelných manekýnů mezi lety 1942 až 2021 je uveden v plné verzi habilitační práce.



Obr. 12 – Vlevo: Tepelný manekýn Newton s vybavením dostupný na pracovišti autora. Uprostřed: Rozdělení manekýna na 34 segmentů. Vpravo: Povrchové teploty manekýna při aktivním řízení teplot manekýna termofyziologickým modelem. Zdroj archiv autora.

Dle zdroje [85] jsou hlavní výhody při využití tepelných manekýnů spatřovány v:

- Odpovídající simulace tepelné výměny mezi lidským tělem/okolím a určení celkového tepelného toku z těla i jeho jednotlivých částí.
- Měření zahrnuje skutečnou 3D geometrii lidského těla a z ní plynoucí důsledky pro přenos tepla a souvztažnost ovlivnění přenosu suchých tepelných ztát konvekci a radiací.
- Objektivní měření tepelných vlastností oděvů, cenově a časově efektivní srovnávací měření při vývoji produktů.
- Určení hodnot veličin důležitých pro predikční modely tepelného komfortu

Využití tepelných manekýnů má však i své komplikace a nevýhody, které lze spatřovat dle autorových zkušeností v:

- Velmi vysoká investiční náročnost na pořízení systému. Například základní verze systému NEWTON je v řádu jednotek miliónů korun a samotný manekýn bez klimatické komory má jen omezené možnosti pro experimentální využití.
- Komplexita systému s množstvím regulační elektroniky, konektorů, mechanických kloubů, těsnost rozvodů vody a údržba/servis všech těchto částí.
- Složitý a časově náročný princip kalibrace u samotného manekýna i některých experimentálních metod (např. kalibrace koeficientů pro výpočet ekvivalentní teploty).
- Manipulace s manekýny vzhledem k jejich rozměrům a váze může být obtížná.
- Delší doba uvedení a nahřátí do provozního stavu (typicky hodiny) vzhledem k tepelné kapacitě těla manekýna ve srovnání s maximálně minutami u čidel a sond.

Jedou z hlavních domén užití tepelných manekýnů je vývoj a testování tepelně technických vlastností oděvů, oděvních sestav a textilních materiálů. Výhody využití tepelných manekýnů při měření tepelných vlastností oděvů jsou především:

- Odpovídající pokrytí těla oděvem versus volný povrch těla. Realistická distribuce a neuniformita textilních a vzduchových vrstev na povrchu těla (při špatné metodologii zvyšuje rozptyl měření).
- Zahrnutí vlivu střihu oděvu (volný vs. těsný) a všech konstrukčních detailů do měření. Větrací otvory, kapuce, náplety a jejich efektu na přenos tepla.
- Přímé zahrnutí efektu plošného faktoru oděvu (f_{cl}) na přenos tepla z povrchu oděvu.
- Variabilita povrchových teplot a tepelných toků na různých částech těla a povrchu oděvu.
- Vliv polohy těla na přenos tepla (v poloze stojící, sedící, ležící).
- Vliv pohybu těla na přenos tepla pod oděvem, ve vrstvách oděvu a z povrchu oděvu (chůze, změny dynamiky pohybu atd.)

Výhody měření s manekýny jako experimentálními měřicími systém at již laboratorními či pro použití ve vývojové a technické praxi jsou následující:

- Jedná se o objektivní metodu.
- Výsledky nejsou závislé na faktorech ovlivňující pokusné osoby - zdravotní a psychický stav, únava, nuda při delším experimentu atd.
- Zařízení je i přes některé uvedené nevýhody prakticky vždy připraveno k použití.
- Je možno provádět i velmi dlouhá měření ve velmi diskomfortních podmínkách bez kompromitace výsledků.

Opakovatelnost měření tepelného odporu oděvů v rámci jedné laboratoře na testovacím vzorku oděvu je dle [85] normálně v rozsahu 2 – 4% z naměřené hodnoty. Reprodukovatelnost hodnot mezi laboratořemi je obecně uváděna na v rozsahu 5 až 10 % [86], [87]. Pro určení výparného odporu oděvů byla na přelomu tisíciletí uváděna variabilita výsledků mezi laboratořemi v rozsahu 50 % pro jednovrstvé oděvy a až 100 % a více u oděvů vícevrstevných [85], [88]. V roce 2005 byla provedena revizní studie s využitím šesti různých manekýnů vybavených systémem pro simulaci pocení. Výsledky přinesly díky zlepšeným konstrukcím manekýnů zúžení pásma reprodukovatelnosti do hodnot 7 až 29 %, nicméně variabilita výsledných hodnot mezi laboratořemi se pohybovala stále v pásmu 41 až 138 % [87]. Doposud poslední srovnávací studie a vylepšení metodologie bylo provedeno F. Wangem v roce 2017 [82]. Ten identifikoval jako základní zdroje vysoké variability výsledků mezi laboratořemi rozdílnost v konstrukci manekýnů a principů simulace pocení, materiálech vlhčených overalů, míře pocení manekýnů, podmínkách při testech, různosti testovacích protokolů a postupů při výpočtu. V roce 2018 provedl R. Toma pod vedení K. Kuklaneho a autora práce srovnávací měření prostřednictvím metod měření vypraných odporů oděvů na manekýnech TORE (Univerzita v Lundu) a NEWTON (VUT v Brně) s vlhčeným overalem. Dílčí výsledky jsou publikovány v [89]–[91].

Hodnocení na základě dotazování pokusných osob – je postup, kdy jsou pro testování efektu prostředí na lidské tělo a jeho hodnocení využity přímo reálné pokusné osoby/dobrovolníci. Takový typ experimentů či testování HVAC systémů je velmi časově, organizačně i finančně náročný, ale je nezbytný pro rozvoj oboru a validaci výše zmíněných přístupů [53]. Nutné je však striktní zachování bezpečnostních a etických postupů při experimentech a to tak, aby bylo eliminováno nebezpečí poškození zdraví či jiné újmy u pokusných osob. Specifičnost metody dotazování pokusných osob spočívá v tom, že jsou do experimentu zapojeny pokusné osoby, které na základě vnímání výsledného účinku okolního prostředí na tepelný stav těla subjektivně vyhodnocují tepelný pocit a výsledný tepelný komfort. Jelikož se jedná o subjektivní hodnocení, které je ovlivněno celou řadou dalších vlivů specifických pro jednotlivé pokusné osoby, je pro získání objektivní informace o stavu prostředí

nezbytné provést měření stejného prostředí se skupinou pokusných osob [53], [92], [93]. Do hry tak zásadním způsobem vstupuje i lidská psychika a psychologie, neboť nefyzikálních faktorů, které ovlivňují výsledné hodnocení, je celá řada (zdravotní stav, kvalita spánku před měřením, nálada, stres z různých životních situací atd.). Správné provedení této metody a nastavení experimentu je tedy relativně obtížné a ze všech metod zmíněných v kapitole 4.1 i nejvíce komplikované. Z pohledu finálního hodnocení HVAC technologie [93] či z pohledu základního výzkumu lidské termofyziologie je však zcela nenahraditelné, neboť využívané měřicí metody a modely jsou stále silně zjednodušené (skořepinový manekýn má například malou tepelnou kapacitu a tvrdý povrch v pórování s reálným lidským tělem) a je validní pouze ve vymezených pásmech podmínek [94]. Detailněji viz plná verze habilitační práce.

4.2. Hodnocení tepelného komfortu na základě modelování

V technické praxi je dnes obvyklé využití simulačních nástrojů pro pilotní fáze návrhu technických zařízení. Numerické simulace lze řadit mezi experimentální metody typu in–silico, kdy experiment probíhá na virtuálním/matematickém modelu vyvíjeného systému a samotné softwarové prostředí pro definici modelů a numerické řešení simulací je řešeno pomocí výpočetní techniky. Každý model ať již reálný či matematický je však jistým zjednodušením zkoumaného problému a požadovaný detail a komplexita řešených dějů pak určuje jaký nástroj či simulační metodu je vhodné či nutné použít. Využití simulačních nástrojů také umožňuje získat představu o chování a zatížení systémů v různých podmínkách a provozních stavech, které na reálných modelech není snadné ani levné dosáhnout (např. vytápění kabiny vozidla při rychlosti 95 km/h, teplotě okolí -20 °C a intenzitě slunečního záření 350 W/m²). Dále je potřeba zmínit, že na odladěném a validovaném modelu je možné provést ucelenější a podrobnější matici zátěžových testů než na modelu reálném, protože množství experimentů prováděných in–silico je prakticky omezeno pouze výkonem počítačového hardwaru popřípadě počtem dostupných licencí simulačního nástroje/software.

Pro in–silico experimenty v oblasti optimalizace vnitřního prostředí, HVAC systémů, tepelného managementu a komfortu je především nezbytné modelování

- Přenosu tepla a hmoty (kondukce, konvekce, radiace, evaporace)
- Proudění a termodynamiku vlhkého vzduchu (a dalších směsí)
- Termofyziologických systémů lidského těla (metabolická produkce, protiproudá výměna tepla krví, pasivní a aktivní termoregulace atd.)

Vzhledem k tomu, že na tepelný komfort má vliv souhra celé řady faktorů, skládá se kompletní simulační prostředí tepelného komfortu z těchto dílčích modelů:

- Model pro simulaci tepelného stavu okolního prostředí
- Model oděvu nebo technologií, které jsou jeho součástí
- Model přenosu tepla z lidského těla do okolí
- Model generace a přenosu tepla v těle a model termoregulace lidského těla
- Model tepelného pocitu a modelu tepelného komfortu

Modely pro simulaci tepelné zátěže, tepelného stavu těla a modely komfortu

Simulace v oblasti tepelného komfortu jsou většinou velmi komplexní neboť působení okolního prostředí i zatížení člověka je prostorově nesymetrické a nehomogenní. Z pohledu simulací jsou tedy některé modely určené pouze pro

- Symetrická a homogenní prostředí a zátěže (např. model PMV–PPD, Adaptivní model, Index tepelných účinků okolí na lidské tělo)
- Nesymetrická a nehomogenní prostředí a zátěže (ekvivalentní teplota a Diagram komfortních zón, Wisslerův model, Tanabeho model, Fialův model, Berkeley model.)

Mnoho simulovaných dějů není možné řešit jako časově ustálené děje, ale je potřeba řešit je jako časově závislé děje a využít tzv. dynamické modely. Z hlediska způsobu zachycení dynamiky vývoje děje lze modely rozdělit na:

- Statický model člověka + statické model okolí (obecně celkově stacionární modely)
- Dynamický model člověka + statický model okolí (a obráceně, kvazidynamické modely)
- Dynamický model člověk + dynamický model okolí (celkově dynamické modely)

Z pohledu termofyziologie je dále možné ještě modely tepelného komfortu rozdělit na:

- Modely pro určení zátěže/stresu – v důsledku stavu prostředí či intenzity vykonávané činnosti – PHS, UTCI, WBGT [95]
- Modely termofyziologie pro celkové simulace tepelného stavu lidského těla – Fialův, Wisslerův, Stolwijkův, Gaggeho, Tanabeho model, Berkeley model
- Modely komfortní – většinou pro nízké metabolické produkce – PMV-PPD, Teq + DKZ

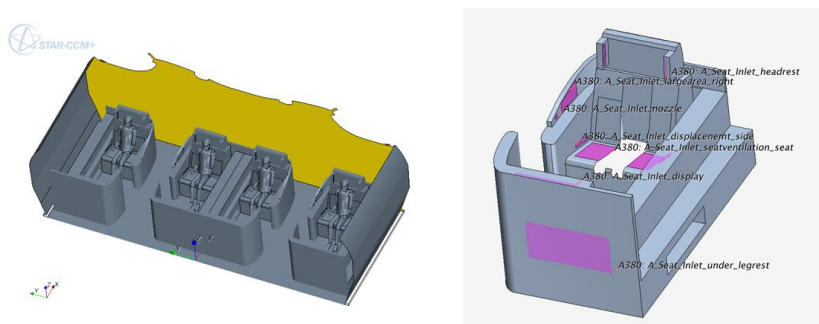
Za základní lze považovat modely tepelných účinků okolí na tělo, které jsou založené na kombinaci parametrů okolního prostředí (operativní teplota, ekvivalentní teplota). Další úrovní jsou modely přidávající metabolickou produkci a zatížení lidského těla, z něž predikují očekávanou tepelnou zátěž lidského organismu (WBGT, PHS, UTCI). Dalším přiblížením jsou modely založené na podrobném výpočtu tepelné bilance mezi lidským tělem a okolím. Jedná se především o model PMV–PPD pro homogenní symetrická prostředí vyvinutý O. Fangerem [96], a postup založený na využití ekvivalentní teploty a diagramu komfortních zón pro nehomogenní/nesymetrická prostředí vyvinutý H. O. Nilssonem [79]. Bilanční modely jsou však vyvinuté a validované pro statické podmínky, kdy je metabolická produkce nízká (cca do 2 met) a prostředí ani zátěž nejsou v čase proměnné. Pro asymetrická a časově proměnná prostředí jsou vyvinuty modely lidské termofyziologie, které přímo simulují lidskou termofyziologii, její subsystémy a přenosové děje tepla v lidském těle (Fiala, Tanabe [95]). Samotnou kapitolou jsou pak modely pro simulaci tepelného pocitu a tepelného komfortu, které predikují hodnocení výsledného tepelného stavu lidského těla, které by pocítoval průměrný člověk v dané simulované situaci. Jedná se například o PPD část modelu PMV–PPD vyvinutý O. Fangerem [96], regresní model Diagram komfortních zón vyvinutý H. O. Nilssonem [79], nebo nejnovější a velmi komplexní dynamický model tepelného komfortu dle Hiu Zhang [30], který pracuje ve spojení s termofyziologickými modely. Modely pro simulaci lidské termofyziologie a dynamického tepelného komfortu jsou sofistikované nástroje. Podrobný popis vývoje modelů je možné nalézt v publikacích Havenith a Fiala 2016 [95] nebo Hensley a kol. 2013 [97]. Termofyziologické modely přidávají modelování generace a přenosu tepla v lidském těle a modelování termoregulačních mechanismů. Tyto mechanismy působí na základě zpětné vazby od nervového systému, který detekuje tepelný stav těla, takže obecně musí být tyto modely časově závislé a jejich řešení probíhá numerickým iteračním postupem na počítači [95]. Termofyziologické modely dnes existují ve škále od jednoduchých po velmi sofistikované modely dle toho, jak realisticky reprezentují anatomii lidského těla (jednoduchý váleček vs. vícesegmentové modely [98]), jak detailně modelují nervový systém s termoreceptory [99], jak detailně je řešena simulace aktivních termoregulačních systémů a dějů [100] a jak predikují tepelný pocit a tepelný komfort [101]. V současné době však neexistuje model plně dostačující pro pokrytí všech prostředí, situací, technologií, zátěží, nesymetrií a dynamických změn. Naštěstí však takto univerzální model asi není úplně zapotřebí, neboť je jen málo úloh, kde je nezbytný takto komplexní přístup. V posledních letech je však tendence takový komplexní model vytvořit, nicméně se nejedná o čistou simulaci, ale propojení Fialova termofyziologického modelu a tepelného manekýna označované jako Human simulator (Koelblen, Psikuta 2018 [102]).

5. VYUŽITÍ POSTUPŮ V EXPERIMENTÁLNÍ A TECH. PRAXI

V kapitole jsou uvedeny příklady využití metod a přístupů, které byly popsány v předešlých kapitolách. Jedná se o výsledky projektů a experimentů uskutečněných v Laboratorii tepelného managementu nebo v kooperaci se spolupracujícími laboratořemi a výzkumnými/vývojovými teamy v letech 2010 až 2021. Podrobný popis všech experimentů je uveden v plné verzi habilitační práce.

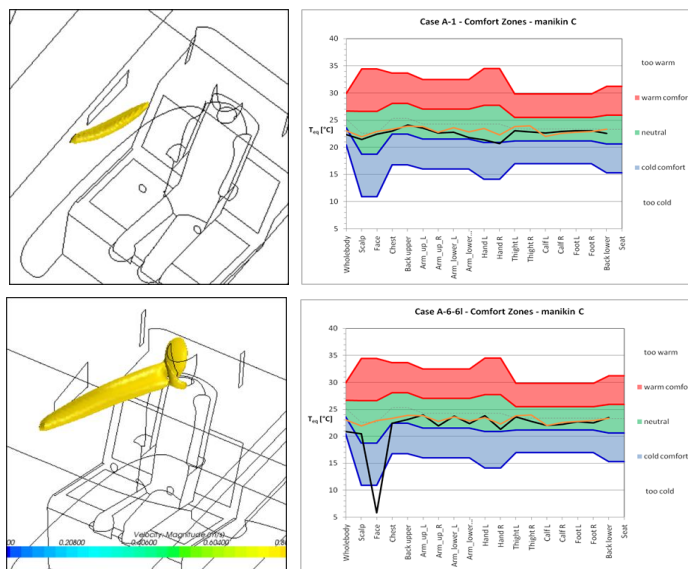
5.1. Simulace prostředí v kabině A380 projekt iSPACE

Projekt iSPACE (innovative Systems for Personalized Aircraft Cabin Environment) měl za cíl odstranit tepelný diskomfort v kabinách letadel a to prostřednictvím nových technologií pro individuální kontrolu prostředí na úrovni každého sedadla. Jednalo se hlavně o individuální nastavení teploty vzduchu, rychlosti proudění vzduchu, vlhkosti vzduchu a kontaktní plochy sedadla (vytápění/větrání). Byl vybrán koncept zástavby všech HVAC technologií na úrovni jednoho sedadla a bylo rozhodnuto, že vývoj bude probíhat pouze pro vybavení kabin první a business třídy (autoři metodiky výběru Fišer, Forman, Jícha). První fází projektu, byla pilotní studie pro posouzení vhodného umístění a nutného průtoku vzduchu individuálními výstky. Vzhledem k tomu, že v této fázi projektu nebyla k dispozici reálná geometrie výsttek ani nebyla připravena kabina pro testy s pokusnými osobami, byl využit přístup modelování pomocí CFD simulace. Geometrický model byl založen na tvaru kabiny Airbusu A380, do které byla umístěna 4 sedadla s obestavbou typickou pro první třídu a 4 virtuální manekýni s možností simulace ekvivalentní teploty na celkem 18ti segmentech těla (viz Obr. 13 vlevo). V obestavbě sedadla, bylo definováno celkem 7 různých lokací distribučních výsttek pro přívod individuálně úpravného vzduchu (viz Obr. 13 vpravo), které pak byly určené pro distribuci různých průtoků vzduchu (dm^3/s). Jedním z parametrů studie bylo také nalezení vhodné kombinace distribučních výsttek, která by zabezpečila přívod individuálně upraveného vzduchu do obličejové zóny pasažéra bez ohledu na interakci indiv. proudů s hlavním proudovým polem, které v kabině vytváří hlavní ECS letadla. Simulovány byly případy pro kombinovaný průtok 3 až 40 dm^3/s na úrovni jednoho sedadla, čili 3.75 až 40 % objemového průtoku vzduchu centrálního ECS.



Obr. 13 – Vlevo: Geometrie simulované výseče kabina Airbusu A380 se čtyřmi sedadly první třídy a čtyřmi virtuálními manekýny. Vpravo: Detail sedadla s lokalizací posuzovaných distribučních výsttek. Zdroj archiv autor.

Hlavní zaměření pak bylo směřováno na kombinaci distribuce vzduchu z boční dýzové výsttky (Inlet_nozzle), výsttky nad displejem (Inlet_display) a bočních výsttek u sedadla (Dispalcement_side). Kvantitativní analýza dosahu proudů z boční dýzové výsttky je uveden na Obr. 14. Zatímco při průtoku 3 dm^3/s a izotermních podmínkách proud z výsttky nedosáhl obličeje, při průtoku 6 dm^3/s již vzduch z individuální výsttky obličeje bezpečně dosáhl. Další zvyšování průtoku bylo možné, ale přinášelo jen chladnější tepelný pocit na obličeji a při průtocích nad 6 dm^3/s bylo patrné i ovlivnění horní poloviny těla průvanem (zvlnění černé křivky v závislosti na levá vs. pravá část těla pro případ A-6-6l Obr. 14.).



Obr. 14 – Horní řada: Při průtoku $3 \text{ dm}^3/\text{s}$ zaniká proud z výstky aniž by dosáhl obličeje, což je patrné i na diagramu komfortních zón. Dolní řada: Při dvojnásobném průtoku $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ proud bezpečně dosáhne obličeje, což je patrné i z poklesu t_{eq} na obličeji (viz DKZ, černá čára, segment Face). Zdroj archiv autora.

Výsledky modelování byly hlavně využity jako podklady pro umístění lokálních distribučních výustek, dimenzování ventilátorů, ohřivačů a zvlhčovačů lokálního HVAC systému.

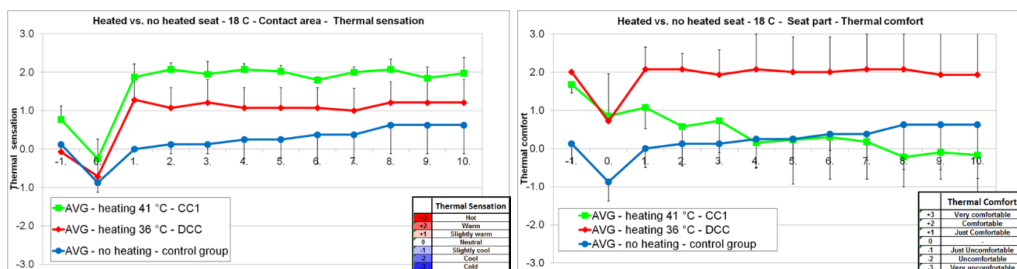
5.2. Tepelný komfort v kontaktní ploše sedačky s vyhříváním

Cílem víceletého projektu bylo experimentální ověření komfortních povrchových teplot v kontaktní ploše sedaček s vyhříváním vzhledem k doporučeným termofyziologickým limitům lidského těla. Projekt byl rozčleněn do pilotní fáze pro ověření vlivu okolní teploty na tepelný pocit a komfort, druhé fáze s vybranou teplotou okolí a variantní teplotou vyhřívání a kontrolní skupinou bez vyhřívání. Všechny sedačky byly umístěny v klimatické komoře za zástěnou, která eliminovala vliv proudění vzduchu v komoře na ochlazování pokusných osob (viz Obr. 15). V první fázi byla využita konstantní teplota vyhřívání na cílovou hodnotu $+41 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ a ve čtyřech opakovaných měřeních byla teplota v komoře udržována na stabilních hodnotách $+16$, $+18$, $+20$, $+24 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Všechna měření byla provedena s relativní vlhkostí $30 \pm 2.5 \text{ } \%$. Pokusné osoby vyplňovaly dotazník každé 3 min po dobu 30 min. Povrchová teplota obličeje pokusných osob byla vždy v době vyplňování dotazníku zaznamenána pomocí IR kamery a v komoře byl využit k měření ekvivalentní teploty manekýn Newton. Na základě výsledků první fáze pak byla vytipovaná jako vhodná teplota okolí $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, při které byly provedeny další části měření s nižší povrchovou teplotou výhřevů $+36 \text{ }^\circ\text{C}$ a také s kontrolní skupinou, kdy nebyl výhřev sedaček zapnut. Hlavním výsledkem měření z pohledu fyziologie a vhodného rozsahu regulace teploty vyhřívání kontaktních ploch bylo ověření fyziologické reakce lidského těla na kontaktní vyhřívání a regulovanou povrchovou teplotu. Bylo ověřeno, že čím vyšší je povrchová teplota sedačky tím vyšší je pociťovaný tepelný pocit (Obr. 16 vlevo). U tepelného komfortu je korelace závislá na povrchové teplotě, kdy teplota $+36 \text{ }^\circ\text{C}$ znamená optimální hodnocení komfortu $+2$ „komfortní“. U teploty $+41 \text{ }^\circ\text{C}$ míra komfortu konstantě klesala a na konci měřicí periody byla na rozhraní „komfortní/nekomfortní“. To lze interpretovat již jako nepříjemný pocit a je to horší hodnocení než u kontrolní sedačky bez vyhřívání (Obr. 16 vpravo). Tomu odpovídá hodnocení i na škále žádaná změna, kde pro teplotu vyhřívání $+41 \text{ }^\circ\text{C}$ je hodnota žádané změny na hodnotě mírně ochladit. Vnímaný pocit je tedy již nepříjemný a většina osob by jej chtěla kompenzovat snížením intenzity vytápění (Obr. 17).



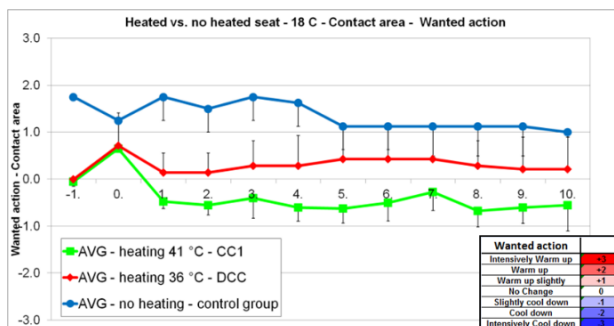
Obr. 15 – Vlevo: první fáze testu, čtyři pokusné osoby a manekýn Newton v testu. Vpravo: druhá fáze – uspořádání pro měření kontrolní skupiny. Zdroj archiv autora.

Je také nezbytná důkladná kontrola parametrů a funkce systémů, které testují dobrovolníci a přímo ovlivňují tělo. U některých testovaných osob byly zaznamenány teploty v kontaktní ploše i přes $+46\text{ }^{\circ}\text{C}$, což by v dlouhodobém působení mohlo vést k poškození pokožky vysokou teplotou (popáleniny 1. stupně). Proto je vždy nutný druhý záložní systém pro monitorování průběhu experimentu a obzvlášť nutné je zobrazení průběhu měřených hodnot v reálném čase.



Obr. 16 – Vlevo: Tepelný pocit v kontaktní ploše při teplotách vyhřívání $+41\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zelená), $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (červená) a bez vyhřívání (modrá). Vpravo: Při teplotě $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$ je hodnocení komfortu celou dobu stabilní na hodnotě $+2$ komfortní, zatímco u teploty $+41\text{ }^{\circ}\text{C}$ postupně klesá až k hodnotě právě nekomfortní. Zdroj archiv autora.

Výsledky experimentu byly využity jako podklad pro hodnoty regulačních prahů při regulaci vyhřívání sedaček. Vybraná data byla využita pro tvorbu a validaci speciálního modelu pro simulaci přenosu tepla mezi kontaktními částmi těla a sedačkou. Výsledky byly publikovány v publikacích Fojtlín, Psíkuta a kol. 2018 [103] a Fojtlín, Psíkuta, Fišer a kol. 2020 [104].



Obr. 17 – Průběh hodnocení veličiny Žádaná změna na částech v kontaktu se sedačkou. Hodnocení kontrolní skupiny bylo „mírně ohřát“, při teplotě $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl požadavek „žádná změna“ a u teploty $+41\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl požadavek již od třetí minuty od usednutí „mírně ochladit“. Zdroj archiv autora.

5.3. Součinitele přenosu tepla radiací a konvekce z lidského těla

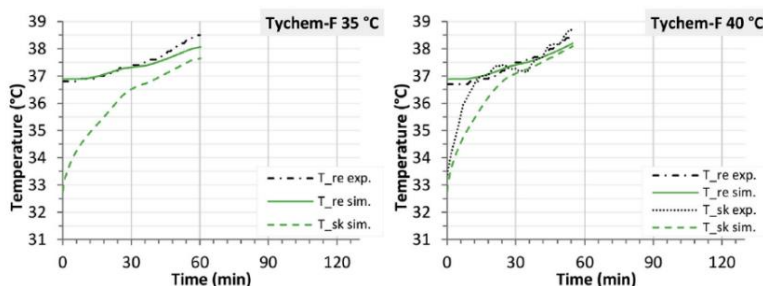
Pro tepelné indexy a termofyziologické modely jsou nezbytné koeficienty součinitelů přenosu tepla konvekce h_c a radiace h_r . Součinitele byly v minulosti vícekrát měřeny, ale nikdy nebyl v publikaci přesněji uveden kompletní rozbor nejistot měření. Pro měření byl využit kalibrační box umístěný v klimakomůře a tepelný manekýn Newton. Pro oddělení tepelného toku radiací a konvekce byl využit postup s potlačením přenosu tepla radiací, pomocí pokrytí povrchu manekýna fólií s nízkou emisivitou (viz Obr. 18). Měření součinitelů přenosu tepla bylo provedeno pro polohu vsedě a vestoje. Podrobný popis měření a výsledků je uveden v diplomové práci FOJTLÍN, M. Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekce z povrchu tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s., podrobný rozbor nejistot měření pak v článku Fojtlín, Fišer, Jícha, 2016 [105].



Obr. 18 – Pokrytí manekýna fólií s nízkou emisivitou (Alobal) pro potlačení přenosu tepla radiací z povrchu manekýna. Zdroj archiv autora.

5.4. Pilotní ověření FMTK modelu na ochranných oděvech

Pracoviště autora disponuje implementací Fialova modelu označovanou jako FMTK model [106], jehož hlavním autorem je Jan Pokorný. Po naprogramování modelu a ověření jeho funkčnosti na datech z literatury, bylo přistoupeno k pilotnímu ověření funkčnosti modelu na reálném problému. První testovací případ byl zaměřen na ověření predikce termofyziologické reakce lidského těla na zátěž ve ochranných oděvech pro zásahy v kontaminovaných prostředích. Byla získána termofyziologická data pro zátěž v různých prostředích a třech různých oděvech (bavlněný overal, filtrační převlekový oděv FOP a nepropustný protichemický oděv typu Tychem-F), které se lišily tepelným odporem I_{et} a výparným odporem R_{et} . Podmínky okolí, vlastnosti oděvů a metabolická produkce byly vstupní data a okrajové podmínky, za nichž byly odsimulovány scénáře odpovídající reálným měřením v klimakomůře. Ukázka výsledků simulací je uvedena na Obr. 19.



Obr. 19 – Porovnání reálné a simulované tělesné teploty T_{re} a průměrné teploty pokožky T_{sk} pro oděv Tychem-F a teploty okolí +35 a +40 °C. Převzato z [106].

Podrobné výsledky pilotní verifikační studie FMTK modelu jsou publikovány v článku Pokorný, Fišer, Fojtlín a kol. 2017 [106].

6. TEZE PRÁCE

Shrnutí poznatků vychází z kapitol a textů plné verze habilitační práce:

Tepelný komfort, adaptační strategie a úpravy prostředí

- Tepelný komfort je nejen výsledkem vyrovnané tepelné bilance mezi tělem a okolím, ale je také závislý na celkovém senzoryckém vjemu tepelného stavu těla a jeho zpracování vyššími mozgovými funkcemi, které interagují s dalšími vjemy, pocity a náladami. Při hodnocení kvality tepelného komfortu nelze tedy opomíjet faktory z oblastí termofyziologie, zvláště pak fenomén alliestézie, či vyšší citlivosti těla na chladné stimuly.
- V oblasti psychologie a kulturních aspektů vyplývá, že vyhodnocení tepelných vjemů vyššími mozgovými funkcemi je ovlivněno celou řadou aktuálních vlivů (emoce, kontrola nad prostředím), i dlouhodobého nastavení daného člověka z pohledu aktuálního zdraví, věku, zvyklostí (preference, očekávání, návyky) a kultury (např. oděvní zvyklosti).
- Parametry pro popis tepelného stavu prostředí a tepelného komfortu lze využít jako parametry při optimalizaci prostředí a výkonu pracovníků, nicméně v současné době neexistuje jednotná metodika, jak tyto postupy v praxi aplikovat. Jako vhodnější se jeví postup zaměřený na podmínky prostředí, které vedou ke ztrátě výkonu, nárůstu zmetkovitosti, zvýšení úrazů či nadměrnému zvýšení spotřeby energie na chod HVAC zařízení.
- K záznamu a objektivnímu vyjádření subjektivního hodnocení stavu prostředí se využívají škály a dotazníky. Z nejnovějšího výzkumu provedeného v 26 zemích celého světa (s 21 jazyky) vyplývá, že metoda je kontextuálně závislá a je nezbytné pečlivé zhodnocení všech faktorů, které mohou mít na hodnocení vliv (jazyk, klimatická oblast, roční období a sezónní aklimatizace, dlouhodobá aklimatizace).
- Celkově by nemělo být cílem vždy a všude udržovat lidské tělo v prostředí tepelné neutrality, protože i pro termoregulační systém lidského těla platí princip, že pro správnou funkci musí být systém přiměřeně využíván a trénován. Nízké využití termoregulace vede k tvorbě energetických zásob v těle a k podpoře rozvoje chorob jako je nadváha a cukrovka II. typu.
- V oblasti adaptability je prvním stupněm adaptabilita pasivní vyplývající z genetické a funkční výbavy lidského těla, která definuje rozsahy a limity adaptačních mechanismů v oblasti aklimatizace na teplo, chlad a hypoxii vyvolanou nízkým tlakem vzduchu. Tyto limity jsou pro většinu populace hraniční a vymezují rozsah parametrů prostředí, v kterých může člověk dlouhodobě existovat.
- Vytváření a užití oděvů patří do oblasti aktivní adaptability. Fenomén termoregulačního chování související s modifikací oděvu, je základním způsobem, jak se člověk přizpůsobuje tepelným změnám prostředí. Pokud je takové chování potlačováno (např. předepsaný dress code), je nutné striktnější řízení prostředí, což často vede k vyšší spotřebě HVAC systémů.
- Významnou kreativní adaptací člověka byl vynález a rozvoj přístřeší/obydlí a systémů pro úpravu prostředí v nich. Vzhledem k pozorovanému vývoji těchto parametrů v posledních 50ti letech se zdá, že prostředí, které lidé vytvářejí, se nápadně podobá prostředí, v kterém se pravděpodobně vyvinuli předci současného moderního člověka [61].

Hodnocení tepelného stavu prostředí na základě měření

- Popis je zaměřen na praktické aspekty měření parametrů prostředí s ohledem na využití dat v hodnocení tepelného stavu prostředí. Kapitola se zabývá především praktickými aspekty v oblasti využití techniky tak, aby získaná data byla relevantní pro oblast hodnocení lidského tepelného komfortu.
- Kapitola Měření pomocí aktivních sond a senzorů je zaměřena na podrobný popis vzniku konceptu ekvivalentní teploty a přístrojového vybavení na její měření. Vznik a rozvoj konceptu, velmi dobře vymezuje možnosti aplikace metody a implikuje vlastnosti, které musí mít měřicí zařízení, pro měření ekvivalentní teploty. Takovým zařízením může být například aktivně vyhřívaný senzor nebo tepelný manekýn.

- V podkapitole Hodnocení na základě měření tepelnými manekýny je velká část věnována popisu historického i současného vývoje tepelných manekýnů, protože v českojazyčné literatuře neexistuje žádný takto ucelený popis této speciální měřicí techniky. Jednotlivá linka popisu, je postupný rozvoj potřeb v oblasti termofyziologie a aplikace jejích poznatků na výzkum a vývoj speciálních oděvů a HVAC systémů.

- Kapitola Hodnocení na základě dotazování pokusných osob obsahuje poznatky, znalosti a zkušenosti autora s prováděním experimentů s pokusnými osobami. Je uveden popis doporučené laboratorní praxe, tak jak ji aplikuje Laboratoř tepelného managementu, FSI, VUT v Brně.

Hodnocení tepelného stavu prostředí na základě modelování

- Základní modely v oblasti modelování termofyziologie jsou Indexy tepelných účinků okolí na lidské tělo, kterými lze modelovat předpokládaný účinek prostředí na tepelný stav lidského těla i jeho výkonnostní parametry. Zvláště vývoj v posledních 20ti letech přinesl nové indexy jako PHS a UTCI, kde zapojením termofyziologie do výpočtu indexu výrazně vzrostla přesnost a univerzálnost predikce indexů pro široký rozsah parametrů prostředí.

- Další modely a postupy zahrnují Diagram komfortních zón a Fangerův model PMV/PPD, které jsou založeny na hodnocení tepelného toku mezi tělem a prostředím. Model PMV/PPD je doposud nejšířší validovaným modelem tepelného komfortu, nicméně s omezení na časově stabilní a homogenní prostředí budov. Diagram komfortních zón je naopak vyvinut pro nehomogenní prostředí, ale je omezen pouze na činnosti blízké klidnému sezení. Jeho výhoda je však snadná implementace do CFD simulací.

- Sofistikované termofyziologické modely a modely komfortu představují dnes nejvíce rozvinuté modely. Zatímco modely termofyziologie jsou v současnosti již relativně rozvinuté, modely lokálního vnímání tepelného pocitu a komfortu jsou stále spíše na začátku vývoje. Množství a provázanost podnětů je totiž natolik vysoká, že jejich algoritmizace je velmi složitá a bude do budoucna pravděpodobně potřebovat jiný typ simulačních metod založených například na neuronových sítích. Vzhledem ke komplexnosti těchto modelů je lze v současné době doporučit pouze pro výzkumné účely, neboť jen komplexnost vstupů a okrajových podmínek je činí jen obtížně využitelnými v běžné vývojové praxi.

Příklady využití postupů v experimentální a technické praxi

- Využití simulačních metod je vhodné především v případech, že testovaná technologie či systém ještě není vyroben či není běžně dostupný. Vždy je však potřeba zapojit alespoň základní validační metody a dílčí ověření výsledků simulací daty z reálného experimentu.

- Z uvedených příkladů lze vyvodit, že je vždy potřeba volit vhodný experimentální postup pro konkrétní řešený problém a mít vždy patřičně rozmyšlený návrh experimentu. Zbytečně rozsáhlé experimenty se špatným zacílením a nevhodně zvolenou řídicí funkcí jsou většinou jen plýtváním prostředky a časem. Pilotní experimenty malého rozsahu jsou vhodným nástrojem pro ověření vyvíjené technologie či testování různých inovací.

- Metody hodnocení tepelného komfortu jsou také jednoznačně využitelné pro hodnocení kvality existujících technologií pro HVAC a jejich vlivu na termofyziologii v různých prostředích. Pomocí těchto postupů lze predikovat vliv technologie na tepelný pocit a posoudit možnosti úprav systému či jeho regulace.

- Experimentátor také musí dbát maximální obezřetnosti při návrhu testovacího postupu, pokud se jedná o experiment se zapojením pokusných osob. Navržené podmínky nesmí pokusné osoby ohrozit a experimentátor musí odolat vnějším tlakům, které jej do takových podmínek mohou směřovat.

- Nedílnou součástí chodu laboratoře je opakované ověřování nejistot měření a další rozvoj měřicích metod. Bez této práce nelze udržet kvalitu experimentů na odpovídající úrovni ani zajistit další rozvoj laboratoře.

7. ZÁVĚR

Z uvedených poznatků a informací lze vyvodit následující stěžejní závěry pro hodnocení tepelného komfortu a tepelného stavu ve vnitřních prostředích.

- Metody hodnocení tepelného komfortu ať již založené na přístrojovém měření, zapojení pokusných osob či na predikci hodnocení na základě simulací jsou dnes etablované postupy, které za sebou mají více jak sto let vývoje. Jelikož je však komplexnost vztahů mezi prostředím, lidskou termofyziologií, vykonávanými činnostmi a lidskou psychikou enormní, není v současné době definována metoda hodnocení tepelného komfortu, která by umožňovala s dostatečnou přesností popsat a hodnotit všechny situace. Existují metodicky dobře pokryté oblasti jako prostředí obytných budov, či kancelářské pracovní prostředí, ale také bílá místa predikce a hodnocení tepelného pocitu a komfortu v dynamických a nehomogenních prostředích.

- Tepelný komfort je dle definice „stav mysli vyjadřující spokojenost s tepelným stavem okolního prostředí a je výsledkem subjektivního hodnocení“ což je vhodná definice pro ustálené stavy a homogenní prostředí. Nicméně dle předložených poznatků by měla definice zahrnovat nejen spokojenost s tepelným stavem prostředí, ale také s tepelným stavem těla člověka, který dané prostředí vnímá a hodnotí (viz Obr. 11.). Definice by tedy pak mohla znít „Tepelný komfort je stav mysli vyjadřující spokojenost s tepelným stavem okolního prostředí a tepelným stavem těla člověka, který subjektivní hodnocení provádí“. Rozšíření definice nijak nekompromituje současnou definici, ale pouze ji rozšiřuje o subjektivní spokojenost s tepelným stavem těla konkrétní osoby, na základě jejíhož senzorického vjemu, vzniká onen „stav mysli“. Rozšíření je vhodné hlavně pro dynamické změny prostředí či zátěže, kde tepelný komfort závisí nejen na tepelném stavu prostředí, ale i tepelném stavu lidského těla.

- Technické parametry HVAC systémů a dílčích technologií musí pro vytvoření komfortního prostředí respektovat termofyziologii lidského těla a základní aspekty lidského tepelného komfortu. Hlavně v regulaci systémů a jejich rozsahu musí být zohledněny limity lidské termofyziologie a psychologie. Pokud je to jen trochu možné, měli by mít uživatelé možnost dílčí regulace hlavních parametrů prostředí ovlivňujících přenos tepla z těla do okolí (ovládání vytápění/chlazení, rychlost proudění vzduchu, množství čerstvého vzduchu). Ideálním stavem je možnost regulace prostředí na úrovni každé osoby.

- V pracovních prostředích, kde je to jen trochu možné, by mělo být osobám umožněno využití termoregulačního chování změnou oděvu, kontroly nad prostředím i zapojením principů alliéstézie v návrhu vnitřních prostředí. Dle aktuální podoby paradigmatu tepelného komfortu je vhodné vytvářet prostředí, která zajistí eliminaci „tepelné nudy“, variabilitu podmínek během dne i roku, a která nebudou udržovat lidské tělo neustále v termoneutrálních podmínkách. Právě nevyužívání termoregulačních mechanismů těla je identifikováno jako jedna z příčin nadměrného hromadění energetických zásob v těle a nárůstů obezity a diabetu II typu v tzv. rozvinutých společnostech.

- Cílem dnešní doby je také minimalizovat energetické vstupy a spotřebu HVAC systémů s ohledem na emise CO₂ a klimatickou změnu. Je však potřeba mít na paměti, že ne vždy "více komfortu s využitím méně energie, je lépe". Jak uvádí [14], [47] "nízkoenergetické standardy, které ve svém důsledku vedou k vytvoření diskomfortu, nejsou o nic více udržitelné než ty, které vyžadují intenzivní využití energie", protože na základě a principu kreativní adaptability lidé v takovém prostředí nakonec využijí další dodatečnou energii na odstranění diskomfortu. Také je nutné počítat s tzv. Jevonsovým paradoxem, který může po optimalizaci energetických nároků HVAC systémů vyústit ve zvýšenou poptávku po jejich využití, čímž nakonec nedojde ke kýžené úspoře energie.

- Další rozvoj oboru hodnocení tepelného komfortu je možný především v oblasti hlubšího poznání mechanismů lidské termoregulace v kombinaci s individuálními vlivy stavby těla a jejich celkové interakce. Výzkumy také naznačují významné rozdíly ve vnímání tepelného

stavu těla různými jedinci a pro zpřesnění predikce je nutné tyto individuality v modelech zachytit (tzv. individualizace termofyziologických a komfortních modelů). K takovým modelům je však také nezbytné podrobnější poznání fyziky oděvu a podrobné měření interakce mezi tělem a okolním prostředím. Nové možnosti ve výzkumu tepelného komfortu přináší také nositelná elektronika, dlouhodobý sběr a vyhodnocení termofyziologických dat, stejně tak i nové typy manekýnů s věrným napodobením termofyziologických systémů člověka. Samostatným polem pro další rozvoj je využití měřených dat o tepelném stavu prostředí a lidského těla v oblasti predikce komfortu a regulace HVAC systémů.

Z pohledu autora a jeho zkušeností je nutné ještě doplnit tyto závěry:

- Nutnou podmínkou k využití nových přístupů při vytváření vnitřního prostředí jsou znalí a uvědomělí uživatelé, což je ovšem spíše otázka kultury a vyspělosti dané společnosti. Ona uvědomělost je také jisté „nastavení mysli (mindset)“ s ohledem na to „že je vhodnější přizpůsobit se prostředí, než za každou cenu přizpůsobovat prostředí sobě“. To lze ilustrovat na příkladu uvážlivého nastavení teploty v místnosti v zimním období a využití adekvátně teplého oblečení + správné motivace k tomuto chování.
- Úkolem vysokých škol je pak předat budoucím projektantům/tkám v oblasti HVAC dovednosti a znalosti v oblasti projekce, údržby a provozu HVAC systémů a to tak, aby mohli navrhovat systémy vytvářející prostředí, která zajistí zdravý a komfortní pobyt uživatelů. Je tedy vhodné využít současné poznatky nejen z oblasti stavební fyziky a přenosu tepla, ale také termofyziologie, sociologie a psychologie člověka. Absolventi vysokých škol jsou také vhodným „nosičem“, jak tyto poznatky šířit do společnosti.
- Nezbytná je také spolupráce mezi obory fyzika přenosu tepla, termofyziologie, konstrukce prvků HVAC systémů, měření, regulace, psychologie a syntéza jejich poznatků. Takový přístup aplikoval autor i v této práci a rozvíjí jej i v Laboratoři tepelného managementu, FSI, VUT v Brně.

Rozvoj techniky však nemůže vyřešit všechny současné výzvy v oblasti HVAC, jejich energetických nároků a dalšího rozvoje do budoucna. Bude nejspíše muset nastat společenská změna, která však není řešitelná technicky. Zkušenosti z pandemie COVID-19 jasně ukázaly, že technická řešení nestačí, pokud je společnost a jedinci nechtějí uplatnit a respektovat. Stejný princip je zřejmý i v oblasti hodnocení tepelného komfortu a optimalizace vnitřních prostředí. Rozsáhlé technické prostředky máme k dispozici a máme i relativně jasné poznatky, jak je aplikovat. Ve finále však záleží na konkrétních lidech, zda tyto poznatky a možnosti rozumně využijí. Informace a postupy předkládané v této práci snad přispějí k získání širšího náhledu na věc v oblasti metod hodnocení tepelného komfortu a jejich využití v experimentální, konstrukční a provozní praxi.

POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY

A_N, A_n	[m ²]	plocha N-tého/n-tého povrchu
C	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok přenášený z těla do okolního prostředí konvekcí
C_{res}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok přenášený z těla dýcháním, část přenášená konvekcí
E_{res}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok přenášený z těla dýcháním, část přenášená evaporací
E_{sk}	[W·m ⁻²]	měrný tep. tok přenášený z povrchu pokožky do okol. prostředí evaporací
h_c, h_r	[W·m ⁻²]	součinitel přenosu tepla konvekcí/radiací z povrchu člověka/manekýna
$h_{cal,whole}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu celého manekýna
I_{cl}	[m ² ·K·W ⁻¹]	celkový tepelný odpor oděvu
K	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok přenášený z těla do okolního prostředí kondukci
M	[W·m ⁻²]	měrná metabolická produkce lidského těla
q_{res}, q_{sk}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok přenášený dýcháním / z povrchu těla člověka
$\dot{Q}_{RC,n}$	[W·m ⁻²]	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z n-tého povrchu
$\dot{Q}_{RC,whole}$	[W·m ⁻²]	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z povrchu manekýna
R	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok přenášený z těla do okolního prostředí radiací
R_{et}	[m ² ·Pa·W ⁻¹]	celkový odpor oděvu proti vypařování potu/vody
RH	[%]	relativní vlhkost vzduchu
S	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok akumulovaný v těle člověka
S_{cr}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok akumulovaný ve vnitřních tkáních těla člověka
S_{sk}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok akumulovaný v pokožce
t_a	[°C]	teplota vzduchu
t_{eq}	[°C]	ekvivalentní teplota
$t_{eq,whole}$	[°C]	ekvivalentní teplota celého těla
$t_{surf,n}$	[°C]	povrchová teplota n-tého povrchu
$t_{surf,whole}$	[°C]	průměrná povrchová teplota celého manekýna
$\bar{t}_r$	[°C]	střední radiační teplota okolí
$\bar{w}_a$	[m·s ⁻¹]	střední rychlost proudění vzduchu
W	[W·m ⁻²]	měrný užitečný mechanický výkon lidského těla

Speciální jednotky, konstanty a zkratky

clo	jednotka tepelného odporu oděvu 1 clo = 0.155 m ² K/W
met	metabolic equivalent of task – metabolický ekvivalent činnosti 1 met = 58.1 W/m ²
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
DKZ	Diagram komfortních zón
ECS	Environmental control system – systém pro kontrolu prostředí v kabině letadla
FMTK	Fialův model tepelného komfortu implementovaný na VUT v Brně, FSI, EU
MTV	Mean Thermal Vote - střední tepelný pocit
PHS	Predicted Heat Strain index
PMV	Predicted Mean Vote – Předpověď středního tepelného pocitu
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied – Předpověď procentuálního podílu nespokojených
UTCI	Universal Thermal Climate Index
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature index

LITERATURA

- [1] M. Taleghani, M. Tenpierik, S. Kurvers, a A. Van Den Dobbelsteen, „A review into thermal comfort in buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 26. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.050.
- [2] K. Blazejczyk *et al.*, „An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI)", *Geogr. Pol.*, roč. 86, č. 1, s. 5–10, 2013, doi: 10.7163/GPol.2013.1.
- [3] P. Bröde, D. Fiala, B. Lemke, a T. Kjellstrom, „Estimated work ability in warm outdoor environments depends on the chosen heat stress assessment metric", *Int. J. Biometeorol.*, dub. 2017, doi: 10.1007/s00484-017-1346-9.
- [4] H. Djamil, „Indoor thermal comfort predictions: Selected issues and trends", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 74. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.076.
- [5] M. N. Cramer a O. Jay, „Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress", *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, roč. 196. s. 3–13, 2016, doi: 10.1016/j.autneu.2016.03.001.
- [6] C. Jeong a A. Di Rienzo, „Adaptations to local environments in modern human populations", *Current Opinion in Genetics and Development*, roč. 29. s. 1–8, 2014, doi: 10.1016/j.gde.2014.06.011.
- [7] B. R. M. Kingma, „Human thermoregulation: a synergy between physiology and mathematical modelling", 2012.
- [8] H. A. M. Daanen, E. Van De Vliert, a X. Huang, „Driving performance in cold, warm, and thermoneutral environments", *Appl. Ergon.*, roč. 34, č. 6, s. 597–602, 2003, doi: 10.1016/S0003-6870(03)00055-3.
- [9] A. K. Mishra a M. Ramgopal, „A comparison of student performance between conditioned and naturally ventilated classrooms", *Build. Environ.*, roč. 84, s. 181–188, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.008.
- [10] A. Pourshaghaghay a M. Omidvari, „Examination of thermal comfort in a hospital using PMV-PPD model", *Appl. Ergon.*, roč. 43, č. 6, s. 1089–1095, 2012, doi: 10.1016/j.apergo.2012.03.010.
- [11] P. Ricciardi a C. Buratti, „Thermal comfort in the Fraschini theatre (Pavia, Italy): Correlation between data from questionnaires, measurements, and mathematical model", *Energy Build.*, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.055.
- [12] F. Zhang *et al.*, „The effects of higher temperature setpoints during summer on office workers' cognitive load and thermal comfort", *Build. Environ.*, roč. 123, s. 176–188, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.06.048.
- [13] H. Sokolová a A. Psikuta, „Using a human thermoregulation model as a tool for design and refurbishment of industrial spaces for human occupancy", *Energy Build.*, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.014.
- [14] C. Croitoru, I. Nastase, F. Bode, A. Meslem, a A. Dogeanu, „Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles - Current capabilities and future perspectives", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 44. s. 304–318, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.105.
- [15] Ashrae, *ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*. 2009.
- [16] R. Escandón, R. Suárez, a J. J. Sendra, „Field assessment of thermal comfort conditions and energy performance of social housing: The case of hot summers in the Mediterranean climate", *Energy Policy*, 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.01.009.
- [17] B. Ozariso, „Assessing overheating risk and thermal comfort in state-of-the-art prototype

- houses that combat exacerbated climate change in UK", *Energy Build.*, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.01.030.
- [18] „Komfort", *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1, 2021.
 - [19] Milan Nakonečný, *Motivace chování*, 3., přepra. TRITON, 2015.
 - [20] T. W. Maretzki, „Transcultural Psychiatry by ARI KIEV, New York: The Free Press, and London: Collier-Macmillan Limited, 1972", *Transcult. Psychiatry*, roč. 9, č. 2, s. 91–96, 1972, doi: 10.1177/136346157200900201.
 - [21] A. H. Maslow, „Motivation and Personality (Third Edition)", in *Addison Wesley Longman, Inc.*, 1954.
 - [22] ASHRAE Standard 55, „Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI approved)", *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, roč. 2004. s. 30, 2013.
 - [23] R. J. de Dear a G. S. Brager, „Developing an adaptive model of thermal comfort and preference", in *ASHRAE Transactions*, 1998.
 - [24] R. F. Goldman, „Heat Stress in Industrial Protective Encapsulating Garments", in *Protecting Personnel at Hazardous Waste Sites*, 2007, s. 295–355.
 - [25] C. L. Lim, C. Byrne, a J. K. Lee, „Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings.", *Ann. Acad. Med. Singapore*, 2008.
 - [26] J. Bullock, J. Boyle, a M. Wang, *Physiology*. Philadelphia: LippincottWilliams &Wilkins, 2001.
 - [27] A. A. Romanovsky, „Thermoregulation: Some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system", *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, roč. 292, č. 1. 2007, doi: 10.1152/ajpregu.00668.2006.
 - [28] J. L. M. Hensen, „Literature review on thermal comfort in transient conditions", *Build. Environ.*, roč. 25, č. 4, s. 309–316, led. 1990, doi: 10.1016/0360-1323(90)90004-B.
 - [29] M. Luo *et al.*, „High-density thermal sensitivity maps of the human body", *Build. Environ.*, roč. 167, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106435.
 - [30] H. Zhang, „Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments", UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2003.
 - [31] H. Hensel, „Thermoreception and temperature regulation", *Gen. Pharmacol. Vasc. Syst.*, roč. 13, č. 2, s. 179, led. 1982, doi: 10.1016/0306-3623(82)90086-6.
 - [32] N. Gerrett, Y. Ouzzahra, a G. Havenith, „Distribution of skin thermal sensitivity", in *Agache's Measuring the Skin: Non-invasive Investigations, Physiology, Normal Constants: Second Edition*, Springer International Publishing Switzerland, 2017, s. 1285–1301.
 - [33] N. Gerrett *et al.*, „Thermal sensitivity to warmth during rest and exercise: A sex comparison", *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2014, doi: 10.1007/s00421-014-2875-0.
 - [34] J. Pokorný, „Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu", Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Brno, 2012.
 - [35] Y. Zhu, M. Luo, Q. Ouyang, L. Huang, a B. Cao, „Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments: A review", *Build. Environ.*, roč. 91, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.03.032.
 - [36] I. Nastase, C. Croitoru, a C. Lungu, „A Questioning of the Thermal Sensation Vote Index Based on Questionnaire Survey for Real Working Environments", in *Energy Procedia*, 2016, roč. 85, s.

366–374, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.263.

- [37] P. Hartl a H. Hartlová, *Psychologický slovník*. Praha: Portál, 2000.
- [38] M. Nakonečný, *Základy psychologie*. Praha: Academia, 1998.
- [39] M. Kim, S. C. Chong, C. Chun, a Y. Choi, „Effect of thermal sensation on emotional responses as measured through brain waves“, *Build. Environ.*, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.03.023.
- [40] H. Wang a L. Liu, „Experimental investigation about effect of emotion state on people's thermal comfort“, *Energy Build.*, roč. 211, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109789.
- [41] R. De Dear, „Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: Alliesthesia“, *Build. Res. Inf.*, roč. 39, č. 2, 2011, doi: 10.1080/09613218.2011.552269.
- [42] T. Parkinson a R. De Dear, „Thermal pleasure in built environments: Physiology of alliesthesia“, *Build. Res. Inf.*, 2015, doi: 10.1080/09613218.2015.989662.
- [43] M. André, R. De Vecchi, a R. Lamberts, „User-centered environmental control: a review of current findings on personal conditioning systems and personal comfort models“, *Energy and Buildings*, roč. 222, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110011.
- [44] K. B. Velt a H. A. M. Daanen, „Thermal sensation and thermal comfort in changing environments“, *J. Build. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.job.2017.02.004.
- [45] M. Frontczak a P. Wargocki, „Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments“, *Build. Environ.*, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.10.021.
- [46] M. Tarantini, G. Pernigotto, a A. Gasparella, „A Co-Citation Analysis on Thermal Comfort and Productivity Aspects in Production and Office Buildings“, *Buildings*, roč. 7, č. 4, s. 36, 2017, doi: 10.3390/buildings7020036.
- [47] J. F. Nicol a M. A. Humphreys, „Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings“, in *Energy and Buildings*, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00006-3.
- [48] M. Luo *et al.*, „Can personal control influence human thermal comfort? A field study in residential buildings in China in winter“, *Energy Build.*, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.057.
- [49] Y. Zhu, Q. Ouyang, B. Cao, X. Zhou, a J. Yu, „Dynamic thermal environment and thermal comfort“, *Indoor Air*, roč. 26, č. 1, s. 125–137, úno. 2016, doi: 10.1111/ina.12233.
- [50] X. Zhou, Q. Ouyang, Y. Zhu, C. Feng, a X. Zhang, „Experimental study of the influence of anticipated control on human thermal sensation and thermal comfort“, *Indoor Air*, 2014, doi: 10.1111/ina.12067.
- [51] „ČSN EN ISO 14505-3 - Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 3: Hodnocení tepelného komfortu pomocí zkušebních osob“. Český normalizační institut, Praha, s. 20, 2007.
- [52] „ČSN ISO 10551 Ergonomie tepelného prostředí - Stanovení vlivů tepelného prostředí použitím subjektivních posuzovacích stupnic“. Český normalizační institut, Praha, s. 24, 1997.
- [53] J. Wang, Z. Wang, R. de Dear, M. Luo, A. Ghahramani, a B. Lin, „The uncertainty of subjective thermal comfort measurement“, *Energy Build.*, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.09.041.
- [54] A. C. Roussac, J. Steinfeld, a R. De Dear, „Revisiting summer setpoint strategies for conventional air conditioned office buildings“, *Strategies*, s. 1–8, 2011.
- [55] P. Antoniadou a A. M. Papadopoulos, „Occupants' thermal comfort: State of the art and the prospects of personalized assessment in office buildings“, *Energy and Buildings*. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.001.

- [56] L. Lan, P. Wargocki, D. P. Wyon, a Z. Lian, „Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance", *Indoor Air*, roč. 21, č. 5, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00714.x.
- [57] N. H. Kutílek M., Landgrafová R., *Homo adaptabilis*. Dokořán, 2013.
- [58] E. G. Hanna a P. W. Tait, „Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to global warming", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, roč. 12, č. 7, 2015, doi: 10.3390/ijerph120708034.
- [59] J. S. Milledge, „The silver hut expedition, 1960-1961", *High Alt. Med. Biol.*, roč. 11, č. 2, 2010, doi: 10.1089/ham.2009.1087.
- [60] I. Gilligan, „The prehistoric development of clothing: Archaeological implications of a thermal model", *J. Archaeol. Method Theory*, roč. 17, č. 1, 2010, doi: 10.1007/s10816-009-9076-x.
- [61] M. G. Just, L. M. Nichols, a R. R. Dunn, „Human indoor climate preferences approximate specific geographies", *R. Soc. Open Sci.*, roč. 6, č. 3, s. 180695, bře. 2019, doi: 10.1098/rsos.180695.
- [62] C. Morgan a R. de Dear, „Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate", *Clim. Res.*, roč. 24, č. 3, 2003, doi: 10.3354/cr024267.
- [63] R. De Dear a G. S. Brager, „The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment", *Int. J. Biometeorol.*, roč. 45, č. 2, 2001, doi: 10.1007/s004840100093.
- [64] D. Kodžoman, „The psychology of clothing", *Text. leather Rev.*, roč. 2, č. 2, 2019, doi: 10.31881/tlr.2019.22.
- [65] R. Bean, B. Olesen, a K. Kim, „History of Radiant Heating and Cooling Systems (part 1)", *ASHRAE J.*, roč. January, č. January, 2010.
- [66] R. Bean, B. W. Olesen, a K. W. Kim, „Part 2 history of radiant heating & cooling systems", *ASHRAE J.*, roč. 52, č. 2, 2010.
- [67] „Stove", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–8, 2021.
- [68] M. A. A. Mohamed, „Traditional Ways of Dealing with Climate in Egypt", *Seventh Int. Conf. Sustain. Archit. Urban Dev. (SAUD 2010)*, č. January 2010, 2010.
- [69] „Evaporative cooler", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–5, 2021.
- [70] „Oliver Evans", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–2, 2021.
- [71] „Jacob Perkins", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–3, 2021.
- [72] „John B. Gorrie", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–4, 2021.
- [73] „Willis H. Carrier", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–4, 2021.
- [74] A. K. Mishra, M. G. L. C. Loomans, a J. L. M. Hensen, „Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions — An overview", *Build. Environ.*, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.016.
- [75] R. F. Goldman, „The four ‚Fs´ of clothing comfort", *Elsevier Ergon. B. Ser.*, roč. 3, č. C, 2005, doi: 10.1016/S1572-347X(05)80050-3.
- [76] P. O. Fanger, *Thermal Comfort - Analysis and Application in Environmental Engineering*. Copenhagen, 1970.
- [77] M. Fojtlín, J. Fišer, J. Pokorný, A. Povalač, T. Urbanec, a M. Jícha, „An innovative HVAC control system: Implementation and testing in a vehicular cabin", *J. Therm. Biol.*, roč. 70, 2017,

doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.04.002.

- [78] „ČSN EN ISO 14505-2 - Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty". Český normalizační institut, Praha, s. 28, 2007.
- [79] H. O. Nilsson, „Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models", University of Gävle, 2004.
- [80] T. Dehne, P. Lange, A. Volkmann, D. Schmeling, M. Konstantinov, a J. Bosbach, „Vertical ventilation concepts for future passenger cars", *Build. Environ.*, roč. 129, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.024.
- [81] A. Psikuta *et al.*, „Thermal manikins controlled by human thermoregulation models for energy efficiency and thermal comfort research – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.115.
- [82] F. Wang, „Measurements of clothing evaporative resistance using a sweating thermal manikin: An overview", *Industrial Health*, roč. 55, č. 6. 2017, doi: 10.2486/indhealth.2017-0052.
- [83] R. F. Goldman, „Thermal Manikins, Their Origins and Role", in *SIXTH INTERNATIONAL THERMAL MANIKIN AND MODELLING MEETING (6I3M)*, 2006, s. 3–17.
- [84] „Thermal manikin", *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., s. 1–4, 2021.
- [85] I. Holmér, „Thermal manikin history and applications", *Eur. J. Appl. Physiol.*, roč. 92, č. 6, 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1135-0.
- [86] H. Anttonen, „Interlaboratory trial of thermal manikin based on thermal insulation of cold protective clothing in accordance with ENV 342", in *Thermal Manikin Testing 3IMM*, 1999, s. 8–11.
- [87] M. G. M. Richards a E. A. McCullough, „Revised interlaboratory study of sweating thermal manikins including results from the sweating agile thermal manikin", *J. ASTM Int.*, roč. 2, č. 4, 2005, doi: 10.1520/JAI12109.
- [88] E. A. McCullough, „The use of thermal manikins to evaluate clothing and environmental factors", *Elsevier Ergon. B. Ser.*, roč. 3, č. C, 2005, doi: 10.1016/S1572-347X(05)80064-3.
- [89] K. Kuklane, R. Toma, a R. A. I. Lucas, „Insulation and evaporative resistance of clothing for sugarcane harvesters and chemical sprayers, and their application in PHS model-based exposure predictions", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, roč. 17, č. 9, 2020, doi: 10.3390/ijerph17093074.
- [90] R. Toma, K. Kuklane, M. Fojtlín, J. Fišer, a M. Jícha, „Using a thermal manikin to determine evaporative resistance and thermal insulation – A comparison of methods", *J. Ind. Text.*, 2020, doi: 10.1177/1528083719900672.
- [91] K. Kuklane a R. Toma, „Validation of iso 9920 clothing item insulation summation method based on an ambulance personnel clothing system", *Ind. Health*, roč. 59, č. 1, 2021, doi: 10.2486/indhealth.2020-0208.
- [92] K. C. Parsons, „Environmental ergonomics: A review of principles, methods and models", *Appl. Ergon.*, roč. 31, č. 6, 2000, doi: 10.1016/S0003-6870(00)00044-2.
- [93] K. C. Parsons, „The assessment of thermal comfort in vehicles using human subjects", in *Assessment of thermal climate in operator's cabs*, 1999, s. 25–30.
- [94] B. Koelblen, A. Psikuta, A. Bogdan, S. Annaheim, a R. M. Rossi, „Thermal sensation models: a systematic comparison", *Indoor Air*, roč. 27, č. 3, 2017, doi: 10.1111/ina.12329.
- [95] G. Havenith a D. Fiala, „Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress",

- [96] P. O. Fanger, N. O. Breum, a E. Jerking, „Can colour and noise influence man's thermal comfort?", *Ergonomics*, roč. 20, č. 1, 1977, doi: 10.1080/00140137708931596.
- [97] D. W. Hensley, A. E. Mark, J. R. Abella, G. M. Netscher, E. H. Wissler, a K. R. Diller, „50 Years of Computer Simulation of the Human Thermoregulatory System.", *J. Biomech. Eng.*, roč. 135, č. 2, 2013, doi: 10.1115/1.4023383.
- [98] D. Fiala, K. J. Lomas, a M. Stohrer, „A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system", *J. Appl. Physiol.*, roč. 87, č. 5, s. 1957–1972, lis. 1999, doi: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
- [99] B. R. M. Kingma, M. J. Vosselman, A. J. H. Frijns, A. A. van Steenhoven, a W. D. van Marken Lichtenbelt, „Incorporating neurophysiological concepts in mathematical thermoregulation models", *Int. J. Biometeorol.*, roč. 58, č. 1, 2014, doi: 10.1007/s00484-012-0628-5.
- [100] D. Fiala, K. J. Lomas, a M. Stohrer, „Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions", *Int. J. Biometeorol.*, roč. 45, č. 3, s. 143–159, 2001, doi: 10.1007/s004840100099.
- [101] D. Fiala, „Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort", De Montfort University, Leicester, 1998.
- [102] B. Koelblen, A. Psikuta, A. Bogdan, S. Annaheim, a R. M. Rossi, „Human simulator – A tool for predicting thermal sensation in the built environment", *Build. Environ.*, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.050.
- [103] M. Fojtlín, A. Psikuta, R. Toma, J. Fišer, a M. Jícha, „Determination of car seat contact area for personalised thermal sensation modelling", *PLoS One*, roč. 13, č. 12, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0208599.
- [104] M. Fojtlín *et al.*, „Thermal model of an unconditioned, heated and ventilated seat to predict human thermo-physiological response and local thermal sensation", *Build. Environ.*, roč. 169, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106571.
- [105] M. Fojtlín, J. Fišer, a M. Jícha, „Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, roč. 77, 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.015.
- [106] J. Pokorný *et al.*, „Verification of Fiala-based human thermophysiological model and its application to protective clothing under high metabolic rates", *Build. Environ.*, roč. 126, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.017.

ABSTRACT

In the work, the concept of thermal comfort is defined from the point of view of human biology, psychology and other factors that relate to it. The main subsystems of the human thermoregulatory system and the equations for the basic expression of heat transfer phenomena between the body and the environment are described. The next part describes the quantification of thermal comfort and thermal sensation using scales and use of thermal comfort as an objective parameter for quality of indoor environment. Furthermore, three basic adaptation approaches by which a human can adapt to the conditions of the surrounding environment are discussed in detail. The description of typical local garments for extreme environments is presented. The subchapter also includes a description and methods of measuring parameters defining the transfer of heat and moisture through clothing. An important creative adaptation of man was the invention of dwellings and systems for the treatment of the environment in them. The next chapter describes in detail the methods for objective determination of the thermal state of the indoor environment and heat transfer from the human body. First, sensors for measuring individual environmental parameters are described, then sensor systems for measuring the equivalent temperature, and then the development, properties and use of thermal manikins are described in detail. Last subchapter is focused on good practice for experiments with the involvement of experimental persons and measuring some thermophysiological parameters of the human body are also presented. Tools for simulations of the environment, human thermophysiology and comfort are also an integral part of development and research. Approaches and methods of simulation using 1D tools, CFD, indices and models of human thermophysiology are described. The last part is focused on practical examples of the use of the described methods on experiments and projects carried out by the team of the Laboratory of Thermal Management, FME, BUT. The author gives examples of good practice, but also some of his own mistakes, as an example of how to avoid such oversteps.