



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Metody hodnocení tepelného komfortu a jejich využití v experimentální a konstrukční praxi

Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

Typ práce:

Habilitační práce

Obor:

Konstrukční a procesní inženýrství

Brno 2021

Abstrakt

V předkládané práci je nejprve definován samotný pojem tepelný komfort a je provedeno jeho základní vymezení z pohledu lidské biologie, psychologie a faktorů, které se k němu vztahují. Jsou popsány základní prvky termoregulačního systému lidského těla a rovnice pro základní vyjádření přenosových fenoménů tepla mezi tělem a okolím. V další části je popsána kvantifikace tepelného komfortu pomocí škál, přičemž je dokladována evidence využití tepelného komfortu jako objektivního parametru pro hodnocení kvality vnitřního prostředí. Dále je podrobně pojednáno o třech základních adaptačních přístupech, kterými se může člověk přizpůsobit podmínkám okolního prostředí. Velký důraz je kladen na popis typických místních oděvů pro různá extrémní prostředí, neboť ty nejlépe ilustrují významnost této inovace pro modifikaci přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím. Součástí podkapitoly je také popis a způsoby měření parametrů definujících přenos tepla a vlhkosti oděvem. Významnou kreativní adaptací člověka byl vynález a rozvoj obydlí a systémů pro úpravu prostředí v nich. V práci jsou podrobně popsány metody pro objektivní určení tepelného stavu vnitřního prostředí a přenos tepla z lidského těla. Nejprve jsou popsána čidla a senzory pro měření jednotlivých parametrů prostředí, dále pak sensorické systémy pro měření ekvivalentní teploty, a poté je podrobně popsán vývoj, vlastnosti a užití tepelných manekýnů. Jsou také uvedeny postupy pro testování prostředí a účinků klimatizačních technologií na lidské tělo se zapojením pokusných osob a měření některých termofyziologických parametrů lidského těla. Nedílnou součástí vývoje a výzkumu jsou také nástroje pro simulace prostředí, lidské termofyziologie a komfortu. Jsou popsány přístupy a metody simulace pomocí 1D nástrojů, CFD, indexů tepelných účinků okolí a modelů lidské termofyziologie. Poslední část práce je věnována praktickým příkladům užití popsaných metod na experimentech a projektech, které realizoval team Laboratoře tepelného managementu FSI, VUT v Brně. Autor uvádí příklady vhodné praxe, ale i některé vlastní chyby a omyly, jako příklad, jak se takových přešlapů vyvarovat. Součástí práce je shrnutí poznatků a závěr.

Klíčová slova

Tepelný stav prostředí, Tepelný komfort, Tepelný pocit, Termofyziologie lidského těla, Kvalita vnitřního prostředí, Oděv, Tepelné vlastnosti oděvu, Vytápění, Větrání, Klimatizace, Model tepelného pocitu, Indexy tepelných účinků okolí, Simulace prostředí, CFD, Měření parametrů prostředí, Tepelný manekýn, Ekvivalentní teplota, Pokusné osoby, Klimatická komora, Kabina dopravního prostředku.

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. These garments are the best example of importance of invention of garment for modification of heat transfer between human body and surrounding environment. The subchapter also includes a description and methods of measuring the 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. Part of the work is a summary of findings and conclusions.

Keywords

Thermal comfort, Thermal sensation, Human thermophysiology, Indoor environment quality, Clothing, Thermal properties of clothing, Heating, Ventilation, Air-conditioning, Thermal sensation models, Thermal indices, Simulation of environment, CFD, Measurement of ambient environment parameters, Thermal manikin, Equivalent temperature, Test subjects, Climatic chamber, Vehicle cabin.

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. Lucie byla také korektorkou prvních raných verzí textu. Dále bych poděkoval mému otci Janu Fišerovi, který mě vedl k sociálním dovednostem, které byly důležitým podkladem pro rozvoj spolupráce s ostatními pracovišti a teamy v oboru.

Práce by nikdy nevznikla bez podpory a inspirace od mentora prof. Miroslava Jíchy. Svým náhledem na výzkum založený na důsledném propojení laboratorních experimentů a simulačních přístupů umožnil postupný vznik a rozvoj teamu a vybavení laboratoře, kterou autor dále označuje jako Laboratoř tepelného managementu. Svým tolerantním vedením a zapojením autora do nejrůznějších projektů týkajících se větrání a klimatizace kabin dopravních prostředků (CLKV, NCK, iSPACE, spolupráce s firmou Volkswagen, Škoda a dalšími) umožnil rozvoj dovedností a znalostí autora.

Poděkování dále patří kolegům a kolegyním z kolektivu Laboratoře tepelného managementu, v které se realizovala většina projektů a experimentů uvedených v práci. Prakticky všech projektů se účastnil kolega Jan Pokorný, který je hlavním autorem matematických modelů vyvinutých v laboratoři a také skriptů pro hromadné zpracování dat. 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 s laboratořemi EMPA St. Gallen, Švýcarsko a Lund university, Švédsko přispěli kolegové Miloš Fojtlín a Róbert Toma, kteří jsou také hlavní autoři významných publikací s těmito zahraničními teamy. Provoz laboratoře a celého teamu byl zajištěn také díky práci a aktivitě Barbory Kopečkové, jak v oblasti managementu projektů, tak matematického modelování přenosu tepla ve strojních systémech a živých organizmech. V neposlední řadě prošla laboratoří celá řada studentek a studentů, kteří v rámci svých bakalářských a magisterských prací zpracovali řadu témat v oboru měření tepelných vlastností oděvů, měření prostředí a simulace prostředí.

Poděkování také patří kolegům z praxe a to především Dr. Viktoru Baderovi z Volkswagen Group Innovation a Bc. Janu Hrnčířovi a doc. Jaroslavu Machanovi ze Škoda auto a.s., kteří umožnili spolupráci celého teamu na aplikovaném výzkumu v oblasti tepelného komfortu a kvality prostředí v kabinách osobních vozidel.

Nakonec bych rád poděkoval za inspiraci v oblasti lidské termofyziologie a využití jejich principů v měření tepelného stavu lidského těla a okolního prostředí prof. Raphu Goldmanovi, prof. Eugenu Wisslerovi, prof. Georgeovi Havenithovi a Dr. Agnes Psikutě, jejichž práce a nasazení pro věc mě vždy pozitivně inspirovala k další práci. Všechny jsem je měl možnost potkat při spolupráci či na vědeckých konferencích ICEE a i3m, kde jejich příspěvky byly vždy inspirující, obohacující a rozšiřující obzory v oboru lidského tepelného komfortu.

Předmluva autora

K technice a experimentům ovlivňujícím parametry vnitřního prostředí jsem se dostal už jako žák čtvrté třídy, kdy jsem zkonstruoval jednoduchou zvlhčovačku vzduchu z malého motoru s vrtulkou z letadla, trať z autodráhy, kbelíku a kousku bavlněné tkaniny namočené ve vodě. Vzduch proudící z šíleně hučícího stroje byl nejen „pocitově“ vlhčí, ale měl i nižší teplotu. Tenkrát jsem samozřejmě vůbec nic netušil o adiabatickém vlhčení a provozních parametrech ventilátorů, ale živě si pamatuji, jak mě ta hučící věc bavila a fascinovala. Fyzikální vysvětlení pro pozorované děje jsem tehdy neměl a zjistit něco bližšího v 80. letech bylo skoro nemožné. Většina dospělých mi poradit nedovedla, jen dědeček odhadoval, že to možná bude něco „jako když večer na louce padne rosa“.

V průběhu let jsem se přes střední školu dostal až na VUT v Brně, kde jsem nejprve vystudoval Fakultu elektrotechniky a informatiky v bakalářském oboru a po přestupu na Strojní fakultu jsem nastoupil do magisterského oboru Technika prostředí. Teprve zde jsem začal nacházet odpovědi na to, co jsem jako dítě pozoroval a získával jsem informace a vědomosti z oblastí HVAC techniky, kvality vnitřního prostředí a využití těchto postupů pro konstrukci nových zařízení a technologií. V navazujícím doktorském studiu jsem se věnoval optimalizaci vnitřního prostředí v kabinách dopravních prostředků pomocí CFD metod, kde jsem ve spolupráci s J. Pokorným poprvé použil predikci tepelného komfortu založenou na ekvivalentní teplotě. Tato práce mi odkryla oblast lidské termofyziologie, tepelně vlhkostních vlastností oděvů, validace výsledků simulací experimenty, tepelné manekýny a výzkumu reakcí lidského těla pomocí pokusných osob. Celá tato plejáda přístupů a metodik však měla jeden hlavní cíl, kterým je poskytnutí optimálního a komfortního prostředí pro člověka. Všechny technologie, které má dnes člověk k dispozici v oblasti HVAC však nevznikly na „zelené louce“, ale prodělaly historický vývoj podmíněný celou řadou kulturních a společenských událostí. Vznik jednotlivých technologií měl své konkrétní důvody, které je nezbytné z mého pohledu znát, aby bylo možné tyto technologie dále rozvíjet a správně aplikovat. Předkládaná práce tedy shrnuje aktuální poznatky v oblasti lidského tepelného komfortu a HVAC technologií a zasazuje je do širšího technického, společenského a historického kontextu, který poskytne čtenáři patřičný náhled na tuto problematiku. Práce je tedy syntézou z více technických i netechnických oblastí, které však mají zásadní vliv na zacílení a konstrukční parametry technologií pro zdraví a komfort člověka ve vnitřním prostředí. Jsem přesvědčen, že takový přístup je nutný abychom ze studentů/tek technických vysokých škol nevychovali „fachidioty“, kteří se „jen honí za čísly“, ale neznají jejich původ, význam ani podstatu.

Záměrně jsem také zvolil pro práci český jazyk, aby byl text bez překážek přístupný pro zájemce z ČR/SK. Protože je, ale téma tepelného komfortu světovým oborem je většina použitých zdrojů v anglickém jazyce a většina prací teamu autora také. Z těchto důvodů má následující text i některé vlastnosti přebrané z anglosaského prostředí: psaní desetinné tečky místo čárky, anglické popisky v přebíraných obrázcích atd. Důvodem pro to bylo usnadnění výměny dat se zahraničními pracovišti a doufám, že nebudou představovat vážnější problém v čitelnosti a srozumitelnosti textu.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	TEPELNÝ KOMFORT	8
2.1	Vymezení pojmu tepelný komfort	8
2.2	Tepelná rovnováha a termofyziologie lidského těla.....	11
2.3	Tepelná bilance lidského těla – veličiny a parametry pro popis.....	19
2.4	Psychologické a kulturní aspekty	22
2.5	Kvantifikace vnímání a hodnocení tepelného stavu prostředí.....	27
2.6	Tepelný komfort jako optimalizační parametr	36
3	ADAPTAČNÍ STRATEGIE A ÚPRAVY PROSTŘEDÍ	39
3.1	Pasivní adaptabilita	40
3.1.1	<i>Aklimatizace</i>	40
3.2	Aktivní adaptabilita	45
3.2.1	<i>Oděvy a jejich hlavní funkce</i>	45
3.2.2	<i>Oděvy pracovní a ochranné</i>	51
3.2.3	<i>Parametry oděvů určující přenos tepla oděvem</i>	54
3.3	Kreativní adaptabilita.....	59
3.3.1	<i>Přístřeší, stavby a kabiny</i>	60
3.3.2	<i>Úprava vnitřního prostředí – HVAC systémy</i>	62
3.3.3	<i>Speciální ochranné pomůcky a systémy</i>	70
4	HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ	72
4.1	Měření parametrů tepelného stavu okolního prostředí	73
4.2	Měření sondami a aktivními senzory – ekvivalentní teplota.....	81
4.2.1	<i>Vývoj měřicích systémů a definice ekvivalentní teploty</i>	81
4.2.2	<i>Principy regulace povrchové teploty senzorů</i>	85
4.2.3	<i>Současné senzory pro určení ekvivalentní teploty</i>	87
4.3	Hodnocení na základě měření tepelných manekýnů.....	90
4.3.1	<i>Vznik a historie tepelných manekýnů</i>	91
4.3.2	<i>Aspekty využití manekýnů v experimentální praxi</i>	107
4.3.3	<i>Speciální manekýni a další možný technický vývoj manekýnů</i>	110
4.4	Hodnocení na základě dotazování pokusných osob	112
4.4.1	<i>Hloubka analýzy a zacílení experimentu - Design of experiment</i>	112
4.4.2	<i>Etika a doporučená praxe při výzkumu s pokusnými osobami</i>	116

4.4.3	<i>Měření parametrů souvisejících s tepelným stavem těla</i>	119
5	HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU NA ZÁKLADĚ MODELOVÁNÍ	124
5.1	Modelování okolního prostředí	127
5.2	Modelování tepelného stavu a komfortu člověka	137
5.2.1	<i>Indexy tepelných účinků okolí na lidské tělo</i>	137
5.2.2	<i>Diagram komfortních zón - DKZ</i>	145
5.2.3	<i>Fangerův model - PMV/PPD</i>	151
5.2.4	<i>Model adaptivního komfortu</i>	154
5.2.5	<i>Termofyziologické modely a modely komfortu</i>	156
6	PŘÍKLADY VYUŽITÍ POSTUPŮ V EXPERIMENTÁLNÍ A TECHNICKÉ PRAXI	170
6.1	Virtuální navrhování a experimenty	172
6.1.1	<i>Simulace prostředí v kabině A380 projekt iSPACE</i>	172
6.1.2	<i>Větrání a komfort v kabině řidiče autobusu</i>	174
6.2	Vývojový experiment a testování inovací	176
6.2.1	<i>Ventilované sedačky v podmínkách teplého prostředí</i>	176
6.2.2	<i>Ověření predikce tepelného komfortu v kabině letadla</i>	178
6.3	Hodnocení existujících technologií či prostředí	180
6.3.1	<i>Tepelný komfort v kontaktní ploše sedačky s vyhříváním</i>	180
6.3.2	<i>Tepelný komfort v kabině vozidla – letní a zimní podmínky</i>	183
6.4	Ověření metody, rozvoj metod a speciální aplikace	185
6.4.1	<i>Kalibrace tepelného manekýna pro měření ekvivalentní teploty</i>	185
6.4.2	<i>Součinitele přenosu tepla radiací a konvekcí z lidského těla</i>	188
6.4.3	<i>Pilotní ověření predikce FMTK modelu na ochranných oděvech</i>	190
7	SHRNUTÍ POZNATKŮ	191
8	ZÁVĚR	196
9	LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ	199
10	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	219

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], [9], tvůrčí činnosti a výuka [10]–[12], chirurgické výkony [13], [14], přesná montáž, hra na hudební nástroje [15] atd.). Stavby 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 [16], [17]. Z tohoto důvodu se začínají v posledních letech intenzivněji využívat metody měření a predikce tepelného komfortu [18] s cílem omezit tato rizika na minimum a to již v návrhové a konstrukční fázi systémů [19] pro úpravu a řízení vnitřního prostředí tzv. HVAC systémů (z anglického Heating, Ventilation and Air Conditioning [20]). 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 [21]–[24].

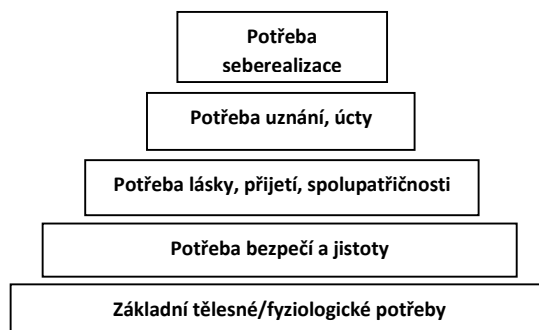
Níže předkládaná habilitační práce shrnuje poznatky autora z projektů, které byly řešeny v rámci teamu Laboratoře tepelného managementu, který postupně autor se svým mentorem prof. Miroslavem Jíchou od roku 2003 vytvořil. Úspěšná realizace všech projektů a experimentů, byla možná pouze za přispění všech členů teamu a vznik této práce by bez těchto výsledků nebyl možný. Je tak i jejich nedílnou zásluhou, že tato práce vznikla a autor by jim rád touto cestou znovu poděkoval.

2 TEPELNÝ KOMFORT

2.1 Vymezení pojmu tepelný komfort

Pojem komfort lze obecně definovat jako „stav myslí vzniklý na základě subjektivního vnímání, vyjadřující spokojenost vzniklou ve spojení s určitým dostatkem. Komfort pak často vyjadřuje velký dostatek při uspokojování nějaké lidské potřeby - například potřeba bydlení, potřeba pohodlí při přepravě, potřeba pocitu bezpečí atd.“[25].

Princip uspokojování potřeba jako motivaci lidského chování definoval již Sigmund Freud ve své práci Mimo princip slasti [26]. V ní postuluje, že jedním z hlavních motivů lidského jednání je uspokojení potřeb člověka a dosažení „odměny/slasti“ spojené s uspokojením této potřeby. I současná psychologie [27] a transkulturní psychiatrie [28] dokumentuje, že motiv dosažení dostatku nebo také komfortu se vyskytuje napříč různými lidskými kulturami. Jinak řečeno, lidé jsou motivováni k hledání postupů, které jim nějakým způsobem usnadní život a zvýší tak jejich komfort/pohodlí. Výše uvedené lze také jinak definovat, že lidé jsou obecně motivováni k hledání postupů, které sníží nebo zcela odstraní nějaký druh nedostatku/diskomfortu. Dle principu Maslowovy pyramidy [29] je potřeba tepelného komfortu řazena do základních fyziologických potřeb člověka, jejichž alespoň částečné naplnění je nezbytnou podmínkou pro realizaci potřeb vyšších (viz Obr. 1). Mezi realizací vyšších potřeb lze řadit různé činnosti související s funkcemi lidské společnosti obecně, takže zajištění a naplnění základních potřeb je nezbytné pro existenci člověka i jeho společenství.



Obr. 1 – Základní vrstvy Maslowovy pyramidy lidských potřeb. Tepelný komfort a homeostáze je řazena do Základních fyziologických potřeb.

Potřeba dosahování stavu tepelného komfortu z pohledu biologie 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. Tento princip se vyskytuje u všech vývojově vyšších živých organismů a je základním předpokladem jejich optimálního fungování a existence [27]. Potřeba tepelného komfortu je tedy svázána s potřebou udržování relativně stabilního vnitřního prostředí v organismu při změně okolí či fyzické zátěže organismu, což však vyžaduje vynaložení dodatečné energie, které pak organismus nemůže využít na jiné aktivity. Homeostatickou podstatu motivace k uspokojení základních potřeb člověka lze dokumentovat i na příkladu fyziologicko-psychologického fenoménu zvaného Alliestézie (anglicky Alliesthesia), který

spočívá v tom, že míra vnímání příjemnosti/nepříjemnosti vnějších stimulů je závislá nejen na kvantitě a kvalitě stimulu, ale také na vnitřním stavu organismu [30]. Například míra uspokojení z konzumace stejného množství jídla je větší, pokud má osoba hlad, než když je sytá. Stejně tak i relativně malá změna okolní teploty je vnímána jako příjemnější, pokud vrací tělo do rovnovážného (homeostatického) stavu z předešlého stavu nerovnováhy než, když je stejná změna teploty aplikována v případě, že je tělo v rovnovážném stavu. 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. Z toho pak plyne, že určení kvality závisí na úsudku a schopnostech pozorovatele, kdežto kvantitu lze obvykle ověřit a je to tedy objektivní údaj [31]. Protože se však v oblasti hodnocení komfortu člověka prolíná subjektivně-objektivní hledisko dané osoby, je objektivní stanovení tepelného komfortu velmi obtížné a je při definici nezbytné provést jisté zúžení parametrů definujících problém.

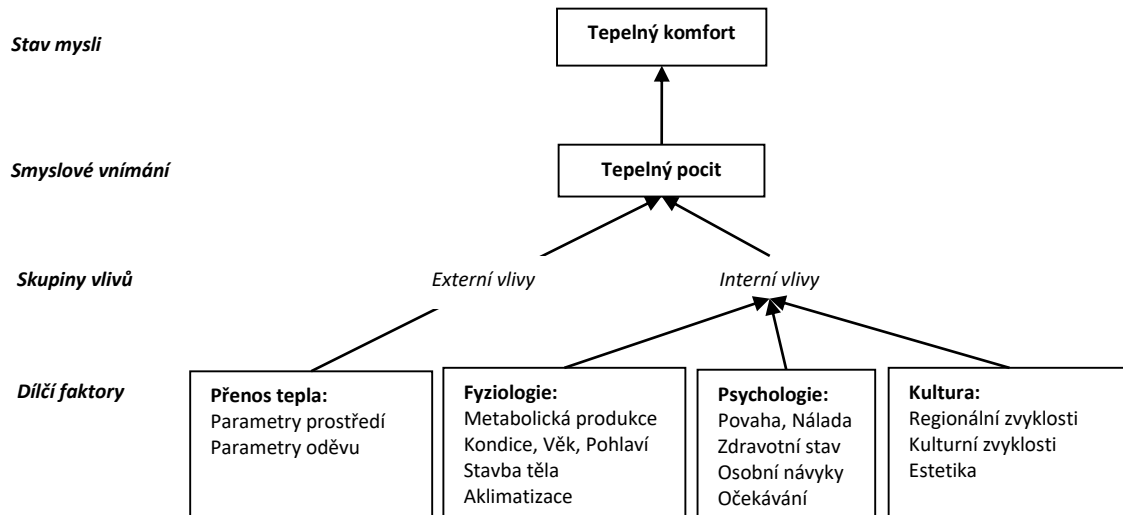
Pokud tedy výše uvedené zúžíme na fenomén tepelného stavu prostředí a interakce lidského těla s ním, pak lze

TEPELNÝ KOMFORT definovat následovně: Tepelný komfort je stav mysli vyjadřující spokojenost s tepelným stavem okolního prostředí a je výsledkem subjektivního hodnocení [32].

Za vyjádření oné spokojenosti se obvykle považuje fakt, že na tepelný stav okolního prostředí nemá člověk potřebu nijak zásadně reagovat či upravovat své chování [19], [33], [34]. Výše zmíněný „postup, pro odstranění diskomfortu“ lze poté spatřovat ve vzorcích chování, opatřeních a technologiích, které ovlivňují či aktivně řídí přenos tepla z lidského těla (např. oděvy) nebo upravují okolní prostředí právě tak, aby byl snížen či odstraněn diskomfort způsobený tepelným stavem okolního prostředí (HVAC systémy). Tyto systémy by měly řídit stav okolního prostředí tak, aby odezvy termoregulačního systému lidského těla byly minimální. Lidské tělo je vybaveno celou řadou velice účinných mechanismů, které zajišťují rovnováhu mezi produkcí a přenosem tepla do okolí, ale aktivace jejich funkce často znemožňuje dosažení výše definovaného stavu spokojenosti. Stručně vyjádřeno, za typický stav prostředí pro dosažení tepelného komfortu lze dle [35] považovat takovou situaci, „kdy je možné volně odvádět do okolí přebytečné teplo, které vzniká v lidském těle v důsledku metabolismu. Ne více, ne méně“.

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. 2). 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 mezi tělem a okolím a do interních pak faktory z oblasti *Fyziologie*, které ovlivňují produkci tepla, přenos tepla v těle, parametry termoregulačních mechanismů a intenzitu fyziologických odezev na signály týkající se tepelného stavu těla. Faktory ze skupin *Psychologie* ovlivňují zpracování těchto vjemů a vědomé reakce na ně, které jsou také často ovlivněny faktory spadajícími do skupiny *Kulturních zvyklostí*, které popisují především vzorce chování odvozené od kultury a místa, z kterého daný jedinec pochází.



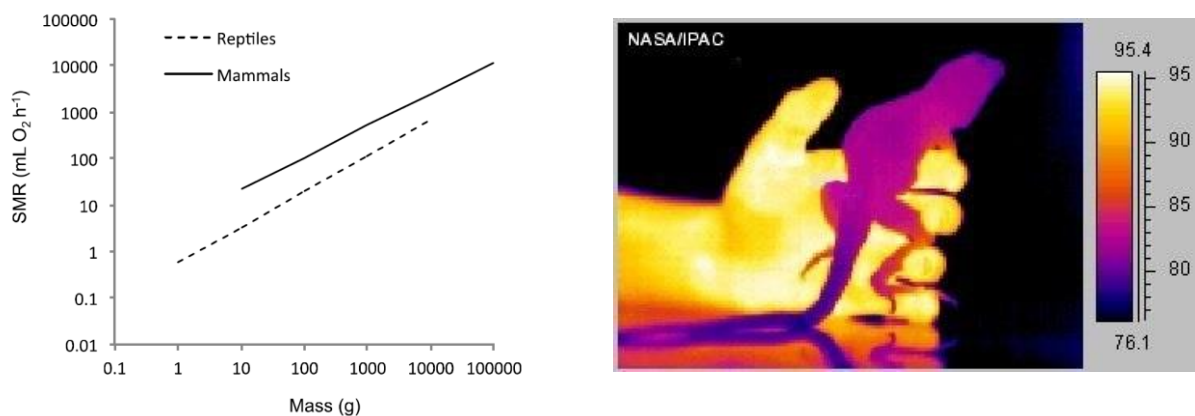
Obr. 2 – Základních skupiny faktorů, které ovlivňují tepelný komfort člověka.

Pomocí HVAC systémů lze přímo ovlivnit pouze faktory spadající do skupiny *Přenos tepla*. Ostatní faktory na úrovni nastavení každého jedince těmito strojními systémy ovlivnit přímo nelze, ale lze využít některých zjištěných korelací mezi nimi (možnost řízení prostředí = obecně lepší hodnocení tepelného stavu viz kapitola 2.4). Tento fakt je potřeba brát v potaz při návrhu a hodnocení vnitřních prostředí, neboť především faktory z oblasti lidské psychiky a kultury se jen obtížně parametrizují a komplexita vztahů v systému je do detailu prakticky nepopsatelná. Návrh a posouzení kvality vnitřního prostředí tedy nelze redukovat pouze na technicistní optimalizaci fyzikálních parametrů prostředí, ale je třeba zapojit i poznatky z oblasti lidského termofyziologie, psychologie, kultury a například i estetiky a designu. Jak naznačují některé studie, lidská psychika [36], očekávání, návyky [37] a vzorce chování mohou dosti zásadně ovlivnit vnímání výsledného prostředí a tím i dosažení/nedosažení stavu tepelného komfortu.

V následujících podkapitolách jsou blíže popsány jednotlivé faktory a fenomény, které ovlivňují tepelný pocit (smyslové vnímání) a tepelný komfort (stav mysli) člověka. Je provedena definice jednotlivých parametrů, které popisují dílní faktory a také příspěvek těchto faktorů k výslednému tepelnému komfortu. V závěru kapitoly jsou blíže popsány současné postupy pro převod tepelného pocitu a komfortu na objektivní škály, což je základní a nutný předpoklad pro objektivní hodnocení a možnou optimalizaci tepelného komfortu ve vnitřním prostředí.

2.2 Tepelná rovnováha a termofyziologie lidského těla

Na základě aktuálního vědeckého poznání a teorií je člověk přizpůsoben prostředí, v kterém se jako druh vyvinul a jelikož spadá do třídy savců, je jeho tělo vybaveno komplexním systémem termoregulačních mechanismů. Tyto mechanismy jsou jeho velkou výhodou umožňující aktivitu neomezenou denní dobou v širokém rozsahu okolních teplot (viz Obr. 3), ale zároveň i limitem, neboť vnitřní teplotu lidského těla je nezbytné udržovat v relativně úzkém rozsahu hodnot a je nutné vydávat relativně velké množství energie na její regulaci [7]. 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 ± 3.5 °C pak přímé ohrožení zdraví a následně i života v důsledku hypo/hypertermie [38], [39]. Na tyto limity jsou pak nastaveny všechny regulační strategie zajišťující interakci a reakce na změny parametrů okolního prostředí či fyzického zatížení těla samotného. Pokud je přibližně zachována rovnováha tepelné bilance mezi tělem a prostředím, lze dosáhnout stavu tzv. tepelné pohody/tepelného komfortu (blíže viz kapitola 2.3) a pouze při dodržení této rovnováhy je lidské tělo schopné dlouhodobě udržovat stálou tělesnou teplotu [20].



Obr. 3 – Vlevo: srovnání standardní metabolické produkce (SMR) u plazů (řád Reptilia, ektotermní) a savců (třída Mammalia, endotermní). Pozor, obě osy jsou v logaritmickém měřítku. Vpravo: ilustrace vlivu rozdílné bazální metabolické produkce na povrchovou teplotu těla člověka a ještěřa z čeledi Iguanidae (poznámka: rozsah škály na snímku je cca od 24 do 35 °C). Převzato a upraveno z [7], [440].

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

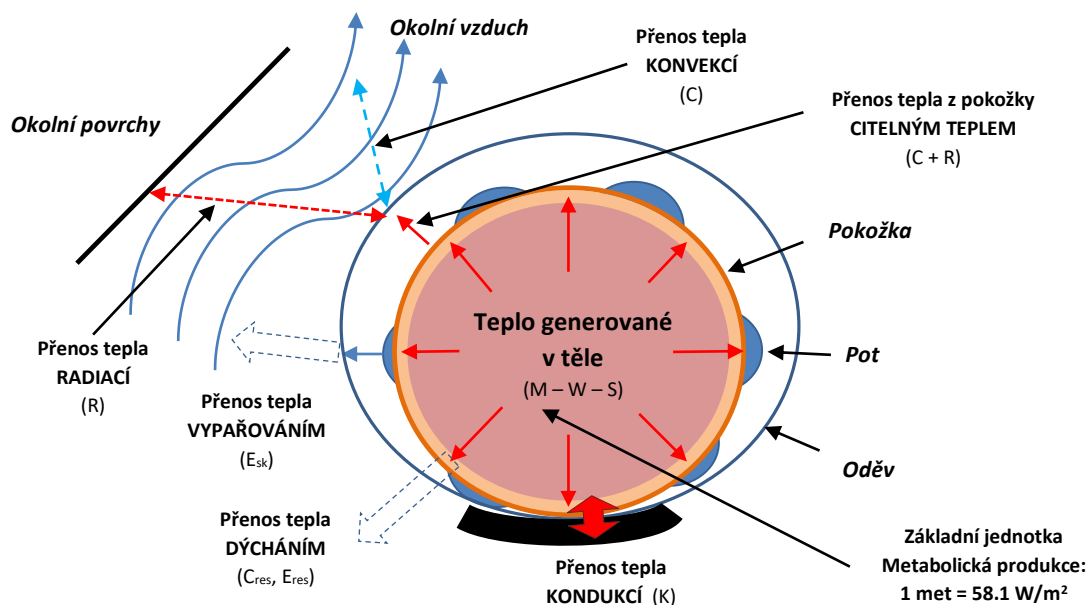
- Přenos tepla kondukcí (vedením)
- Přenos tepla konvekcí (prouděním)
- Přenos tepla radiací (zářením)

Jako čtvrtý mechanismus lze označit přenos tepla vypařováním, který je však kombinací přenosu tepla při současném přenosu hmoty a uplatňuje se při suchém pocení, mokřém pocení s vypařováním potu a přenosu tepla v dýchacích cestách (viz Obr. 4). Všechny zmíněné mechanismy jsou teoreticky popsány v celé řadě publikací [40] a jejich podrobnější popis tedy nebude v této části práce rozváděn.

Co je, však důležité z pohledu tepelného komfortu je fakt, že aktuální tepelný stav lidského těla a jeho okolí přímo určuje intenzitu výše zmíněných mechanismů přenosu tepla a 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/m^2] vztaženém k povrchu těla a definovány dle ISO 13731:2001 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. 4 – Znárodnění fenoménů uplatňujících se u přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím. Převzato, upraveno a doplněno z [20].

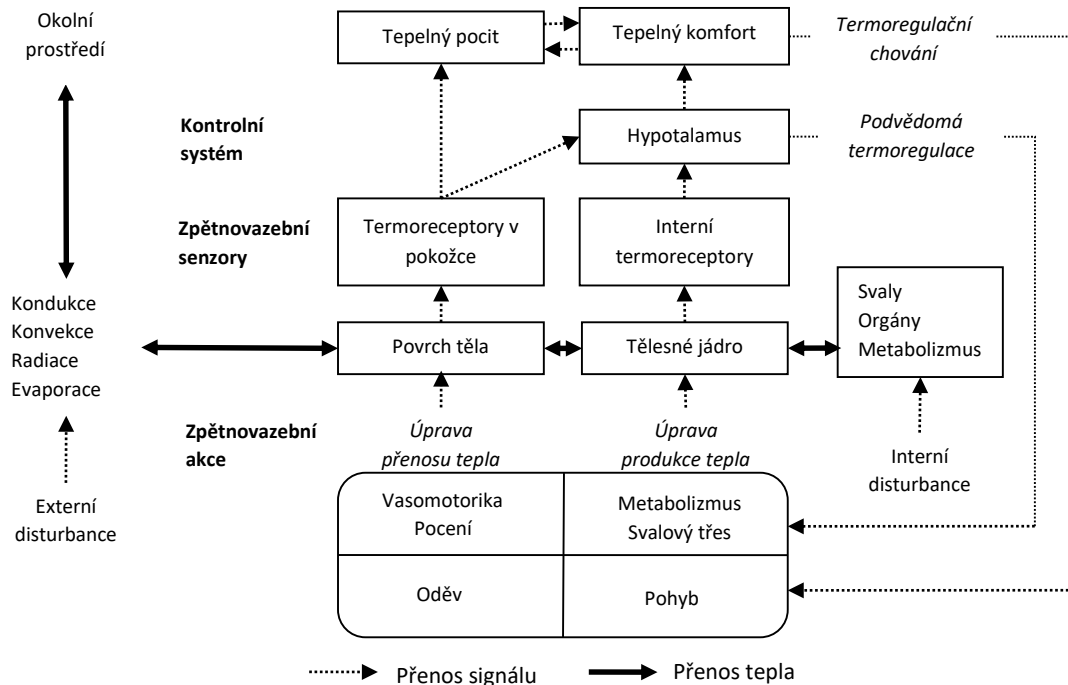
Metabolické teplo se tvoří hlavně v jádře těla, tj. játrech, svalech a srdci. V případě, že teplota okolí je nižší než tělesná teplota, prostupuje teplo vedením na povrch skrz vrstvy tkáně (svalové, tukové, podkožní vazivo a kůži) a odchází do okolí. Tuková vrstva omezuje tento prostup tepla díky svým izolačním vlastnostem a má velký vliv na celkovou redukci tepelných ztrát lidského těla [41]. 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. Za normálních okolností se krev z tkání vrací k srdci žilami, které vytváří na končetinách dva systémy: jeden povrchový a dále systém hluboký, který je situován podél tepen mezi svaly [42]. Krev uvnitř hlubokých žil, která je relativně chladnější (vrací se z končetin směrem k srdci), se ohřívá od krve tepen, které jsou situovány v těsné blízkosti a dochází tak k protiproudé výměně tepla krví [43], [44], která je dle [42] jednou z důležitých funkcí hlubokého žilního systému končetin.

Mechanismy pro produkci či regulaci přenosu tepla z těla však mají své limity, při jejichž překročení mohou nastat situace, které ohrožují zdraví a při dlouhodobém působení i život člověka. Situace, která může způsobit změnu či nabourání těchto regulačních mechanismů je vystavení lidského těla podmínkám, které způsobí nadměrné zvýšení přenosu tepla z těla do okolí či naopak přenos tepla z okolí do těla. V důsledku takové situace je narušena rovnováha mezi generovaným a odváděným teplem popsaným 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. Rozlišujeme následující rozsahy tělesné teploty a dopadů této teploty na zdraví a základní životní funkce lidského organismu [39].

- **Normální tělesná teplota** - cca 36.8 až 37.4 °C, střed 37 °C. Jsou zachovány všechny tělesné funkce a u zdravého člověka ji lze (po určitou dobu) udržet i ve velmi diskomfortních podmínkách díky aktivním termoregulačním mechanismům. V chladném prostředí se zvětšuje rychlost metabolických přeměn a svalovou činnost doplňuje svalový třes, v horkém prostředí se uplatňuje pocení. Krátké výkyvy tělesné teploty mimo tento rozsah jsou relativně běžné (např. při sportu/vyšší fyzické zátěži) a většinou nijak neohrožují lidské zdraví.
- **Zdraví ohrožující tělesná teplota** - pokud z nějakého důvodu nejsou schopny termoregulační mechanismy udržet tělesnou teplotu dlouhodobě v pásmu normální tělesné teploty, může dojít k následujícím dvěma situacím. Při nadměrném odvodu tepla z těla dojde k poklesu tělesné teploty do pásma 36.8 až cca 35 °C a nastává hypotermie/podchlazení organismu. Opačným případem je pak situace, kdy je odvod tepla natolik malý, nebo metabolická produkce tepla naopak natolik velká, že tělesná teplota vzroste do pásma 37.4 až cca 39 °C a nastane hypertermie/přehřátí organismu [45]. V této práci není mezi tyto stavy zahrnuta tzv. zvýšená teplota či horečka, která je vyvolána imunitní reakcí organismu a není tudíž důsledkem reakce zdravého lidského organismu.
- **Život ohrožující tělesná teplota** - pokud nejsou odstraněny příčiny, které vedly k vzrůstu/poklesu tělesné teploty do rozmezí zdraví ohrožujících hodnot, mohou dále nastat stavy: teplota dále klesne do rozmezí 35 až 33 °C a nastane stav těžké hypotermie/podchlazení organismu nebo naopak dále roste do rozsahu 39 až 41.5 °C do stavu tzv. těžká hypertermie/přehřátí organismu [46]. Překročení tělesné teploty 42 °C vede ve většině případů k akutní hypertermii s akutním nebezpečím selhání životně důležitých orgánů a následně k smrti [47]–[49]. Opačně pak pokles tělesné teploty pod 33 °C vede k akutní hypotermii spojené s poruchami vědomí a následně se stejně fatálními důsledky jako u akutní hypertermie. K selhání životně důležitých orgánů a tím k smrti dochází při poklesu tělesné teploty pod 28 °C [20].

Změny tělesné teploty kontinuálně vyhodnocuje řídicí centrum termoregulace, jímž je část mozku zvaná hypotalamus a podle signálů z povrchových (v kůži) a vnitřních (v míše, břišní dutině a v blízkosti velkých žil) termoreceptorů řídí odezvy jednotlivých termoregulačních mechanismů (viz Obr. 5) [39], [41].

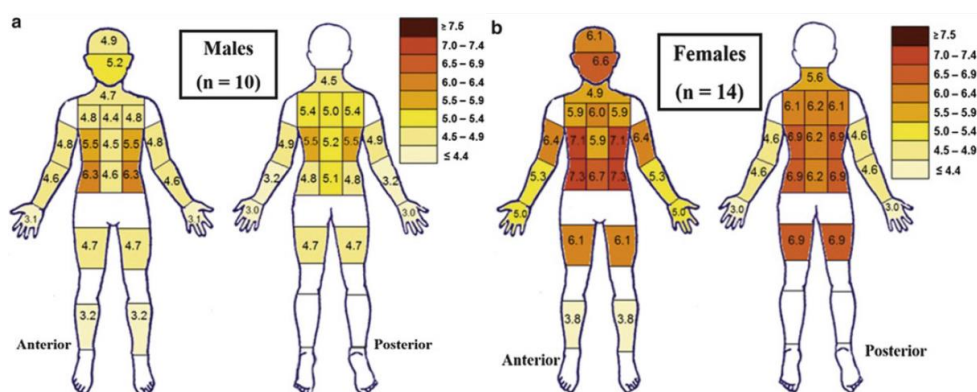


Obr. 5 – Schéma termoregulačního systému lidského těla s vyznačením hlavních prvků systému a signálních cest ovlivňujících podvědomé mechanismy a vědomé termoregulační chování člověka - převzato, upraveno a doplněno z [19], [62]. Zdroj [51] také uvádí, že dle nového konceptu funkce termoregulace mohou termoreceptory v pokožce přímo a lokálně řídit některé termoregulační procesy nezávisle na hypotalamu.

Termoreceptory lze rozdělit na tělíška chladu a tepla, což jsou volná nervová zakončení, která zvyšují či snižují svoji aktivitu (anglicky Firing rate) v závislosti na změně (nárůst/pokles) a absolutní hodnotě teploty tkáně, ve které jsou lokalizována. Hustota jejich rozmístění po celém těle je nepravidelná, přičemž počet tělíšek chladu je cca 10krát vyšší než počet tělíšek tepla [50]–[52]. Další důležitou skutečností je i fakt, že tělíška chladu v případě podráždění vykazují vyšší aktivitu a chladné stimuly tak vyvolávají vyšší odezvu termoregulačního systému [53]. Na chladné i teplé stimuly je citlivý především obličej, zadní část krku, hýždě a dále pak části těla, které obsahují životně důležité orgány např. bederní část zad a břicho. Naopak nejméně citlivé jsou horní část hrudníku, končetiny, ruce a chodidla, na kterých je běžná velká variabilita povrchových teplot v důsledku termoregulace [50], [54], [55].

Statisticky významné rozdíly byly pozorovány u citlivosti na tepelné stimuly mezi pohlavími (viz Obr. 6), kdy na všech sledovaných částech těla byly citlivější ženy než muži a to jak pro chladné (15 a 20 °C), tak pro teplé (40 °C) stimuly [54], [56]. Citlivost mírně klesá s rostoucí metabolickou produkcí tepla/fyzickou zátěží, ale rozložení po povrchu těla zůstává stejné [57]. Ve studii [50] 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. Rozdíly byly také pozorovány mezi etnickými skupinami, kdy nejméně citliví na chlad byly muži z Británie, naopak vyšší citlivost vykazovali muži původem z Číny a Nigérie

[54], [58], [59]. Pro tyto rozdíly jsou zmiňována různá vysvětlení od prostého faktu, že podstatný vliv má přirozené ochlupení kůže, které je vyšší u mužů než u žen a u Evropanů než u Asiatů či Afričanů [54], až po dílčím přizpůsobení jednotlivých etnik podnebí v místě jejich původu. Například původní obyvatelé území Ohňové země v Jižní Americe z kmenů Alakaluf, Selknam a Jaghan byly schopni běžně odolávat teplotám pod bodem mrazu i při využití jen minimálně chránícího oděvu [60]. Dalším příkladem je schopnost Polynéských národů odolávat chladnému a vlhkému prostředí, kterému byly vystaveny při osídlování ostrovů v Tichomoří. Tato schopnost je přisuzována menšímu počtu termoreceptorů a jejich propojení s hypotalamem, na kterou se usuzuje v důsledku menší příčné plochy otvorů v lebce pro vstup senzoričtých kranálních nervů [61].



Obr. 6 – Citlivost jednotlivých částí těla na chladný stimul (dotyk sondy o povrchové teplotě 20 °C) pro a) muže a b) ženy při aktivitě odpovídající klidnému sezení. Je patrná signifikantně vyšší citlivost na všech částech těla u žen. Přejato a upraveno z [54].

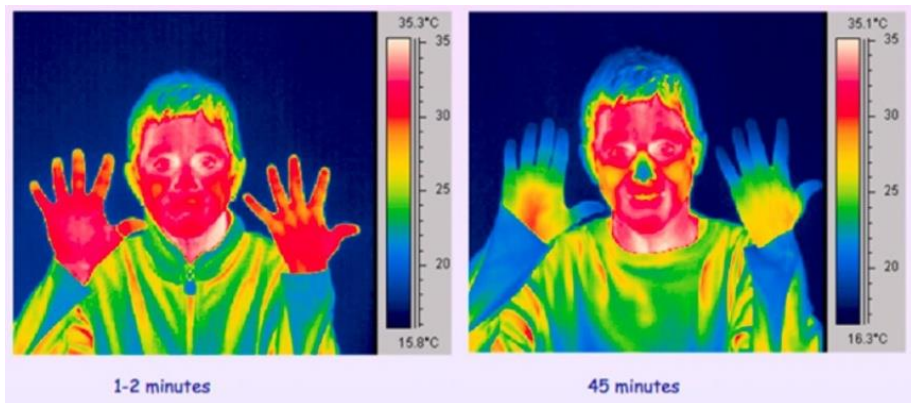
Systém termoregulace je tvořen několika funkčními celky, jejichž schéma a propojení je zobrazeno na Obr. 5. Tyto celky lze dále rozdělit do dvou základních skupin, které obsahují termoregulační mechanismy samotného těla (podvědomá termoregulace řízená hypotalamem) a vědomé termoregulační mechanismy jinak také označované jako termoregulační chování [62]. Do této skupiny patří především užití oděvu, které je nejúčinnějším mechanismem pro regulaci přenosu tepla z těla (oblékání - podrobněji viz kapitola 3.2) dále pak změna pozice těla např. schoulení se, ukrytí se v závětrí apod. či vědomý pohyb pro produkci tepla tzv. „zahřátí se pohybem“.

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 [43]. Tyto mechanismy lze rozdělit do dvou základních skupin:

Mechanismy pro úpravu přenosu tepla z těla do okolí

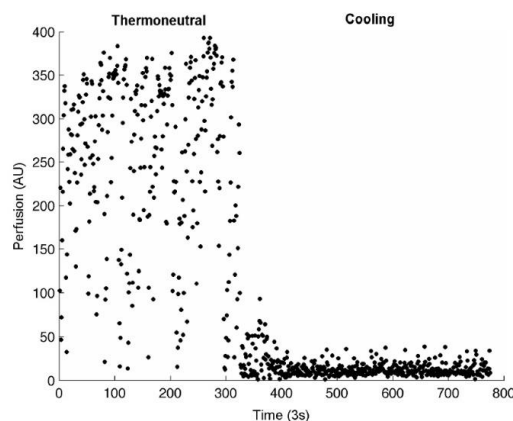
Vasomotrika cév - lze ji rozdělit na Vasodilataci což je akce, při které se rozšíří příčný průřez cév a umožní se větší průtok krve pokožkou a okrajovými částmi těla [53]. Zvýšeným prokrvováním pokožky, se celkově zvýší teplota povrchu těla a tepelný tok odcházející do okolí, čehož výsledkem je snížení tělesné teploty. Jejím opakem je Vasokonstrikce, při které se zúží příčný průřez cév a tím se sníží průtok krve pokožkou a končetinami, čímž se sníží tepelné ztráty z těla do okolí (viz Obr. 7). Lidský organismus se tak brání podchlazení životně důležitých vnitřních částí těla na úkor těch okrajových, což může být v extrémním případě i příčinou

vzniku omrzlin na okrajových částech těla (konečky prstů, apod.). Celý mechanismus vasokonstrikce a jeho regulační proces je však ještě složitější a paradoxně v některých případech, a na některých částech těla (hlavně prstech) může dojít i k vasodilataci vyvolané chladem [63] (Cold-induced vasodilatation). V obou případech se pravděpodobně jedná o vlastnosti získané v důsledku adaptace na životní prostředí předků moderního člověka, kdy omrznutí periferních částí těla za cenu zachování funkce životně důležitých vnitřních orgánů byla adaptace, která podstatně snižovala riziko smrti člověka v důsledku akutní hypotermie [63], [64] nicméně i tak je termoregulační systém nastaven tak, aby minimalizoval možnost poškození končetin příliš nízkou teplotou.



Obr. 7 – Termogram mladého člověka před a po vystavení působení chladu v místnosti s teplotou 14.5 °C. Na obrázku vpravo je patrný efekt vazokonstrikce na povrchovou teplotu konců prstů a obličeje. Převzato z [65].

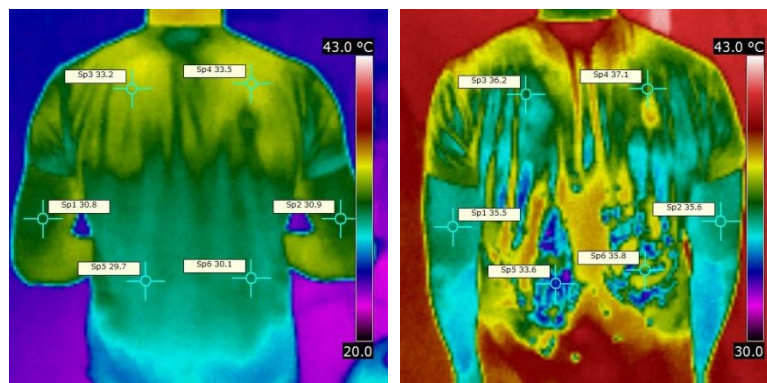
Pokud se však člověk nachází v termoneutrálních podmínkách, osciluje prokrvení pokožky mezi hodnotami pro vasokonstrikci a vasodilataci a to v závislosti na individuálním nastavení každého jedince a jeho regulačních prahů. Tyto oscilace jsou normálním stavem, člověk je nijak nepocítuje a nezpůsobují žádné rušivé či nepříjemné vjemy [7] (viz. Obr. 8).



Obr. 8 – Záznam prokrvení pokožky na dlaních testovaných osob. V tepelně neutrálních podmínkách prokrvení fluktuuje mezi hodnotami pro vasokonstrikci a vasodilataci, což je běžný stav. V chladných podmínkách (po čase 300 s) jednoznačně dominuje vasokonstrikce. Převzato a upraveno z [7].

Pocení - Pokud teplota okolí přesáhne povrchovou teplotu člověka, zůstává jediným termoregulačním mechanismem pocení, což je proces, kdy se na pokožce vylučuje pot (převážně voda obsahující ionty Na⁺, K⁺ a Cl⁻, ale i kyselinu mléčnou a močovinu. V extrémním

horku může vznikat více než cca 1000 ml potu za hodinu [66], [67] u trénovaných atletů i více než 2000 ml za hodinu [39]). Voda se v horkém prostředí odpařuje a tím dochází k přenosu hmoty a tepla z pokožky do okolí (viz Obr. 9) [68], [69]. Tento mechanismus odvodu tepla je velmi intenzivní, ale jeho funkčnost je závislá na míře nasycení okolního vzduchu vodní parou. V prostředích s parciálním tlakem vodní páry vyšším než 6 kPa (teplota rosného bodu 36 °C) není přítomný dostatečný koncentrační gradient v relaci povrch zpocené pokožky/okolí a odpařování potu a odvod tepla je tak prakticky neúčinný [20], [70], [71].



Obr. 9 – Efekt pocení na povrchovou teplotu člověka – IR snímek dobrovolníka v testu horkých podmínek před začátkem testu (teplota prostředí 25.1 °C) a po testu (teplota prostředí 40 °C), kdy jsou oděv na zádech i pokožka rukou zvlhčeny potem = nižší povrchová teplota než okolí. Zdroj archiv autora.

Mechanismy pro úpravu produkce tepla v těle

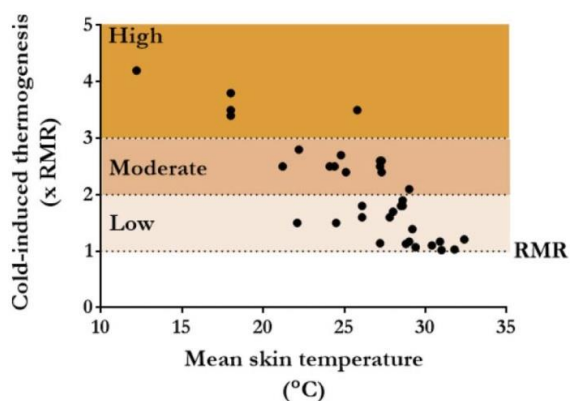
Chemická termogeneze - je-li přenos tepla z lidského organismu do okolí mírně vyšší než produkce, tzn. působí-li na tělo mírný chlad (pro zdravého, hubeného člověka s lehkým oděvem ve vnitřním prostředí cca teplota vzduchu v rozsahu 14 až 19 °C [72]), dochází nejprve k tvorbě tepla chemickou cestou a to zvýšením rychlosti metabolických přeměn [73], [74]. Tento mechanismus se anglicky nazývá Non-shivering thermogenesis a je schopen zvýšit metabolickou produkci tepla maximálně o 30 až 40 % oproti produkci v termoneutrálních podmínkách [75]. Zdrojem energie pro tyto termoregulační zásahy je především tzv. hnědý tuk, který se nachází v oblasti krku, okolo páteře, v oblasti ledvin a v podkoží na zádech [76] (viz Obr. 10). Nejvyšší podíl hnědého tuku mají nově narozené děti a kojenci (až 5 % tělesné váhy) [74], neboť tyto zásoby energie jsou nutné jako prevence hypotermie. Ta kojencům hrozí především z důvodů, že v prvních hodinách a dnech života se musí rychle adaptovat na podstatně chladnější prostředí mimo dělohu (v děloze je prakticky stálá teplota blízká tělesné teplotě matky), nemohou využít termoregulačního chování (změna oblečení, přechod do jiného prostředí atd.), mají podstatně větší poměr povrchu těla k objemu a váze než dospělí, mají větší poměr nezakrytých a zakrytých částí těla (hlavně v oblasti hlavy a krku) a ještě nemají zcela vyvinutý mechanismus generování tepla svalovým třesem [77], [78]. U dospělých jedinců je tvorba hnědého tuku spojená především s častým pobytem v chladném až velmi chladném prostředí [79], nebo s opakovaným vystavováním těla intenzivním chladným stimulům [72], [80] (viz Obr. 10). Vyvážený poměr hnědého a bílého tuku je důležitý pro správnou funkci termoregulace a jak naznačují práce [73], [74], [81]–[83] tak i pro celkovou správnou funkčnost a vyváženost metabolismu. Pro vyrovnaný poměr zásob energie je nezbytné, aby byly

přiměřeně zapojovány termoregulační mechanismy a aby lidské tělo nebylo neustále udržováno v termoneutrálních podmínkách [72], [73], [83], [84].



Obr. 10 – Změna množství a aktivity hnědého tuku u dospělého jedince mužského pohlaví před (PRE) a po (POST) opakovaných expozicích těla chladnému prostředí - (tzv. Cold acclimation). Převzato a upraveno z [80].

Svalový třes - pokud mechanismus chemické termogeneze není schopen vyrovnat zvýšený přenos tepla z těla do okolí a nastane pokles tělesné teploty, je aktivován mechanismus stavového třesu (Anglicky: Shivering thermogenesis). Ten obecně vyvolává zvýšené svalové napětí, přecházející až ve svalové kontrakce, čímž dochází ke generování dodatečného metabolického tepla. Maximální zvýšení produkce tepla je cca 5ti násobné ve srovnání s termoneutrálními podmínkami a nastává v případě, že tělesná teplota klesne k hodnotě kolem 35 °C (začátek stavu těžké hypotermie) [85]. Pokud však není odstraněna příčina nadměrného přenosu tepla z těla a tělesná teplota dále klesá, intenzita svalového třesu se snižuje a pod tělesnou teplotou 33 °C nastává stav akutní hypotermie. Pokud tělesná teplota klesne pod 31 °C, není mechanismus svalového třesu schopen vykompenzovat tepelnou ztrátu těla a pokud není tělesná teplota zvýšena externím zdrojem tepla, vede tento stav k smrti v důsledku akutní hypotermie.



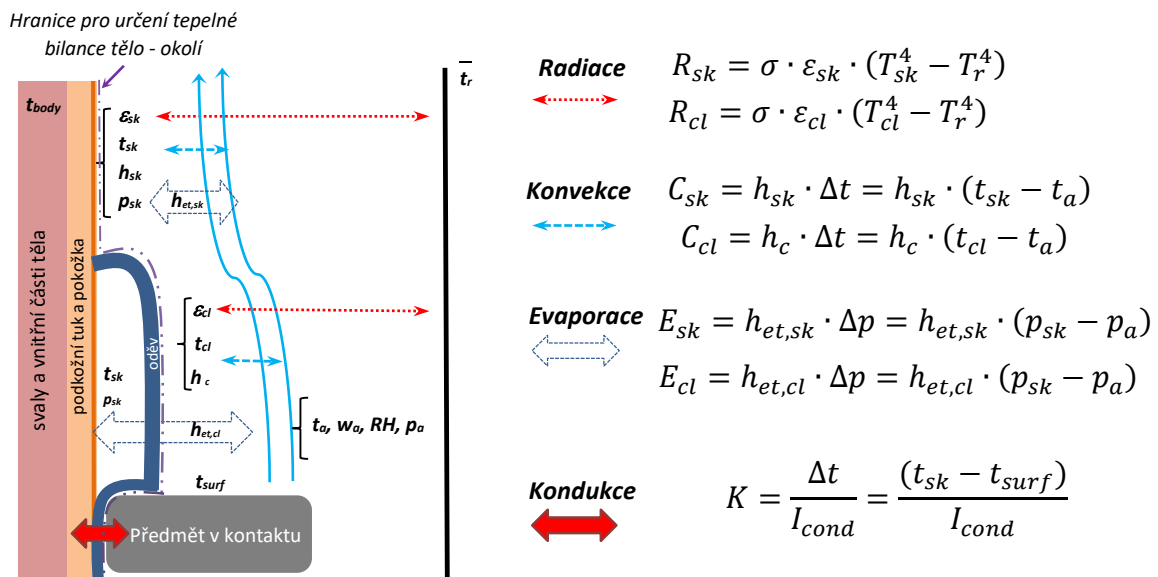
Obr. 11 – Zvýšení metabolické produkce tepla v důsledku svalového třesu v závislosti na střední povrchové teplotě pokožky. Body představují povrchové teploty kůže na konci experimentů v různých studiích zabývajících se reakcemi těla na chladné prostředí. Převzato a upraveno z [85].

Pro spuštění svalového třesu je hlavním řídicím signálem povrchová teplota pokožky [86] a sekundárním signálem je tělesná teplota, neboť významný pokles teploty pokožky indikuje intenzivní přenos tepla z těla ještě před tím, než nastane pokles tělesné teploty [87]. Jak je ale patrné z Obr. 11 je prahová teplota pro spuštění tohoto mechanismu a jeho intenzita velmi individuální a je silně ovlivněna dispozicemi každého jedince, jeho aklimatizací na chlad a nastavení termoregulačního systému.

2.3 Tepelná bilance lidského těla – veličiny a parametry pro popis

Hlavní, nikoliv však postačující, podmínkou pro tepelný komfort je dosažení tepelné rovnováhy mezi produkcí tepla v těle a přenosem tepla do okolí dle rovnice 2.1. V předešlé kapitole byly popsány hlavní mechanismy a systémy, které jsou zapojeny do produkce a přenosu tepla v těle a také byl popsán jejich efekt na fenomény zajišťující přenos z těla do okolí. Nyní budou blíže popsány jednotlivé veličiny a parametry, které definují intenzitu/efektivitu jednotlivých typů přenosu tepla mezi tělem a okolím a používají se tak pro popis tepelné bilance mezi lidským tělem a okolním prostředím.

Pro vyjádření tepelné bilance lidského těla je nezbytné stanovit si nejprve hranici, na které bude bilance uvažována. V případě částí lidského těla bez oděvu (typicky obličej, dlaně, předloktí) je takovou hranicí povrch pokožky. Speciálním případem jsou neoblečené části těla s přirozeným porostem vlasů (na hlavě), vousy (na obličejí), či místa s hustším a výraznějším ochlupením kůže např. na předloktí. Protože se však tyto znaky mohou velice lišit mezi jednotlivci (ochlupení spíše více u mužů), pohlavími (vousy prakticky pouze u mužů) má smysl obecněji uvažovat pouze vliv vlasů, které má většina jedinců a které mají vliv na přenos tepla z hlavy, čili na hlavě a temeni hlavy je touto hranicí povrch vlasů. U oblečených částí těla je pak hranicí povrch oděvu (viz Obr. 12). Jednu stranu bilanční plochy tak definují veličiny popisující tepelný stav povrchu těla, druhou stranu pak veličiny popisující tepelný stav okolí. Pokud hranici tvoří oděv, je nutné do charakteristiky hranice zahrnout parametry popisující jeho tepelně technické vlastnosti, a to jak materiálů + celé konstrukce oděvu, tak i vlastnosti povrchové. Podobně u hlavy pokryté vlasy je nezbytné zahrnout vlastnosti vlasů.



Obr. 12 – Hranice pro určení tepelné bilance tělo vs. okolní prostředí s vyznačením základních parametrů pro výpočet intenzity jednotlivých způsobů přenosu tepla. Jsou uvedeny pouze základní výpočetní vztahy a není zahrnuta tepelná ztráta dýcháním C_{res} , E_{res} a akumulční členy S .

Protože dva základní typy povrchů na lidském těle jsou plochy bez oděvu a s oděvem, jsou i základní vztahy pro přenos tepla (Obr. 12) rozděleny na tyto dva typy. Dále je potřeba brát v úvahu, že mohou nastat okrajové podmínky, kdy na jedné straně hranice je přímo povrch kůže a na druhé straně okolní prostředí, oděv kryjící povrch pokožky nebo povrch, který

je v kontaktu s oděvem či přímo povrchem lidského těla. Jednotlivé parametry na povrchu těla i na druhé straně hranice se tedy mohou zásadně měnit vzhledem k poloze na těle či vlastnostem okolí. Je tedy nezbytné mít na paměti, že dané parametry jsou silně závislé na lokalizaci na povrchu těla a souhrnné parametry platné pro celé tělo lze použít jen u specifických případů za statických podmínek těla a při homogenních podmínkách okolního prostředí [88], [89]. V opačném případě je potřeba rozlišovat parametry podle lokalizace, na základě podobnosti okrajových podmínek (např. kůže bez oděvu, kůže pod oděvem, kůže v kontaktu se sedačkou atd.) Tepelný tok ve většině případů směřuje z těla do okolí, jen v některých specifických případech je teplo transportováno z okolí do těla (např. přenos tepla do těla z vyhřívané sedačky, přenos tepla zářením na povrch pokožky atd.) a znaménková konvence je: + kladná, pro přenos tepla z těla do okolí; – záporná, pro přenos tepla z okolí do těla. Parametry pro povrch pokožky jsou označeny indexem s_k , pro povrch oděvu indexem cl , pro okolní vzduch indexem a , a pro povrchy v kontaktu s tělem indexem $surf$.

Vztahy pro výpočet jednotlivých způsobů přenosu tepla jsou vyjádřeny v základní zjednodušené formě, která vychází z definice pomocí základních a explicitně vyjádřených diferencí hlavních veličin (ΔT , Δt , Δp), které jsou „hlavní hnací silou“ pro přenos tepla danými transportními fenomény. U tohoto vyjádření je však, jak říká klasik „dábel ukryt v detailu“, neboť prakticky všechny součinitele určující intenzitu přenosu (ε , h , R_{surf}) je nezbytné pro každý daný případ či konfiguraci určit měřením či velice komplexním podobnostním výpočtem pomocí kritériálních rovnic [90]. I přímé měření veličin jako povrchová teplota těla je často velmi obtížné a v mnoha případech i technicky nemožné. Proto se často realizují měření jiných snadněji měřitelných veličin, jejichž výsledky lze pak převést na danou veličinu a tak určit intenzitu daného způsobu přenosu tepla (typicky určení metabolické produkce M a následný přepočtení na danou veličinu na povrchu lidského těla či oděvu). Následující výčet uvádí bližší popis jednotlivých veličin a jejich vztah k definici a hranici bilance. Bližší popis postupů měření nebo jejich určení z nepřímých veličin viz kapitola 4.

Stav okolního prostředí:

- t_a [°C] – teplota vzduchu, základní stavová veličina, měří se přímo.
- \bar{t}_r [°C] – střední radiační teplota okolí, měří se přímo.
- p_a [Pa] – parciální tlak vodní páry v okolním vzduchu. Určuje se výpočtem z přímo měřených hodnot relativní vlhkosti RH a teploty vzduchu t_a .
- t_{surf} [°C] – povrchová teplota, určuje se měřením teploty povrchu.

Stav povrchu lidského těla:

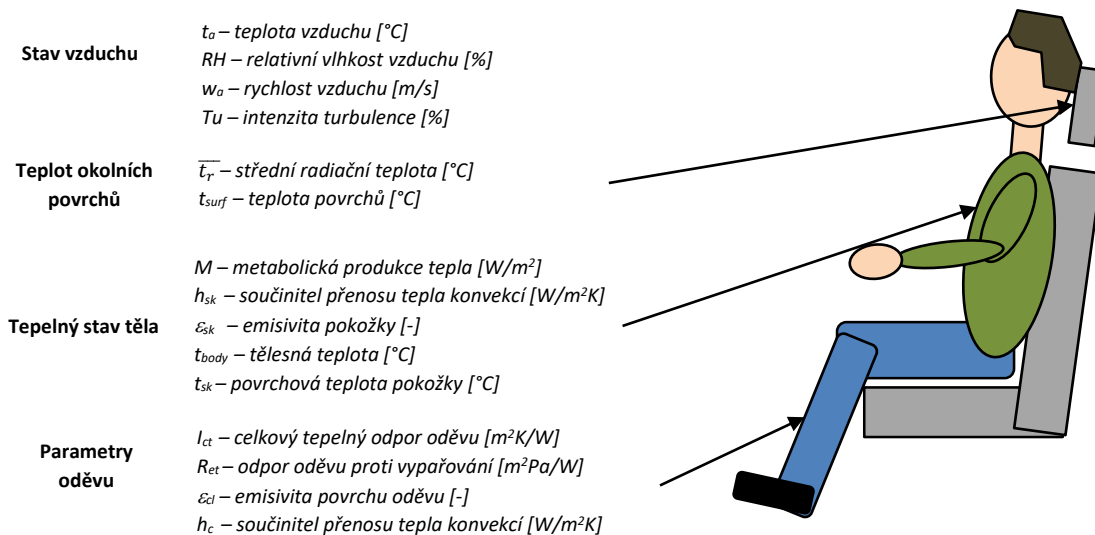
- t_{sk} [°C] – povrchová teplota pokožky – je možné měřit ji přímo (IR kamera, dotykové senzory), ale právě tato měření jsou mimo laboratoř velmi obtížná. Jsou tedy definovány postupy, jak t_{sk} určit nepřímo na základě metabolické produkce M , vlastností oděvu I_{ct} , R_{et} a stavu okolního prostředí (viz kapitola 5.2).
- t_{cl} [°C] – povrchová teplota oděvu – přímo lze určit pouze pomocí IR kamery a následného výpočtu průměrné teploty na daném segmentu oděvu. Výpočtově ji lze určit přibližně z t_{sk} a tepelných vlastností oděvu I_{ct} , R_{et} a tepelného stavu okolního prostředí.

- p_{sk} [Pa] – parciální tlak vodní páry v blízkosti pokožky, určuje se výpočtem z přímo měřených hodnot relativní vlhkosti vzduchu RH a teploty pokožky t_{sk} .

Parametry přenosových fenoménů:

- $\varepsilon_{sk}, \varepsilon_{cl}$ [-] – emisivita povrchu pokožky a povrchu oděvu. Určuje se přímým měřením.
- h_{sk}, h_c [W/m^2K] – součinitel přenosu tepla konvekcí na pokožce, oděvu – lze měřit přímo pomocí alfametru, nebo některým ze speciálních postupů [91], [92].
- $h_{et,sk}$ a $h_{et,cl}$ [W/m^2Pa] – součinitel přenosu tepla vypařováním na pokožce, oděvu – určují se pomocí Lewisova kritéria z h_{sk} a h_c [20] nebo pomocí měření na manekýnovi.
- l_{cond} [m^2K/W] – tepelný odpor kontaktu mezi povrchem pokožky a okolním povrchem. Lze určit měřením.

Pro popis tepelné bilance mezi lidským tělem a okolním prostředím se používají veličiny a parametry uvedené na Obr. 13 (bližší popis významu a postupů měření viz kapitola 4). Některé z veličin lze řídit technickými prostředky pro HVAC ve vnitřních prostředích. Jiné se spíše vztahují k parametrům materiálů, konstrukci oděvů či osobním charakteristikám člověka.



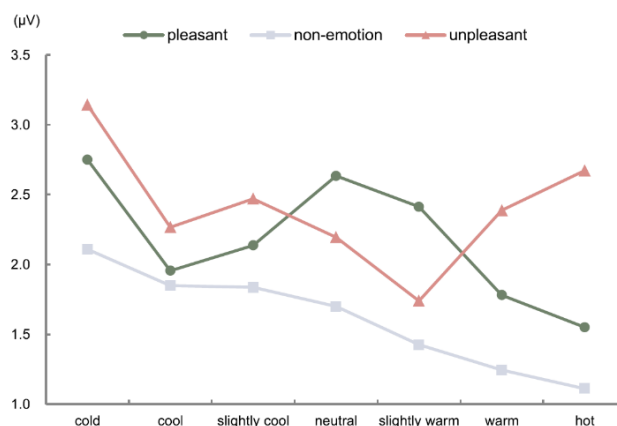
Obr. 13 – Výčet základních veličin a parametrů pro popis tepelné bilance mezi lidským tělem a okolním prostředím. Pro popis konkrétních situací se obvykle používá vhodná kombinace veličin a parametrů, přičemž zástupci z jednotlivých skupin se mohou v jednotlivých přenosových fenoménech prolínat a doplňovat.

Pokud tedy HVAC systémy mají zabezpečit optimální prostředí pro zajištění tepelné rovnováhy mezi tělem a okolím, musí být schopné zabezpečit řízení a kontrolu parametrů prostředí jako je teplota vzduchu t_a , rychlost proudění vzduchu w_a a z nich plynoucí charakteristicky proudění pro přenos tepla konvekcí, vlhkost vzduchu RH ovlivňující přenos tepla vypařováním a teplotu okolních povrchů určujících t_r ovlivňující přenos tepla radiací a t_{surf} kondukcí. Použití oděvu a modifikací jeho vlastností (více či méně vrstev, materiál) a pokrytí jednotlivých částí těla (termoregulační chování) pak umožňuje regulovat intenzitu přenosu tepla konvekcí, radiací a vypařováním na daných částech těla (viz kapitola 3.2.3).

2.4 Psychologické a kulturní aspekty

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 [93]. Často se tedy můžeme setkat ze situací, že v prostředí, které by na základě tepelné bilančního objektivního hodnocení mělo být komfortní, se vyskytuje jisté procento jedinců, kterým daný stav nevyhovuje a způsobuje jim tepelný diskomfort [94], [95] (viz Obr. 144, kde je cca 5-10 % nespokojených při $PMV = 0$.) Tento stav je způsoben různorodostí lidí a jejich odlišným nastavením v oblastech psychiky a kultury, kde mohou hrát roli tyto faktory:

- Povaha, nálada, emoce, alliestézie** – existují různé systémy pro klasifikace lidských charakterů a temperamentů. Jedním z možných dělení temperamentů je klasické schéma choleric, melancholik, sangvinik a flegmatik, popřípadě složitější kvalifikace například pomocí MBTI metody, Jungovy typologie či typologie dle Ernsta Kretschmera [96], [97]. Projevem dané povahy je pak různé prožívání emocí, na jejichž základě a na základě dalších událostí a prožitků vznikají tzv. nálady. Náladu je tedy „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“ [98], [99]. Míra ovlivnění vnímání emocí na základě subjektivního vnímání tepelného stavu prostředí byla vyšetřována ve studii [100]. Výsledky naznačují, že objektivní tepelný stav prostředí nemá přímý vliv na emoce, ale zpracování emocí je závislé na subjektivním tepelném pocitu pokusné osoby (viz Obr. 14). 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 velmi málo neboť se jedná o zcela novou oblast využívající například metody EEG (Elektroencefalografie mozku) pro objektivní určení emocí.

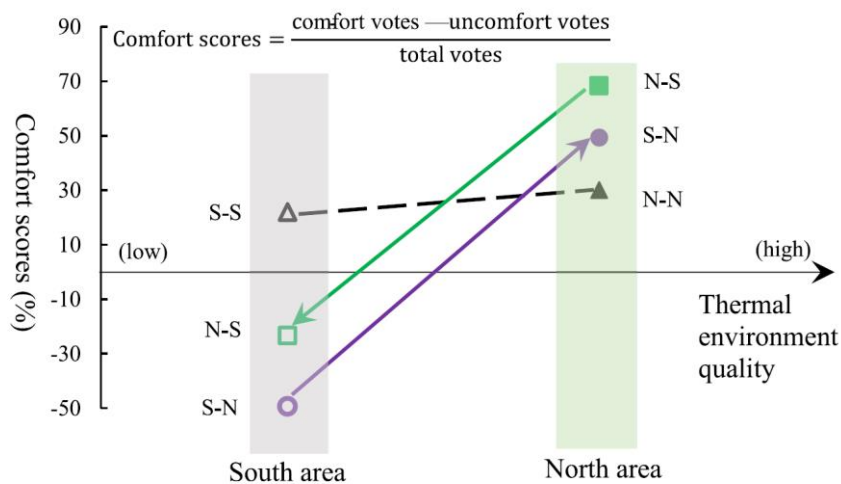


Obr. 14 – Míra odezvy emočních stimulů v závislosti na pociťovaném tepelném stavu prostředí. Pozitivní/příjemné emoční stimuly (pleasant) vyvolávaly nevyšší odezvu (EEG signál, osa y) v případě, že pokusné osoby hodnotily prostředí jako neutrální či mírně teplé. V ostatních případech měly negativní/nepříjemné emoční stimuly (unpleasant) vyšší odezvu než pozitivní. Nejnižší odezvu měly stimuly emočně neutrální (non-emotion). Převzato z [100].

Dosud získané poznatky však naznačují, že přímý vliv tepelného stavu prostředí na náladu/emoce je málo průkazný, a naopak, že individuální vnímání a hodnocení tepelného stavu prostředí (tepelný pocit) může být ovlivněno prožívanou emocí a náladou (negativní emoce/nálada = horší hodnocení tepelného stavu prostředí a obráceně). 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 [101]. V oblasti nálad a vnímání tepelného stavu prostředí je také definován pojem „Thermal boredom“ [102], 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 [30], [103], avšak pro lidské tělo je absence jakýchkoliv změn a podnětů nepřírodným 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 (viz kap. 2.1). To však platí pouze za předpokladu, že osoby mohou využít termoregulačního chování (např. přizpůsobení oděvu) a adaptaci na změnu podmínek v průběhu dne/sezóny [102], [104].

- **Zdravotní stav a věk** – zdravotní stav přímo ovlivňuje psychiku a náladu, neboť nemoc či zranění je samo o sobě stav, který není pro tělo normálním stavem. Samostatnou kapitolou jsou pak chronická onemocnění, která nemají akutní projevy, ale celkově ovlivňují termofyziologii člověka (kardiovaskulární choroby, poruchy metabolismu, poruchy termoregulace, cukrovka atd.). Zásadní vliv na celkové zdraví člověka má věk, v jehož důsledku se snižuje pružnost a rozsah termoregulačních mechanismů [105], [106], posouvá se vnímání tepelného stavu prostředí a také hodnocení tepelného komfortu [107]. U osob starších 60 let je hlavní změnou snížení rozsahu termoregulačního systému, což sebou nese nebezpečí v podobě snazšího vzniku hypo/hypertermie v případě vyšší zátěže či extrémů počasí například v podobě vlny veder [104], [108].
- **Osobní návyky, preference, očekávání** – hrají ve vnímání komfortu neopomenutelnou roli, protože určují, na co jsou jednotliví lidé zvyklí a co očekávají. Například preference nižší teploty v ložnici pro kvalitní spánek, tma, ticho atd. Nenaplnění těchto očekávání a preferencí pak může negativně ovlivnit hodnocení celkové kvality prostředí a tím i komfortu [17], [109]. Jedná se však o velmi individuální záležitost, kterou lze jen velmi těžko kvalifikovat. V souvislosti s návyky a preferencemi v oblasti tepelného komfortu se také můžeme setkat s aplikací ekonomického pojmu „majetnický efekt“ [110], který lze volně interpretovat jako skutečnost, že „lidé jsou obecně citlivější na ztrátu než na zisk o stejné velikosti“. Studii tohoto efektu v případě vnitřního prostředí v obytných budovách v Číně byla věnována studie [111]. Výsledky studie poukázaly na skutečnost, že změny preferencí obyvatel k vyšším očekáváním jsou snadnější než obrácený postup, kdy je třeba očekávání snížit. Respondenti studie, kteří se přestěhovali z budov bez vytápění (jižní Čína, v zimě často nízké teploty v interiéru) do budov s vytápěním (severní Čína, možnost regulace) hodnotili prostředí lépe než ti co byli na tento standard zvyklí (viz Obr.

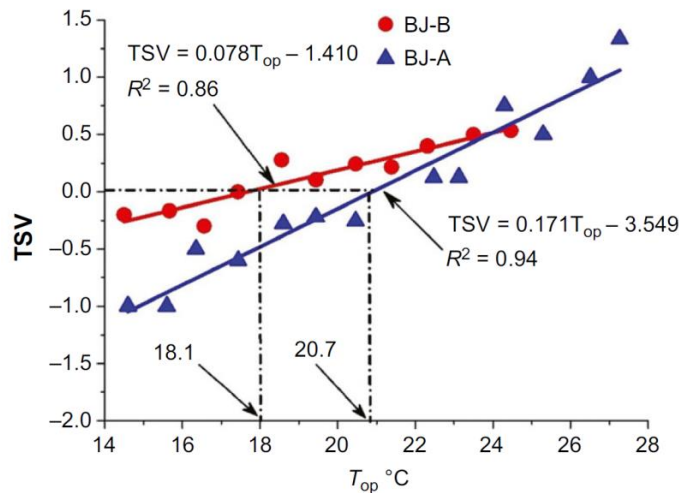
15). Pokud se však tato skupina (S-N) vrátila zpět do svého původního prostředí na jihu Číny, hodnotila prostředí v budovách jako více diskomfortní než obyvatelé, kteří na jihu žijí celý život a jsou zvyklí na nízké teploty (mají nižší očekávání/nároky na kvalitu prostředí). Lidé, kteří se z domů bez vytápění (jižní Čína) přestěhovali do „lepších“ domů s vytápěním (severní Čína) si na kvalitnější prostředí snadno zvykli a po návratu bylo původní prostředí pocíťováno značně negativně, neboť respondenti přišli o „jistý“ díl komfortu (čili utrpěli jistou ztrátu). Projevil se tedy majetnický efekt a disproporce mezi očekáváním a skutečností. Tento efekt lze celkem přesně vystihnout rčením, že „na lepší se zvyká lépe“ s dovětkem, že „obráceně to jde většinou jen ztuha“.



Obr. 15 – Osoby, které zůstávají v prostředí, které znají a očekávají, vykazují prakticky stejné hodnocení komfortu (přerušovaná čára spojující body S-S a N-N) ačkoliv prostředí, kterým jsou vystaveny, jsou rozdílná. Pokud se však osoby z „méně kvalitního“ prostředí přestěhují a zvyknou si na „kvalitnější prostředí“ (S-N) hodnotí návrat do „méně kvalitního“ prostředí negativně (S-N v šedém poli) než osoby, které se přestěhovali opačným směrem (N-S). Hodnocení obou skupin (N-S i S-N) po návratu do „kvalitnějšího prostředí“ zelené pole, je pak vyšší než průměr u obou skupin (S-S, N-N), neboť návrat do prostředí splňujícího očekávání je hodnocen „velmi pozitivně“. Převzato ze [111].

- **Regionální zvyklosti** – zvláště ve vyspělých a bohatých zemích situovaných v pouštním či tropickém klimatu například obecně země Perského zálivu, Hong Kong, Singapur, Brunej, Malajsie, Austrálie atd. je často praktikována praxe popsána anglickým „Summer outside, Winter inside“ [103], [112]. Experimentálně je ověřeno, že toto „přechlazování“ vnitřního prostředí nevede ke zlepšení pracovního výkonu či komfortu prostředí, ačkoliv je právě tento argument často užíván při odůvodnění takto nízkých teplot ve vnitřním prostředí kancelářských budov [113] (viz také kap. 5.2.4). Jedná se tedy spíše o jistý kulturní zvyk, kliše či spíše zlozvyk, který nemá prakticky žádný racionální základ. Někdy bývá i důsledkem jistých předsudků či špatné informovanosti, jaká teplota je optimální pro dané období, vnitřní prostředí a vykonávanou činnost. Často se lze také setkat s přístupem, který lze popsat jako „čím více, tím lépe“ (hodně chladit na nízkou teplotu/ vytápět na vysokou teplotu), což jak je obecně známo není vždy cesta vedoucí ke kýženému výsledku. Podrobněji viz kapitola 2.6.

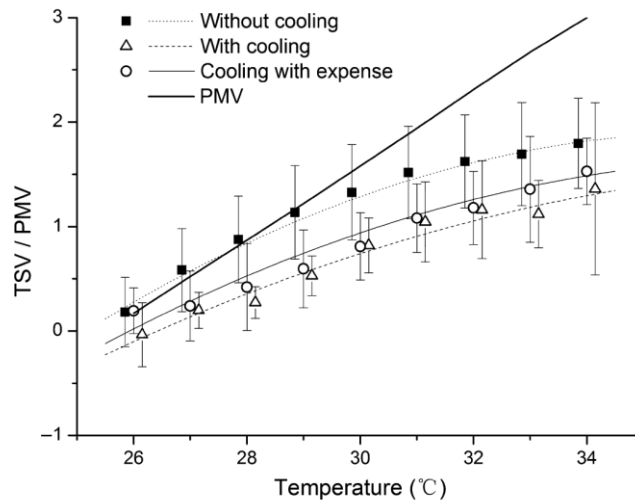
- **Kontrola nad prostředím** – pokud je uživatelům umožněno kontrolovat nastavení vnitřního prostředí, obecně je poté dosaženo větší spokojenosti s kvalitou prostředí [114]–[116]. Navíc pokud mohou lidé regulací prostředí ovlivnit energetickou spotřebu a tím i finanční náročnost vytápění/chlazení je dle [93] 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 [117] (viz Obr. 16).



Obr. 16 - 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 [112].

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 [118]. 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. 17).

- **Estetika a ergonomie prostředí** – celkový komfort ve vnitřním prostředí je utvářen také vzhledem a ergonomií celého prostoru [119]. Jak uvádí například studie [120], [121] na celkový komfort prostředí ve školních učebnách má vliv nejen tepelný stav vnitřního prostředí, ale také faktory jako osvětlení, akustika, vzhled a ergonomie celého prostoru a vybavení/nábytku. Pro vytvoření celkového komfortu ve vnitřním prostředí je tedy nezbytné zajistit jistý standard a kvalitu vzhledu/estetiky prostoru. Standard vzhledu je však ovlivněn rozvinutostí a kulturními zvyky dané společnosti. To co je v jedné zemi považováno za nadstandardní vybavení, může být v jiné považováno za úplný základ (např. koupelna s tekoucí teplou vodou), takže toto kritérium je potřeba brát v potaz, ale jeho nastavení je silně závislé na kontextu místa, kde jej aplikujeme (např. Evropa vs. rozvojové země) [114].



Obr. 17 - 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 [118].

- **Oděvní zvyklosti** – Oděvy pro muže a ženy se liší jak střihem, tak materiály prakticky ve všech kulturách [122]. Kultura, náboženství a také požadavky některých společenských rolí či zaměstnání (armáda, lékaři, sestry, úředníci, příslušníci církve) pak často vymezují, jaký typ oděvu je pro určitou situaci nezbytné použít. Jelikož je však užití oděvu a možnost změny jeho skladby základem pro účinné termoregulační chování, jsou právě některé omezení plynoucí z oděvních zvyklostí příčinou vzniku tepelného diskomfortu [13], [14]. Blíže viz kapitola 3.2.1.

2.5 Kvantifikace vnímání a hodnocení tepelného stavu prostředí

Člověk nevnímá a nehodnotí tepelný stav prostředí a jeho efektů na tělo dle hodnot fyzikálních veličin (např. teplota vzduchu, tělesná teplota), ale na základě zpracování senzoryckých a termofyziologických signálů podvědomými funkcemi mozku. Výsledkem toho zpracování jsou pocity (Obr. 5), které následně zpracovávají vyšší mozkové funkce a z jejich výsledku pak plyne hodnocení příjemnosti/nepříjemnosti daného tepelného stavu okolí a jeho účinků na tělo. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, tento kognitivní proces je u každého jedince ovlivněn celou řadou individuálních faktorů a konečné hodnocení stejného prostředí je složitý a vysoce individuální proces. Pro porovnání a celkové hodnocení vnímaného tepelného stavu prostředí a výsledného tepelného komfortu je nezbytné kvantifikovat a vyjádřit tato vysoce subjektivní vnímání a hodnocení. Základem postupu je provedení kvantifikace jednotlivých veličin a vytvoření škál, které mají většinou číselné a slovní vyjádření hodnocených stupňů (viz Obr. 18). 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 subjektivní vnímání tepelného stavu těla a z něj vyplývajících pocitů (např. tepelný pocit) na určité škále je velmi složitý kognitivní proces vyžadující jisté úsilí, znalost postupu a trénink/praxi [94], [103].

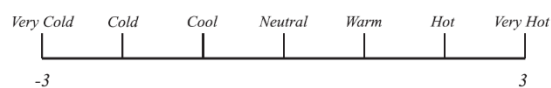


Obr. 18 - Vícebodová diskrétní škála s neutrálním bodem (a) a spojitá vizuální škála bez neutrálního bodu (b) pro hodnocení tepelného komfortu. Konstrukce, kvantifikace, orientace i slovní hodnocení jsou na škálách různá, ačkoliv jsou vytvořeny pro vyjádření hodnocení stejné veličiny. Převzato z [123].

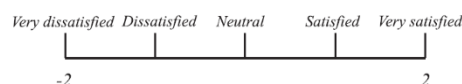
Kvantifikace je akt počítání a měření, který mapuje lidská smyslová pozorování a zkušenosti do kvantit/množství [124]. V oblasti hodnocení kvality prostředí se například setkáváme s kvantifikací pocitů a jejich intenzity v důsledku stavu těla (tepelný pocit), působení nějakého jevu v prostředí na lidské tělo (např. obtěžování průvanem), s kvantifikací hodnocení kvality, kterou pokusná osoba subjektivně pociťuje (tepelný komfort, světelný komfort), ale i s vyjádřením emocí, přání, očekávání a odhadů dle individuálních nastavení a preferencí dané pokusné osoby (například tzv. žádaná změna, vyjádření nálady, stresu atd). Škála, pomocí které pokusná osoba provádějí kvantifikaci jevů, by měla být zkonstruována tak, aby její konstrukce, orientace, číselné a slovní vyjádření odpovídalo obecným zvyklostem kultury, z které pokusná osoba pochází. V následujících bodech jsou uvedeny postupy, zkušenosti a doporučení plynoucí z dosavadní praxe autora.

- Konstrukce škály, symetrie, neutrální bod, lineárnost** – pro kvantifikaci a hodnocení jevů s různou intenzitou, které vyvolávají pozitivní i negativní pocity je vhodné užití symetrických škál se stejně velkou kladnou a zápornou částí. Součástí škály je střed škály nebo také neutrální bod, který odpovídá neutrálnímu hodnocení, kdy kvantifikovaný jev/vjem nevyvolává žádný konkrétní pocit (např. hodnocení tepelného pocitu, vlhkosti vzduchu Obr. 19 škály a) a b)). Jiné škály využívají pouze kladnou polovinu rozsahu a kvantifikují tak jev od stupně „neexistence efektu jevu na tělo“ až po „maximální míru efektu jevu na tělo“ (např. hodnocení obtěžování průvanem od „žádný průvan“ až po „intenzivní pocit průvanu“ Obr. 19 škála c)). Lineární škály se používají pro kvantifikaci jevů, jejichž účinek na lidské tělo a vyvolaný pocit je přímo úměrný a lineárně závislý na intenzitě jevu. Pro vyjádření nerovnoměrného vlivu jevu či limitnosti některých stavů (především okrajových částí škál) lze zvolit nelineární dělení škály. Volbou této mezní hodnoty s vyšším číselným hodnocením i ultimátním slovním vyjádřením pak může pokusná osoba kvantifikovat pocit či efekt jevu na tělo jako hraniční (např. *neakceptovatelně horko*). Naopak nelinearitou v centrálních částech škály lze podchytit situaci, že změna jevu má menší efekt na vyjadřované hodnocení. Je potřeba mít ale na paměti, že nelinearita škály má zásadní dopad na statistické metriky měření (průměr, rozptyl, směrodatná odchylka) a nelinearita v centrální části symetrické škály zásadně modifikuje citlivost hodnocení. Nevhodná konstrukce škály tedy může vést k nadhodnocení či potlačení subjektivních hodnocení zkoumaných jevů, proto pokud se jedná o výzkum v oblasti neextrémních prostředí a termofyziologických stavů je lepší volit vždy škály lineární.

- | | | | |
|--------------------|---------------------|-------------------------|---|
| ○ <i>Very Hot</i> | | | ○ <i>Very Satisfied</i> |
| ○ <i>Hot</i> | | | ○ <i>Satisfied</i> |
| ○ <i>Warm</i> | ○ <i>Very Humid</i> | | ○ <i>Slightly Satisfied</i> |
| ○ <i>Neutral</i> | ○ <i>Humid</i> | ○ <i>Strong Draught</i> | ○ <i>Neither Satisfied nor Dissatisfied</i> |
| ○ <i>Cool</i> | ○ <i>Neutral</i> | ○ <i>Draught</i> | ○ <i>Slightly Dissatisfied</i> |
| ○ <i>Cold</i> | ○ <i>Dry</i> | ○ <i>Weak Draught</i> | ○ <i>Dissatisfied</i> |
| ○ <i>Very Cold</i> | ○ <i>Very Dry</i> | ○ <i>No Draught</i> | ○ <i>Very Dissatisfied</i> |
| (a) | (b) | (c) | (d) |



(e)



(f)

Obr. 19 – Různě zkonstruované škály pro hodnocení: (a) 7-bodová diskrétní škála pro tepelný pocit, (b) 5-bodová diskrétní škála pro vnímání vlhkosti prostředí, (c) 4-bodová diskrétní škála pro obtěžování průvanem, (d) 7-bodová diskrétní škála pro tepelný komfort, (e) 7-bodová spojitá škála pro tepelný pocit, (f) 5-bodová spojitá škála pro tepelný komfort. Převzato z [123]. Slovní vyjádření je ponecháno v angličtině, aby nedošlo ke zkreslení při překladu a interpretaci významů slovních spojení.

- **Číselné vyjádření škály** – škály mohou být konstruovány jako diskrétní nebo spojité (viz Obr. 18). U diskrétních škál se kvantifikace provádí jen v určitých oddělených/diskrétních krocích/stupních (např. 1, 2, 3). Speciálním případem jsou škály binární, kde pokusná osoba může volit pouze mezi stupni 0 a 1 pro jasné rozlišení přítomnosti či nepřítomnosti jevu, pocitu či vyjádření odpovědi na otázku ve tvaru ANO/NE. U spojitých škál je možné kvantifikaci provádět spojitě mezi jednotlivými kroky/stupni (např. 1.1, 2.5, 1.8). Spojitá kvantifikace je prakticky možná jen u číselného vyjádření. Diskrétnost či spojitost škály má také přímý důsledek pro vyjádření nejistoty měření, kdy u diskrétních škál je velikost jednoho stupně škály úměrný „základní“ systematické nejistotě měření (zdroj nejistoty typu B).
- **Slovní vyjádření škály** – přiřazení slovních ekvivalentů různým pocitům, náladám, přáním a jevů představuje v lidské kultuře přirozený postup pro vyjádření hodnocení daného jevu. Slovní vyjádření jednotlivých stupňů škály tedy představuje přirozené vodítko pro pokusné osoby, jak kvantifikovat a vyjádřit jednotlivé pocity na škále. Pro slovní vyjádření by tedy měla být používána především přesná a obecně známá slova a slovní spojení popisující hodnocení daného pocitu či jevu. Slovní vyjádření je většinou možné pouze v diskrétních krocích, neboť běžnými jazykovými prostředky lze vyjádřit jen konkrétní stupně a většinou nelze přímo a přesně vyjádřit plynulé přechody mezi nimi. Jako příklad uveďme vyjádření hlavních stupňů tepelných pocitů, pro které lze v češtině doporučit základní výrazy: *zima, chladno, neutrálně, teplo, horko*. Některým výrazům lze ještě pomocí příslovečných určení *velmi, trochu, středně, mírně* přiřadit vyšší či nižší intenzitu pocitu. Vzhledem k složitosti interpretace takových výrazů jako „*trochu horko*“, „*středně zima*“ atd. lze doporučit pro tvoření škál jen využití slovních výrazů popisujících vyšší intenzitu tepelných pocitů jako například *velmi horko, velmi zima*, či nižší intenzitu pocitu *mírně teplo, mírně chladno* (viz Obr. 20).

Table 2
Comparison between thermal sensation scales - hatched values are considered comfortable

Num.	[87,88]	[92,93,98]	[83]		[96]	[82,100]	[84,94]
+3		Hot	Very hot	Hot		Hot	
+2	Hot	Warm	Hot	Warm		Warm	Very warm
+1	Warm	Slightly warm	Warm	Slightly warm	Warm / Slightly warm	Slightly warm	Warm
0	OK	Neutral	Comfortable	Neutral	Neutral / Slightly cool	Neutral	Neutral
-1	Cool	Slightly cool	Chilly	Slightly cool		Slightly cool	Cold
-2	Cold	Cool	Cold	Cool		Cool	Very cold
-3		Cold	Very cold	Cold		Cold	

Table 3
Comparison between thermal comfort scales - hatched values are considered comfortable

Num.	[24,106,107]	[89,97]	[90,91]	[102]
	TC local	TC	TC	TC
+3		Too much warm		
+2	Too warm uncomfortable	Too warm	Warm discomfort	
+1	Cold uncomfortable	Comfortably warm	High warm discomfort	Uncomfortably warm
0	Neutral comfortable	Comfortable	Comfortable	Comfortable
-1	Warm uncomfortable	Comfortably cool	Cold discomfort	Uncomfortably cool
-2	Too cold uncomfortable	Too cool	High cold discomfort	
-3		Too much cool		

Obr. 20 – Dokumentace růzností v definici škál pro Tepelný pocit (Table 2) a Tepelný komfort (Table 3) ve studiích zaměřených na kvalitu vnitřního prostředí dle [103]. Škály se liší jak v rozsahu, tak ve slovním a číselném vyjádření jednotlivých stupňů škály. Šedivě podbarvená hodnocení jsou považována za komfortní. Slovní vyjádření je ponecháno v angličtině, aby nedošlo ke zkreslení při překladu a interpretaci významů slovních spojení.

Dále je možné na krajích škály ještě vytvořit slovní hodnocení pro limitní/hraniční pocity dodáním příslovce *neakceptovatelně*. Výrazy pak znějí *neakceptovatelně horko*, *neakceptovatelně zima*. Čeština má pro tyto pocity i další výrazy spíše slangové/hovorové povahy: pro teplé pocity – *vedro*, *hrozná vedro*, *hic*, *šilené horko*; pro chladné pocity: *kosa*, *kláda*, *hrozná kosa*, *klendra*, *ledárna* atd. nicméně u těchto slovních hodnocení chybí přesně ukotvený význam jednotlivých slovních spojení, proto není doporučeno tyto výrazy používat. Podrobnější popis pro tvorbu slovního hodnocení škál lze nalézt v normách ISO 14505-3 [125] a ISO 10551 [126]. Variace slovních vyjádření a slovních spojení je však obecně velmi velká a převody mezi jednotlivými škálami a jazyky není triviální [103], [123], [127] (viz Obr. 20 a Obr. 21).

- **Jednoduchá a kombinovaná škála** – jednoduchý typ škály slouží k vyjádření pouze jedné hodnocené veličiny, zatímco kombinovaná škála může vyjadřovat dva hodnocené jevy na jedné škále. Ve většině hodnocení se používají jednoduché škály. S kombinovaným typem se lze setkat u metody vyhodnocení ekvivalentní teploty v diagramu komfortních zón, kdy škála MTV (Mean Thermal Vote – střední tepelný pocit) kombinuje hodnocení tepelného pocitu a komfortu (viz kapitola 5.2.2) nebo u dalších komfortních škál (viz Obr. 20, Tab 3).
- **Orientace škály a trendová shoda vyjádření** – obecně by intenzita jevu vyjadřovaného na škále měla růst zdola nahoru nebo zleva doprava (pozor u kultur se zápisem písma zprava doleva – např. arabská). Pokud má kvantifikovaný jev naturální stav = střed, kladné hodnoty by měly být od středu nahoru, záporné od středu dolů (stejně tak jako na klasickém lihovém teploměru) nebo záporné vlevo do středu a kladné vpravo od středu při horizontální orientaci (ačkoliv zdroj [125] uvádí přesně opačnou orientaci pro horizontální škály). Nevhodná převrácená orientace konstrukce škály po hodnocení tepelného komfortu je uvedena na Obr. 18 a), kde vyšší hodnocení spokojenosti jsou pod nižšími, a neutrální hodnocení je vyjádřeno číslicí 3, což může být pro pokusné osoby matoucí. Při konstrukci škály by také měla být dodržena trendová shoda číselného a slovního vyjádření. Zcela nevhodné a matoucí by bylo vytvoření škály pro hodnocení tepelného pocitu s rozsahem od +5 *Velmi zima* po -5 *Velmi horko*.

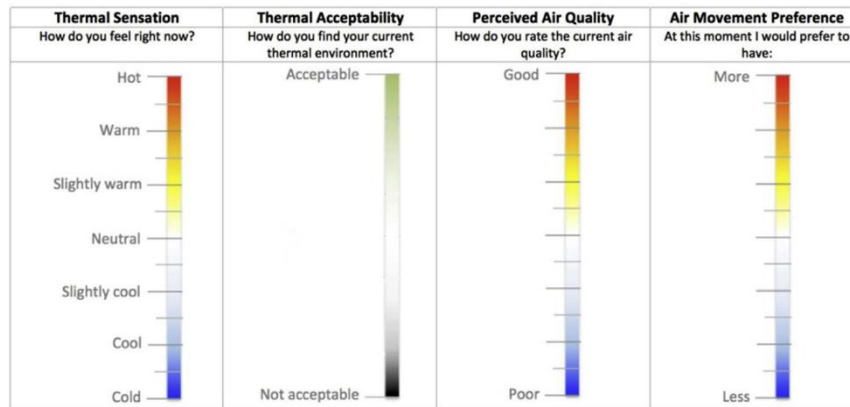
Comparison between thermal preferences scales - hatched values are considered comfortable

Num.	[99]	[92,93]	[81,110]	[87,88,104,105]	[111]
+3	Much warmer	Hot			
+2	Warmer	Warm			
+1	Slightly warmer	Slightly warm	Warmer	Warmer	Uncomfortably warm
0	No change	Neutral	No change	Neutral	No change
-1	Slightly colder	Slightly cool	Cooler	Cooler	Uncomfortably cold
-2	Colder	Cool			
-3	Much colder	Cold			

Obr. 21 – Dokumentace různosti v definici škál pro vyjádření Tepelných preferencí/Žádané změny ve studiích zaměřených na kvalitu vnitřního prostředí dle [103]. Škály se liší jak v rozsahu, tak ve slovním a číselném vyjádření jednotlivých stupňů škály. Šedivě podbarvená vyjádření jsou autory studií určena jako hodnocení neutrální bez požadavku na změnu prostředí. Slovní vyjádření je ponecháno v angličtině, aby nedošlo ke zkreslení při překladu a interpretaci významů slovních spojení.

- **Barevný kód škály** - u škál lze podpořit snadnost užití a orientaci pokusných osob pomocí barevného kódu. Například u škály pro tepelný pocit lze doporučit, pro teplé pocity

odstíny červené či oranžové (asociace s ohněm), pro chladné pocity odstíny barvy modré (asociace s ledem/vodou). U škály pro tepelný komfort odstíny zelené pro uspokojivé hodnocení, odstíny černé nebo modré pro neuspokojivé hodnocení (viz Obr. 22). Ne u všech škál je možné konkrétní barevné vyjádření škály, například škála vnímání vlhkosti – je vysoká vlhkost modrá = hodně vlhkosti nebo červená = dusný pocit?



Obr. 22 – Příklad využití barevného kódu ve škálách. Převzato z [16].

- **Piktogramy/symbols** – Piktogram je grafický znak vyjadřující vizuálně podstatu hodnocené veličiny/vjemu. Pro Tepelný pocit například symbol teploměru, pro Tepelný komfort symbol smajlíka ☺/mračíka ☹ a pro škálu týkající se Žádané změny symbol slunce kombinovaný se symbolem vločky (viz Obr. 24). V případě využití piktogramů je však obecně potřeba brát v úvahu kulturní a klimatický kontextu místa výzkumu. Například obyvatelé pouštních oblastí pravděpodobně nebudou mít příliš zkušeností s chladnými pocity vyvolanými kontaktem kůže s ledem/sněhem, takže piktogram sněhové vločky pro ně nemusí být jednoduše přiřaditelný k chladnému pocitu.

Zásadní otázkou kvantifikace v oblasti tepelného pocitu a komfortu je, jakou škálu a slovní vyjádření zvolit. V autorově praxi bylo ověřeno, že je účelné rozdělit kvantifikaci tepelného komfortu do minimálně dvou oddělených/jednoduchých škál. Jedna škála je určena pro kvantifikaci a hodnocení tepelného pocitu a druhá pro kvantifikaci míry spokojenosti s tepelným stavem těla = tepelný komfort. Pro značně proměnlivá a asymetrická prostředí se dále ukázalo jako vhodné definovat třetí škálu tzv. škálu Žádaná změna. Na této stupnici jsou vyjadřována přání pokusné osoby ohledně změny tepelných účinků prostředí, která by osoba preferovala, aby byl dosažen jí očekávaný/požadovaný tepelný stav prostředí a tím i tepelný komfort. Tato škála pak představuje zpětnou vazbu, kterou lze považovat za nastavení regulačního bodu virtuálního regulátoru. Lze tak přibližně odhadnout, jaké zásahy by uživatel prováděl do nastavení skutečného regulátoru, pokud by mohl řízení HVAC systému nastavovat (behaviorální metoda výzkumu tepelného komfortu [125]). Níže jsou shrnuty doporučení ke konstrukci jednotlivých škál.

- **Tepelný pocit** – „jaký je můj osobní tepelný vjem v daném stavu prostředí“ – škála slouží k vyjádření tepelného pocitu, který dotazovaná osoba vnímá v aktuálním tepelném stavu prostředí a jeho účincích na tělo. Pro tepelný pocit je vhodná symetrická škála

s neutrálním bodem uprostřed jako vyjádřením neutrálního hodnocení tepelného pocitu v daném prostředí, kdy hodnotící osoba nepocituje ani teplý ani chladný vjem/pocit. Kladné hodnoty pak vyjadřují teplé pocity (pocity spojené s aktivitou tělísek tepla a termoregulačními zásahy spojenými s intenzifikací odvodu tepla z těla), záporné hodnoty pak chladné tepelné pocity (pocity spojené s aktivitou tělísek chladu a termoregulačními zásahy spojenými s generováním tepla). Škála je diskretní se 7 stupni a nemá číselné ani slovní hodnocení extrémních tepelných pocitů ani limitní hodnocení pro vyjádření neakceptovatelnosti tepelného pocitu, neboť byla konstruována pro testy HVAC systémů, při kterých takové stavy běžně nenastávají (viz Obr. 23).

- **Tepelný komfort** – „spokojenost s tepelným stavem těla“ – u škály pro tepelný komfort lze doporučit jako optimální nesymetrickou diskretní škálu s 6 stupni, bez neutrálního bodu. Neutrální bod se vynechává z toho důvodu, že na otázku „je pro vás daný tepelný pocit komfortní“ lze jen těžko odpovědět „tak nějak neutrálně/bez efektu“ neboť s principu je volba komfort/diskomfort spíše binární. Pro vyjádření optimálního komfortu je vhodné číslo s kladným znaménkem, kdy se vychází ze skutečnosti, že spokojenost odpovídající komfortu je hodnocena jako kladný vjem a lze ji reprezentovat na škále například hodnotu +2. Naopak nepříjemné/diskomfortní hodnocení jsou vyjádřena zápornými hodnotami škály (viz Obr. 23). Takto konstruovaná škála vycházející z práce Hui Zhang [128], [129] a je dle autorovy praxe pro většinou pokusných osob dobře pochopitelná a snadno se s ní naučí pracovat.

















	Tepelný pocit		Tepelný komfort		Žádaná změna
+3	Horko	+3	Velmi komfortní	+3	Velmi ohřát
+2	Teplo	+2	Komfortní	+2	Ohřát
+1	Mírně teplo	+1	Právě komfortní	+1	Mírně ohřát
0	Neutrální pocit		-	0	Žádná změna
-1	Mírně chladno	-1	Právě nekomfortní	-1	Mírně ochladit
-2	Chladno	-2	Nekomfortní	-2	Ochladit
-3	Zima	-3	Velmi nekomfortní	-3	Velmi ochladit

Obr. 23 – Škály využívané autorem při experimentech s pokusnými osobami. Škály jsou konstruovány pro testování vnitřních prostředí bez extrémní tepelné či fyzické zátěže pokusných osob.

- **Žádaná změna / tepelná preference** – „preferovaný versus pocíťovaný tepelný pocit“ - škála slouží k vyjádření preferencí dotazované osoby a vyjadřuje rozdíl mezi tím jaký je její aktuální tepelný pocit a tím jaký tepelný pocit by osoba preferovala. Pro žádanou změnu je vhodná symetrická, diskretní, 7 stupňová škála s neutrálním bodem jako vyjádření neutrálního hodnocení, kdy hodnotící osoba nepocituje žádnou potřebu daný tepelný stav těla měnit. Kladné hodnoty pak vyjadřují preference k „ohřátí“ těla, záporné hodnoty pak preference k „ochlazení“ těla.
- **Další škály** – obecně lze zkonstruovat škály pro kvantifikaci kteréhokoliv jevu, který mohou pokusné osoby sensoricky hodnotit, či který vyvolává nějaký hodnotitelný pocit/efekt. Dále jsou uvedené jen některé příklady dle zdrojů [123], [125], [126]: *Vlhkost vzduchu* - slouží k hodnocení pocíťované vlhkosti vzduchu. Konstruuje se jako symetrická s nulovým bodem (*vlhkost vyhovující*), a plusovou částí vlhké vjemy a zápornou částí pro suché vjemy. *Vlhkost pokožky* – slouží k hodnocení vlhkosti (lepkavosti) pokožky vlivem

pocení. Norma uvádí jako číselné vyjádření kladnou část škály s neutrálním bodem (*Žádné vlhko*), nicméně vzhledem k tomu, že zvyšující se intenzita pocení vyvolává spíše negativní pocity, měla by být spíše využita záporná část škály. *Přijatelnost prostředí* – binární škála pro vyjádření přijatelnosti aktuálního stavu prostředí (ANO/NE), *Spokojenost s prostředím* – binární škála pro vyjádření spokojenosti s aktuálním stavem prostředí a jeho vlivem na tělo pokusné osoby (ANO/NE).

Samotné definování škál je jen základem pro kvantifikaci hodnocení prostředí pokusnými osobami. Jelikož se jedná o dotazovací metodu, je pro účely experimentu nutné sestavit dotazník, kam budou zaznamenány jednotlivé odpovědi pokusných osob v průběhu experimentu. Základní formy podoby dotazníků jsou uvedeny v normách [125], [126]. Příklad tištěného dotazníku užívaného v experimentální praxi autora při výzkumu tepelného prostředí v kabině automobilů je uveden na Obr. 24. Dnes je také stále častější využití elektronických dotazníků vyplňovaných přes mobilní telefon či tablet, které usnadňují výsledné zpracování tím, že odpadá pracný přepis hodnot z „papíru do počítače“. Elektronické dotazníky však lze doporučit spíše pro studie, kde jsou pokusné osoby dotazovány a elektronický dotazník pak přímo vyplňuje osoba dotazovatele. Pro experimenty, kde pokusné osoby samy vyplňují dotazník, lze spíše doporučit použití papírových dotazníků, které jsou pro většinu osob jednodušší na vyplnění. Dotazník je vždy sestavován pro daný typ měření a volba škál a detailu hodnocení (lokální, celkové) vždy musí odpovídat účelu a cíli konkrétního experimentu. Cílem při sestavování dotazníku je vždy dosáhnout rozumného kompromisu mezi množstvím získaných informací, přehledností dotazníku a zátěží, kterou vyplňování dotazníku představuje pro pokusné osoby a tím i částečně ovlivňuje samotný průběh experimentu. Například dotazník na Obr. 24. byl sestaven tak, aby vyhověl svojí detailností nehomogenitě prostředí v kabině vozidla, zohlednil dynamické jevy, které se v kabině mohou vyskytovat, ale zároveň, aby byl dostatečně jednoduchý a příliš nezatěžoval řidiče, pokud řídí vozidlo (v tom případě je dotazována další osobou).

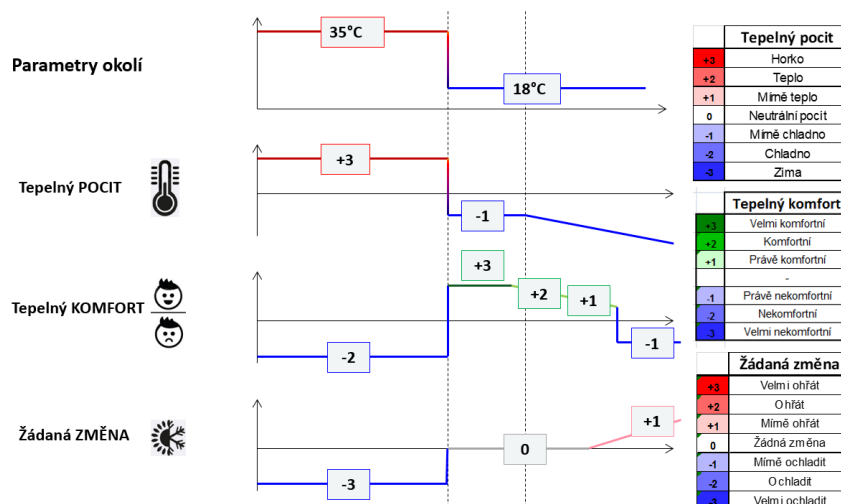
Číslo měření	ČÁST TĚLA																GLOBÁLNÍ	
	Tvář		Záda		Hrud'		Paže		Dlaně		Hýždě		Nohy		Chodidla		Celkový komfort	Žádaná změna
	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort	 pocit	 komfort		
-1																		
0														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

Obr. 24 – Dotazník užívaný při výzkum tepelného prostředí v kabině automobilu. Dotazník umožňuje záznam lokálních i celkových hodnocení pokusných osob, využívá škály pro tepelný pocit, komfort a žádanou změnu. V záhlaví jsou využity piktogramy pro zjednodušení orientace v dotazníku.

Pro jiné experimenty v klimatické komoře, kdy byly například testovány automobilní sedačky (viz Kapitola 0), byl autorem použit dotazník s detailnějším dělením, neboť při jeho použití nehrozilo ovlivnění pozornosti pokusných osob a cílem experimentů bylo detailní hodnocení vlivu testované technologie na lokální tepelný komfort.

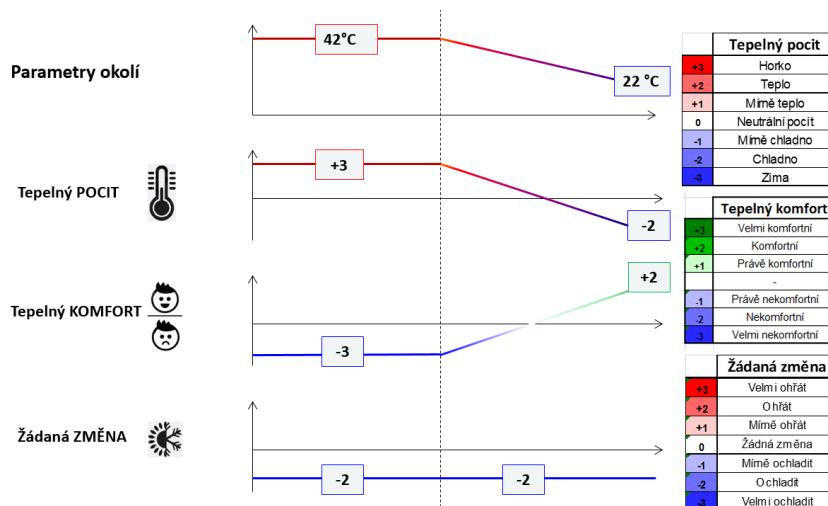
Nejistota měření a kontraindikační princí provázání jednotlivých škál v dotazníku – z pohledu nejistoty měření a rozptylu mezi jednotlivými pokusnými osobami je účelnější diskretní škála s jemným dělením než škály spojité. Standardní nejistota střední hodnoty subjektivních hodnocení prostředí klesla dle [123] 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 spojité 5ti stupňové škály (10.7 %), nejnižší pak u hodnocení *vlhkosti prostředí* diskretní 5ti stupňovou škálou (4.7 %) a hodnocení *tepelného pocitu* diskretní 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.

Dalším důležitým doporučením pro praxi je skutečnost, že škály v dotazníku by měly být voleny tak, že některé kombinace vyplnění jsou pravděpodobnější (viz Obr. 25) než jiné a některé kombinace by měly být dokonce vysoce nepravděpodobné [125]. Pokud je ale přesto taková kombinace vyplnění nalezena může to indikovat, že byl dotazník buď špatně vyplněn, že pokusná osoba správně nepochopila princip vyplňování nebo, že kombinace působících faktorů je zcela ojedinělá a neobvyklá. Interpretace výsledů z dotazníků je blíže popsána v normě ČSN ISO 14505-3 [125], ale při posuzování a vyhodnocování dotazníků je také nutné mít na zřeteli kulturní a místní zvláštnosti oblasti, kde byl daný experiment/test proveden. Blíže jsou některé aspekty rozebrány i v kapitole 2.4.



Obr. 25 – Příklad očekávaného vyplnění dotazníku z Obr. 24 s využitím všech škál při skokové změně prostředí (např. přechod z horkého venkovního prostředí do chladné/klimatizované budovy). Změna tepelného pocitu, komfortu a žádané změny odpovídá běžným průběhům termofyziologické odpovědi těla na skokovou změnu prostředí.

Zajímavostí z využití dotazníku (viz Obr. 24) pro experiment v Indii byl poznatek, že kontraindikační princip v dynamických podmínkách platný pro Evropskou populaci v Indii nemusí přesně platit. Typické nastavení klimatizace v automobilu při experimentech bylo na maximální chladicí výkon, který pak vedl ke kombinaci hodnocení: *Tepelný pocit – chladno, Komfort - komfortní, Žádaná změna – ochladit*. Testovací osoba tedy cítila chlad, bylo jí to příjemné a chtěla ještě více ochladit (viz Obr. 26). Toto chování vyplývá pravděpodobně ze skutečnosti, že ve velmi horkých oblastech Indie s vysokými teplotami je možnost efektivního ochlazení vzácná věc a pokud je k dispozici, tak je využívána principem "čím více, tím lépe" aneb „když mám možnost kontroly, tak ji využiji“ (viz také kapitola 2.4).



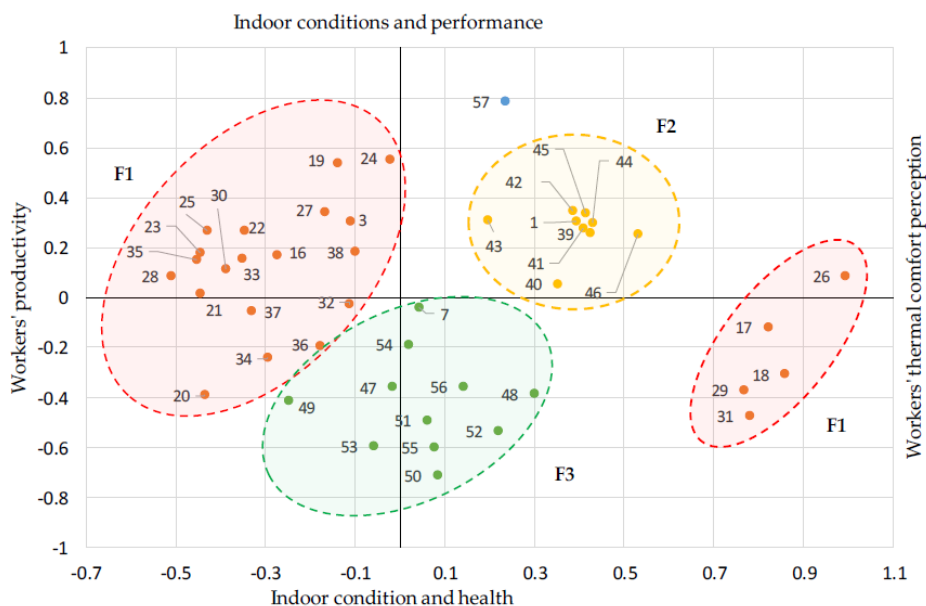
Obr. 26 - Příklad vyplnění dotazníku z Obr. 24 v prostředí indického subkontinentu – dotazování osoby při ochlazování rozehřáté kabiny automobilu v pouštním klimatu, celkový čas 60 min. Je patrné, že i přes zásadní změnu na škálách Tepelný pocit a Tepelný komfort nedochází k žádné změně na škále Žádaná změna neboť očekávání pokusné osoby ohledně nastavení klimatizace v automobilu je že "klimatizace musí hodně chladit" a proto volí stále hodnotu -2.

Nejnovější studie Schweiker a kol. z roku 2020 [127], přinesla nové poznatky v oblasti využití škál a dotazníků, neboť shromáždila data z 26 zemí světa s 21 různými jazyky. Výsledky naznačují, že v datech získaných z dotazníků se projevuje sezónní aklimatizace, dlouhodobá adaptace na podnebí a vliv použitého jazyka, čili využití této metody je kontextuálně závislé. Například, lidé v teplých a vlhkých podnebí asociují tepelný komfort s chladnými tepelnými pocity, zatímco osoby v mírných a studených podnebí asociují komfort spíše s neutrálním či mírně teplým pocitem. Také slovní vyjádření jednotlivých tepelných pocitů a komfortu může být mezi jazyky rozdílné, a zatímco pro škálu hodnocení tepelného pocitu bylo napříč zeměmi preferováno rovnoměrné dělení, škála pro komfort a akceptaci tepelného stavu byla preferovaná spíše v nerovnoměrném dělení.

Znalost těchto vztahů je zásadní pro práci s pokusnými osobami a interpretaci výsledků z dotazníkových šetření. V opačném případě totiž můžeme dojít k milným závěrům ohledně stavu a kvality prostředí v posuzovaném prostředí a jeho akceptace pokusnými osobami. Další postupy a konkrétní doporučení k použití dotazníků u experimentů s pokusnými osobami jsou uvedeny u v kapitole 4.4 a 6.

2.6 Tepelný komfort jako optimalizační parametr

Pro využití určitého parametru pro optimalizaci, je nezbytné ověřit kauzální vztah mezi parametrem a optimalizovanou veličinou. S ohledem na zaměření této práce je definice „optimalizované veličiny“ poměrně široká, protože nastavení vnitřního prostředí a z něj plynoucí tepelný komfort je jedním z faktorů, který může ovlivňovat produktivitu práce, četnost pracovních úrazů, nemocnost, nehodovost, spotřebu energie pro klimatizaci, negativní vliv prostředí na člověka atd. Následující kapitola je tedy věnována shrnutí dosavadních publikovaných poznatků v oblasti vztahů mezi stavem prostředím a různými cíli optimalizace prostředí. Jinak řečeno odpovědět na otázku: 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?

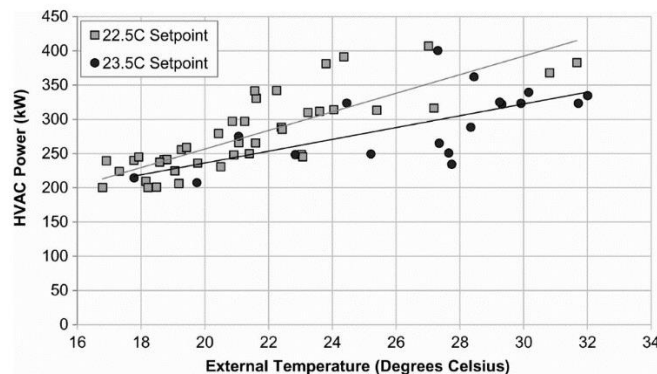


Obr. 27 – Klusterová analýza článků zabývajících se výkonností a produktivitou pracovníků v závislosti na okolním prostředí. Publikace jsou rozčleněny do tří základních klusterů F1 (složený ze dvou částí) – vliv prostředí na výkonnost a produktivitu pracovníků, F2 – vnímání prostředí pracovníky a F3 – vliv prostředí na zdraví pracovníků. Převzato z [115].

V posledním desetiletí byla vypracována celá řada studií na téma kvalita vnitřního prostředí a produktivita práce. Dle přehledové studie [115] lze publikace rozdělit do tří základních klusterů. Do klasteru F1 – vliv prostředí na výkonnost a produktivitu pracovníků, jsou zařazeny hlavně publikace propojující parametry vnitřního prostředí (viz kapitola 4) s parametry jako je produktivita práce, kvalita výroby, mentální výkon, bdělost až po četnost chyb a pracovní úrazy v průmyslu. V klasteru F2 – vnímání prostředí pracovníky, jsou zařazeny články, které především popisují modely komfortu (viz kapitola 5.2) nebo se věnují aspektům prostředí, které jsou pracovníky uváděny jako zásadní pro zlepšení prostředí či jako nejdůležitější pro hodnocení kvality prostředí. Klaster F3 – vliv prostředí na zdraví pracovníků pak obsahuje články propojující parametry jako kvalita pracovního prostředí, kvalita větrání, produktivita a zdravé pracovní prostředí. Z celkového hodnocení studií vyplývá:

- 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. Je to jednak dáno komplexitou vztahů mezi jednotlivými parametry prostředí, různými druhy stresorů, individuálními nastaveními a preferencemi jednotlivých osob a na druhou stranu je otázkou, jak přesně měřit produktivitu a kvalitu práce, když rozmanitost prací, které mohou lidé vykonávat je velice široká (administrativní práce v kanceláři vs. těžba rudy v hlubinném dole.) V tomto směru bylo značného pokroku dosaženo hlavně ve výzkumu kvality prostředí v administrativních budovách [113], [130], [131]. Ztrátu pracovního výkonu u administrativních úkolů (chybovost psaní, chybovost výběrů, srovnávací úlohy atd.) lze totiž snadno měřit a to, jak v reálném pracovním prostředí, tak v laboratorních podmínkách (např. v klimatické komoře) [115].
- 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 [103], [132], [133].
- 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 [115].
- Většina autorů uvádí, že vyšší četnost výměny vzduchu na pracovišti je přínosná pro kvalitu vnitřního prostředí a lepší výkon pracovníků [115], [133].
- 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 nemocnosti 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 [115], [134].
- V omezeném počtu studií byly navrženy regresní modely k vyčíslení ztráty výkonu při provádění konkrétních úkolů, které jsou výsledkem statistického zpracování dat o pracovním výkonu vztaženém na kvalitu prostředí. Modely jsou většinou vypracovány pro konkrétní kancléřské činnosti (např. psaní textu na klávesnici) a řídicí proměnná je buď PMV z Fangerova modelu [135], [136], tepelný pocit [137], [138], míra tepelného diskomfortu dle Gagge [139] nebo pouze teplota okolí [140]. Někteří autoři zahrnuli také účinek interakce s jinými proměnnými a stresory prostředí, jako je hluk nebo nespokojenost pracovníků [141], [142]. Lze říci, že přestože mají tyto modely jisté limity a jejich zobecnění na všechny činnosti není možné, představují první krok k integrovanému modelování pracovní produktivity ve vnitřním prostředí a umožňují získat podklady pro optimalizaci kvality prostředí s ohledem na ekonomické a energetické náklady.
- 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 [115]. Ve studii [113] je uveden příklad, že zvýšení cílové teploty nastavení klimatizace v kancelářské budově z 22 °C na 25 °C

nepřinese žádné významné snížení výkon pracovníků, ale může ušetřit cca 6 % energie na každý stupeň zvýšení teploty klimatizovaného prostoru [130].



Obr. 28 – 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 ze [130].

Z výše uvedeného lze shrnout, že tepelný komfort a obecněji pak kvalitu vnitřního prostředí lze využít při posuzování vlivu vnitřního prostředí na produktivitu práce, zdraví, možnost relaxace a energetickou náročnost HVAC systémů. Z uvedených poznatků v kapitole 2 také vyplývá, že k vytváření vnitřního prostředí nelze přistupovat pouze technicistně na základě tepelné bilance tělo – okolí, ale je nezbytné zahrnut všechny aspekty z oblasti psychologie, kultury a chování lidí. Je však nutné také podotknout, že i pro oblast tepelného komfortu je nutné mít na paměti tvrzení dle [25], že "Nadměrný komfort může být některými lidmi považován za luxus či přepych a může být vnímán i jako plýtvání." Dosažení stavu komfortního prostředí vždy, všude a za jakýchkoliv okolností tedy nemusí být považováno za optimální stav. Je také nutné mít na paměti, že provoz HVAC systémů je vždy spojen s nezanedbatelnými energetickými a materiálovými náklady a s tím souvisejícími dopady na životní prostředí i chod společnosti (výroba energie, těžba surovin, nemožnost alokovat zdroje na jiné potřeby atd.). Navíc jak dokumentují například práce [7], [72], [102] je pro celkové zdraví a správnou funkci termoregulačního systému nezbytné střídání fází komfortu a tepelného diskomfortu. Pouze tyto změny umožňují zapojení všech termoregulačních mechanismů (viz kapitola 2.2) a správné sladění jejich funkcí. Nejedná se však v žádném případě o situace, kdy je lidské tělo nuceně vystaveno dlouhotrvajícímu pobytu v diskomfortní prostředí (např. celá pracovní doba strávená v přechlazené open-space kanceláři), ale o vědomé činnosti, kdy je potřeba tyto mechanismy zapojit (lehká fyzická práce, sport, pobyt ve venkovním prostředí atd.). Tyto činnosti pak musí být následovány odpočinkem v prostředí s optimálním tepelným stavem umožňující patřičnou regeneraci organismu [84].

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. Elegantně to lze vyjádřit anglosaským "Use it, or lose it". Nízké využití funkcí termoregulačních mechanismů vede k tvorbě nevyváženého poměru energetických zásob a k podpoře rozvoje civilizačních chorob jako je nadváha a cukrovka II. typu [73], [81], [143], [144].

3 ADAPTAČNÍ STRATEGIE A ÚPRAVY PROSTŘEDÍ

Adaptace je evoluční mechanismus, kterým se organismus přizpůsobuje podmínkám, panujícím v jeho životním prostředí. Jedná se tedy o základní mechanismus, který však ze své podstaty trvá dlouhé generace a vyžaduje uzavřené populace, ve kterých se může adaptační výhoda efektivně uplatnit [6], [60], [145]. Člověk i někteří jiní tvorové je však schopni vyvíjet adaptační strategie s využitím nástrojů, oděvů, staveb a strojů. Schopnost organismu přizpůsobit se svému okolí se nazývá adaptabilita a lze ji dle [146] rozdělit na:

- **Adaptabilita pasivní** – 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 a rozsahům parametrů okolního prostředí.
- **Adaptabilita aktivní** – 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 a zvýšení rozsahu parametrů vnějšího prostředí, v kterých může člověk pobývat bez ohrožení zdraví a života.
- **Adaptabilita kreativní** – 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 (např. výsadba stromů v blízkosti lidských obydlí pro vytvoření stínu a snížení tepelné zátěže v letním období) a také vytváření prostředí oddělených od vnějšího prostředí tzv. vnitřního prostředí (přístřeší, staveb, kabin dopravních prostředků), kde je možno udržovat parametry prostředí v rozsahu vhodném pro člověka.

Než byly vynalezeny způsoby pro aktivní adaptace na prostředí, bylo možné šíření člověka jen v prostředí, které odpovídalo možnostem jeho těla a termoregulace. Místa vzniku prvních starověkých civilizací na blízkém východě se nápadně shodují s pásem optimálního podnebí, které má střední teplotu cca 21 °C (viz Obr. 50). V takovém prostředí je lidské tělo schopno udržovat optimální tělesnou teplotu s minimálními energetickými náklady [7]. V průběhu evoluce člověka bylo vyvinuto několik postupů a přístupů k aktivní a kreativní adaptaci na okolní prostředí. Nejprve byly 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 mezi tělem a okolím, poskytuje ochranné funkce a umožňuje tak funkci lidského těla i v prostředí, kde by bez ochrany nemohlo trvale a efektivně fungovat [147]. S dalším rozvojem společnosti začali vznikat postupy pro kreativní modifikaci prostředí tak, aby vyhovovalo lidské termofyziologii [148]. Člověk tedy začal vytvářet vnitřní prostředí oddělená od okolí nějakou konstrukcí, což bylo základní podmínkou, aby bylo možné kontrolovat parametry prostředí (např. teplotu vzduchu, teplotu okolních povrchů, výměnu vzduchu atd.). Aktivně se adaptovat na prostředí či kreativně modifikovat prostředí jsou dvě rozdílné strategie, které daná společnost aplikuje podle podmínek prostředí, zdrojů surovin, zdrojů technicky využitelné energie a stupně rozvoje společnosti.

3.1 Pasivní adaptabilita

Z pohledu lidské společnosti a jejího historického vývoje je patrné, že rozvoj lidské společnosti a úspěšnost druhu homo je založena především na základě využití aktivní a kreativní adaptability. Vzhledem k překotnosti vývoje uspořádání lidské společnosti v posledních cca sedmi tisíciletích, lze změny plynoucí z procesu pasivní adaptability pro celkovou lidskou společnost prakticky zanedbat. Časový rámeček nutný pro propagaci změn je větší než celkové historicky zdokumentované trvání komplexnějších forem lidské společnosti, jehož počátky se dle nálezů svatyní v Göbekli Tepe na území dnešního Turecka odhadují na 10té tisíciletí př.n.l. [149], [150]. Na druhou stranu jsou zdokumentovány lidské populace, kde byly nalezeny významné znaky přizpůsobení těla okolnímu prostředí, ale vždy se jednalo o malé uzavřené komunity (kde se mohla získaná genetická výhoda ve větší míře uplatnit) v kombinaci s intenzivním selektivním tlakem okolního prostředí. Například u kmenů z Ohňové země je zdokumentováno, že dané prostředí obývali cca 8 až 10 tisíc let [60], přičemž stavba jejich těl vykazovala signifikantní přizpůsobení se velmi chladnému prostředí: menší kompaktní postava, velmi silná vrstva podkožního tuku, větší intenzita bazálního metabolismu, vyšší tělesná teplota a nižší citlivost kůže na chladné stimuly [54]. Populace těchto komunit dle odhadů však nikdy nepřekročila nižší jednotky tisíců a navíc se vyskytovali na jasně vymezeném území bez významnějších kontaktů s jinými lidmi (až do kolonizace v 19. století). Podobné morfologické znaky v izolovaných populacích ve chladném klimatu jsou zdokumentovány i pro kmeny Inuitů v Severní Americe a Grónsku [60]. Lidé tedy zřejmě dosáhli tak značného rozvoje společnosti a významného rozšíření především na základě využití aktivní a kreativní adaptability. Níže je popsán proces, který sice není přímo pasivní adaptabilitou, ale jistým způsobem je produktem prostředí, které při evoluci na lidský druh působilo a definovalo podmínky a limity pro pasivní adaptabilitu. Z těchto podmínek vycházející i limity a schopnost procesu zvaného aklimatizace, která je u všech lidí v jisté míře zachována dodnes.

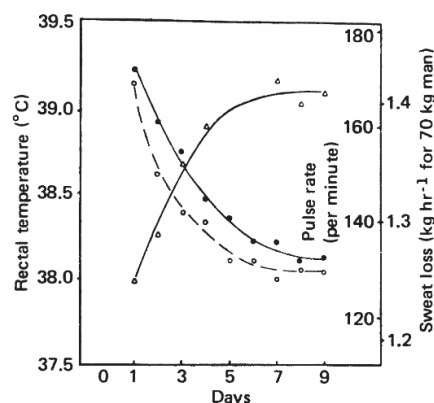
3.1.1 Aklimatizace

Aklimatizace je proces, při kterém se organizmus přizpůsobuje změněným podmínkám prostředí, což mu umožňuje udržet výkon i při těchto změněných podmínkách [45]. Aklimatizace probíhá v rámci hodin až týdnů, ale vždy se jedná o procesy v rámci života jednoho jedince. Aklimatizace může být krátkodobá (vyskytuje se jen po omezenou dobu např. aklimatizace na teplé podnebí v rámci pobytu v jiné zemi), 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 v průběhu roku, u člověka v teplém a mírném pásmu tzv. sezónní aklimatizace na roční období [45] atd.). Krátkodobá i periodická aklimatizace zapadá do oblasti homeostatických principů, neboť umožňuje organismu udržovat stále podmínky vnitřního prostředí nutné pro jeho život.

Subsystémy lidského těla a metabolismu jsou schopné aklimatizovat se na změněné podmínky (především termoregulace a metabolismus) nicméně i ty mají své limity, které jsou nepřekročitelné pro správu funkci těla. Za těmito limity se nelze na prostředí aklimatizovat

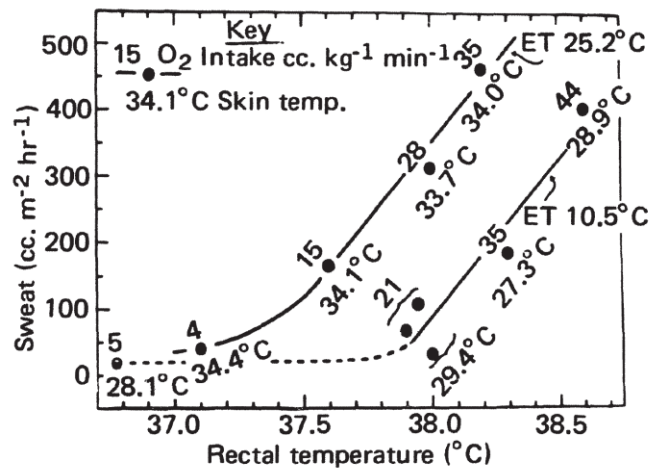
žádným sebedelším tréninkem [151] a je nutné využít aktivních a kreativních přístupů. Pružnost systému a schopnost aklimatizace na nové podmínky je u člověka zachována dodnes a to hlavně u těch parametrů prostředí, které v minulosti byly stěžejní pro přežití předků člověka a vytvářely tak hlavními selektivními tlaky pro pasivní adaptaci.

- **Aklimatizace na chlad** je proces, kterým se tělo přizpůsobuje nižší teplotě okolního prostředí. Takové prostředí intenzifikuje přenos tepla z povrchu těla jak konvekcí, tak radiací (blíže viz kap. 2.3) a způsob, jak udržet tělesnou teplotu v potřebném rozsahu spočívá především ve zvýšení intenzity termogeneze a také ve vytvoření a zvětšení energetických zdrojů pro termogenezi v podobě zásob hnědého tuku (blíže viz kap. 2.1). Další možností je snížení tepelné vodivosti těla a vytvoření dlouhodobé zásoby energie v podobě světlého tuku. Proces této aklimatizace je však dlouhodobější a vyžaduje přebytek energie (přijímané v podobě potravy) nad jejím výdejem. U některých etnik v Polynésii a na Novém Zélandu je zdokumentována zvýšená schopnost rychle hromadit zásoby energie v podobě světlého tuku [74], [81], [152], [153]. Jedná se pravděpodobně o přizpůsobení selekčním tlakům v minulosti, kterým byli vystaveni předci těchto lidí v nelehkých podmínkách lovecko-sběračských kultur, kdy bylo běžné hladovění a lidé se schopností vytvářet si zásoby tuku v době hojnosti potravy, měli výhodu v době nedostatku a hladovění nad těmi, kteří tímto přizpůsobením nedisponovali. (například při dlouhých mořských migracích v Polynésii). Tato hypotéza označovaná jako „hypotéza šetrného genu“ byla formulována Jamesem V. Neelem v roce 1962 a je jedním z možných vysvětlení, pro významný nárůst obezity a diabetu II. typu v rozvinutém světě, kde je stabilní přístup k potravě běžný a prakticky zcela vymizelo hladovění [154]. V kombinaci s omezením pohybu a prostředím, které nevyžaduje příliš termoregulačních zásahů, se tedy tato adaptace pravděpodobně změnila z výhody spíše v nevýhodu.
- **Aklimatizace na teplo** představuje proces, při kterém dochází k postupnému zvýšení produkce potu za účelem intenzifikace přenosu tepla odpařováním z povrchu pokožky/oděvu. Průběh aklimatizace termoregulačního systému na práci trvající 100 min v horkém prostředí s teplotou vzduchu 48.9 °C v průběhu devíti dní je uveden na Obr. 29.



Obr. 29 – Změna tělesné teploty (vyplněné kroužky), srdeční frekvence (prázdné kroužky) a produkce potu (trojúhelníky) v důsledku 9ti denní aklimatizace pokusných osob mužského pohlaví při práci s en. výdejem 350 W, trvající 100 minut v prostředí s teplotou 48.9 °C a teplotou mokrého teploměru 26.7 °C. S postupnou aklimatizací lze pozorovat pokles tělesné teploty a srdeční frekvence ve spojení s růstem produkce potu (intenzivnější přenos tepla evaporací). Převzato ze [155].

Z průběhu je patrné, že zatímco reakce organismu na expozici teplem a zátěží v prvním dni byla v podobě zvýšení srdeční frekvence a tělesné teploty, s pokračující aklimatizací tělesná teplota i frekvence klesaly, ale rostla schopnost těla produkovat pot a tím zvyšovat přenos tepla odpařováním. Tato aklimatizace se u většiny zdravých osob s normální kondicí plně vyvine po 7 dnech opakovaných expozic a udrží se na stejné úrovni přibližně další dva týdny, než posléze postupně vymizí [45]. Zajímavým poznatkem také je, že rychlost aklimatizace nelze zvýšit opakovanou expozicí pokusných osob vysokým teplotám víckrát za den [155].



Obr. 30 – Ilustrace závislosti produkce potu na tělesné teplotě. Pokud je tělo aklimatizované na teplo, je schopné udržet stálou povrchovou teplotu díky produkci potu nezávisle na zátěži organismu. Povrchové teploty pokožky (hodnoty po body grafu) zůstávají v důsledku změny množství odpařovaného potu nezávislé na rostoucí zátěži (vyjádřené spotřebou kyslíku – čísla nad body) a tělesné teplotě. Experiment byl proveden ve dvou prostředích s ekvivalentní teplotou 10.5 a 25.2 °C. Převzato ze [155].

Zásadní pro aklimatizaci v horkém prostředí je dodatečná produkce potu v závislosti na tělesné teplotě, což umožňuje tělu udržet nízkou povrchovou teplotu pokožky a tím i dostatečný teplotní spád mezi jádrem těla a jeho povrchem. Při úspěšné aklimatizaci na teplé prostředí je termoregulace schopna udržet povrchovou teplotu pokožky nezávisle na metabolickém výdeji organismu a dostatečně zvlhčená pokožka si udržuje stálou teplotu, která je blízká teplotě mezního adiabatického ochlazení (viz Obr. 30). Odvod tepla vypařováním potu je velmi intenzivní, ale jeho funkčnost je závislá na míře nasycení okolního vzduchu vodní párou. V prostředích s parciálním tlakem vodní páry vyšším než 6 kPa (teplota rosného bodu 36 °C) není přítomný dostatečný koncentrační gradient a odpařování potu je tak prakticky nemožné [20], [67], [68]. Takové prostředí je tedy limitní pro aklimatizaci na teplé podmínky.

- **Aklimatizace na nízký tlak vzduchu a hypoxii** Hypoxie je stav nedostatku kyslíku v těle nebo některé jeho části. Příčiny hypoxie z pohledu fyziologie mohou být různé, ale v přirozeném prostředí při normální funkci těla bývá hypoxie většinou důsledkem nižšího tlaku vzduchu a tím i nižšího parciálního tlaku kyslíku [156] (viz Obr. 32). Před vynálezem letectví byl lidský organismus takovým podmínkám prakticky vystaven jen ve vysokohorských oblastech (nadmořská výška nad 3 000 m [157]). Pilotní vědecký experiment vlivu dlouhodobé hypoxie na člověka, byl proveden na přelomu let 1960/61

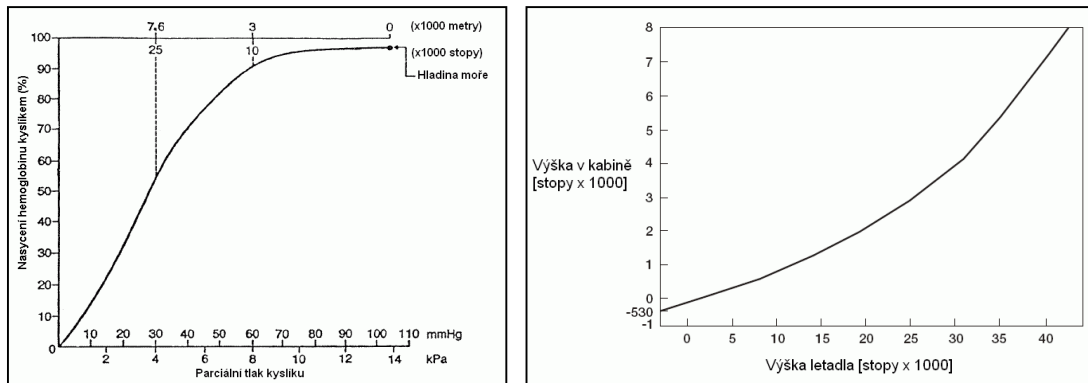
při expedici, jejímž cílem byl pokus o zdolání vrcholu hory Makalu (8 470 m) bez podpory kyslíkového přístroje. Vědecká část expedice byla pojmenována Silver Hut Expedition, dle stříbrné barvy habitatu, který výzkumníci obývali v nadmořské výšce 5 800 m.n.m. (viz Obr. 31). Ačkoliv členové expedice dokázali v průběhu experimentu žít, pracovat a provádět určené experimenty, docházelo u nich k ztrátě tělesné hmotnosti rychlostí v rozmezí 0.5 až 1.4 kg za týden a tuto ztrátu nebylo možné kompenzovat ani zvýšeným kalorickým obsahem stravy. Pouze sestup do základního tábora ve výšce 4 500 m a delší pobyt v něm umožňoval zvrácení tohoto trendu [151]. Experiment byl na svou dobu zcela průkopnický a z dnešního pohledu pracoval jen se základním vybavením, nicméně jeho závěry a poznatky jsou platné dodnes a určují, že se lidský organizmus není schopen trvale aklimatizovat na nadmořské výšce nad 5 300 m, což odpovídá atmosférickému tlaku cca 52 kPa (dle mezinárodní standardní atmosféry [158]).



Obr. 31 – Habitat expedice Silver Hut umístěný na ledovci Mingbo v nadmořské výšce 5 800 m. V pozadí vrchol Ama Dablam (6 814 m), který sloužil pro trénink výstupů bez kyslíkové podpory. Výzkum trval od podzimu 1960 do léta 1961 a přinesl zásadní poznatky v oblasti možnosti aklimatizace lidského těla na stavy dlouhodobé hypoxie ve vysoké nadmořské výšce. Převzato ze [151].

S respektováním výše uvedeného, však dle studie [157] mají obyvatelé vysokohorských oblastí s výškou nad 4 000 m (Tibet, Andy, Etiopská vysočina) jistá fyziologická přizpůsobení pro specifické podmínky prostředí s nízkým tlakem vzduchu. Především se jedná o menší tělesný vzrůst a celkovou nižší tělesnou váhu (což snižuje celkové nároky na energetický výkon metabolismu [159]), zvýšenou kapacitu plic a kardiovaskulárního systému. Například u Tibeťanů je prokázáno přizpůsobení fyziologie srdečního svalu a jeho schopnosti vytrvale pracovat při vyšší srdeční frekvenci, přizpůsobení plic pro výměnu plynů při nižších atmosférických tlacích, zvýšení průtoku krve končetinami = vyšší rozsah termoregulace, vyšší hustota kapilárních cév ve svalové tkáni a nižší nárůst koncentrace hemoglobinu v krvi v závislosti na nadmořské výšce. Posledně zmiňovaná adaptace se může zdát paradoxní, neboť méně hemoglobinu v krvi, znamená nižší transport kyslíku pro potřeby metabolismu. Význam této adaptace je ale spatřován v tom, že tato nižší koncentrace hemoglobinu vede k zachování nízké viskozity krve, což umožňuje její

snadnější oběh kardiovaskulárním systémem a v kombinaci s vyšší srdeční frekvencí kompenzuje množství transportovaného kyslíku. Tato adaptace také představuje účinnou prevenci proti „výškové nemoci“, nadměrnému srážení krve a život ohrožujícím trombózám [157], [160]. S rozvojem civilního letectví a letadel s proudovými motory, které kvůli snížení odporu vzduchu a úspoře paliva využívají běžně letové hladiny nad 8 000 m [158], se tato problematika stala důležitou i pro civilní aplikace. Tlak v kabině civilních letadel je udržován na maximální ekvivalentní nadmořské výšce 2 450 m (viz Obr. 32), což odpovídá tlaku 75 kPa a pro většinu populace nepředstavuje prakticky žádné zdravotní riziko.



Obr. 32 – Vlevo: Nasyčení hemoglobinu kyslíkem v závislosti na primární tlaku kyslíku ve vzduchu. Do nadmořské výšky 2 500 m nedochází prakticky k žádnému poklesu nasyčení. Vpravo: Ekvivalentní nadmořská výška udržovaná systémem pro přetlakování kabiny v závislosti na nadmořské výšce letu. Při letu v hladině 40 000 stop (12 190 m) je v kabině udržován tlak odpovídající výšce cca 7 000 stop (2 130 m) což je cca 79 kPa dle MSA. Převzato ze [158].

Rozpustnost plynů v krvi a rychlé změny tlaku okolí – Při vývoji člověka byly změny tlaku okolního prostředí jen relativně pozvolné a úměrné změně počasí nebo změně nadmořské výšky v důsledku pohybu člověka chůzí v krajině. Z toho důvodu nemá lidské tělo přizpůsobení pro rychlé snížení tlaku okolí, které může vyvolat zdravotní obtíže známé pod označením „kesonová či dekompresní nemoc“. Problém spočívá ve stlačitelnosti plynů a přímé závislosti rozpustnosti plynů v krvi (především dusíku) na tlaku okolí. Rychlá expanze či skokové vysycení dusíku v podobě bublinek v tkáních při poklesu tlaku se označuje jako barotrauma a může být nebezpečná pro oběhový systém, lebeční dutiny, plíce, klouby i další tkáně a orgány [161]. Takové podmínky mohou nastat například při rychlém výstupu z hloubky při potápění, či v kabině letadla při poruše systému přetlakování kabiny. Hlavní prevencí při potápění jsou přestávky ve výstupu z hloubky (tzv. dekompresní přestávky), což umožní postupné bezpečné uvolnění rozpuštěného dusíku z krve v plicích zpět do plynné formy. Hloubka a délka dekompresních přestávek je dána dobou pobytu, maximální výší tlaku okolí a další řadou parametrů. V případě letecké přepravy ve vysokých výškách je to pak systém regulace přetlaku v kabině, který řídí změny tlaku při stoupaní a klesání letadla tak, aby nebyly překročeny změny tlaku: při stoupaní letadla -1.8 kPa/min a při klesání letadla $+1.1 \text{ kPa/min}$. Tyto poznatky naznačují, že limit aklimatizace fyziologie člověka na tlak okolního prostředí je v rozsahu cca 0.55 až 1.5 násobku běžné hodnoty atmosférického tlaku (tedy cca 55 až 150 kPa) [162].

3.2 Aktivní adaptabilita

Mezi využití postupů aktivní adaptability lze zařadit používání oděvů, které rozšiřují interval parametrů okolního prostředí ať již z pohledu teploty (teplý oděv do arktických podmínek), vlhkosti (chlazený oděv), mechanického působení okolí na tělo člověka (řeznické rukavice, pracovní rukavice, motocyklistický oděv s ochranou páteře) či nebezpečných a toxických látek (ochranné protichemické oděvy). Využití oděvů a jejich ochranných funkcí je typické u venkovních aktivit či při práci v prostorách, které je vzhledem k jejich velikosti či povaze neefektivní či prakticky nemožné udržovat v rozsahu optimálním pro člověka: prostory hutí (viz Obr. 33), sléváren, dolů, lakoven atd.



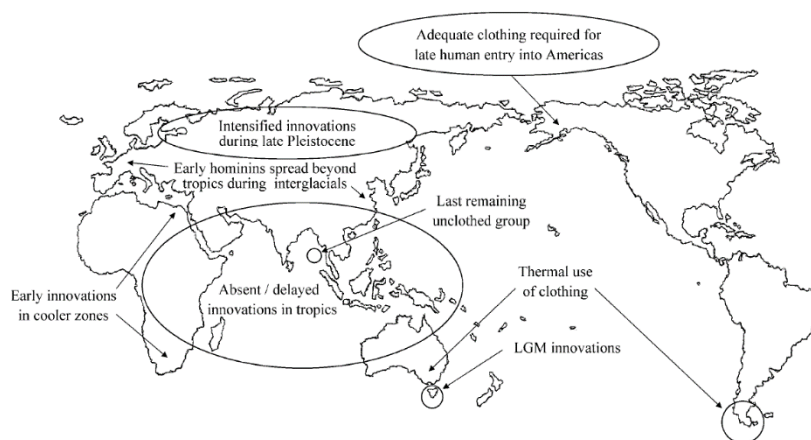
Obr. 33 – Jedno z extrémních prostředí, kde je nezbytná ochrana člověka před účinky okolí pomocí speciálního oděvu (aktivní adaptabilita) jsou hutní provozy pro výrobu oceli. Převzato ze [163].

Lidské tělo je vybavené celou řadou aktivních termoregulačních mechanismů, které umožňují přežití v chladu či v horku (viz kapitola 2.2) a lze je pomocí aklimatizace vyladit na vyšší efektivitu a pružnost při extrémních zátěžích (viz kapitola 3.1). Jejich rozsah a limity pro běžnou populaci jsou však dány a například pobyt ve výškách nad 7000 m.n.m zvládne bez dýchacího přístroje jen mizivý zlomek lidské populace a i ten jen na velmi omezenou dobu. Stejně tak i v prostředí s teplotou $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nemůže člověk bezpečně pobývat bez kvalitního oděvu s vysokou hodnotou tepelného odporu. V takových prostředích je tedy nezbytné využití prvků aktivní adaptability a pomocí oděvů nebo osobních ochranných pomůcek aktivně ochránit lidský organizmus před nepříznivými účinky okolí.

3.2.1 Oděvy a jejich hlavní funkce

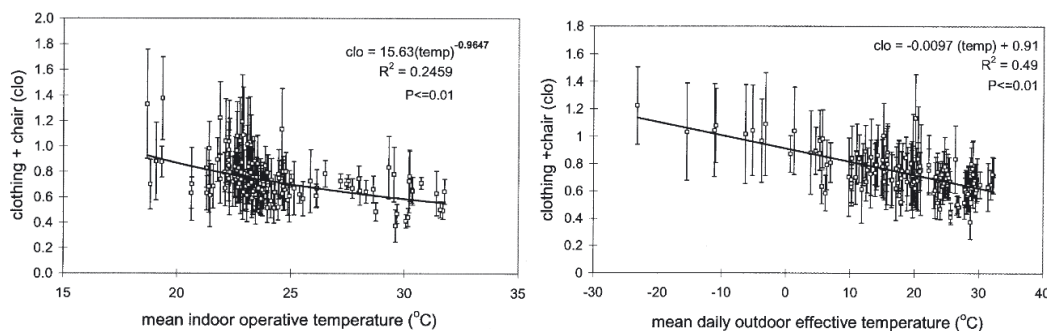
Dle [147], [148] pocházejí první důkazy o využití oděvů s komplexní konstrukcí (střih, technologické zpracování materiálů jako řezání, krájení, sešívání) z období před cca 20 tisíci lety. Do té doby se člověk mohl rozšiřovat jen v prostředích, která odpovídala termofyziologickým možnostem jeho těla [7] nebo kde stačila ochrana od jednoduchých oděvů. Oděvy od počátku užívání plnily především ochrannou funkci před okolním prostředím [147]. S rozvojem civilizace a komplexnosti společnosti však začaly mít i funkce dekorativní a statusové (demonstrovaly příslušnost k nějaké skupině, druhu povolání či společenské vrstvě [164]). 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 (viz Obr. 34). 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 [148]. Oděvy tedy měly spíše společenskou funkci a funkci ochrany před zraněním těla (pracovní oděvy, zbroj pro vojáky). 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 pro přenos tepla. Pokud byl oděv užíván, byl tvořen z velmi lehkých materiálů, které většinou kryly pouze pánevní oblast.



Obr. 34 – Vliv klimatu na vznik a vývoj oděvu. Hlavní vývoj a inovace v konstrukcích oděvů proběhl na místech, kde byla potřebná tepelná ochrana těla jako funkce oděvu (Severní Afrika, Evropa, severní část Asie, sever a jih Ameriky, jih Austrálie). Naopak v tropických oblastech byl vývoj oděvů opožděn či oděvy nikdy přirozeně nevznikly (např. na Andamanských ostrovech). Převzato ze [147].

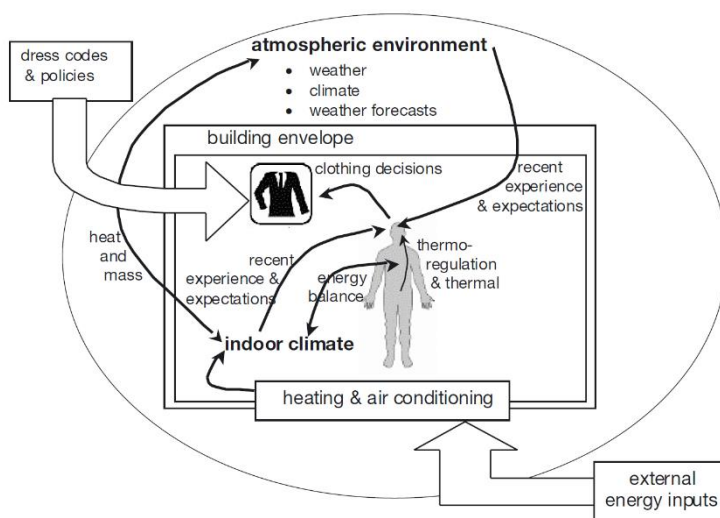
V moderní společnosti žijící v urbanizovaném prostředí, převyšuje čas strávený ve vnitřních prostředích čas pobytu v prostředí venkovním [16], nicméně užití oděvu jako hlavního nástroje pro termoregulační chování lze dokladovat i v těchto současných populacích [165]. Na Obr. 35 je uvedena závislost izolačního 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. 35 – 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 ze [165], [166].

Ochrana těla před fyzikálními účinky prostředí při činnosti člověka – další funkcí oděvů může být ochrana před mechanickým poškozením těla při práci (rukavice, polstrovaná čepice, kovářská zástěra), ochrana těla při boji (drátěná košile, helma, rukavice) nebo ochrana před opakovaným mechanickým působením jiných předmětů na tělo (jezdecké kalhoty pro jízdu na koni bránící odření kůže nohou o sedlo).

Společenské funkce – jsou všechny funkce, které oděv naplňuje v rámci lidského společenství a nejedná se o výše uvedené ochranné funkce. Především v mírných podnebních, kde nebyl kladen hlavní důraz na ochrannou funkci, se mohly při konstrukci oděvů uplatnit i takové vlivy a společenské fenomény, jako identifikace s nějakou skupinou prostřednictvím oděvu, identifikace postavení jedince ve společnosti dle oděvu, užití oděvu k rituálním a náboženským účelům, či preference různých barev, materiálů, střihů atd. dle aktuálního společenského konsenzu, jinak řečeno móda [164].



Obr. 36 – Složitost vztahů, které formují a ovlivňují volbu oděvu, je často velmi vysoká. Nejen vnější prostředí a očekávané vnitřní prostředí hraje roli, ale i zkušenost a očekávání ohledně vnitřního prostředí, dress code a společenské normy hrají často důležitou roli. Převzato ze [165].

Častý je dokonce stav, kdy oděvy pro některé společenské funkce mají nevhodnou konstrukci a parametry, ale protože je takový oděv vyžadován společenskou situací či zastávanou funkcí, jsou takové oděvy používány i za cenu případného funkčního a tepelného diskomfortu [13], [165] (např. některá uniformovaná povolání, zaměstnání s předepsaným dress code, společenské akce typu ples atd.). Volba oděvu, která není závislá jednoznačně na ochranných funkcích, ale je podmíněna kulturně a společensky je velmi složitým rozhodovacím procesem, který je blíže znázorněn na Obr. 36. Z něj je patrné, že v takových situacích obvykle člověk volí oděv tak, aby mu zajistil tepelný komfort ve vnitřním (indoor climate) i vnějším prostředí (atmospheric environment), a aby vyhověl požadavkům aktuální společenské situace a norem (dress code & policies). Ze studie [165] také vyplývá, že pokud je vyžadován striktní dress code klesá variabilita tepelného odporu oděvu mezi jednotlivými jedinci a naopak v situacích, kdy je striktnost nižší variabilita tepelného odporu oděvu roste. Termoregulační chování je tedy v případech striktního dress code potlačováno, což však často vede k zvýšenému požití HVAC systémů a tím i jejich energetické spotřeby.

Místní oděvy a jejich konstrukce dle klimatu

Místní oděvy z místně dostupných materiálů mají optimalizovanou konstrukci a funkcionalitu, která je ověřena mnoha roky užívání v daném prostředí. Konstrukce oděvů také vychází z místně dostupných materiálů a hojnosti jejich zdrojů, neboť před začátkem průmyslové výroby oděvů nebylo možné využívat umělé materiály, či zdroje materiálů, které nebyly v dané lokalitě dostupné (proto byly například inuitské oděvy v Grónsku vyráběny převážně z kůží tuleňů a v Kanadě z kůží soba polárního – byl využit místní zdroj [167]). Navíc uživatelé těchto oděvů měli dlouhodobou praxi s jejich užitím a věděli přesně, jak daný oděv použít. Například oděv Inuitů by dokonale přizpůsoben arktickému klimatu zatímco oděv berberský Tuaregů klimatu pouštnímu. Oproti tomu současné módní oděvy často respektují pouze trendy a „společenské vlny“ a často sledují v návrhu střihu i použitých materiálů zcela jiné cíle než funkcionalitu a ochranu člověka. Samostatným prvkem jsou pak různé ozdobné doplňky a aplikace, jejichž funkce je čistě dekorativní (Obr. 38), popřípadě mají zvýšit atraktivitu či společenský status uživatele/majitele oděvu. Níže jsou uvedeny základní příklady místních oděvů pro specifické klimatické oblasti, kde prostředí definuje konstrukci a parametry oděvů. Jedná se o stručný popis místních oděvů pro oblasti chladné, horké, s vysokou nadmořskou výškou a tropické (horké + vlhké klima).

- **Polární oblasti** – inuitské oděvy viz Obr. 37 vpravo – jsou konstruovány ze zvířecích kožešin a představují svým provedením a tepelným odporem jeden z nejlepších oděvů z pohledu ochrany před extrémně chladným a větrným prostředím (vysoký tepelný odpor až 4 clo), při zachování ještě únosného omezení pohybu [147], [167], [168]. Na obrázku Obr. 37 vlevo je fotografie členů kmene Alakalufů z Ohňové země (Chile), kteří jako oděv užívali kožešiny zvířat, ale bez dalších konstrukčních úprav a optimalizací (tzv. simple clothing [147]). Tato situace však byla kompenzována přizpůsobením jejich termofyziologie chladnému podnebí a je to příklad, kdy díky pasivní adaptabilitě byl nezbytný jen nižší stupeň rozvoje v oblasti aktivní adaptability (nebyl tlak na vyvinutí komplexního oděvu).



Obr. 37 – Příklady místních oděvů pro chladné klima. Vlevo: Oděv kmene Alakalufů z Ohňové země (datováno 1882, zdroj [169]). Vpravo: Oděv Inuitů z Aljašky (datováno 1929, zdroj [170]).

Další příklady materiálů a konstrukcí oděvů pro polární oblasti jsou uvedeny na Obr. 38. Jedná se o moderní verze tradičního oděvu pro ženy z oblasti Kanady, kde je patrné

i dekorativní provedení, které nemá funkční, ale estetický význam. Oděv z kožešiny polárního medvěda byl užíván v Grónsku hlavně v zimě v období polární noci, kdy teploty běžně klesají pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [167]. Oděv také bylo potřeba chránit před promočením a ztrátou izolačních schopností, proto byly používány vrchní oděvy odolné vodě (pláštěnky). Hlavními principy při konstrukci a použití inuitských oděvů bylo: Ochrana před chladem (tepelný odpor a konstrukce oděvu brání úniku tepla), prodyšnost a odvod vlhkosti, voděodolnost, funkcionality a každodenní kontrola a údržba oděvu pro zachování spolehlivosti ochranných funkcí oděvu [167].



Obr. 38 – Vlevo: Inuitský oděv pro ženy z tulení kůže (vlevo) a kůže polárního soba (moderní verze, Kanada). Uprostřed: Vrchní izolační oděv z kožešiny ledního medvěda pro zimní období (Grónsko, 19. stol) a dívčí pláštěnka z tulení kůže (Grónsko). Na obrázcích vpravo a vlevo si lze povšimnout, že některé prvky konstrukce oděvu mají čistě dekorativní funkci, zatím co oděv uprostřed je čistě funkční. Převzato z [167].

- **Pouštní oblasti** – v horkých pouštních oblastech (hlavně Blízký východ a Afrika) se využívají oděvy kompletně zahalující tělo, které chrání kůži před negativním účinkem intenzivního slunečního záření. Častý je také šátek/závoj chránící hlavu a obličej před sluncem, prachem a pískem. Protože v pouštním klimatu je obvyklý velký rozdíl teplot mezi dnem a nocí [171], jsou tradiční oděvy pro pouštní podmínky přizpůsobeny tak, aby umožňovali termoregulační chování a úpravu oděvu podle aktuálních podmínek. Konstrukce, střih a barva těchto oděvů je přizpůsobena tak, aby umožnila přenos tepla do okolí a minimalizovala přednost infračervené složky slunečního záření na pokožku [172], [173].



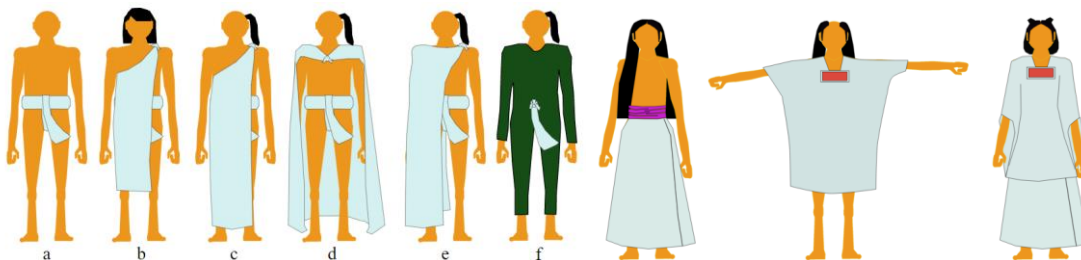
Obr. 39 – Tradiční oděvy pouštních oblastí zleva doprava: Beduínský oděv ze Sinaje (1920), moderní varianta beduínského oděvu (2019), tradiční oděv Tuarežské ženy (Mali, 2007). Převzato z [174], [175].

- **Vysokohorské oblasti** (rovníkové oblasti And – Peru, Bolívie, Chile) – součástí oděvu je pokrývka hlavy (klobouk či čepice) chránící hlavu, obličej a oči před účinky slunečního záření ve vyšších polohách, kde je vyšší intenzita slunečního záření z důvodu menší vrstvy atmosféry. Oděv kryje celý povrch těla a je většinou tvořen minimálně dvěma vrstvami textilních materiálů [176]. Více vrstev umožňuje využití termoregulačního chování a přizpůsobení oděvu aktuálním podmínkám prostředí, což je možné i díky častému využití vrchní vrstvy oděvu v podobě tuniky/ponča, které právě svojí konstrukcí takové změny snadno umožňuje (viz Obr. 40).



Obr. 40 – Vlevo a uprostřed: Kečuánské oděvy oblasti And v Bolívii a Peru (současnost). Vpravo: Mapučský oděv z jižní části Chile (konec 19. stol). Převzato z [177], [178].

- **Střední Amerika** – místní oděvy byly konstruovány pro horké a vlhké podnebí. Na Obr. 41 jsou střihy oděvů užívaných Aztéky v předkolumbovské době, kdy střih a typ oděvu určoval hlavně postavení uživatele ve společnosti či příležitost/účel oděvu. Konstrukce oděvu pro civilní a společenské užití byly jednoduché, minimálně kryjící tělo s cílem umožnit maximální přenos tepla do okolí v horkém klimatu. Skládaly se většinou z bederního pásu a pláště. Oděv pro válečné výpravy pak porývaly většinu těla, z čehož lze usuzovat, že měly i funkci ochrany před zraněními způsobenými bojem.



Obr. 41 – Střihy oděvů v Aztécké říši určovali postavení uživatele a činnost, kterou bude vykonávat. Vzhledem k podnebí nemusel střih oděvu zohledňovat ochranu před prostředím. Střihy oděvů pro a) děti a mládež, b) běžné použití střední vrstvy, c) slavnostní oděv válečník/vojáka, d + e) vládnoucí třída a kněží f) válečný oděv pro vojáky. Vpravo: tři základní střihy oděvů pro ženy. Převzato ze [179].

- **Tropické oblasti** - (Amerika, Afrika, Andamanské ostrovy, Sundské ostrovy a Oceánie) – klima v okolí rovníku je natolik teplé a stabilní, že je možný pobyt venku bez oděvu prakticky celý rok. Kmeny a etnika původních obyvatel v Amazonii, Pygmejové a Křováci v Africe či příslušníci kmenů na Andamanech, Sundách a Nové Guinei používali jen

minimální oděv, většinou kryjící pouze genitálie či oblast pánve nebo žádný oděv (viz Obr. 42.). Vzhledem k bujné vegetaci v tomto klimatickém pásmu, nebyla nezbytná funkce oděvu v podobě ochrany kůže před slunečním zářením (tak jako na pouštích), neboť vegetace kryla prakticky celý povrch krajiny a poskytovala dostatek možností ukrytí se ve stínu a ochrany před sluncem.



Obr. 42 – Pygmejové (Kongo, Afrika, 1942), Aravakové (Surinam, Jižní Amerika, 1880), Papuánci z Nové Guineje (1900). Převzato a upraveno z [180]–[182].

3.2.2 Oděvy pracovní a ochranné

Pracovní oděvy souvisejí s výkonem jistého povolání, anebo činnosti a 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.) Dále uvedené příklady skupiny pracovních oděvů jsou roztrženy z pohledu konstrukce, použitých materiálů a prostředí pro, které se oděvy používají.

- **Oděvy chránící před konvektivním teplem/chladem a tepelnou radiací** – jsou tvořeny materiály, které poskytují ochranu před zvýšeným přenosem tepla z okolí do lidského těla (a obráceně), kombinují materiály s vysokým tepelným odporem a povrchové materiály s vhodnou emisivitou povrchu (Obr. 43 vpravo). Jsou to například oděvy pro slévače, pro chladné prostředí, hasičské a záchranářské oděvy atd. Používají se průmyslově vyráběné textilní materiály v kombinaci s přírodními materiály (kůže) na funkčních částech oděvu např. na rukavicích (Obr. 43 uprostřed). Hlavně povrchové materiály musí být odolné vůči vysoké/nízké teplotě a mít nízkou akumulaci tepla. Ta je důležitá hlavně při výskytu vysokého přenosu tepla radiací, kdy může dojít k nebezpečím popálení pokožky při kontaktu s ochranným oděvem, které nastane při změně polohy člověka a vytlačení izolační vrstvy vzduchu mezi oděvem a tělem člověka [183], [184]. Oděvy pro hasiče jsou často doplněny o reflexní prvky usnadňující lokalizaci hasiče v místech s nedostatkem světla nebo v zakouřeném prostoru s nízkou viditelností (Obr. 43 vlevo).



Obr. 43 – Vlevo: haličský oděv Tiger používaný HZS ČR (archiv autora). Uprostřed: speciální rukavice pro práci v mrazárnách, kontaktní chlad při teplotách -15 až -20 °C (archiv autora). Vpravo: ochranný oděv pro zásahy s intenzivním radičním přenosem tepla (stříbrný povrch oděvů má nízkou emisivitu a tím snižuje přenos tepla radiací). Převzato z [185].

- **Oděvy chránící před biologickou kontaminací** – oddělují člověka od okolního biologicky kontaminovaného prostředí, přičemž míra pokrytí těla oděvem a izolace od okolí je úměrná míře nebezpečí biologické kontaminace prostředí. Oděv je většinou doplněn rukavicemi a botami pro ochranu končetin. Dýchací cesty se chrání respirátorem/filtrační maskou, oči a obličej pak štítem či brýlemi. Oděv musí být možné svléci a zlikvidovat nebo odeslat na dekontaminaci bez nebezpečí kontaminace pracovníka z povrchu oděvu. Tyto typy oděvů byly zvláště důležité v době psaní této práce (roky 2020/2021), kdy probíhá pandemie nemoci COVID-19 (viz Obr. 44). Opačný účel pak plní oděvy do čistých prostor, které snižují kontaminaci čistého prostoru částicemi, které produkuje člověk (prachové částice, biologické částice viz Obr. 44 vpravo).



Obr. 44 – Vlevo: Ochranný jednorázový oděv pro biologicky kontaminované prostředí – měření vlastností na tepelném manekýnovi Newtonovi (archiv autora). Uprostřed: Ochranný oděv proti biologické kontaminaci využívaný na odběrových místech pro testování na COVID-19. Vpravo: Detail opakovaně použitelného oděvu do čistých prostor s ochranou očí a dýchacích cest. Převzato z [186], [187].

- **Oděvy chránící před chemickými látkami** – oděvy musí být z materiálů odolných k působení chemických látek a kompletně oddělovat lidské tělo od okolí. Kombinují se

s plynovými maskami či dýchacími přístroji, které chrání dýchací cesty před toxickými účinky nebezpečných látek. Jsou doplněny o rukavice a boty, které jsou vyrobeny z materiálů odolávajících nebezpečným chemickým látkám a konstrukčně jsou přizpůsobeny tak, aby bylo možné jejich těsné napojení na hlavní oděv. Oděvy jsou obvykle konstruovány jako znovupoužitelné umožňující kompletní dekontaminaci všech částí oděvu, ale i jako jednorázové (viz Obr. 45.)



Obr. 45 – Vlevo: Ochranný opakovaně použitelný protichemický oděv OPCH. Vpravo: Jednorázový oděv Tychem-F. Měření vlastností na tepelném manekýnovi Newtonovi (archiv autora).

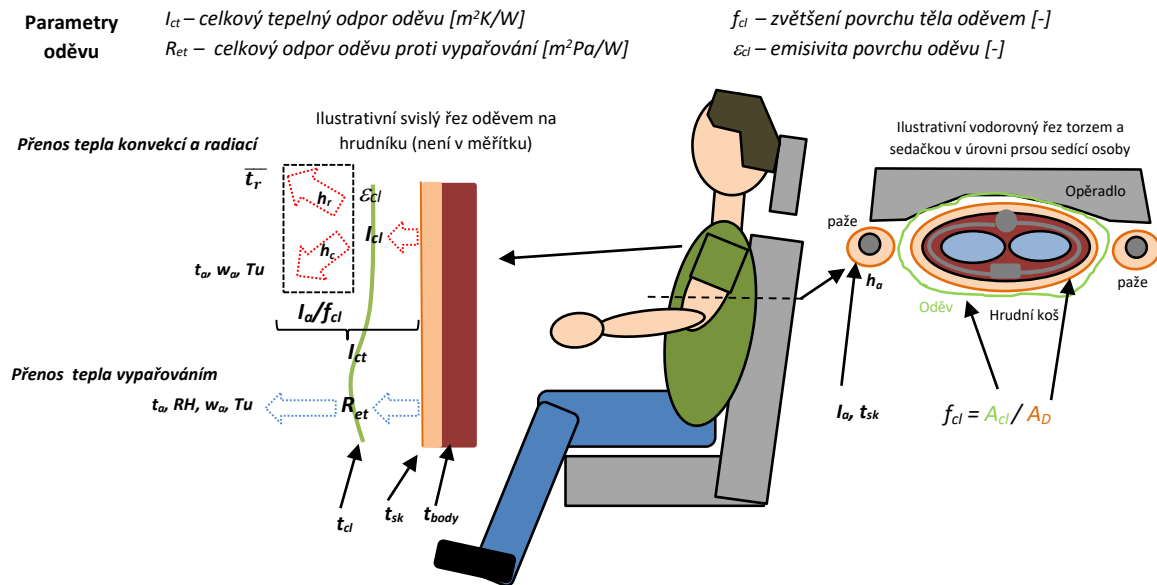
- **Oděvy chránící před ionizujícím zářením** – obsahují materiály poskytující efektivní stínění vůči ionizujícímu záření především prvky s vysokým atomovým číslem (olovo, kadmium, ocel a další kovy). Zásadním limitem je váha těchto oděvů vzhledem k vysoké hustotě těchto prvků [188]. V posledních letech se v této oblasti rozvíjí směr nových typů kompozitních textilních materiálů (viz Obr. 46) využívajících netkaných textilií jako nosiče pro materiály poskytující účinné stínění [189]. Oděvy jsou využívány především v lékařství pro ochranu pacientů a pracovníků v oblasti nukleární medicíny a diagnostiky (viz Obr. 46). Samostatným oborem je využití těchto oděvů v kosmickém výzkumu, kde je potřeba ochrana lidského těla před radiací z vesmíru [190].



Obr. 46 – Vlevo: Klasický oděv pro ochranu trupu před ionizujícím zářením využívaný pro lékařské účely. Vpravo: Speciální oděv konstruovaný z kompozitních materiálů zabezpečujících radiační ochranu. Oděv je odvozen od vesmírného skafandru, ale je určen pro pozemní použití. Převzato z [189], [191].

3.2.3 Parametry oděvů určující přenos tepla oděvem

Pro popis základních vlastností/parametrů oděvů z pohledu přenosu tepla se používají parametry a koeficienty jako tepelný odpor oděvu I_c , odpor proti vypařování R_{et} , součinitel zvětšení povrchu oděvem f_{cl} a vlastnosti povrchu. Blíže viz tyto parametry znázorněny a popásány na Obr. 47.



Obr. 47 - Bližší znázornění základních veličin pro popis vlastností oděvu z pohledu přenosu tepla mezi tělem a okolím. Nákres je pouze ilustrativní.

Tepelný odpor oděvu – I_c - je hlavní parametrem při určení přenosu tepla z povrchu oblečeného člověka do okolí prostřednictvím konvekce a radiace. Vyjadřuje tepelný odpor oděvu, vrstev vzduchu zachycených v oděvu a odpor pro přenos tepla z povrchu oděvu do okolí. Podle toho, jaké odpory jsou započteny do výsledného tepelného odporu oděvu rozlišujeme:

- I_a – tepelný odpor mezní vrstvy (air thermal insulation), který zahrnuje tepelný odpor přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu neoblečeného člověka/manekýna.
- I_{ct} – celkový/totální tepelný odpor oděvu (total thermal insulation), který zahrnuje tepelný odpor oděvu a tepelný odpor pro přenos tepla konvekcí a radiací z povrchu oděvu do okolí.
- I_{cl} – základní/vlastní tepelný odpor oděvu (intrinsic thermal insulation), který zahrnuje tepelný odpor všech vzduchových vrstev pod oděvem a tepelný odpor mezní vrstvy I_a přepočítaný dle vnější plochy povrchu oděvu.
- I_{cle} – efektivní/účinný tepelný odpor oděvu (effective thermal insulation), který zahrnuje vzduchové vrstvy pouze v oděvu a jeho vrstvách. Hodnota vyjadřuje přírůstek tepelného odporu na povrchu těla při použití oděvu oproti stavu bez oděvu.

Tepelný odpor oděvu se uvádí v základním rozměru m^2K/W nebo pomocí jednotky clo , kde $1\ clo = 0.155\ m^2K/W$. Oděv odpovídající $1\ clo$ byl zaveden ve čtyřicátých letech 20. století pro popis termoizolačních vlastností oděvů [192] a přibližně odpovídal pánskému oděvu užívanému v zimním období ve vnitřních prostorách budov (sako, vesta, košile s dlouhým rukávem, kalhoty, spodní prádlo, boty), při jehož užití by mělo být dosaženo tepelné rovnováhy mezi sedícím člověkem a okolím s operativní teplotou $21\ ^\circ C$ [193], [194].

Jak měřit: Základní měřicí metoda pro určení tepelného odporu textilních souvrství je metoda založená na metodě guarded hot plate (viz Obr. 48 vpravo). Ta však nezohledňuje blíže všechny vlivy stříhu a nehomogenit vzduchových vrstev vzniklých při reálném užití oděvu [195]. Blíže hodnotě tepelného odporu oděvu při použití v reálných podmínkách je měření pomocí tepelného manekýna [20]. Povrch manekýna je vyhříván na uniformní povrchovou teplotu t_{sk} , která by měla být minimálně o $12\ ^\circ C$ vyšší než teplota okolí t_a (kde platí, že teplota vzduchu $t_a = t_r$) a manekýn musí být vybaven systémem na měření hustoty tepelného toku \dot{Q} [W/m^2] z jednotlivých částí manekýna. Tepelný odpor mezní vrstvy I_a proti přenosu tepla konvekcí a radiací na povrchu neoblečeného manekýna lze vyjádřit jako:

$$I_a = \frac{t_{sk} - t_a}{\dot{Q}} = \frac{1}{h_{sk} + h_r} = \frac{1}{h_a} \quad (3.1)$$

Celkový/totální tepelný odpor oděvu I_{ct} (m^2K/W) na oblečených částech je definován vztahem:

$$I_{ct} = \frac{t_{sk} - t_a}{\dot{Q}} \quad (3.2)$$

Základní/vlastní tepelný odpor oděvu I_{cl} je pak určen z celkového tepelného odporu oděvu I_{ct} zmenšeného o tepelný odpor mezní vrstvy na povrchu neoblečeného manekýna I_a , přepočtený na vnější povrch oděvu pomocí faktoru zvětšení povrchu oděvem f_{cl} :

$$I_{cl} = I_{ct} - \frac{I_a}{f_{cl}} = \frac{t_{sk} - t_a}{\dot{Q}} - \frac{1}{h_a \cdot f_{cl}} \quad (3.3)$$

Efektivní tepelný odpor I_{cle} je určen rozdílem celkového tepelného odporu a odporu mezní vrstvy změřené na neoblečeném manekýnovi.

$$I_{cle} = I_{ct} - I_a = \frac{t_{sk} - t_a}{\dot{Q}} - \frac{1}{h_a} \quad (3.4)$$

Měření odporu oděvu může být provedeno na statickém manekýnovi či pohyblivém manekýnovi (označení výsledných hodnot přídomkem „výsledný“/ „resultant“). Obecně platí, že tepelný odpor oděvu měřený na statickém manekýnovi je větší než na pohyblivém, protože při pohybu dochází k změnám vzduchových vrstev v oděvu a výsledný tepelný odpor je menší, ale blíže hodnotě při reálném použití oděvu (zahrnutí pohybu při dané činnosti a proudění vzduchu okolo postavy v reálném prostředí) [20], [196]. Pohyblivý manekýn je však finančně extrémně drahé měřicí zařízení, které je řádově složitější na provoz a údržbu než statický manekýn. Podrobný popis pro měření tepelných vlastností oděvů je uveden v normě a ČSN EN ISO 9920 Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelné izolace oděvu a odporu oděvu proti odpařování, kde lze nalézt i přepočte statických hodnot na hodnoty výsledné.

Z praxe: Pokud jsou přebírány hodnoty tepelného odporu oděvů z literatury, je potřebné se vždy ujistit, zda se jedná o celkový (totální) I_{ct} nebo základní/vlastní I_{cl} tepelný odpor oděvu

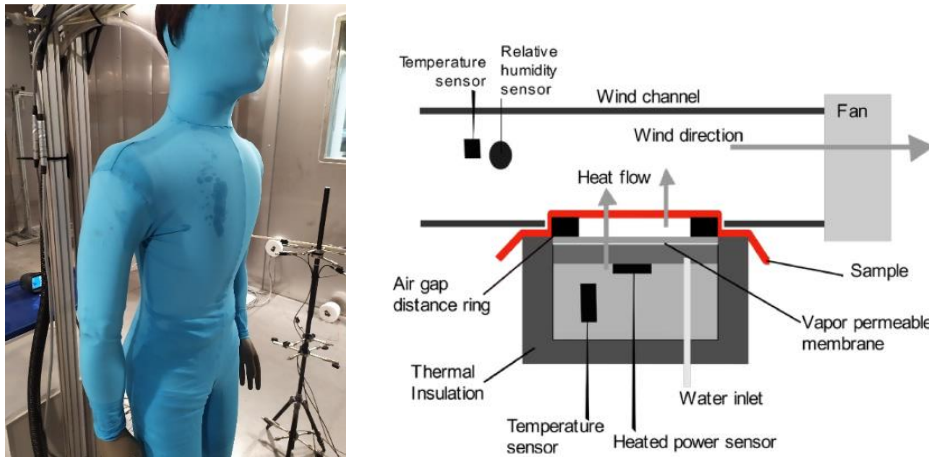
a zda jsou hodnoty získané z měření na statickém či pohyblivém manekýnovi [197]. Přepočtové vztahy mezi celkovými (statický manekýn) a výslednými (pohyblivý manekýn) hodnotami tepelného odporu lze nalézt v normě ISO 9920. V literatuře se lze většinou setkat s tepelným odporem oděvu, který je definován jako jedna hodnota pro celé tělo. Tato hodnota „globálního“ odporu oděvu je určována z dat naměřených na manekýnovi a to sériovou či paralelní metodou výpočtu (ISO 15831), přičemž metoda paralelní se stále více prosazuje jako metoda základní. Její výhoda je především v tom, že lépe popisuje globální tepelný odpor i u oděvů, kde může být větší rozdíl mezi tepelnou izolací jednotlivých částí/segmentů těla [88], [198]. Jelikož se oděvy na různých částech těla mohou značně lišit (nejvíce bývá zpravidla izolován trup, nejméně pak obličej či dlaně) je v posledních letech spíše tendence uvádět lokální tepelné odpory pro jednotlivé zóny těla (např. paže, nohy, chodidla, trup, hlava atd.) [89], [199], [200]. Toto detailnější dělení je také nutné pro vícesegmentové modely tepelného pocitu a komfortu (blíže viz kapitola 5.2).

Vypařovací odpor / Odpor oděvu proti vypařování – R_{et} vyjadřuje odpor oděvu vůči transportu páry mezi povrchem pokožky a okolím. Obvykle se označuje jako R_{et} s jednotkou m^2Pa/W . Jednovrstvý bavlněný oděv má R_{et} cca v řádu desítek, neprodyšný izolační ochranný oděv v řádu stovek až tisíců m^2Pa/W [199]. Pro odpor proti vypařování platí stejné vztahy jako pro tepelný odpor, jenom s tím rozdílem, že řídicí diferencí není rozdíl teplot, ale rozdíl parciálních tlaků vodní páry ve vzduchu. Dále je uveden základní postup pro určení celkového odporu proti vypařování, ostatní odpory jsou poté analogické s odpory tepelnými.

Jak měřit: Základní měřicí metoda je podobně jako u tepelného odporu založena na metodě guarded hot plate ovšem s doplněním o vlhčení prostředí pod textilním souvrstvím. Příkladem přístroje na tomto principu je zařízení s označením Permetest [172] (viz Obr. 48). Metoda má však stejné limity pro užití jako u měření tepelného odporu, a proto se v posledních letech využívá tepelných manekýnů, kteří však musí být vybaveni speciálním overalem a systémem pro zvlhčování povrchu vodou. Tento systém primárně slouží pro simulaci přenosu tepla pocením, ale lze jej nastavit i pro měření výparného odporu [196], [201]. Povrch manekýna je vyhříván na uniformní povrchovou teplotu t_{sk} (obvykle 34 °C) a zároveň je navlhčován tak, aby při dané teplotě byla relativní vlhkost vzduchu v blízkosti povrchu manekýna co nejbližší hodnotě 100 %. Okolí manekýna je udržováno na parametrech: teplota vzduchu t_a shodná se střední radiační $t_r = 34$ °C a relativní vlhkosti, která je cca poloviční oproti RH u povrchu manekýna. Tímto postupem jsou potlačeny na minimum suché tepelné ztráty z povrchu manekýna, neboť $\Delta t \approx 0$ °C a zůstává tak pouze rozdíl v parciálních tlacích vodní páry na povrchu manekýna a v okolním vzduchu. Veškerý tepelný tok \dot{Q} [W/m^2], který je manekýnem dodáván a měřen na jednotlivých segmentech, je tedy využit jako zdroj tepla pro „adiabatické“ odpaření vody a pak lze celkový vypařovací odpor R_{et} [m^2Pa/W] vyčíslit jako

$$R_{et} = \frac{P_s - P_a}{\dot{Q}} \quad (3.5)$$

Z praxe: Vypařovací odpor lze měřit i pomocí tepelného manekýna bez potíciho systému, pokud je doplněn o navlhčovací overal a je možné umístit jej do klimakomory s přesně kontrolovanou teplotou a vlhkostí (viz Obr. 48).



Obr. 48 – Vlevo: Tepelný manekýn Newton s vlhčícím overalem, umístěný v klimatické komoře po dokončení vlhkých testů oděvu (oděv svlečen). Místa s tmavší modrou barvou mají vyšší vlhkost než s barvou světlou (zdroj archiv autora). Vpravo: Princip měření výparného odporu na přístroji Permetest. Převzato z [202].

Pokud jsou teplota povrchu manekýna a okolního vzduchu prakticky stejné je přenos tepla konvekcí a radiací zcela minimální. Pokud je však zachován dostatečný koncentrační spád mezi povrchem manekýna (100 % RH) a okolím (například 40 % RH), lze z tepelného příkonu jednotlivých segmentů vyjádřit vypařovací odpor oděvu dle rovnice 3.5. Jelikož se ale jedná o dynamický děj a množství vody v overalu je omezené, je u prodyšných oděvů omezená délka měření na cca 20 minutový časový interval (u neprodyšných oděvů je interval i několikanásobně delší). To klade zvýšené nároky na rychlost obléčení měřeného oděvu a zkušenosti pracovníků provádějících měření. Vzhledem k obtížnosti navlékání navlhčeného overalu na manekýna je také většinou nutná spolupráce alespoň dvou osob. Na podrobné implementaci této metody v laboratoři pracoval Ing. Róbert Toma pod odborným vedením autora. Výsledky jeho práce na toto téma lze nalézt v publikacích [199], [203], [204].

Součinitel zvětšení povrchu těla oděvem / plošný faktor oděvu – je bezrozměrný součinitel udávající zvětšení povrchu lidského těla oděvem a tím i zvětšení plochy pro přenos tepla na povrchu oděvu. Určí se z podílu povrchu oděvu A_{cl} [m^2] ku povrchu lidského těl A_D [m^2].

$$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A_D} \quad (3.6)$$

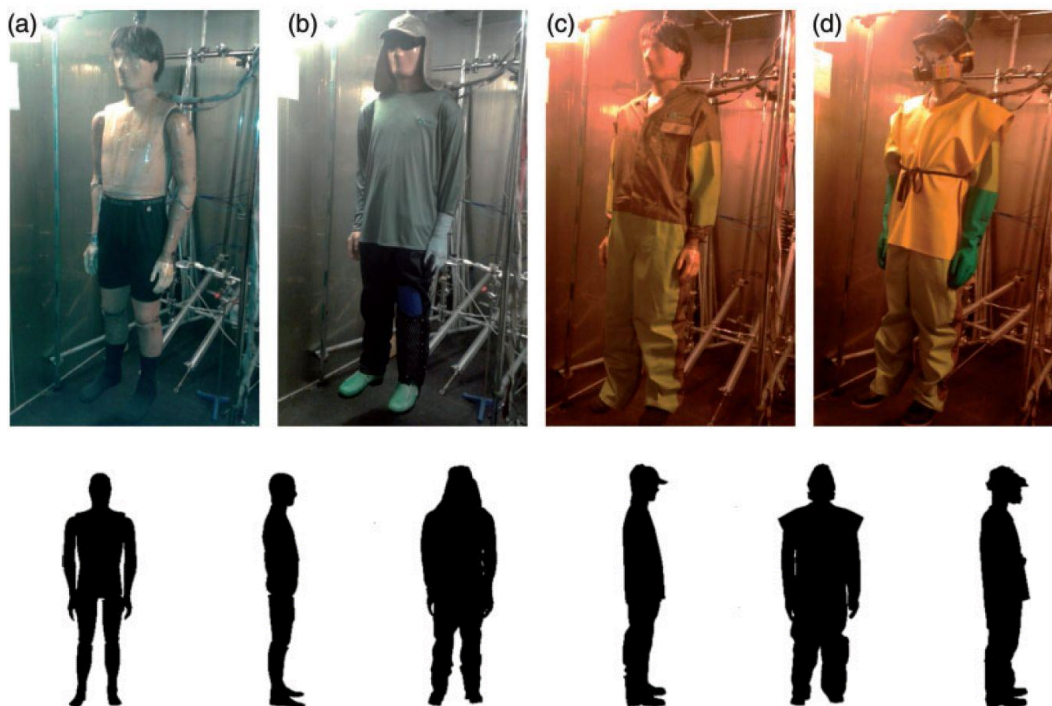
Povrch lidského těla je určován obvykle z DuBoisova vztahu, kde m je hmotnost osoby [kg] a l je výška osoby [m] [20].

$$A_D = 0.202m^{0.425}l^{0.725} \quad (3.7)$$

Jak měřit: V praxi lze využít metodu založenou na měření odvodů nahé a oblečené figury, fotografickou metodu [203] nebo velmi sofistikovanou metodu určení povrchu oděvu na základě 3D skenu oblečené a neoblečené postavy [89], [205].

Z praxe: Ukázka použití fotografické metody na určení plošného faktoru oděvu f_{cl} je uvedena na Obr. 49, kdy se jednalo o určení faktoru u tvarově atypických oděvů pro pracovníky sklízející cukrovou třtinu v oblastech střední Ameriky [203]. Pro výpočet faktoru byly použity záběry na manekýna v úhlu 0° (zepředu) a 90° (z boku) a fotografie byly následně zpracovány na

jednobitovou hloubku (pouze barva černá nebo bílá). Plošný faktor byl určen jako podíl počtu černých pixelů průmětu postavy s oděvem ku počtu černých pixelů v průmětu bez oděvu [206].



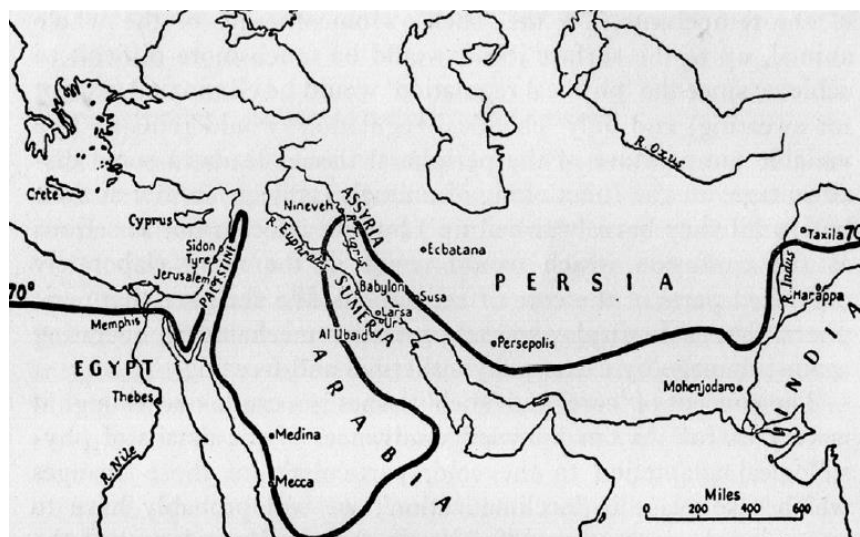
Obr. 49 – Horní řada: Manekýn Tore bez oděvu (a), s oděvy pro sekáče cukrové třtiny (b) a s kompletním oděvem pro aplikaci pesticidů (d). Dolní řada: Průměty manekýna pro případy a), b) a d) získané fotografickou metodou. Fotografie byly pořízeny zepředu (úhel 0°) a z boku (úhel 90°). Převzato ze [203].

Emisivita povrchu oděvu – obvykle se označuje písmenem řecké abecedy ϵ_{cl} a je obecně definována jako „poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Emisivita tak určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo.“ Hodnota emisivity je závislá například na úhlu odklonu od normály povrchu, teplotě objektu, vlnové délce, barvě povrchu, struktuře povrchu atd. [207]. Dle Kirchhoffova zákona pro černá tělesa je emisivita rovna absorptivitě a její velikost tedy vypovídá nejen o schopnosti povrchu vyzařovat, ale i absorbovat tepelnou radiaci. Povrchy s vysokou emisivitou tedy tepelnou radiaci dobře pohlcují/vyzařují. Povrchy s nízkou emisivitou se používají například u hasičských oděvů pro zásahy v blízkosti požárů, kde je obvyklý vysoký tepelný tok radiací (viz Obr. 43 vpravo) s cílem minimalizovat přenos tepla radiací do oděvu.

Jak měřit: Obvykle se měření povrchové emisivity provádí pomocí měření povrchové teploty termokamerou a kontaktním senzorem, nebo měřením příkonu pro udržování vzorku na konstantní povrchové teplotě při měření ve vakuové komoře. Nepřímé měření emisivity bylo také provedeno v diplomové práci M. Fojtlína, jejíž hlavní výsledky byly publikovány v [208] (blíže viz kapitola 6.4.2).

3.3 Kreativní adaptabilita

V dřívějších stupních vývoje společnosti, kdy byly omezené zdroje energie i surovin, převládal jednoznačně způsob aktivní adaptace na dané podmínky a lidé a jejich civilizace se rozvíjely hlavně v oblastech, kde bylo vhodné klima (viz Obr. 50). S postupným vývojem společnosti, techniky a dostupnosti energetických zdrojů, však začalo být možné přejít k využití postupů kreativní adaptability, kam patří postupy a technika pro případ, kdy dané podmínky prostředí neumožňují přizpůsobení se pomocí aktivní adaptability.

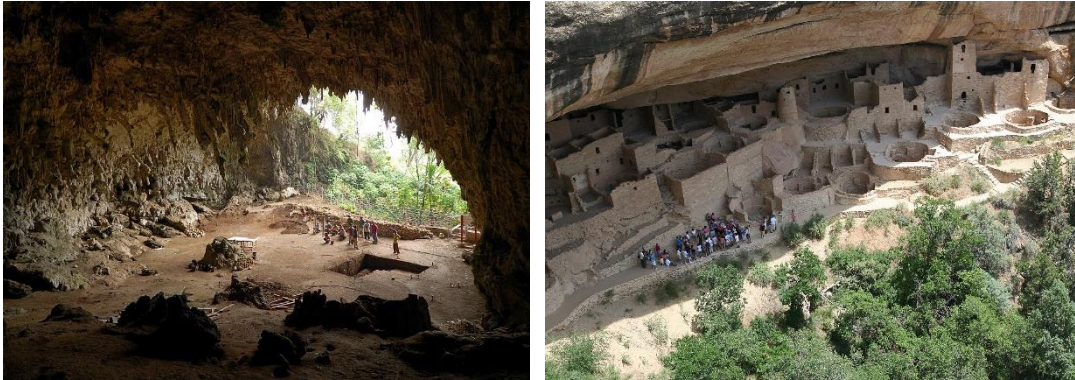


Obr. 50 – Klimatická izoterma 21 °C (vyznačená jako 70 °F) a oblasti, kde se na blízkém východě rozvinuly první civilizace. V takovém prostředí nemusí člověk vynakládat příliš mnoho zdrojů na udržení optimální tělesné teploty a nemusí pro přežití nutně využívat postupy kreativní adaptability. Převzato z [7], [84].

Mezi postup kreativní adaptability patří vytváření tzv. vnitřních prostředí oddělených od vnějšího prostředí konstrukcí či obálkou, ve kterých lze aktivně ovlivňovat/řídít parametry prostředí a přizpůsobovat je pro potřeby člověka nebo určité technologie. K případům, kdy je nezbytně až životně nutné zajistit optimální podmínky prostředí patří stavy, kdy je například lidské tělo těžce zasaženo nemocí, má být vykonán složitý a manuálně precizní výkon (čisté prostory operačního sálu) nebo lidské tělo není schopné čelit parametrů okolního prostředí a jejich změnám (např. neonatologický inkubátor pro nedonošené děti, přetlaková kabina letadla pro lety ve vysokých nadmořských výškách, kabina kosmické lodi atd.). Specifickým případem je pak prostředí všem lidem velmi blízké a to prostředí jejich soukromých obydlí. Prostor v nich by mělo odpovídat podmínkám, v kterých je možná běžný rodinný život, zábava, práce spojené s provozem domácnosti, kvalitní relaxace a obnovení sil v průběhu spánku. Obydlí poskytují tedy prostředí s optimálními parametry pro lidskou termofyziologii bez nutnosti využívat příliš tepelně izolující oděv, ale také poskytují prostor pro soukromý a pocit jistoty nutný pro každého jedince dle Maslowovy pyramidy potřeb – 2. úroveň (viz Obr. 1). Pokud naopak prostředí v obydlích není optimální (např. při letní vlně veder) vede to k nedostatku kvalitního odpočinku, snížení pracovního výkonu a kvality práce v následujícím dni (viz kapitola 2.6). Kvalita vnitřních prostředí, je tedy pro rozvinuté společnosti důležitým parametrem ovlivňujícím chod a efektivitu celé společnosti.

3.3.1 Přístřeší, stavby a kabiny

Dle [35] je zjevné, že venkovní prostředí si nelze technickými prostředky přizpůsobit pro potřeby člověka, proto člověk vytváří vnitřní prostředí, která jsou nějakou konstrukcí oddělena od prostředí vnějšího, a v takto prostorově vymezeném prostředí je poté možné udržovat a řídit parametry prostředí. Již od začátku člověk využíval přirozená přístřeší (skalní převisy, jeskyně atd. viz Obr. 51), později začal stavět i různé stavby, chránící před nepříznivými účinky okolního prostředí na tepelnou bilanci a vitalitu těla jako byl vítr, déšť, nízké/vysoké teploty, intenzivní sluneční záření atd.



Obr. 51 – Příklady využití jeskyní a převisů jako ochrany před účinky prostředí. Vlevo: Jeskyně Laing Bua na ostrově Flores, kde byly odkryty pozůstatky člověka floreského. Vpravo: Zbytky puebla Cliff palace v údolí Mesa verde (Colorado, USA) využívající skalní převis k ochraně budov před intenzivním slunečním zářením. Převzato z [209], [210].

Pro tyto stavby byly nejprve používány přírodní materiály přítomné v daném prostředí a zpracovatelné dostupnou technikou. Na Obr. 52 jsou uvedeny dva typy obydlí s jednoduchou konstrukcí vycházející z omezených zdrojů a jednoduššího stupně rozvoje sopečností, které je využívaly. Ačkoliv se tato obydlí mohou z dnešního pohledu jevit primitivní, byla vždy vybavena základními systémy pro zajištění výměny vzduchu = větrání (různé otvory, klapky) a úpravu vnitřní teploty = vytápění (ohniště, kouřovody, komíny). Jejich obyvatelé také uměli tato obydlí patřičně používat a udržovat, neboť na jejich správné funkčnosti často přímo záviselo jejich zdraví a život.



Obr. 52 – Přístřeší budovaná z lokálně dostupných materiálů. Vlevo: Inuitské iglú budované z kvádrů sněhu (počátek 20. století). Vpravo: Wigwam severoamerických Apačů. Kostra z větví pokrytá krycím materiálem z trávy, kůry, rákosí atd. (1903). Převzato ze [170], [211].

Na vyšším stupni organizace společnosti, v prostředích s bohatšími zdroji materiálů, rozvinutější technikou a dostatkem energetických zdrojů lze realizovat obydlí a stavby, které jsou svojí konstrukcí a náročností provedení podstatně složitější (viz Obr. 53) než obydlí na předchozím obrázku (viz Obr. 52). Podstata obydlí však zůstává stejná, zásadně se však liší vnitřní vybavení a další funkce, které obydlí poskytuje svým uživatelům. Je to například rozvod pitné vody (pití, vaření, sanitární účely), rozvod elektřiny (světlo, teplo, komunikační technologie, jiné technologické účely), odvod odpadů, transport v budově a samozřejmě funkce HVAC = větrání, vytápění a klimatizace. Stejně jako u oděvů (viz kapitola 3.2.1) však postupně s rozvojem společnosti došlo i u staveb a obydlí k vývoji sekundárních funkcí, kdy vzhled, velikost, použité materiály, vybavení či umístění stavby reprezentuje status jejího uživatele/majitele.



Obr. 53 – Vlevo: Rodinné domy v Nizozemí konstruované dle zásad nízkoenergetické výstavby. Vpravo: Mrakodrap Burdž Chalífa v Dubaji, nejvyšší obytná budova na světě s výškou 828 m. Budova integruje nejen prostory pro bydlení, ale i obchod, kanceláře, restaurace, hotel a další služby. Převzato ze [212], [213].

Speciálním případem vnitřního prostředí jsou kabiny dopravních prostředků, které zažily dramatický rozvoj především v 19. a 20. století s nástupem dopravy založené na využití strojů poháněných tepelnými motory (vlak, dálková loďní doprava, automobilismus, letectví). Kabiny dopravních prostředků podobně jako budovy poskytují pro své uživatele ochranu před účinky okolního prostředí, ale také komfort a další služby využitelné po dobu použití kabiny. Ochranná funkce je zvláště důležitá u kabin dopravních letadel a vesmírných lodí neboť prostředí, v kterém se tyto dopravní prostředky pohybují, není slučitelné s životem člověka. Z toho pak následně plyne i složitost HVAC systémů pro řízení prostředí v těchto kabinách.

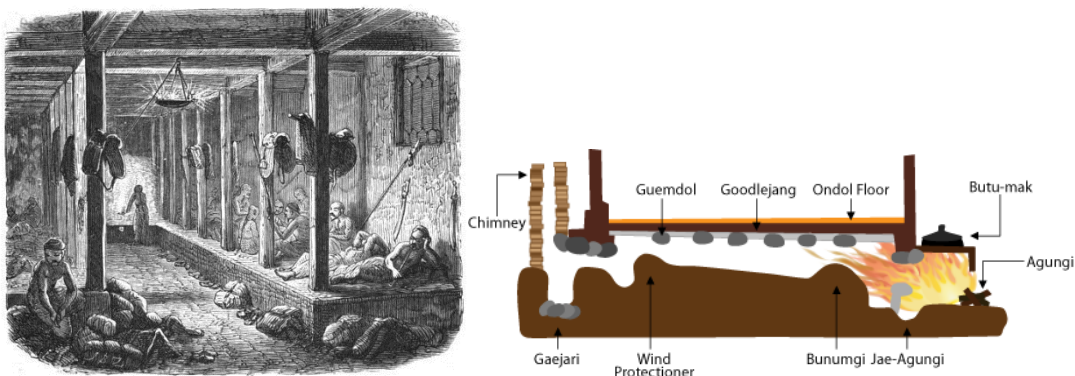


Obr. 54 – Vlevo: Kabina dopravního letadla Boeing 737 v uspořádání pro turistickou třídu. Vpravo: Záběr na sedadlo řidiče v kabině osobního vozu Škoda Octavia III. generace. Převzato ze [214], [215].

3.3.2 Úprava vnitřního prostředí – HVAC systémy

Kvalitu vnitřního prostředí z pohledu míry tepelného komfortu obecně posuzujeme podle základních parametrů, které modifikují přenos tepla mezi tělem a okolím. HVAC systém tedy v základu musí být 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 (blíže viz kapitola 2.3).

Historicky první doložená technologie/postup pro kreativní úpravu parametrů prostředí bylo využití ohně pro regulaci teploty prostředí (lze ovlivnit: teplotu vzduchu t_a , střední radiční teplotu t_r , teplotu povrchů t_{surf}). Oheň je projevem prudké oxidace paliva vzdušným kyslíkem, která se obecně nazývá „spalování“. Jedná se o exotermickou chemickou reakci, která uvolňuje energii v podobě tepla a světla [216]. Doklady o pravidelném užití ohně v podobě tepelně zpracovaných kamenných nástrojů a technologie pro rozdělování ohně třením pochází z míst obývaných lidmi v Africe v období cca 120 tisíc let př.n.l. [217], [218]. 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 „vyhříváná 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. [219]. Oba systémy se skládaly z venkovního ohniště, z kterého byly spaliny vedeny pod vyvýšeným podiem určeným k odpočinku, sušení oděvů a spánku (kang – Čína viz Obr. 55 vlevo) nebo pod podlahou celé obytné místnosti (ondol – Korea viz Obr. 55 vpravo). Na stejném principu pak fungovalo i hypokaustum (v překladu „spodní topení“) instalované v domech bohatých obyvatel antického Řecka/Římské říše a také v lázních (viz Obr. 56 vlevo). Nejstarší doložené instalace jsou datovány do 4. století př.n.l. [219], [220]. Po pádu Říše římské byla technologie hypokaustového vytápění ve středověké Evropě prakticky zapomenuta a k vytápění a přípravě jídel v obydlích byl využíván až do konce 17. století hlavně otevřený oheň v krbu či otevřená ohniště s dýmníkem velkého průřezu nad ohništěm (viz Obr. 56 vpravo). V Asii se v té době dále rozvíjelo využití ondol vytápění, které se stalo široce využívaným [220].



Obr. 55 – Vlevo: Vyvýšené vyhřívání podium sloužící pro odpočinek, sušení oděvů a spánek zvané kang. (Čína konec 19. stol.) Vpravo: podélný řez podlahové vytápění označovaným jako ondol z oblasti Korejského poloostrova. Převzato ze [221], [222].

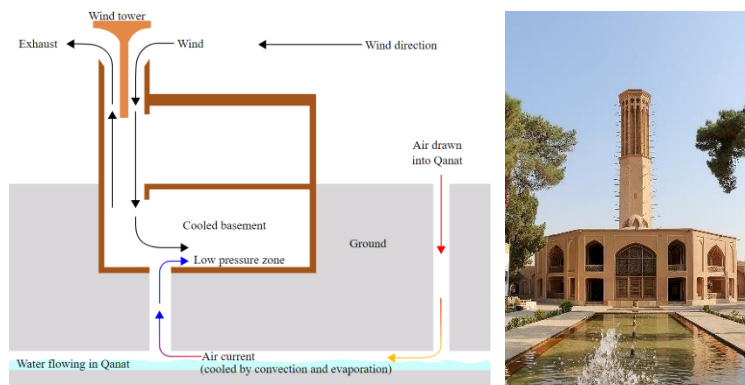


Obr. 56 – Vlevo: spodní část hypokaustového vytápěcího systému z římské vily. Oblast Caen, Francie. Převzato z [223]. Vpravo: místnost nazývaná černá kuchyně (podle barvy stěny zčernalých od sazí a kouře) s otevřeným ohništěm a velkým sopouchem pro odvod kouře do komína (hrad Kost, ČR, archiv autora).

Nový rozvoj vytápěcích systémů s využitím ohně jako zdroje tepla nastal v 18. a 19. století v Evropě a USA. V roce 1742 zkonstruoval Benjamin Franklin (jeden z „otců zakladatelů“ USA) vylepšenou verzi krbu s kovovou vložkou, zvyšující účinnost krbu a lépe chránící před průniky kouře do místnosti [220]. Jednalo se však stále víceméně o otevřené topeniště, které neumožňovalo dosažení vyšší teploty spalování. Přibližně ve stejnou dobu se ve Francii začaly vyvíjet první typy uzavřených topenišť překrytých perforovaným plechem, což byl konstrukční základ pro pozdější první sporáky a kamna. Spalovací prostor topeniště tak byl opět plně oddělen od vnitřního prostoru, což zlepšilo především účinnost vytápění a prakticky zamezilo průniku kouře do místnosti [224]. Devatenácté století bylo v Evropě i USA ve znamení prudkého technického rozvoje v oblasti vytápění. Opět bylo ve větší míře instalováno velkoplošné podlahové vytápění (vytápění nemocnic za Občanské války v USA, vytápění budovy Reichstagu v Německu), byly vyvinuty první centrální systémy vytápění založené na využití vody a páry jako teplotnosných médií, experimentovalo se s tepelnou vodivostí a kapacitou různých materiálů [220]. 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. Převažujícím zdrojem tepla bylo stále spalování vhodného paliva, ale uplatňovalo se i vytápění elektrické či využití tepelných čerpadel. Počátek 21. století je v rozvinutých zemích spojen s intenzivním hledáním energeticky úsporných řešení, při konstrukci budov se běžně užívají izolační materiály a i pláště starších budov jsou při rekonstrukcích dodatečně izolovány. Nároky na zdroje tepla pro úpravu vnitřní teploty jsou tedy hlavně v oblasti regulační pružnosti a relativně nízkého měrného výkonu. Procesy spalování jako zdroj tepla jsou stále využívány, ale jako palivo je preferován především zemní plyn či biomasa s ohledem na nízké emise skleníkových plynů a prachu na jednotku uvolněné energie [225], [226].

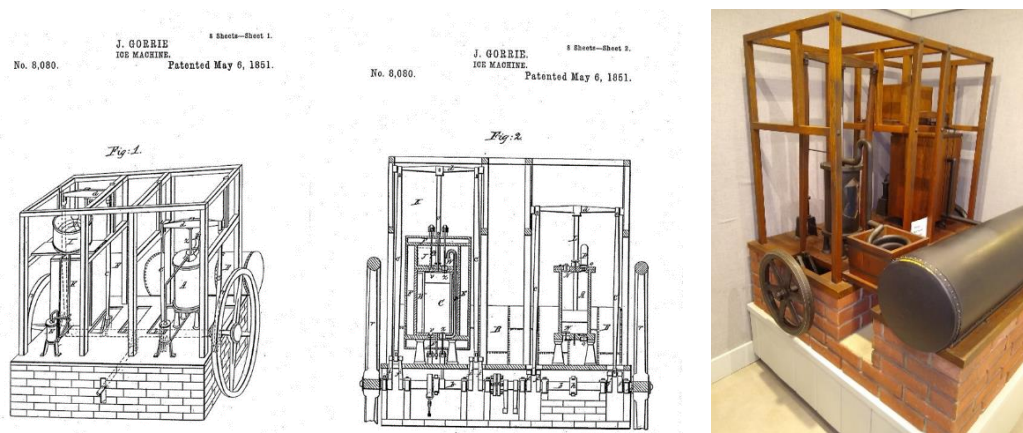
První systémy pro snížení teploty vzduchu založené na odpařování vody do vzduchu byly využívány v horkých a suchých oblastech Blízkého východu a Severní Afriky již ve středověku (kolem roku 1 000 n.l.) [227]. Princip spočíval v průchodu teplého a suchého vzduchu nad vodní hladinou v podzemních kanálech pro distribuci vody (tzv. kanátech) či kolem vlhčených rohoží, kde docházelo k odparu vody. Energie nutná na odpaření vody byla odebírána především z vnitřní energie proudícího vzduchu (transformace citelného tepla na vázané z čehož plyne i užívaný název adiabatické nebo také odpařovací chlazení) a pro nucený pohyb

vzduchu bylo využíváno principů šachtového větrání kombinovaného s dynamickými účinky větru (viz. Obr. 57). V důsledku tohoto jevu se snižovala teplota vzduchu a rostla jeho relativní vlhkost. Systém byl využíván jak pro komfortní účely, tak pro uchování potravin [228].



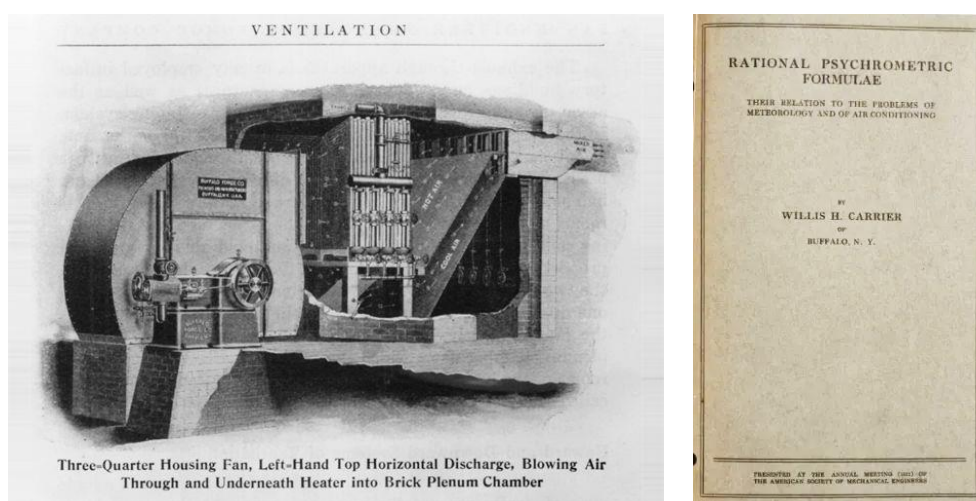
Obr. 57 – Vlevo: princip prvního známého chladicího systému kombinující adiabatické chlazení založené na odpařování vody a přirozeném šachtové větrání podpořeném dynamickými účinky větru. Vpravo: Zahradní pavilon v Dolat Abad, Yazd, Irán využívající princip adiabatického chlazení a šachtového větrání. Převzato z [228], [229].

Až do vynálezu strojního chlazení se v Evropě, USA a například i v Perské říši (dnešní Irán), využíval jako zdroj chladu vodní led, uschovaný ze zimního období, popřípadě transportovaný z míst s chladnějším podnebím. Z Bostonu v USA byl počátkem 19. století vyvážen společností Tudor Ice Company led jako zdroj pro chlazení do celých USA, Karibiku, Jižní Ameriky, Asie i Evropy [230]. Tento obchod byl ukončen v druhé polovině století s příchodem strojního chlazení, jehož základy byly položeny v podobě vědeckotechnických objevů počátku 19. století především v USA. Objevy Olivera Evanse týkající se termodynamiky par vody a éteru při změně tlaku [231] aplikoval Jakob Perkins. Ten v roce 1834 patentoval první zařízení pro strojní „výrobu ledu a chlazení tekutin“ využívané především při skladování a transportu rychle se kazících potravin [232]. První strojní zařízení pro chlazení prostředí v budovách sestrojil a patentoval v roce 1851 americký lékař z Floridy Dr. John B. Gorrie [233] (viz Obr. 58). Cílem bylo snížení teploty a vlhkosti vzduchu v nemocničních pokojích a poskytnutí úlevy pacientům trpícím horečnatými stavy v souvislosti s malárií a žlutou zimnicí, které v té době byly na Floridě běžnými nemocemi.



Obr. 58 – První stroj na „výrobu“ chladu s cílem snížení teploty a vlhkosti v prostředí nemocničních pokojů patentoval Dr. Johan B. Gorrie v roce 1851. Vlevo: vyobrazení z patentové přihlášky stroje „8080 a machine to make ice“. Vpravo: moderní replika stroje. Převzato ze [234].

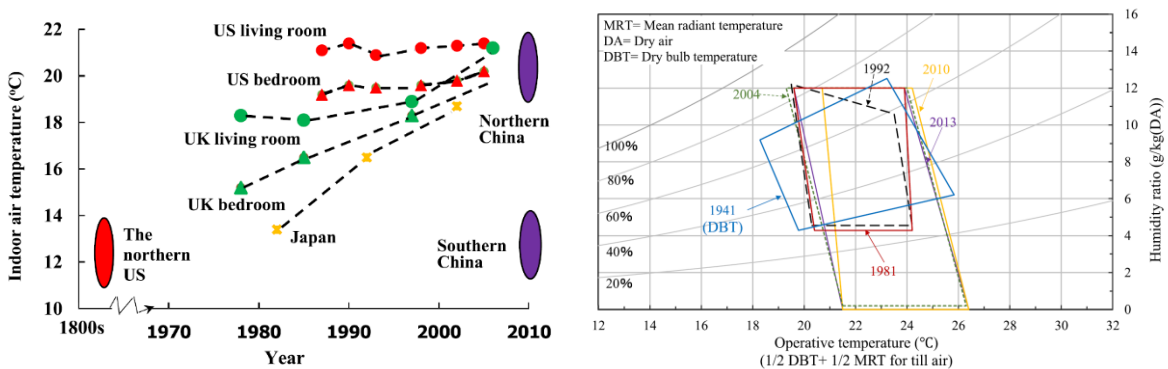
Velmi významnou postavou v historii klimatizační techniky byl Dr. Willis H. Carrier, který roku 1902 zkonstruoval zařízení pro kontrolu teploty a vlhkosti (viz Obr. 59) v tiskařské firmě Sackett-Wilhelms Lithographing & Publishing Company v newyorském Brooklynu [235] a položil tak základy technologické klimatizace. W. H. Carrier je také vynálezcem první automatické regulace pro řízení vlhkosti ve vnitřním prostředí, založené na poznatku, že udržování konstantního rozdílu teploty vzduchu a teploty rosného bodu (anglicky dew point depression) udržuje prakticky konstantní relativní vlhkost vzduchu, bez ohledu na teplotu vzduchu [235]. Svá pozorování a výsledky z experimentů s vlhkým vzduchem posléze shrnul v práci „Rational Psychrometric Formulae“, která byla publikována v roce 1911 a byla první svého druhu na světě (viz Obr. 59). Od této doby pak byl k dispozici model pro popis chování vlhkého vzduchu i strojní technologie, pomocí níž bylo možné kontrolovat a řídit parametry vnitřního prostředí jako teplota, vlhkost, rychlost proudění či výměna vzduchu.



Obr. 59 – První technologická klimatizace instalovaná v tiskárně v newyorském Brooklynu v roce 1902 a první vydání publikace „Rational Psychrometric Formulae“ od Willise H. Carrieria z roku 1911. Převzato ze [236].

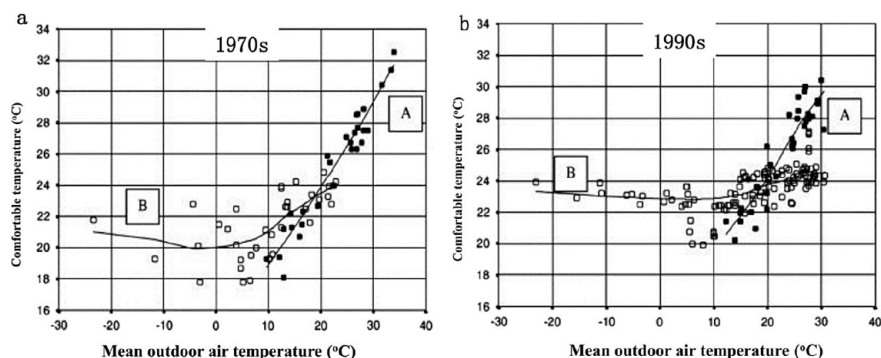
HVAC zařízení poté začala být uplatňována i pro kontrolu prostředí v kancelářských budovách, obytných budovách a v kabinách dopravních prostředků. Tato zařízení se souhrnně označují jako komfortní klimatizace, neboť účelem jejich instalace a provozu je tepelný komfort osob. Například první instalace takového systému v kancelářských budovách Elektrických podniků u Hlávkova mostu a Penzijního ústavu (pojišťovny) na Žižkově v Praze byla provedena v třicátých letech dvacátého století [237]. S rozvojem společnosti a také nárůstem počtu obyvatel ve dvacátém století však začal být také kladen důraz na energetickou efektivitu HVAC systémů [238], neboť lidská populace se v průběhu tohoto století prakticky zečtyřnásobila [239] a množství využívané energie vzrostlo desetkrát [240]. Počátek 21. století je tak spojen s hledáním průniku mezi aktivními a kreativními adaptačními postupy, které jsou schopny vytvářet vnitřní prostředí dle požadavků, ale při optimální energetické spotřebě [102]. Příkladem takových postupů je výstavba pasivních budov (viz Obr. 53 vlevo), kde je kladen důraz na minimalizaci tepelných ztrát z vnitřního prostředí do okolí, ale také adaptace budovy na vlastnosti daného okolí a klimatu tak, aby nebyly nutné příliš časté aktivní zásahy HVAC systémů, popřípadě aby pro ně bylo možné maximálně využít energetických zdrojů z okolí budovy.

Historicky prvním parametrem pro popis kvality vnitřního prostředí byla teplota vzduchu t_a měřená pomocí teploměru [7]. První zařízení pro určování teplotních stavů zvané termoskop sestavil již ve starověku Hérón Alexandrijský. V novověku se v 17. století zabýval měřením teploty Galileo Galilei a v tomto století byly zkonstruovány i teploměry na bázi teplotní roztažnosti kapalin. V roce 1714 využil holandský vynálezce Daniel G. Fahrenheit, rtuť místo směsi alkoholu a vody a položil tak základ pro přesné a opakované měření teploty. Definoval také stupnici, která nese jeho jméno, a je široce užívána dodnes. V roce 1742 zkonstruoval Andreas Celsius stupnici ohraničenou dvěma fázovými přechody vody při barometrickém tlaku, rozdělil ji na 100 dílků a tato stupnice je vzhledem ke své praktičnosti jednou z nejpoužívanějších stupnic v současné době [241]. Teplota vzduchu je tedy nejstarší veličina využívaná pro popis kvality tepelného stavu vnitřního prostředí, ale i preferovaná hodnota teploty vzduchu v obydlích podléhá v průběhu vývoje společnosti změnám v souvislosti s vývojem technologie. Na Obr. 60 vlevo jsou uvedeny změny v teplotě vzduchu v zimním období, jak je dokumentuje studie [111]. Na pravém obrázku je pak zachycen časový vývoj doporučených rozsahů teploty vzduchu, vlhkosti a střední radiační teploty dle standardu ASHRAE-55 v letech 1941 až 2010. Ve všech zemích s běžným využitím vytápění lze pozorovat postupnou konvergenci k teplotě v rozmezí 20 až 22 °C což je typický rozsah termoneutralní zóny pro sedícího člověka v zimním oděvu s tepelným odporem 1 clo.



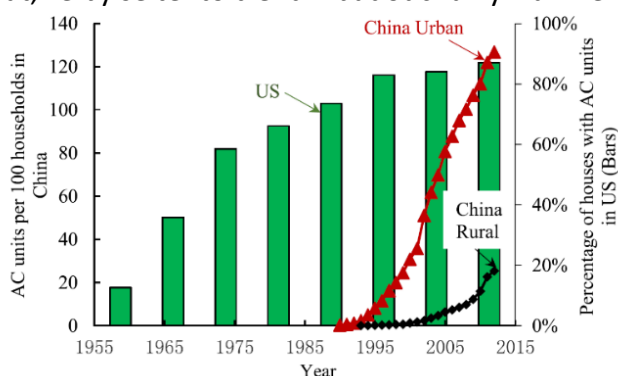
Obr. 60 – Vlevo: Dlouhodobé trendy ve vývoji vnitřní teploty obytných budov v zimním období v USA, Británii, Japonsku a Číně. Ve všech zemích s běžným využitím vytápění lze pozorovat postupnou konvergenci k teplotě v rozmezí 20 až 22 °C. Vpravo: Stejně tak dochází k posunům k teplejšímu vnitřnímu prostředí i u standardů ASHRAE-55 mezi lety 1941 a 2010. Převzato ze [111].

Podobný posun je viditelný i v průměrných teplotách vzduchu uvnitř budov vnesených v závislosti na průměrné vnější teplotě vzduchu. Na obrázku Obr. 61 je patrné, že zatímco ještě na začátku 70. let 20. století byla průměrná vnitřní teplota v zimním období cca 20 °C a v létě i přes 30 °C, na počátku 90. let již to byla zimní teplota kolem 23 °C, přičemž v letním období teplota nepřekračovala 30 °C a většina pozorování byla v rozmezí 24 až 26 °C. Tento trend uvedený ve studiích [111], [116] odpovídá i zjištění studie [148], která ověřovala hypotézu, zda lidé ve vnitřním prostředí preferují teplotní podmínky termoneutralní zóny, která vychází z klimatických podmínek oblasti východní Afriky, kde se pravděpodobně vyvinuli předci moderního člověka. Tato preference byla studií potvrzena a dále bylo také uvedeno, že hlavní změnou v posledních desetiletích, je zlepšení tepelně izolačních vlastností budov, rostoucí vybavenost HVAC systémy a dostatek levné energie nutné pro jejich pohon, která činí tyto úpravy dostupnými a tím pádem i využívanými.



Obr. 61 – Posun komfortní teploty v budovách s „přirozenou klimatizací“ (A - tzv. free running) a se strojní klimatizací (B) mezi 70. a 90. roky 20. století v závislosti na venkovní teplotě vzduchu. U budov se strojní klimatizací (B) je patrný výrazný posun k vyšší teplotě v zimním období (20 °C vs. 23 °C) a nižší teplotě v létě. Převzato ze [111], [116].

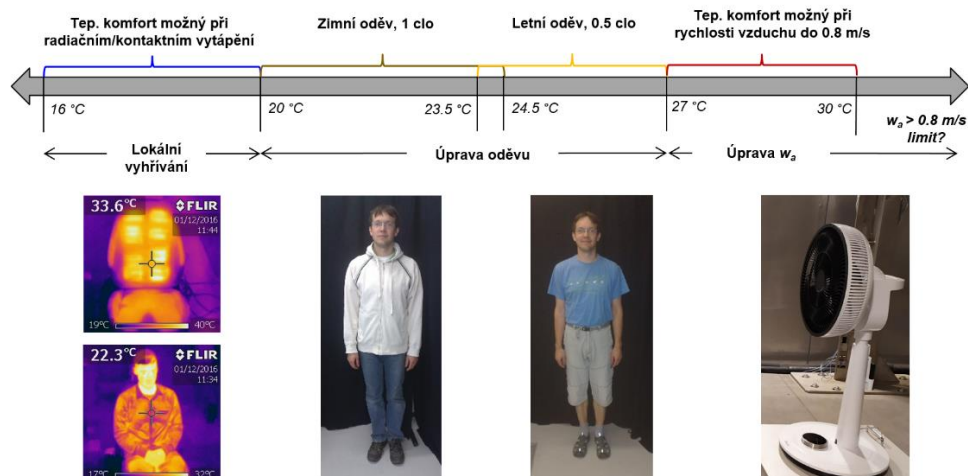
Trend adopce chladicích HVAC systémů v USA a Číně je uveden na Obr. 62. Je patrné, že zatímco zavádění těchto systémů v USA bylo rozloženo přibližně do období padesáti let, délka období adopce v Číně je z prakticky nulového stavu počátkem 90. let na přibližně 90% vybavenost v městských oblastech pouhých dvacet let. Adopce těchto systémů tedy po světě roste, a i vzhledem k psychologickým faktorům ovlivňujícím lidský tepelný komfort (viz kapitola 2.4) nelze očekávat, že by se tento trend v budoucnu významně změnil.



Obr. 62 – Vybavení domácností klimatizačními/chladicími systémy v USA a Číně v letech 1955 až 2015. Značný nárůst penetrace v Číně je patrný hlavně po roce 2000. Převzato ze [111], [242].

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 přijatelné/komfortní/příjemné pro většinu osob. Ukázka možných úprav prostředí a termoregulačního chování v závislosti na změně prostředí v rozsahu teplot vzduchu od 16 °C do 30 °C pro sedícího člověka s metabolickou aktivitou 1 met je uvedena na Obr. 63. V rozmezí teplot 16 až 20 °C je vhodnou cestou ke kompenzaci zvýšeného odvodu tepla z těla do okolí lokální radiační/kontaktní vytápění. Typicky vyhřívaná sedačka v automobilu nebo lokální radiační systémy v budovách. V těchto podmínkách se uvažuje zimní oděv s tepelným odporem cca 1 clo. 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 (většinou pouze v soukromých prostorách

budov určených k rezidenčnímu bydlení, či některá vnitřní sportoviště). Další možností je zvýšení přenosu tepla konvekcí v důsledku zvýšení rychlosti proudění vzduchu w_a a tím i zvýšení součinitele přestupu tepla h_c na povrchu pokožky / oděvu a narušení mezní vrstvy a stoupavého proudu v okolí těla (anglicky boundary layer, thermal plume). Toto zvýšení má však limit přibližně na úrovni 0.8 m/s , neboť vyšší rychlosti jsou většinou osob pocíťovány jako nadměrné lokální ochlazování spojené s nepříjemným pocitem (chlad a dráždění nervových zakončení v pokožce) známé také jako pocit průvanu. Tento pocit je však závislý na vykonávané činnosti a při vyšších metabolických výdejích je možné využití i vyšších rychlostí.



Obr. 63 – Ilustrace možných úprav prostředí v závislosti na teplotě vzduchu. Platí pro sedícího člověka, metabolická produkce 1 met. Převzato a doplněno z [243].

Další možnosti kompenzací či ekvivalencí mezi parametry prostředí ovlivňujícími přenos tepla z lidského těla v prostředí, které je blízké vyrovnané tepelné bilanci a tepelnému komfortu jsou uvedeny v Tabulka 1. Ekvivalence jsou odvozeny z experimentů, které provedli R. Goldman a P. Gagge při výzkumech lidské termofyziologie a oděvů pro americkou armádu [244]. Z tabulky jsou patrné jednotlivé ekvivalence, je však nutné podotknout, že nelze využít jednotlivých ekvivalencí bez omezení. 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 jednotlivých faktorů 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. Goldman také uvádí, že je nezbytné posuzovat působení jednotlivých faktorů v širších souvislostech, kdy například v teplotách vzduchu pod 10 °C je většinou RH blízká 100% , což však neznamená, že není možné odpařování potu z pokožky (hlavní je totiž rozdíl parciálních tlaků vodní páry mezi povrchem pokožky a okolím viz kapitola 2.3, který je v těchto teplotách zachován) a přenos tepla konvekcí a radiací. 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 změnami teploty vzduchu t_a a parametry ovlivňujícími přenos tepla a tepelnou bilanci lidského těla. Platí v prostředí blízkém vyrovnané tepelné bilanci lidského těla a okolí. Převzato a upraveno z [244].

Parametr	Ekvivalence
RH	Zvýšení relativní vlhkosti RH o 18 % může být kompenzováno snížením t_a o 0.5 °C.
w_a	Zvýšení rychlosti proudění vzduchu w_a o 0.18 m/s přibližně odpovídá snížení t_a o 1 °C. Maximální kompenzace je cca 3 °C \approx 0.55 m/s.
\bar{e}_r	Zvýšení střední radiační teploty \bar{e}_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.

Výsledný přenos tepla mezi lidským tělem a okolím vede k ustavení povrchových teplot lidského těla a následnému přenosu tepla mezi povrchem a jádrem těla. Tyto změny jsou dynamické a odpovídají změnám jak okolního prostředí, tak činnosti a zátěži lidského těla (blíže viz kapitola 2.2). Jednotlivé typicky preferované tepelné pocity v závislosti na teplotě pokožky, tělesné teplotě a jejich změně jsou znázorněny na Obr. 64. Je patrné, že neutrální tepelný pocit je preferován většinou pouze v případě, že tělesná teplota i teplota pokožky je stabilní a na neutrální teplotě cca 34 °C (poslední řádek tabulky). Dále je možných celkem osm kombinací obou teplot a jejich změn, které vedou 4x k preferenci chladného pocitu a z něj primárně plynoucí preference zvýšení odvodu tepla z těla (chlazení) a 4x k preferenci teplého pocitu a primární preference snížení odvodu tepla z těla (ohřívání/vytápění). Z těchto preferencí lze odvodit jaký typ zásahu do prostředí je vhodný od HVAC technologie a její regulace, nicméně je nutné správně odhadnout či monitorovat preference lidí v prostoru ať již nepřímou (např. měření povrchové teploty kůže) či přímo pomocí ovládacích prvků regulace (více viz kapitola 6.2.1).

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

Legenda

↓ klesá
 ↑ roste
 ↔ bez změny

Obr. 64 – Preferovaný tepelný pocit v závislosti na teplotě pokožky, tělesné teplotě a jejich změně. Převzato z [243].

3.3.3 Speciální ochranné pomůcky a systémy

Speciální osobní ochranné pomůcky většinou využívají konstrukční možnosti současné techniky a jsou dobrým příkladem možností v oblasti kreativní adaptability. Princip spočívá v úpravě prostředí pouze v bezprostředním okolí člověka [245], což zásadním způsobem snižuje energetické i materiálové nároky systému [246], ale klade vyšší požadavky na technologii a sofistikovanost provedení. Většina speciálních ochranných pomůcek kombinuje funkce oděvů, elektroniky a HVAC systémů, proto se pro některé jejich typy používá označení chytré oblečení (smart clothing). Jako příklad z autorovy praxe lze uvést:

- Svářečská kukla s dodávkou filtrovaného vzduchu, která chrání obličej, oči a dýchací trakt člověka před prachem a toxickými látkami, většinou v pracovním prostředí (viz Obr. 65 vlevo). Filtrace vzduchu může spočívat nejen v odstraňování prachových částic, ale i těkavých organických sloučenin ve filtrech s aktivním uhlím.
- Chlazená vesta s PCM materiály k ochraně lidského těla před hypertermií v horkých prostředích či v oděvech, které neumožňují ochlazování těla pocením (protichemické oděvy, izolační oděvy, balistický oděv pyrotechniků atd.). Bod tání PCM materiálu je nastaven tak, aby umožňoval efektivní chlazení lidského těla v zátěži (například 28 °C). Po roztátí PCM materiálu je nezbytné umístění vesty do prostředí s nižší teplotou pro opětovnou rekrystalizaci a ztuhnutí materiálu [247] (viz Obr. 65 vpravo).



Obr. 65 – Vlevo: Speciální ochranná kukla s dodávkou filtrovaného vzduchu při testování na manekýnovi. Vpravo: Testování tepelných vlastností a akumulčních schopností chladicí vesty s PCM materiálem na tepelném manekýnovi. Zdroj osobní archiv autora.

- Vyhřívané boty pro prevenci omrzlin a NFCI (non freezing cold injuries) v oblasti prstů chodidel. Využívají se integrované systémy s dobíjecím akumulátorem, vestavěnou regulací výkonu a ovládání mobilním telefonem přes bezdrátové rozhraní bluetooth.
- Vyhřívané vesty nebo bundy pro doručovatele zásilek s cílem snížení spotřeby HVAC systémů v kabině rozvázkového vozidla s elektrickým pohonem. Vyhřívání je instalováno přímo u těla čímž lze snížit teplotu v kabině. Dále také vesty pro řidiče kamionů s bezpečnostními funkcemi typu osvětlení osoby při opuštění kabiny, přivolání pomoci při pádu, nalezení vesty v místnosti atd.

- Speciální hasičské rukavice s funkcí bezkontaktního měření povrchové teploty a indikací výsledku na optickém ukazateli (Obr. 66 vpravo). Místo měření je indikováno pomocí laserového paprsku/tečky, který je aktivován při měření. Celý systém se ovládá jedním tlačítkem přizpůsobeným pro práci v rukavicích a vlhkém prostředí.
- Speciální lůžko pro transport pacientů zasažených zvláště infekční chorobou (Obr. 66 vlevo). Lůžko musí umožňovat vložení pacienta do lůžka, oddělení od okolí, bezpečný přístup pro ošetřování transportovaného pacienta (vestavěné izolační rukavice), utěsněné prostupy pro připojení medicínské techniky a jejích senzorů. Dále je lůžko vybaveno podtlakovou větrací jednotkou s filtrací vzduchu HEPA filtrem, která zajišťuje dostatečnou výměnu vzduchu při uzavření lůžka i odvod tepelné produkce pacienta. Konstrukce lůžka i všech jednotek musí umožňovat kompletní dezinfekci.



Obr. 66 – Vlevo: Izolační lůžko pro přepravu pacientů zasažených zvláště infekčními chorobami. Zdroj osobní archiv autora. Vpravo: Speciální hasičská rukavice s radičním teploměrem a optickou indikací změřené povrchové teploty. Zdroj Holík int. s.r.o.

- Filtrační kápě do čistých prostor s přívodem vzduchu ventilátorem přes filtrační nano-tkaninu. Využívá se při ochraně čistých prostor pro výrobu léků před znečištěním jemným prachem a biologickým materiálem od obsluhujícího personálu (Obr. 67 vlevo).
- Ventilovaná bunda pro zlepšení odvodu tepla odpařováním potu pod pracovní ochrannou bundou. Bunda obsahuje dva axiální radiátory v bederní části zad napájené z řídicí jednotky umístěné na opasku. Systém využívá průmyslový Li-Ion akumulátor.



Obr. 67 – Vlevo: Testování ventilované kápě (s filtrem z nanovláken) určené do čistých prostor. Vpravo: Detail na pracovní bundu zn. Makita s vestavěnými ventilátory, akumulátorem a jednotkou pro regulaci ventilace. Zdroj archiv autora.

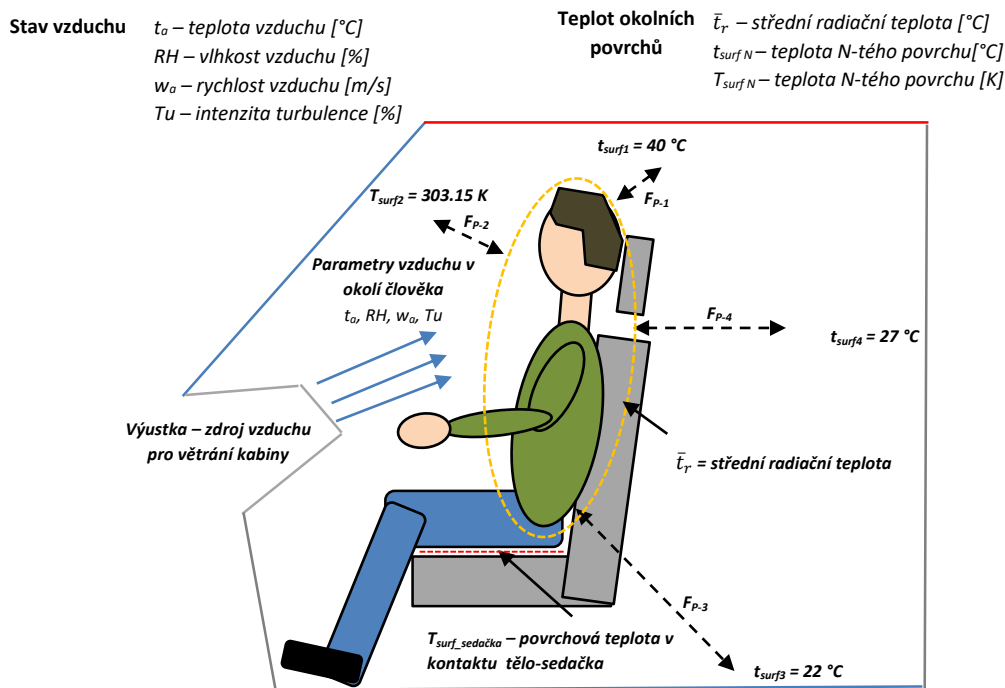
4 HODNOCENÍ TEPELNÉHO KOMFORTU NA ZÁKLADĚ MĚŘENÍ

Hodnocení tepelného stavu prostředí má za cíl kvantifikovat parametry fenoménů určujících intenzitu přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím (viz kapitola 2.3). 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 (např. model tepelného pocitu při sezení na vyhřívané sedačce [248]). 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 (viz kapitola 2.5) a přímo tak vyjadřují své hodnocení posuzovaného jevu/vjemu. 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 (viz kapitola 2.3). 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 (viz kapitola 5.2.3) dle Fanger [249].
- **Hodnocení na základě měření sondami a 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 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 senzoru v prostoru většinou aproximuje pozici skutečného člověka a zahrnuje tak podstatné vlivy prostorového uspořádání na fenomény přenosu tepla [250], [251].
- **Hodnocení na základě měření s tepelnými manekýny** – tepelní manekýni (thermal manikins) jsou měřicí zařízení využívající figurín, jejichž tvar, velikost i geometrie napodobuje anatomii skutečného lidského těla [252], [253]. Detail, zpracovanost a funkční vlastnosti figuríny pokrývají spektrum od velmi jednoduchých manekýnů imitujících pouze suchou tepelnou produkci průměrného člověka [254], [255] až po vysoce sofistikovaná řešení s kompletním systémem pro simulaci lidské termofyziologie [256], [257].
- **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 [123]. 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.

4.1 Měření parametrů tepelného stavu okolního prostředí

Následující text je zaměřen na výčet jednotlivých měřitelných parametrů definujících tepelný stav okolního prostředí (viz Obr. 68.). Stručně jsou popsány jejich základní charakteristiky, soudobé možnosti měření a také jsou doplněny poznatky z experimentální praxe autora. Text si neklade za cíl rigorózní popis problematiky měření jednotlivých veličin, ale spíše praktický přehled toho co je účelné využít v experimentální a konstrukční praxi při vývoji a výzkumu HVAC technologií.



Obr. 68 – Bližší znázornění základních veličin pro popis tepelného stavu vzduchu a teplot okolních povrchů v schematicky zakreslené kabině automobilu. Nákres je pouze ilustrativní.

Teplota vzduchu – teplota je obecně základní fyzikální veličinou soustavy SI (rozměr K, nebo také $^{\circ}\text{C}$ a $^{\circ}\text{F}$), která se využívá k popisu vnitřní energie systému či látky. Teplota vzduchu t_a je pak veličina pro základní popis teploty směsi plynů, kterou označujeme jako vzduch (N_2 , O_2 , H_2O většinou v podobě páry, Ar, CO_2 a stopové plyny [35], [258]) a která tvoří atmosféru planety Země. Jako veličina vystupuje především v přenosu tepla konvekcí a také je jedním z hlavních parametrů pro určení vlastností vlhkého vzduchu.

Jak měřit: Pro měření teploty vzduchu se používá teploměr. Dnes existuje široká škála měřicích systémů a principů, které umožňují přesné a rychlé určení této veličiny. V klasických teploměrech je měření teploty založeno na teplotní roztažnosti látek (plynů, kapalin, tuhých látek). S výhodou se také využívá závislost elektricky měřitelných veličin (elektrický odpor, termoelektrické napětí, frekvence) na teplotě a tím možného využití elektronických a digitálních systémů pro měření teploty vzduchu. Běžná přesnost teploměrů je cca ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$, u kalibrovaných cca ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ a jen u velmi přesných laboratorních přístrojů lze dosáhnout ještě vyšší přesnosti měření. U běžných inženýrských měření v oblasti HVAC dává tedy smysl uvádět teplotu v maximálním rozlišení na jedno desetinné místo.

Z praxe: Teploměr pro korektní měření teploty vzduchu musí být důsledně stíněn proti tepelné radiaci okolních povrchů a přímé solární radiaci, při zachování dobré ventilace čidla senzoru (viz Obr. 69).



Obr. 69 – Dvakrát stíněný digitální teploměr kombinovaný s hygrometrem pro měření teploty a vlhkosti vzduchu nad střechou automobilu při měření tepelné zátěže kabiny automobilu v klimatické komoře FSI. Alobal pokrývající tělo sondy chrání elektroniku před intenzivní tepelnou zátěží od solárního záření. Zdroj archiv autora.

Vlhkost vzduchu – určuje množství vody (H_2O) přítomné ve směsi s ostatními suchými složkami vzduchu (N_2 , O_2 , Ar, CO_2 a další stopové plyny) [20]. Tato směs se nazývá vlhký vzduch, jehož termodynamika je velice komplexní záležitost (bližší popis všech stavů lze nalézt v [35]). Mezi nejběžnější stav vlhkého vzduchu ve vnitřním prostředí lze považovat nenasycený vlhký vzduch, kdy je parciální tlak vodní páry nižší, než parciální tlak nasycení vzduchu vodní párou při dané teplotě a barometrickém tlaku. V takovém stavu je voda v plynném skupenství a nedochází ke kondenzaci či jiným fázovým změnám [20]. Pro popis obsahu vody ve vzduchu se používá několik parametrů, kdy nejpoužívanější jsou relativní vlhkost označovaná φ nebo RH [%], měrná vlhkost označovaná obvykle x [$g/kg_{s.v.}$] a parciální tlak vodní páry ve vzduchu p_a [Pa]. Vlhkost vzduchu ovlivňuje především přenos tepla a hmoty odpařováním z povrchu kůže (pocení), vlhkých povrchů/materiálů a přenos tepla v dýchacích cestách.

Jak měřit: Pro měření koncentrace vodní páry v nenasyceném vzduchu existuje několik metod, kdy mezi základní lze považovat metodu psychrometrickou založenou na měření rozdílu teplot tzv. suchého a mokrého teploměru nazývanou psychrometrická diference. Další fyzikální metoda je založena na měření rosného bodu (optické měření orosení chlazeného zrcátka) [20], [35]. Dnes jsou však běžnější metody využívající změnu elektrické vodivosti či kapacity určité látky, kterou lze převést na měření elektrických veličin (viz Obr. 69). Přístroj pro měření vlhkosti vzduchu se nazývá vlhkoměr neboli hygrometr. Běžná přesnost hygrometrů je cca $\pm 5\% RH$, u kalibrovaných cca $\pm 2\% RH$, a jen u velmi přesných laboratorních přístrojů a etalonů lze dosáhnout ještě vyšší přesnosti měření [259]. U běžných inženýrských aplikací v oblasti HVAC je tedy vhodné uvádět relativní velkost v maximálním rozlišení na celé jednotky procent RH.

Z praxe: U elektronických senzorů vlhkosti je nezbytné provádět pravidelné kalibrace, zvláště pak u těch, které jsou opakovaně vystavovány vysokým relativním vlhkostem. Doporučena je perioda kalibrace minimálně jednou ročně, u senzorů pracujících v nízkých a středních relativních vlhkostech a perioda kalibrace minimálně jednou za 6 měsíců u senzorů opakovaně

vystavovaných vysokým vlhkostem [259]. Nutné je také podotknout, že u některých miniaturních senzorů s integrovanou elektronikou může v důsledku vystavení senzoru dlouhodobé vysoké vlhkosti vzduchu dojít k poškození elektroniky senzoru. Takové senzory by neměly být dlouhodobě vystavovány hodnotám RH vyšším než 95 % a pokud jsou, tak jen po omezenou dobu s následným umístěním v prostředí s nižší vlhkostí, kde dojde k vysušení celého senzoru.



Obr. 70 – Improvizovaný psychrometr pro ověření vlhkosti vzduchu měřené elektronickým vlhkoměrem v kabině automobilu při teplotě vzduchu cca 48 °C. Teploměr t_s měřil teplotu suchého teploměru, teploměr t_m s navlhčenou bavlnou měřil teplotu mokrého teploměru, radiální ventilátor zajišťoval proudění vzduchu. Výsledky měření byly: $t_s = 47.5$ °C, $t_m = 29.2$ °C, relativní vlhkost dle h - x diagramu cca 25 %, změřená vlhkost el. vlhkoměrem byla 23 %.

Psychrometrickou metodu lze považovat za základní metodu a lze ji relativně snadno použít pro ověření správnosti měření vlhkosti vzduchu v případech, kdy panuje nejistota ohledně měření elektronických přístrojů. Stačí pak pouze dva teploměry, savý materiál pro vytvoření mokrého teploměru, voda a psychrometrický diagram (viz Obr. 70). Autor například využil tento postup při ověření vlhkosti v kabině vozu při vysokých teplotách +48 °C, kdy nebylo jasné, zda digitální vlhkoměr ukazuje korektní hodnotu relativní vlhkosti.

Rychlost proudění vzduchu a směr proudění vzduchu – je veličina popisující rychlost makroskopického pohybu vzduchu, jehož zdrojem mohou být přírodní jevy jako například rozdíl tlaků v atmosféře vítr, hustota přirozeném proudění (advekce) nebo mechanická zařízení typu ventilátor, kdy poté mluvíme o nuceném proudění vzduchu. Rychlost proudění vzduchu w_a [m/s] ovlivňuje především přenos tepla konvekcí a odpařováním z povrchu lidského těla (kůže) [92] nebo z povrchu oděvu [260].

Jak měřit: Přístroj pro měření rychlosti vzduchu se nazývá anemometr. Pro měření rychlosti existují různé metody založené například na aerodynamických účincích proudícího vzduchu na vhodně tvarovanou plochu (vrtulkové anemometry), metody založené na měření dynamického tlaku vytvořeného prouděním (tlakové sondy Pitotova trubice a Prandtlova trubice), metody založené na ochlazování žhaveného tělíska proudícím vzduchem (metoda CTA – Constant Temperature Anemometry, CCA - Constant Current Anemometry [261]) až po velmi sofistikované metody využívající pulsních laserů a vyhodnocování obrazového záznamu rozptylu laseru na trasovacích částicích ve speciálním software (PIV – Particle Image Velocimetry) [262]. Pro měření v oblasti HVAC systémů jsou vhodné všechny výše popsané metody, ale jejich aplikace záleží na konkrétním místě a cíli měření. Například pro měření výstupní rychlosti vzduchu z dýzové výustky, lze použít jak vrtulkový anemometr tak CTA

system. Pro měření rychlostního pole v prostoru je však vlivem nižší citlivosti vrtulkový anemometr nepoužitelný a je třeba využít CTA či PIV metody. Pro měření nízkých rychlostí vzduchu lze také využít katateploměr (viz Obr. 76).



Obr. 71 – Příklad jednoduché fotografické dokumentace polohy anemometrické sondy (stříbrná „tyčka“ s černým koncem) vůči manekýnovi a podlaze klimatické komory. Zdroj archiv autora.

Z praxe: Protože je rychlost obecně vektorová veličina je nezbytné znát nejen její magnitudu (velikost vektoru), ale i směr, který má proudění vzduchu relativně k tělu nebo v definovaném souřadném systému. Ve většině experimentů se uvádí pouze magnituda vektoru rychlosti [m/s] a pouze někdy je uvedeno, jaká byla poloha anemometru vzhledem k tělu, kde se nacházel „zdroj“ způsobující proudění vzduchu nebo jaká byla orientace lidského těla k proudícímu vzduchu [92]. Zvláště pak u stísněných prostorů s intenzivní výměnou vzduchu (kabina dopravních prostředků, kanceláře s chlazením, experimenty v klimatické komoře) je nezbytný popis rozmístění všech zdrojů proudění, poloh osob a anemometrů v prostoru (viz Obr. 71). Jinak většinou nelze efektivně využít a analyzovat naměřená data.

Parametry turbulence při proudění vzduchu – časově závislé fluktuace rychlosti proudění vzduchu jsou vyvolány průchodem vírů přes měřicí bod/objem, kdy tyto víry vznikají v důsledku převážně turbulentního proudění vzduchu. Samotná problematika turbulence a jejího popisu je velmi komplikovaná nicméně mezi hlavní parametry popisující turbulenci ve vnitřním prostředí lze zařadit: amplitudu signálu, intenzitu turbulence, frekvenci vírů, integrální délkové měřítko turbulence, energetické spektrum turbulence a sklon spektra [263]. Dle [264] jsou lidskou pokožkou nejvíce vnímány fluktuace rychlosti proudění v rozsahu 0.1 až 1 Hz, kdy největší efekt na přenos tepla a vnímání člověkem mají fluktuace s frekvencí 0.5 Hz. Integrální délkové měřítko turbulence (turbulent integral length) pro venkovní prostory je větší než 10 m (vítr), pro přirozeně větrané vnitřní prostory je cca 3 m a pro nuceně větrané a klimatizované prostory je menší než 1.5 m. V klimatizovaných prostorách se může délkové měřítko zvětšit i k hodnotám pro přirozené větrání (zvětšení ze 1.1 m na cca 3 m), ale k této změně dojde, až pokud magnituda rychlosti klesne v důsledku rozpadu primárních proudů k hodnotě 0.25 m/s a jedná se tak prakticky o oblast, která již není ovlivněna činností HVAC systémů [111], [264]. Integrální veličinou popisující turbulenci proudícího vzduchu je intenzita

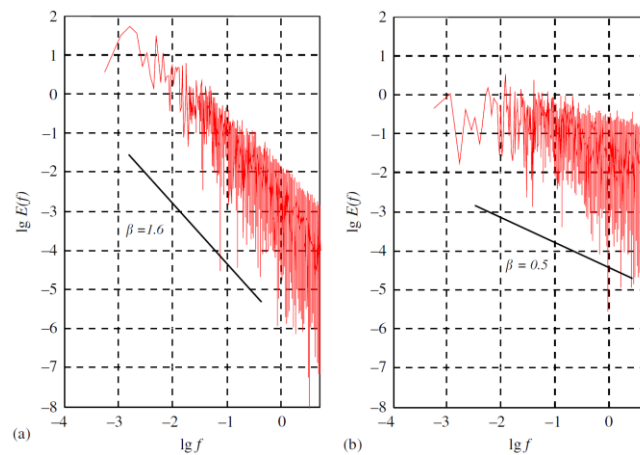
turbulence T_u [%], která se určuje jako podíl směrodatné odchylky fluktuací rychlosti proudícího vzduchu vzhledem k průměrné/střední hodnotě rychlosti vzduchu.

$$T_u = \frac{s}{\bar{w}_a} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (w_{a,i} - \bar{w}_a)^2}{n-1}}}{\bar{w}_a} \quad (4.1)$$

$$\bar{w}_a = \frac{\sum_i w_{a,i}}{n} \quad (4.2)$$

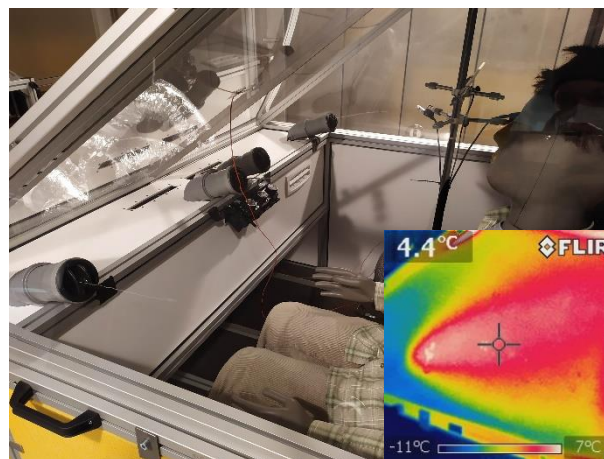
Jak měřit: Parametry turbulence při proudění vzduchu se určují z časového záznamu rychlosti proudění vzduchu [92]. Neměří se tedy přímo, ale na základě zpracování dat z anemometrů. Aby bylo možné zpracovat i vyšší frekvence generované malými víry, je nezbytné využít sond s malou časovou konstantou a dostatečně vysokou vzorkovací frekvencí, které je možné splnit prakticky pouze anemometry pracujícími na principu metod ochlazovaných žhavených tělísek (metoda CTA, CCA). Zvláště u těchto měření platí Nyquistův–Kotělnikovův–Shannonův teorém, který uvádí, že pro vzorkování signálu o frekvenci f je nezbytné vzorkování minimálně o dvojnásobné frekvenci $2f$. Pokud je tedy signál anemometrické sondy vzorkován s frekvencí 10 Hz , je možné zachytit fluktuace rychlosti o maximální frekvenci 5 Hz . Protože největší efekt na přenos tepla a sensorický vjem lidské pokožky mají frekvence do 1 Hz , je dle [264]–[266] dostatečná vzorkovací frekvence pro měření turbulentního proudění ve vnitřních prostorách do 10 Hz . Vhodné anemometrické sondy se žhavenou kuličkou či lépe drátkem, včetně podrobného rozboru nejistoty měření fluktuací rychlostí, intenzity turbulence a dalších vlivů na nejistotu určení indexu Draft risk (blíže viz kapitola 5) lze nalézt v [265].

Z praxe: Nutné je zdůraznit, že vliv intenzity turbulence na přenos tepla z povrchu lidského těla se začíná výrazněji projevovat až od rychlosti proudění vzduchu větší než 1.0 m/s [92], [267]. Ve vnitřních prostředích se takové rychlosti vyskytují většinou jen v oblastech primárních proudů generovaných HVAC systémy (v blízkosti výustek při směšovacím větrání, v proudu vzduchu od stojanového či stropního ventilátoru, pod kazetovou stropní jednotkou splitového chlazení atd.). V takových místech má smysl intenzitu turbulence měřit, v opačných případech je její vliv na přenos tepla prakticky zanedbatelný. Studie [264], [266] poukazují na fakt, že při bližším pohledu na celé spektrum turbulence proudícího vzduchu je potřeba brát v potaz také dráždění nervových zakončení v pokožce a celkový vliv charakteru proudění nejen na přenos tepla, ale i na sensorický pocit vyvolaný silovým působením fluktuací dynamického tlaku na pokožku. Výzkumy naznačují, že turbulentní spektrum vytvářené HVAC systémy často obsahuje větší množství menších vírových struktur (jejich frekvenční charakteristika odpovídá bílému šumu [93]), které nepřírozně a opakovaně dráždí pokožku, což je většinou osob pocíťováno jako méně příjemné než spektrum vyvolané přirozeným prouděním, na které je lidské tělo adaptováno v důsledku dlouhého vývoje ve venkovním prostředí [268]. Odlišné charakteristiky proudění jsou dobře patrné v energetických spektrech proudění (viz Obr. 72), kde větší sklon energetického spektra přirozeného proudění značí větší množství velkých vírů a jimi nesené energie, zatímco spektrum pro nucené proudění má menší sklon a tím více menších vírů s vyšší frekvencí a menší energií.



Obr. 72 – Energetické spektra proudění vzduchu v logaritickém zobrazení a vyčíslení jejich sklonu, a) energetické spektrum přirozené proudění se sklonem $\beta = 1.6$ b) energetické spektrum nuceného proudění se sklonem $\beta = 0.5$. Převzato z [264].

Povrchová teplota – je veličina popisující teplotu na rozhraní pevného tělesa a okolního prostředí. Znalost této teploty je nezbytná pro určení přenosu tepla radiací a konvekcí mezi lidským tělem a okolím či přenosu tepla kondukcí při dotyku s povrchem. Označení t_{surfN} [$^{\circ}\text{C}$].
Jak měřit: Povrchovou teplotu lze bodově měřit teploměrem nebo čidlem teploty nalepeným na měřený povrch. Plošné měření je možné pomocí infračervené kamery (viz Obr. 73) nebo speciálními odporovými čidly, která jsou připevněna k měřenému povrchu nebo jsou jeho součástí (tento princip se používá například pro měření povrchové teploty manekýna, kdy odporové čidlo teploty v podobě tenkého drátku je meandrovitě vedeno těsně pod vnějším povrchem manekýna – viz Obr. 97).



Obr. 73 – Měření povrchové teploty bočního okénka makety kabiny vozidla při testu vytápění (okolní teplota -10°C). V dolní části IR snímek zobrazující rozložení povrchové teploty v důsledku dopadu proudu vzduchu z boční výustky na okno. Zdroj archiv autora.

Z praxe: Kvalitní připevnění čidel a senzorů pro měření povrchové teploty k měřenému povrchu je zásadní pro kvalitu a spolehlivost měření. Zvláště u měření vyšších teplot v klimatické komoře je správné připevnění složité. Většina levných lepicích pásek nemá dostatečně tepelně odolná lepidla a při vyšších teplotách je lepený spoj nestabilní. Pásky pro vyšší teploty používají stabilnější lepidla, ale mají často nosný materiál z hliníku (viz Obr. 75). Při jejich použití je potřeba zvážit, zda povrchové vlastnosti nosného materiálu neovlivní

negativně měření (např. měření s přenosem tepla zářením a úprava emisivity povrchu páskou, která má nižší emisivitu). V opačném případě je potřeba využít nějaký ze způsobů mechanického připevnění čidla k povrchu, které je však většinou invazivní/destruktivní vzhledem k měřenému povrchu (příšroubování pomocí vrutu/šroubu). Tepelný odpor mezi mechanicky připevněným čidlem a měřeným povrchem je také vhodné snížit za využití teplovodivé pasty.

Střední radiální teplota – je veličina popisující teplotu imaginárního prostoru, kde by přenos tepla radíci z lidského těla byl stejný jako v aktuálním prostředí. Tato veličina je nezbytná pro určení míry přenosu tepla radiací mezi lidským tělem a okolím [20]. Označuje se zpravidla \bar{t}_r [°C].

Jak měřit: Střední radiální teplotu lze měřit kulovým teploměrem, kdy teplota kulového teploměru t_g (průměr 10 cm) je následně přepočtena na střední radiální teplotu \bar{t}_r dle vztahu níže. Pro korektní vyjádření tedy musíme znát ještě hodnoty teploty vzduchu t_a a rychlosti proudění vzduchu w_a . Pro průměr 15 cm je konstanta rovna hodnotě $2.5 \cdot 10^8$ [269].

$$\bar{t}_r = \left((t_g + 273)^4 + 2.9 \cdot 10^8 \cdot w_a^{0.6} (t_g - t_a) \right)^{0.25} - 273 \quad (4.3)$$



Obr. 74 – Kulový teploměr jako sonda umístěná nad přístrojem Testo 480 (modrý display) použitý k určení střední radiální teploty v maketě kabiny. Teploměr je umístěn za sedadlem, aby nebyl ovlivněn povrchovou teplotou manekýna. Zdroj archiv autora.

Z praxe: Časová konstanta kulového teploměru je typicky v řádu desítek minut, takže rychlejší změny radiální teploty nelze tímto přístrojem efektivně měřit. V případech, kde se povrchová teplota jednotlivých povrchů může měnit v řádu minut (například v kabině vozidla při oblačném dni) je možné usuzovat na střední radiální teplotu z povrchových teplot jednotlivých ploch a konstrukcí tvořících kabinu. Vyžaduje to však vždy několik měřicích bodů na každé konstrukční ploše (viz Obr. 75), která je tvořená určitým materiálem či orientovanou plochou (střecha, přední sklo, výplň dveří atd.) Výsledná střední radiální teplota je dána matematickým zpracováním naměřených teplot a úhlových faktorů ploch (rovnice 4.4) pro místo v prostoru kabiny, kde se nachází člověk vzhledem k měřeným povrchům [249], [270].

$$\bar{T}_r^4 = T_{surf1}^4 F_{p-1} + T_{surf2}^4 F_{p-2} + \dots + T_{surfN}^4 F_{p-N} \quad (4.4)$$



Obr. 75 – Připevnění více odporových teploměrů Pt100 na čelní sklo a palubní desku při testech automobilu s využitím solárního simulátoru v klimatické komoře. Více čidel povrchové teploty na jedné konstrukci lze využít k přesnějšímu určení povrchové teploty a následnému výpočtu střední radiační teploty. K připevnění je zvolena hliníková páska, která má sice jinou emisivitu než měřené povrchy, ale díky své teplotní odolnosti zabezpečuje kvalitní připevnění teploměrů v celém rozsahu teplot experimentu. Zdroj archiv autora.

Pokud jsou měřené rodičy teplot malé, lze dle [20], [249] rovnici 4.4 převést do lineárního tvaru

$$\bar{t}_r = t_{surf1} F_{p-1} + t_{surf2} F_{p-2} + \dots + t_{surfN} F_{p-N} \quad (4.5)$$

Pokud má polovina okolních ploch teplotu o 5 K vyšší než zbylé plochy, dává rovnice 4.5 pouze o 0.2 K nižší hodnotu než rovnice 4.4, pokud je však teplota vyšší o 100 K, pak je hodnota z rovnice 4.5 o 10 K nižší než z rovnice 4.4. Dle O. Fanger [249] je v praxi také často používán zjednodušený vztah pro výpočet střední radiační teploty v podobě rovnice 4.6.

$$\bar{t}_r = \frac{t_{surf1} A_1 + t_{surf2} A_2 + \dots + t_{surfN} A_N}{A_1 + A_2 + \dots + A_N} \quad (4.6)$$

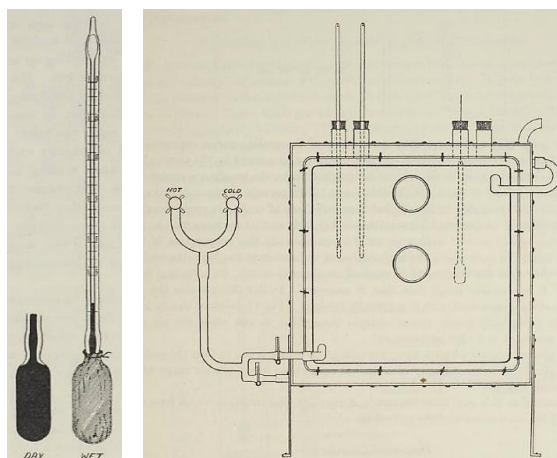
Jedná se o vážený průměr povrchových teplot okolních ploch, kde váhou je obsah plochy o dané teplotě. Fanger [249] uvádí, že při využití tohoto postupu je potřeba mít na zřeteli, že postup nijak nezohledňuje polohu ani orientaci lidského těla v prostoru a v některých specifických případech může vést k nepřesnému určení střední radiační teploty. Bližší popis pro určení úhlových faktorů a střední radiační teploty pro stojícího a sedícího člověka lze nalézt ve zdroji [20], komplexní popis pak ve zdroji [249].

4.2 Měření sondami a aktivními senzory – ekvivalentní teplota

V případě hodnocení prostředí na základě měření sondami a aktivními senzory je využíván postup, kdy měřicí zařízení aktivně napodobuje podmínky přenosu tepla z lidského těla do okolí a měří tak intenzitu jednotlivých způsobů přenosu tepla. Jedná se o čidla a senzory, která mají aktivní plochu řádově menší než je plocha lidského těla, takže měření je spíše bodové, ale například se zahrnutím směrovosti některých veličin (např. směrová ekvivalentní teplota). Většina těchto sond a senzorů je zaměřena na určení citelného tepelného toku z lidského těla (členy $C + R$, rovnice 2.1 viz kapitola 2.2) v daném prostředí, který se pak s výhodou převádí na tzv. ekvivalentní teplotu t_{eq} . Některé systémy umožňují určit i tepelný tok vypařováním (E_{sk}).

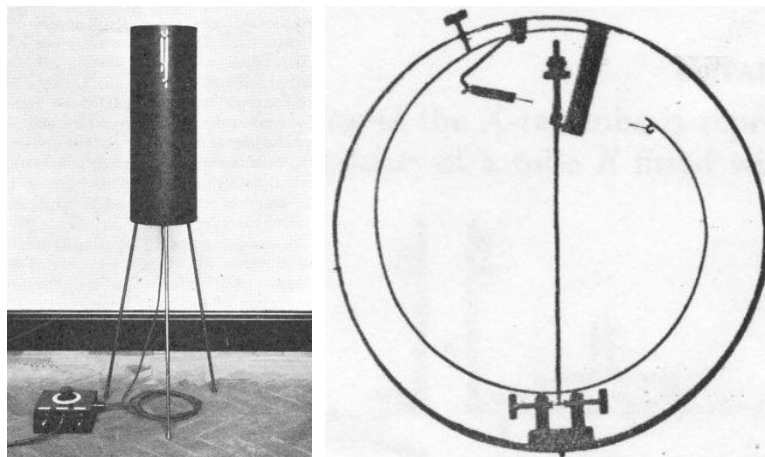
4.2.1 Vývoj měřicích systémů a definice ekvivalentní teploty

Katateploměr – Historicky prvním měřicím zařízením, které bylo zkonstruováno ke stanovení „ochlazovacího účinku prostředí na lidské tělo“ byl katateploměr sestavený L. Hillem v roce 1916 [252], [271]. V klasické podobě se skládá z nádoby o průměru 18 mm a výšce 40 mm zakončené polokoulemi, obsahující teploměrnou kapalinu (většinou líh). Nádobka přechází v kapiláru, která je na obou koncích rozšířena. Na teploměru jsou vyznačeny dvě teploty: nahoře 38 °C , dole 35 °C (střední teplota 36.5 °C přibližně odpovídá teplotě lidského těla). Při měření se nejprve katateploměr zahřeje na teplotu vyšší než 38 °C (většinou ve vodní lázni), takže teploměrná kapalina vystoupá do horního rozšíření kapiláry. Potom se teploměr osuší a změří se čas, za který teploměrná kapalina klesne z rysky 38 na 35 °C . S využitím konstanty katateploměru, zjištěné jeho kalibrací (Obr. 76 vpravo), se vypočítá tzv. katahodnota [272]. Katateploměr lze doplnit o punčošku navlhčenou ve vodě (Obr. 76 vlevo) a lze tak do katahodnoty zahrnout i efekt vypařování [252]. Následně však byla zjištěna vysoká citlivost katateploměru na rychlost proudění vzduchu, a proto se dále využíval především k měření malých rychlostí proudění vzduchu ve vnitřních prostředích [252], [272].



Obr. 76 – Vlevo: Katateploměr v provedení pro měření suchého tepelného toku (DRY) a úprava pro zahrnutí tepelného toku vypařováním (WET) v podobě punčošky vlhčené ve vodě. Katateploměrem se měřila katahodnota odvozená od času poklesu teploměrné látky mezi teplotami 38 a 35 °C (100 až 95 °F). Vpravo: Kalibrační komora pro stanovení konstanty katateploměru použité L. Hillem k experimentům při vývoji a kalibraci katateploměru. Převzato z [271].

Eupatheoskop – Byl historicky prvním aktivně vyhřívaným měřicím zařízením pro napodobení tepelných ztrát lidského těla využívající jako zdroj tepla elektrickou energii. První verze označovaná eupatheostat byla zkonstruována A. Duftonem v roce 1929 a měla podobu elektricky vyhřívaného měděného válce s černým povrchem [273].

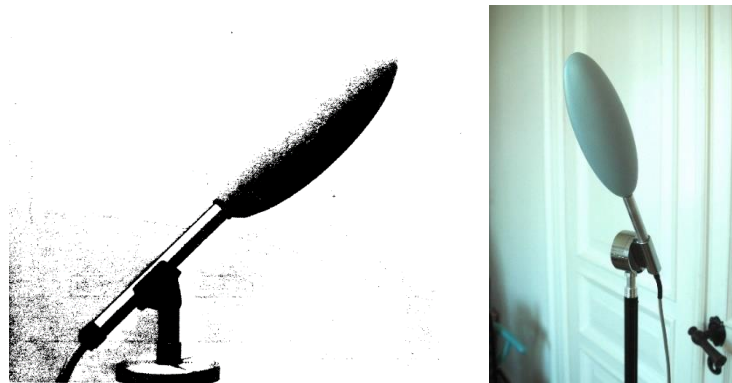


Obr. 77 – Eupatheoskop Mark II publikovaný Dufton v roce 1936, byl vyhříván dvěma žárovkami a povrchová teplota byla udržována termostatem na nastavené úrovni (vpravo). Jednalo se o první zařízení s aktivním vyhříváním pro určení tepelných účinků prostředí na lidské tělo. Převzato z [252].

Dufton dále pokračoval ve vývoji a v roce 1932 sestrojil přístroj pro laboratorní využití označený jako eupatheoskop [274]. Zdrojem tepla byly dvě žárovky a povrchová teplota byla udržována na nastavené hodnotě $75\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($24\text{ }^{\circ}\text{C}$) bimetalovým termostatem (viz Obr. 77 vpravo), který spínal rtuťové relé. Přístroj byl také vybaven automatickým systémem pro časový záznam velikosti dodávaného elektrického proudu, z kterého se pak odvozovala měřená „ekvivalentní teplota“. Tu Dufton definoval vzhledem k použité povrchové teplotě přístroje jako „teplotu uzavřeného prostoru s uniformní teplotou a vzduchem bez pohybu, kde má černé těleso o povrchové teplotě $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ stejnou tepelnou ztrátu jako v měřeném prostředí“. Teplota $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ však zásadně limitovala využití přístroje pro vyšší teploty [274], a proto byla Duftonem v roce 1936 uvedena inovovaná verze eupatheoskopu označená Mark II (viz Obr. 77 vlevo) s povrchovou teplotou $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ [252]. Protože zařízení mělo jinou povrchovou teplotu než první verze, byla upravena i definice ekvivalentní teploty na „ekvivalentní teplota prostředí je teplota uzavřeného prostoru s uniformní teplotou a vzduchem bez pohybu, kde má černé těleso stejnou tepelnou ztrátu jako v měřeném prostředí, přičemž jeho povrchová teplota je rovna jedné třetině rozdílu mezi teplotou prostoru a hodnotou $38\text{ }^{\circ}\text{C}$.“ Protože bylo měření s eupatheoskopem limitováno jen na laboratoř (byl nutný zdroj elektřiny), vyvinul Dufton ještě dvojici speciálně upravených katateploměrů, které umožňovaly určit ekvivalentní teplotu i mimo laboratoř. Jeden katateploměr měl baňku upravenou černou barvou a u druhého byla baňka lesklá. Kalibrační měření v 19ti různých prostředích prokázala dobrou shodu měření s eupatheoskopem s nejistotou určení ekvivalentní teploty do $0.75\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$) [275].

V průběhu druhé světové války byl rozvoj techniky v oblasti tepelných účinků prostředí zaměřen hlavně na podrobný výzkum výstroje pro vojáky do chladných klimatických podmínek a později i do teplých a vlhkých klimatických podmínek. Vývoj spočíval především v rozvoji manekýnů (viz kapitola 4.3.1) a metod pro kvantifikaci vlastností tkanin. Vznikaly i různé

indexy pro hodnocení účinků prostředí na tepelný stres a komfort člověka, ale převážně s využitím měření základních veličin tepelného stavu prostředí (viz kapitola 4.1). Lze říci, že další rozvoj aktivních senzorů nastal až v 80. letech 20. století, kdy již byla na trhu dostatečná nabídka elektronických součástek pro realizaci integrovaných senzorů a digitální regulační techniky propojitelné s osobními počítači (viz Obr. 78) [276]. První ukázkou aplikace této technologie bylo v roce 1986 testování kvality prostředí v kabině osobního vozidla [277], kde byl systém porovnáván s prostým měřením teploty vzduchu a měření ekvivalentní teploty pomocí manekýna s 16ti zónami. Systém umožnil určení ekvivalentní teploty ve třech výškových úrovních a vzhledem k nehomogenitě a asymetrii prostředí lépe popisoval tepelné účinky prostředí na lidské tělo než prosté měření teploty vzduchu. Zásadní výhodou také bylo určení tepelné ztráty konvekcí a radiací pomocí jednoho relativně jednoduchého senzoru místo sestavy několika sond pro měření t_a , \bar{t}_r , w_a .



Obr. 78 – Vlevo: první xerokopie fotografie aktivního senzoru pro měření ekvivalentní teploty z roku 1984 s tvarem rotačního elipsoidu, převzato z [276]. Vpravo: současná podoba stále vyráběného senzoru z roku 2021, převzato z [278].

V závěru článku je také uvedeno, že nejpřesnější popis nehomogenního, asymetrického prostředí v kabině automobilu poskytl tepelný manekýn [277], avšak vzhledem ke komplexitě manekýnů, jejich ceně a nemožnosti využít manekýna jako zpětnovazebního senzoru pro běžnou regulaci, byla v následujících letech dále rozvíjena technika pro sensorické měření ekvivalentní teploty [279], [280]. Koncem 90. let proběhl v Evropě projekt EQUIV - Development of standard test methods for evaluation of thermal climate in vehicles – EC Cost Contract No SMT4-CT95-2017, jehož hlavním výstupem byla norma ISO 14505 Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech [251]. V rámci projektu byly konkretizovány všechny níže uvedené definice ekvivalentní teploty, ověřeny měřicí systémy a způsoby regulace teploty aktivních měřicích ploch. Hlavní postupy pro měření lze nalézt ve výše zmíněné normě, podrobné výsledky projektu pak v publikaci ze semináře Assessment of thermal climate in operator's cabs [281].

V současnosti je ekvivalentní teplota t_{eq} [°C] definována dle ISO 14505-2 následovně:
 „Teplota homogenního prostoru při střední radiční teplotě rovné teplotě vzduchu a nulové rychlosti proudění vzduchu, ve kterém osoba vymění stejnou tepelnou ztrátu konvekcí a radiací, jako ve skutečných podmínkách.“ [251].

Důležitá pro utčení t_{eq} a konstrukci měřicího zařízení je především podtržená část, neboť ta říká, že měřicí zařízení musí co nejdříve napodobit tepelnou ztrátu reálného lidského těla. Základní definice ekvivalentní teploty je použitelná pouze pro celé tělo [251]. 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 [252]. Dle normy ČSN EN ISO 14505-2 [251] Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty rozlišujeme dle použitého zařízení tyto specifické typy ekvivalentní teploty:

Ekvivalentní teplota celého těla – stanovuje se pomocí změření 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 4.7 – 4.9. Hodnota $h_{cal,whole}$ je určena kalibrací ve standardním prostředí (viz kapitola 5.2.2)

$$t_{eq,whole} = t_{surf,whole} - \frac{\dot{Q}_{RC,whole}}{h_{cal,whole}} \quad (4.7)$$

$$t_{surf,whole} = \frac{\sum(t_{surf,n} \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (4.8)$$

$$\dot{Q}_{RC,whole} = \frac{\sum(\dot{Q}_{RC,n} \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (4.9)$$

Segmentová ekvivalentní teplota – stanovuje se změřením celkového tepelného toku se segmentu (např. dlaň, hlava, hrud') sestávajícího se z jedné nebo více zón, každá se specificky změřenou povrchovou teplotou podobnou povrchové teplotě člověka. Segmentovou $t_{eq,segment}$ můžeme změřit pouze na nezmenšeném, lidsky tvarovaném zahřátém čidle, například na části tepelného manekýna. Hodnoty $h_{cal,segment}$ pro jednotlivé segmenty jsou určeny kalibrací ve standardním prostředí (viz kapitola 5.2.2).

$$t_{eq,segment} = t_{surf,segment} - \frac{\dot{Q}_{RC,segment}}{h_{cal,segment}} \quad (4.10)$$

$$t_{surf,segment} = \frac{\sum(t_{surf,n} \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q}_{RC,segment} = \frac{\sum(\dot{Q}_{RC,n} \cdot A_n)}{\sum A_n} \quad (4.12)$$

Směrová ekvivalentní teplota – princip stanovení spočívá v měření celkového tepelného toku z malé rovinné plochy se změřenou povrchovou teplotou. Směrová $t_{eq,direct}$ se může změřit pouze plochým čidlem, které je většinou upevněno na nevyhřívávanou figurínu nebo jiné polohovací zařízení. Hodnoty $h_{cal,direct}$ pro jednotlivé senzory jsou určeny kalibrací ve standardním prostředí (viz kapitola 5.2.2).

$$t_{eq,direct} = t_{surf,direct} - \frac{\dot{Q}_{RC,direct}}{h_{cal,direct}} \quad (4.13)$$

Všesměrová ekvivalentní teplota – princip stanovení spočívá ve změření celkového tepelného toku z povrchu elipsoidu se změřenou povrchovou teplotou (viz Obr. 78). Hodnoty $h_{cal,omni}$ pro jednotlivé senzory jsou určeny kalibrací ve standardním prostředí (viz kapitola 5.2.2).

$$t_{eq,omni} = t_{surf,omni} - \frac{\dot{Q}_{RC,omni}}{h_{cal,omni}} \quad (4.14)$$

Aktivními senzory lze především měřit **směrovou a všesměrovou ekvivalentní teplotu**. Pomocí tepelných manekýnů pak lze určit **segmentovou ekvivalentní teplotu** a **ekvivalentní teplotu celého těla**.

4.2.2 Principy regulace povrchové teploty senzorů

Dle principu regulace vyhřívání aktivní části senzoru nebo povrchu manekýna lze měření ekvivalentní teploty rozlišit do tří základních regulačních přístupů.

Regulace na konstantní povrchovou teplotou (režim CST – Constant Surface Temperature mode) – regulační elektronika udržuje nastavenou povrchovou teplotu t_{surf} na konstantní hodnotě (většinou 34 °C) a to tak, že v případě jejího poklesu zvyšuje množství elektrické energie dodávané do vyhřívané části senzoru (el. energie se transformuje v odporovém elementu na Jouleovo teplo). V případě překročení cílové teploty povrchu množství energie snižuje. Hlavním výstupem senzoru je údaj o hustotě tepelného toku \dot{Q}_{RC} [W/m²], přičemž při znalosti součinitele přestupu tepla h_{cal} (nebo $I_{cal} = 1/h_{cal}$) získaného z kalibrace v ekvivalentním prostředí (blíže viz kapitola 0) lze dle rovnice 4.15 nebo 4.16 určit ekvivalentní teplotu.

$$t_{eq} = t_{surf} - I_{cal} \cdot \dot{Q}_{RC} \quad (4.15)$$

$$t_{eq} = t_{surf} - \frac{\dot{Q}_{RC}}{h_{cal}} \quad (4.16)$$

Dle A. Melikova [282] lze také povrchovou teplotu více přiblížit reálnému lidskému tělu a předepsat následující povrchové teploty: Obličej a hlava 35.5 °C, záda 33.6 °C, hrudník 34.4°C, paže 32.6 °C, dlaně 33.1 °C, nohy 32.4°C, chodidla 30.2°C. Pro tyto povrchové teploty však musí být měřicí systém kalibrován v homogenním prostředí, a pokud se vyčísluje t_{eq} celého těla musí se použít rovnice 4.7 až 4.9.

Regulace na konstantní tepelný tok (režim CHF – Constant Heat Flux mode) – regulace udržuje konstantní nastavené množství energie (hustotu tepelného toku), které dodává do aktivně vyhřívané části měřicího systému (typicky 85 W/m² [125]) a měří výslednou povrchovou teplotu RST [°C] (Resultant Surface Temperature), která se mění na základě ochlazovacího účinku měřeného prostředí (viz rovnice 4.17). Hodnota RST tedy představuje „míru ochlazovacích účinků“ měřeného prostředí a nikoliv přímo ekvivalentní teplotu. Ekvivalentní teplota je poté určena ze vztahu mezi RST a T_{eq} , který je získán z kalibrace v ekvivalentním prostředí (příklad rovnice 4.18). Je však potřeba mít na paměti, že rovnice 4.18 je určena pouze

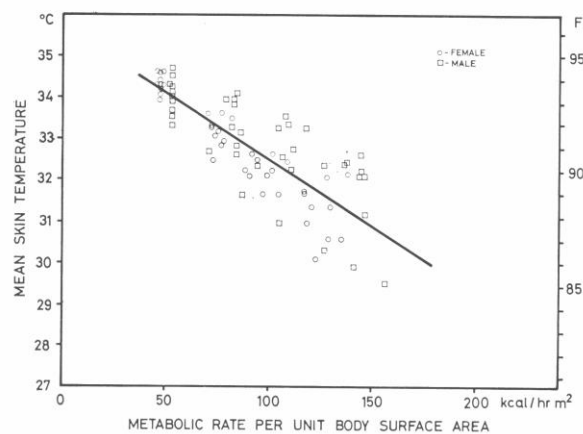
pro specifické podmínky senzoru (hlavně poloha) a také, že koeficient h_c v rovnici 4.17 je závislý na rozdílu teplot ($RST - t_a$). Protože typický tok \dot{Q}_{RST} závisí na části těla, jejíž ekvivalentní teplota má být určena (obličej, ruce, chodidla), musí se i při měření tento tok nastavit dopovídajícím způsobem a i kalibrace senzoru musí být proveden pro tyto podmínky [283].

$$\dot{Q}_{RST} = h_c \cdot (RST - t_a) + \varepsilon_s \cdot \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot [(RST + 273.15)^4 - (\bar{t}_r + 273.15)^4] \quad (4.17)$$

Kde $\dot{Q}_{RST} = 85 \text{ W/m}^2$, $h_c = 1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon_s = 0.96$, $\varepsilon_a = 0.9$ a $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$$t_{eq} = 1.1 \cdot RST - 15.6 \quad (4.18)$$

Regulace na adaptabilní povrchovou teplotu – měřicí systém udržuje povrchovou teplotu na úrovni, odpovídající povrchové teplotě lidského těla při určitém metabolickém výdeji a zachování tepelného komfortu. Rovnice 4.19 je odvozena z experimentů s pokusnými osobami, které provedl O. Fanger [249] a je regresní funkcí grafu na Obr. 79.



Obr. 79 – Průměrná povrchová teplota lidské kůže při zachování tepelného komfortu, jako funkce metabolické produkce člověka. Tepelného komfortu u vyšší metabolické zátěže bylo dosaženo snížením teploty okolního vzduchu. Přepočtový koeficient z jednotky kcal/hrm² na W/m² je 1.16. Převzato z [249].

$$t_s = 35.7 - 0.0275 \cdot (M - W) \quad (4.19)$$

Jelikož však běžný měřicí systém nesimuluje pocení, transformuje se dle [196], [284] rovnice 4.19 do následujícího tvaru, který zahrnuje stejné tepelné ztráty, ale přenášené pouze pomocí konvekce a radiace.

$$t_s = 36.4 - 0.054 \cdot \dot{Q}_{RC} \quad (4.20)$$

$$t_{eq} = t_s - I_{cal} \cdot \dot{Q}_{RC} \quad (4.21)$$

Při vyšší metabolické zátěži je nezbytné pro zachování tepelné bilance a transport tepla z jádra těla dosáhnout vyššího tepelného spádu mezi jádrem a pokožkou což se projevuje jako požadavek na nižší teplotu pokožky. Tato nižší teplota pokožky však odpovídá tepelné neutralitě pouze pro osobu v tepelné rovnováze s okolím dosažené díky zvýšené úrovni metabolické aktivity. Jinými slovy, tato metoda vždy určuje ekvivalentní teplotu za podmínek tepelné neutrality pro danou aktivitu (úroveň metabolické produkce). Toto dodatečné rozšíření je poté nutné zahrnout jako součást definice ekvivalentní teploty [252].

Regulace s komfortním vyrovnáváním povrchové teploty

Je experimentální algoritmus odvozený z pozorování a poznatků experimentů Laboratoře tepelného managementu (FSI, VUT v Brně), které provedli a analyzovali J. Fišer a J. Pokorný v letech 2012 až 2021. Algoritmus spočívá v adaptivní kontrole povrchové teploty senzoru $t_{surf,PF}$ tak, aby bylo dosaženo povrchové teploty dle rovnice 4.20, ale s lokálními setpointy pro odlišné části těla (hlava + obličej, hrudník, záda, paže, dlaně, dolní končetiny a chodidla). Cílem postupu je přiblížit se reakci povrchu reálného lidského těla a jeho termofyziologie na tepelný stav okolního prostředí hlavně pak v chladných a studených podmínkách. Postup také zohledňuje imitaci termoregulace měřicím systémem a například nemožnost aktivního ochlazování pocením, nemožnost napodobení vazokonstrikce atd. Teplota povrchu se nastavuje v iteračním procesu, takže rychlost odpovědi senzoru na skokovou změnu je pomalejší než u ostatních metod. Ekvivalentní teplota se určuje dle rovnice 4.23.

$$t_{surf,PF} = t_{CST,PF} - 0.054 \cdot \dot{Q}_{RC} \quad (4.22)$$

$$t_{eq} = t_{CST,PF} - \frac{\dot{Q}_{RC}}{h_{cal}} \quad (4.23)$$

Povrchové teploty $t_{CST,PF}$ odpovídají povrchovým teplotám pro metodu CST dle A. Melikova [282] upravených na ofset při metabolismu 1 met a komfortním stavu dle rovnice 4.19 a 4.20.

4.2.3 Současné senzory pro určení ekvivalentní teploty

Systém INNOVA 1221 a systém Flatman – systém vychází koncepčně z práce T. Madsena z Technical University of Denmark (TUD), který v 80. letech vyvinul senzor ekvivalentní teploty využívající aktivní povrch ve tvaru elipsoidu (viz Obr. 78). Senzor byl poté zařazen do systému pro měření komfortu dle modelu PMV-PPD, který vyráběla dánská firma Brüel & Kjær a rozšířil tak jeho možnosti o měření ekvivalentní teploty [276]. Po roce 2000 byla část firmy zabývající se měřením komfortu několikrát přeprodána a z toho důvodu lze tento systém nalézt pod různými značkami a obchodními názvy jako Lumasence, INNOVA (viz Obr. 80 vlevo), Dantec ComfortSense, či některé části vyrábí i firma PT Teknik z Dánska [278]. Obecně však všechny tyto systémy umožňují měření všech hlavních parametrů nezbytných pro měření tepelných účinků prostředí na lidské tělo (viz kapitola 4.1), ekvivalentní teploty i jejich zpracování na další indexy a modely tepelného komfortu (např.: PMV-PPD, WGBT atd.). Systém je možné detailně konfigurovat a kalibrovat, což umožňuje dosažení vysoké přesnosti měření a to především díky tomu, že systém byl přímo navržen pro měření parametrů vnitřních prostředí. Koncepčně zůstává systém od 80. let prakticky nezměněn, což v dnešní době v některých případech komplikuje jeho využití (například přítomnost pouze sériového rozhraní RS232 pro komunikaci s počítačem). Elipsoidní senzory a měřicí systém byly také základem pro systémy Flatman (viz Obr. 80 vpravo), který byl navržen pro měření ekvivalentní teploty a tepelného komfortu v kabinách vozidel. Systém se využíval při experimentech a vývoji především koncem 80. a v 90. letech 20. století a byl také jedním ze systémů, které byly využity v projektu EQUIV [281]. Systém je stále v nabídce a lze jej zakoupit, nicméně cena je velmi vysoká vzhledem k možnostem systému a jeho prakticky jednostrannému využití pro měření prostředí v kabině vozidel.



Obr. 80 – Vlevo: Data logger INNOVA 1221 a stojan s připojenými sondami. Zdroj archiv autora. Vpravo: Systém Flatman použitý při projektu EQUIV využíval celkem šest senzorů s geometrií elipsoidu pro určení ekvivalentní teploty v kabině testovaného vozidla. Převzato z [281].

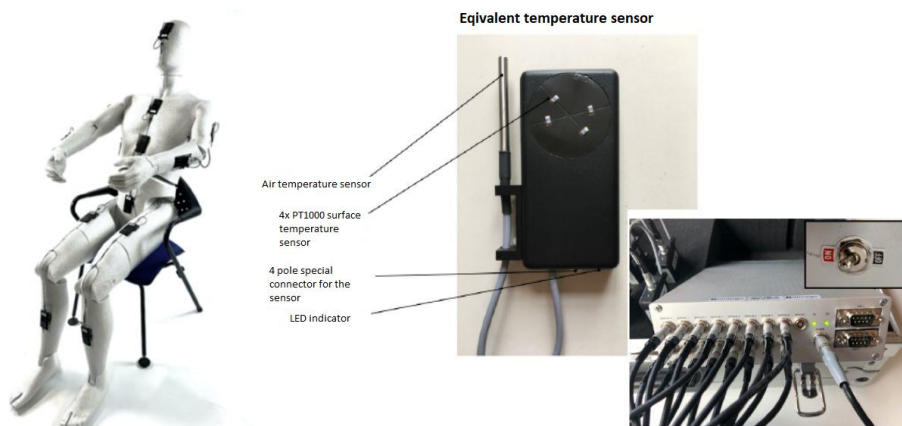
Systém Comfortis od firmy Comlogo – systém vychází z měřicího zařízení DRESSMAN (Dummy Representing Suit for Simulation of huMAN heat loss), které vzniklo v 90. letech 20. století jako systém s vyhřívanými plošnými senzory využívajícími regulační mód s konstantním tepelným tokem (CHF) a RST teplotou. Systém byl vyvinut ve Fraunhoferově institutu stavební techniky v Holzkirchenu u Mnichova a v současné době je dostupný ve verzi DRESSMAN 3.2. Senzory jsou umístěny na pasivní figuríně, která zajišťuje správnou orientaci senzorů a také imituje objem a překážku, kterou představuje lidské tělo pro proudění vzduchu v klimatizovaném prostoru (viz Obr. 81.) Senzory jsou propojeny do jedné centrální měřicí jednotky (kabelem nebo v bezdrátové verzi protokolem Zigbee), která je propojena s počítačem pro řízení, sběr a vizualizaci dat.



Obr. 81 – Vlevo: Systém DRESSMAN (Dummy Representing Suit for Simulation of huMAN heat loss) ve verzi z 90. let. Hlavní vlastností senzorů byla bezdrátovost, jak v přenosu dat, tak v napájení. Vpravo: Aktuální podoba systém DRESSMAN 3.2, která je v současné době dostupná na trhu má senzory připojeny pomocí kabelů a umožňuje i nezávislé měření teploty vzduchu u každého senzoru. Převzato z [280], [285]

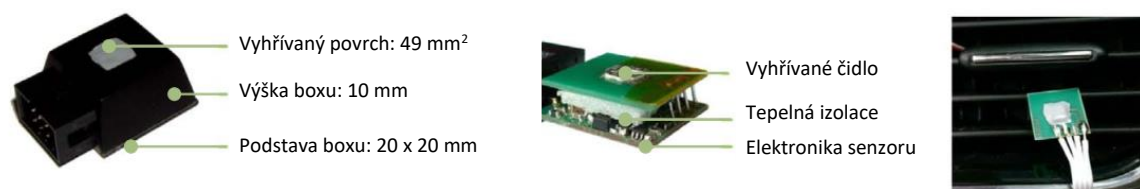
Systém Comfortis je funkčně shodný, ale je prodáván pro značkou firmy Comlogo. Systém se sestává z hlavní měřicí jednotky, ke které jsou jednotlivé senzory připojeny pomocí kabelů a z této jednotky jsou pak data a řídicí povely přenášeny bezdrátově nebo pomocí CAN linky do počítače či tabletu s řídicím software. Program umožňuje nastavení systému, zpracování

a ukládání dat a vizualizaci probíhajícího měření. Zpracování a nastavení systému je založeno na informacích a grafech z normy ISO 14505-2 [251].



Obr. 82 – Systém Comfortis a ukázka konstrukce senzoru a centrální měřicí jednotky. Převzato z [286].

Smart senzor iHVAC – je vyhříváný plošný senzor měřící tepelné toky (radiací a konvekcí), které lze přepočítat na směrovou t_{eq} (viz rovnice 4.13). Přídomek „smart“ značí fakt, že senzor není pouhým čidlem, ale obsahuje kromě čidla i řídicí elektroniku a procesor, který zajišťuje řízení aktivních prvků senzoru a digitalizaci signálu (viz Obr. 83 uprostřed). Senzor je napojen na digitální sběrnici (standard RS485), předává data a přijímá kontrolní údaje od nadřazeného měřicího systému. Senzor je možné přepnout do regulačního režimu CST i CHF pro měření ekvivalentní teploty a dále je možné nastavit i pasivní režim, kdy senzor pouze měří povrchovou teplotu čidla. Senzor byl vyvinut při řešení projektu Inovativní řízení HVAC systému kabiny automobilu jako součást asistenčního systému řidiče ve spolupráci pracovníků Laboratoře tepelného managementu a Ústavu radioelektroniky, FEKT, VUT v Brně [287].



Obr. 83 – Vlevo: rozměry iHVAC senzoru a pohled na řídicí a vyhříváný prvek. Vpravo: verze senzor s odděleným čidlem vhodná pro měření ve výustce HVAC systému osobního vozidla. Převzato z [250].

Senzor má také dvě základní konstrukční uspořádání a to verzi, kde je elektronika i čidlo integrováno v jedné krabici o rozměrech $20 \times 20 \times 10$ mm (viz Obr. 83 vlevo) a variantu, kde je čidlo vyvedeno mimo krabici s elektronikou (viz Obr. 83 vpravo), aby byla zajištěna vyšší citlivost čidla na nucenou konvekci a bylo eliminováno ovlivnění měřicí části ztrátovým teplem řídicí a komunikační elektroniky [250].

4.3 Hodnocení na základě měření tepelných manekýnů

Zařízení s nevyšším stupněm podobnosti k lidskému tělu, které umožňuje detailní experimenty ohledně tepelné bilance v relaci lidské tělo/okolní prostředí je tepelný manekýn. Dle [192], [288] je tepelný manekýn měřicí systém, využívající figurínu napodobující geometrii lidského těla, určený k testování tepelného prostředí. Hlavním důvodem vzniku a využití manekýnů byla eliminace nejistot měření a rizik vyskytujících se při experimentech s pokusnými osobami [289]. Tepelní manekýni se primárně využívají v automobilovém výzkumu, výzkumu účinků vnitřního i vnějšího prostředí na lidské tělo a ve výzkumu civilních i vojenských oděvů [288]. Aktualizovaný přehled vývoje a hlavních vlastností tepelných manekýnů sestavený s využitím zdrojů [192], [193], [252], [289]–[291] mezi lety 1942 až 2021 je uveden v Tabulce 2. Data vzniku v prvním sloupci uvádějí rok, kdy byly jednotlivé systémy uvedeny do praxe a byla publikována základní data o jejich využití. V různých zdrojích tak lze nalézt rozdílné údaje např. rokem uvedení do provozu prvního manekýna série COPERRMAN je dle R. Goldmana (spolupracovníka H. Beldinga) rok 1946 [289], dle zdrojů [192], [193], [252] je tímto datem rok 1942 či 1945.

Tabulka 2 – Technický vývoj tepelných manekýnů, jejich vlastností a schopností napodobit termofyziologické procesy lidského těla.

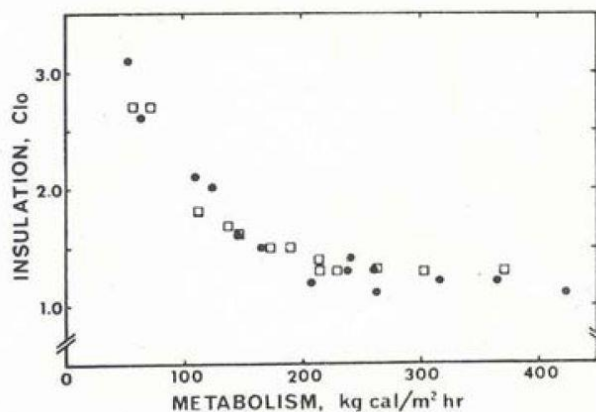
Rok	Označení	Zón	Geom.	Materiál	Pohyblivost	Regulace a měření	Zdroj tepla	Pocení	Dýchání	Model term.	Chlazení	Země vzniku
1942	není	1	M	trubky a plechy	pouze torzo	analogová	el.	-	-	-	-	USA
1946	COPPERMAN	1 + 2	M	měď	stojící	analogová	el.	-	-	-	-	USA
1964	ALMANKIN	11	M	hliník	stojící	analogová	el.	-	-	-	-	UK
1972	CEPAT400	1	M	hliník	stojící	analogová	el.	-	-	-	ano	Francie
1973	HENRIK2	16	M	plast	simulace chůze	analogová	el.	-	-	-	-	Dánsko
1978	CHARLIE	16	M	plast	simulace chůze	analogová	el.	-	-	-	-	Německo
1980	SIBMAN	16	M	plast	sedící/stojící	digitální	el.	-	-	-	-	Švédsko
1982	VOLTMAN	17/19	M	plast	sedící	digitální	el.	-	-	-	-	Švédsko
1984	UNCLE WIGGLY	18	M	měď/hliník	simulace chůze	digitální	el.	ano	-	-	-	USA
1984	TORE	19	M	plast	simulace chůze	digitální	el.	-	-	-	-	Švédsko
1988	COPPELIUS	18	M	plast	simulace chůze	digitální	el.	ano	-	-	-	Finsko
1989	NILLE	1	F	plast	sedící/stojící	komfortní	el.	-	-	-	-	Dánsko
1991	HEATMAN	33	M	plast	sedící	digitální	el.	-	-	-	-	Švédsko
1992	TARO	1	M	porózní měď	stojící	digitální	el.	ano	-	-	-	Japonsko
1996	NILLE	16	F	plast	sedící/stojící	digitální	el.	-	ano	-	-	Dánsko
2001	SAM	26	M	plast	simulace chůze	digitální	el.	ano	-	-	-	Švýcarsko
2002	WALTER	1	M	textilie	simulace chůze	digitální	voda	ano	-	-	-	Hongkong
2003	TOM	26	M	měď	pohyblivé klouby	digitální	el.	-	-	-	-	USA
2003	ADAM	126	M	porózní kov	pohyblivé klouby	digitální	el.	ano	ano	ano	-	USA
2004	KEM	17	M	porózní materiál	pohyblivé klouby	digitální	el.	ano	-	-	-	Japonsko
2005	NEWTON	34	M	vlhčená pokožka	simulace chůze	digitální	el.	ano	ano	-	-	USA
2009	NEWTON	34	M/F	vlhčená pokožka	simulace chůze	digitální	el.	ano	ano	ano	-	USA
2017	RUTH	11	B	vlhčená pokožka	pohyblivé klouby	digitální	el.	ano	-	-	-	USA
2018	ANDI	35	M	vlhčená pokožka	simulace chůze	digitální	el. / voda	ano	ano	ano	ano	USA
2021	LIZ	30	F	vlhčená pokožka	simulace chůze	digitální	el.	ano	ano	ano	-	USA

U měření a regulace představuje slovo *komfortní* řízení teploty dle zjednodušené rovnice povrchové teploty dle metabolické zátěže (Fanger). *Pocení* – simulace ochlazování povrchu manekýna pocením pomocí vylučování vody z portů/pórů na povrchu manekýna. *Model term.* – aktivní řízení povrchové teploty a míry pocení manekýna dle termofyziologického modelu. *Chlazení* – aktivní simulace tepelné kapacity a negativního tepelného toku chlazením povrchu teplotonosnou tekutinou.

4.3.1 Vznik a historie tepelných manekýnů

Období 1920 až 1950: Základ pro vývoj tepelných manekýnů byl položen dle [289] po roce 1920, kdy při Lékařské fakultě Harvardské university (Harvard Medical School) vznikla laboratoř pro výzkum „únavy“ u pracovníků v průmyslu (Harvard Fatigue Lab). Bohatí průmyslníci iniciovali a dotovali provoz laboratoře s cílem výzkumu ztráty výkonu v důsledku fyziologické únavy pracovníků ve fyzicky náročných zaměstnáních. V třicátých letech se v oblasti armádního výzkumu začaly rozvíjet experimentální techniky pro určení tepelného odporu skladeb textilií s cílem zlepšit konstrukci výstroje pro vojáky (plošné systémy typu guarded hot plate (viz Obr. 48) a jednoduché vyhřívané válce)[292]. Počátkem čtyřicátých let, poté co USA vstoupily do druhé světové války (koncem roku 1941), začali pracovníci z Harvard Fatigue Lab pod vedením Dr. Harwooda Beldinga spolupracovat s armádní laboratoří pro klimatický výzkum (Climatic Research Lab) na problémech týkajících se ochrany vojáků v chladných klimatických pásmech (dalším postupným vývojem vznikl z těchto výzkumných laboratoří po roce 1960 výzkumný ústav USARIEM - U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine). Při operacích v extrémně chladných podmínkách bylo dle [289], [290] více vojáků „zraněno“ extrémním chladem než bojem (boje o Aleuty 1943/oblast Aljašky a také zimní boje v Evropě 1944/45 [293] atd.). První výzkumné aktivity byly zaměřeny na vyvinutí spacího pytle a nafukovací matrace, které by poskytly dostatečnou ochranu pro spícího člověka po dobu 2 hodin v teplotách okolí klesajících k $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Protože však pokusné osoby trpěly chladem, často u nich docházelo k nebezpečným hypotermiím (i ti nejodolnější jedinci končili pokus, pokud povrchová teplota konečků prstů klesla k hodnotě $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy obvyklá hranice bolesti je cca $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20]) a rozdíly výdrže při stejné teplotě okolních se lišily pro stejnou osobu až o 10 % a pro stejnou osobu a dvě různé teploty až o 17 %, hledali výzkumníci jiné přesnější metody výzkumu. Prvním přiblížením byl nápad na využití nádob s teplou vodou propojených hadicí, které by simulovaly zatížení spacího pytle ležícím člověkem a dle rozdílu teploty vody proudící do a z nádob by bylo možné usuzovat na tepelnou ztrátu přes stěny spacího pytle. Vzhledem k nedostatečnému technickému vybavení na měření průtoku a teploty vody však byla tato idea vodního manekýna nazývaná „LUMPY“ opuštěna. V roce 1942 byl sestaven první manekýn s dutou válcovou geometrií, vyhříváný odporovým elektrickým tělesem, s termostatem pro regulaci povrchové teploty a ventilátorem pro zajištění oběhu vzduchu uvnitř. Konstruktorem manekýna byl Dr. Harwood Belding, který dle [292] údajně dostal inspiraci na podobu zařízení, když uviděl ve výloze obchodu s oblečením figurínu pro vystavení oděvů. Manekýn měl jen základní tvar trupu a nohou a byl sestaven z kouřovodů ke kamnům a různě ohnutých plechů. Vzhledem ke své nízké váze neposkytoval dostatečné stlačení materiálů, které vyvolávalo lidské tělo, ale jednalo se o zárodek prvního manekýna, který měl elektrické vyhřívání a regulovanou povrchovou teplotu. V roce 1943 byl vytvořen vylepšený model skládající se stále pouze z torza a dolních končetin, avšak s ventilátory a vzduchovody zlepšujícími cirkulaci vzduchu do končetin. Manekýn měl plochu povrchu přibližně 1.5 m^2 , váhu 18 kg a při vnitřní teplotě vzduchu $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ odpovídala povrchová teplota přibližně průměrné povrchové teplotě člověka. Za pomoci wattmetru a měření času bylo možné určit tepelnou ztrátu spacího pytle s nejistotou opakovaného měření do 2 %. Vzhledem k těmto pozitivním výsledkům byla v roce 1943 vytvořena vyhříváná ruka

a vyhřívané chodidlo pro určování tepelného odporu rukavic a bot. Úspěšně se také podařilo ověřit hypotézu o závislosti tepelného odporu oděvu na metabolickém výdeji vojáků v chladném klimatu (viz Obr. 84). Hypotéza byla zformulována na základě teoretických výpočtů tepelné bilance těla okolí a očekávaného vlivu oděvu na ni (viz kapitoly 2.2 a 2.3). Tyto úspěchy vedly Dr. Beldinga k pokračování ve vývoji manekýnů a objednání výroby anatomicky standardizovaného tepelného manekýna [289].



Obr. 84 – Tepelný odpor oděvů, které používali vojáci americké armády při různých intenzitách metabolické produkce tepla (plynoucí z různých činností) v chladném klimatu. Hodnoty tepelného odporu byly získány pomocí měření na prvních prototypch tepelných manekýnů, skladby oděvů byly odvozeny z pozorování v reálných podmínkách. Teoretické předpoklady o tepelné bilanci a vlivu oděvu na ni tak byly potvrzeny experimentálními údaji. Převzato z [289].

Geometrie těla nového manekýna byla vytvořena na základě anatomických dat cca 3000 kadetů letecké školy ve Wright Field tak, aby dobře reprezentovala průměrnou postavu tehdejšího amerického vojáka [294]. Postava byla vytvořena z elektricky vodivého vosku (na základě forem vytvořených akademickým sochařem Leopoldem Schmidtem z Connecticutu [292]), ta byla následně elektrochemicky pokryta mědí o síle cca 3 až 6 mm a poté byl vosk vytaven ze vzniklé skořepiny. Hlava, dlaně a chodidla, bylo možné oddělat a paže byly připojeny klouby v ramenu, aby bylo možné pohodlné oblékání oděvů. Manekýn byl vybaven celkem 6 vyhřívacími elementy/dečkami s odporovým drátem, které byly přilepeny na vnitřní povrch manekýna a vyhřívaly hlavu, hrudník a dolní + horní části paží a nohou. Tyto dečky dodala firma General Electric corporation zabývající se výrobou prvních elektricky vyhříváných dek/podložek pro koncové uživatele. Dlaně a chodidla byla vybavena nezávisle regulovatelnými elektrickými rezistory a manekýn byl osazen celkem 22 termočlánky pro měření povrchové teploty (průměrná povrchová teplota stojícího manekýna byla 37.5 °C) [289]. Povrch manekýna byl upraven černou barvou, která dodala povrchu emisivitu odpovídající reálné lidské pokožce. Manekýn byl pojmenován „Chauncy“ (viz Obr. 85), první exemplář byl dodán v roce 1946 (jiné zdroje [192], [193], [252] uvádějí rok 1942, což je ale pravděpodobně mylný údaj vzniklý opisem dat z pozdějších publikací) a celkově bylo vyrobeno minimálně 10 manekýnů této konstrukce (později označené jako Copperman), využívaných v různých výzkumných ústavech po celých USA. Zajímavostí je, že dečky od GE sloužily v některých manekýnech až do 70. let a jeden exemplář manekýn po retrofitu regulace v roce 1995 slouží v USARIEM dodnes [292].



Obr. 85 – Manekýni a jejich konstruktéři, zleva doprava: James Bogart a manekýn pro výzkum přenosu tepla ve vodním prostředí, Harwood E. Belding konstruktér prvního tepelného manekýna Chauncy, tepelný manekýn Chauncy (typ Copperman) dodnes funkční v USARIEM, Ralph F. Goldman nestor výzkum tepelně technických vlastností oděvů a konstruktér prvního manekýna „s pocením“ a pohyblivého manekýna, první manekýn s možností měření výparného odporu oděvu a Robert J. Breckenridge termofyziolog a spolupracovník R. Goldmana (1972, USARIEM). Zcela vpravo: nefunkční exemplář manekýna typu Copperman vystavený v Národním muzeu zdraví a medicíny, USA. Převzato z [294].

Období 1950 až 1960: Manekýni série Copperman byly využívány pro různé studie a experimenty související s lidskou termofyziologií (Obr. 86 vlevo), vývojem oděvů a speciálního vybavení [292]. Technický vývoj manekýnů byl po skončení druhé světové války utlumen a pro provedení měření tepelných vlastností oděvů byla většina manekýnů uložena do skladu, vyřazena z provozu a někteří byly dokonce sešrotováni [289]. Jako hlavní metoda pro výzkum tepelných vlastností oděvů a textilií se využívala metoda založená na přístupu guarded hot plate, pomocí níž bylo odhaleno, že převážnou část tepelného odporu oděvu určuje vzduch zachycený v materiálu oděvu a mezi vrstvami oděvu nikoliv samotné materiály textilií, z kterých je oděv vytvořen (Obr. 86 vpravo).

Layer (#)	Nature	Insulation* (clo)	
1	Surface still air layer	0.8	0.8
2	Jacket cover fabric	0.15	}
3	Trapped still air layer	0.15	
4	Insulating batting	0.2 - 0.5	- 0.9 - 1.2
5	Trapped still air layer	0.15	}
6	Jacket lining	0.1	
7	Trapped still air layer	0.15	}
8	Shirt	0.1	
9	Trapped still air layer	0.2	}
10	Underwear	0.15	
11	Trapped still air layer	0.15	}
	Torso surface total clo	1.6	
		air +	fabric = total

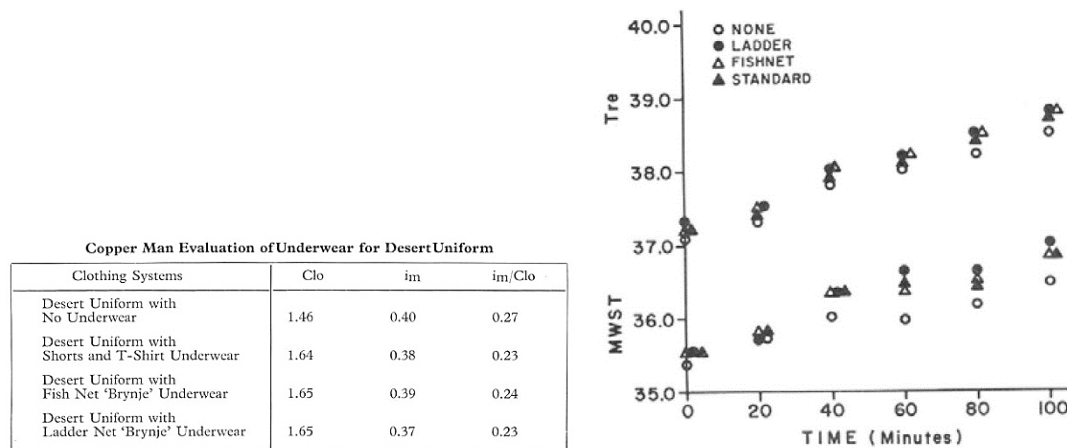
Obr. 86 – Vlevo: Tepelný manekýn typu Copperman využíváný k studiím „teploty lidského těla“, 1951, School of Public Health, University of Pittsburgh, USA. Převzato z [252]. Vpravo: Ukázka příspěvku materiálů vícevrstvého oděvu (cca 0.7 až 1 clo) a vzduchových vrstev zachycených v oděvu (cca 1.6 clo) k celkovému tepelnému odporu oděvu (2.3 až 2.6 clo). Tepelný odpor vrstev vzduchu je vyšší než vlastních materiálů oděvu. Převzato z [289].

1960 - 1970 – V důsledku rozvoje studené války a obav z případného použití chemických zbraní ve válečném konfliktu byla zkoumána výdrž vojáků v neprodyšných protichemických oděvech (viz kapitola 3.3.3). Důsledek eliminace ochlazování těla odpařováním potu se jasně

projevil při polním testu (úroveň 4 – viz kapitola 4.4.1) protichemického vybavení, kdy více než polovina vojáků z čtyř čítající 44 osob, dosáhla po jedné hodině pochodu tělesné teploty pro hypertermii. Vojáci pochodovali s plnou polní výbavou ve venkovním prostředí v podmínkách „příjemně teplého dubnového rána“ ve Virginii, USA [289]. Byl tedy hledán postup jak kvantifikovat „odpor“, který představoval oděv pro ochlazování lidského těla odpařováním potu a k těmto účelům byl zaveden „moisture permeability index“ tj. index propustnosti vlhkosti označovaný I_m [-]. Index udává poměr tepla odváděného z lidského těla při aktuálních podmínkách a použití oděvu ku maximálnímu teple odváděnému odpařováním, které je možné odvádět z neoblečeného povrchu v daných podmínkách prostředí. Dle [289] vznikl index na základě práce Dr. Alana Woodcocka, který prováděl experimenty s vlhčeným válcem o rozměrech simulujících předloktí a definoval rozsah I_m indexu od 0 pro případ, kdy byl válec kompletně zakryt pro vodní páru nepropustnou pogumovanou tkaninou, po 1 pro případ, kdy byl válec odkrytý a teplo přenášené odpařováním z povrchu válce bylo maximální vzhledem k podmínkám okolí (teplota, relativní vlhkost/parciální tlak vodní páry). Maximalizace odváděného tepla byla také dosažena pomocí nucené konvekce okolo válce, čímž byl minimalizován vliv mezních vrstev u povrchu válce. V reálných podmínkách je tedy index I_m prakticky vždy menší než 1 a pro typické oděvy používané ve vnitřních prostředích je v rozsahu 0.3 až 0.5 [20]. Aby bylo možné určit index I_m pro reálné oděvy a jejich skladby navrhnul a později i realizoval R. Goldman první pokusy s „potícím se“ manekýnem, ačkoliv Dr. Woodcock tento návrh považoval nejprve za vtip [289]. Jako první krok byl ušit overal z bavlny, který dobře přiléhá k povrchu manekýna (viz Obr. 85 vlevo – manekýn s bílým overalem). Před započítáním měření byl manekýn nejprve obalen voděodolnou fólií, která chránila regulační a vytápěcí obvody před poškozením vodou (u současných manekýnů, kteří mají provedení elektroniky odolné proti vlhkosti, není toto opatření potřeba [289]) a na takto upraveného manekýna byl nasazen suchý bavlněný overal. Poté byl oblečen testovaný oděv a změřen suchý tepelný odpor celé sestavy pro kalibraci měření. Následně byl oděv svlečen, bavlněný overal byl zvlhčen vodou (o teplotě cca 35 °C) pomocí ručního zahradního rozprašovače a oděv byl oblečen zpět na manekýna. Měření poté probíhalo, dokud nebylo pozorováno schnutí některé části manekýna indikované poklesem příkonu elektrické energie nutné pro udržování povrchové teploty daného segmentu. Oděv byl opět sundán, overal znovu navlhčen a měření opakováno (prakticky stejná metodologie je používána při měření výparného odporu v laboratoři autora viz kapitola 3.2.3.). Zahrnutí tohoto postupu do metodologie umožnilo rozšířit využití manekýnů nejen pro studium přenosu tepla z těla v chladných podmínkách, ale i podmínkách teplých, kdy je nezbytné intenzifikovat přenos tepla do okolí prostřednictvím pocení.

Koeficient I_m je praktický pro určení účinků oděvu na schopnost lidského těla ochlazovat se v daném prostředí pocením [289], ale vzhledem k tomu, že se jedná o relativní index závislý na aktuálních podmínkách prostředí je v oblasti určování parametrů oděvů a simulačních modelech dnes spíše využíván výparný odpor oděvů R_{et} (viz kapitola 3.2.3). Praktičnost přístupu I_m indexu tím však není nijak dotčena a pro základní přiblížení a rychlé výpočty tepelné ztráty vypařováním v daném prostředí je to nejlepší možný postup. Jeho užitečnost lze demonstrovat na měření provedeném pro určení vhodnosti využití různých typů tkaniny pro podvlekové prádlo určené pro uniformy pouštních podmínek. Test se konal na úrovni 3, kdy

malá skupina na horko aklimatizovaných pokusných osob (blíže viz kapitola 3.1.1 aklimatizace na teplo) byla vystavena řízené zátěži v klimatické komoře s teplotou 49 °C, 20 % RH. Testovány byly skladby bez podvlekového prádla (None), s podvlekovým prádlem z bavlny (standard), síťované podvlekové prádlo (fishnet) a podvlekové prádlo s žebříčkovým síťováním (ladder). Dle měření indexu propustnosti vlhkosti na manekýnovi byl předpoklad, že měřitelný rozdíl by měl nastat pouze mezi testy bez prádla a ostatními testovanými podvlekovými oděvy. Testy tento předpoklad potvrdily (viz Obr. 87) a bylo možné konstatovat, že struktura tkaniny podvlekového prádla nemá zásadní vliv na výparný odpor celé sestavy, nicméně užití podvlekového prádla zvyšuje tepelný odpor celého oděvu.



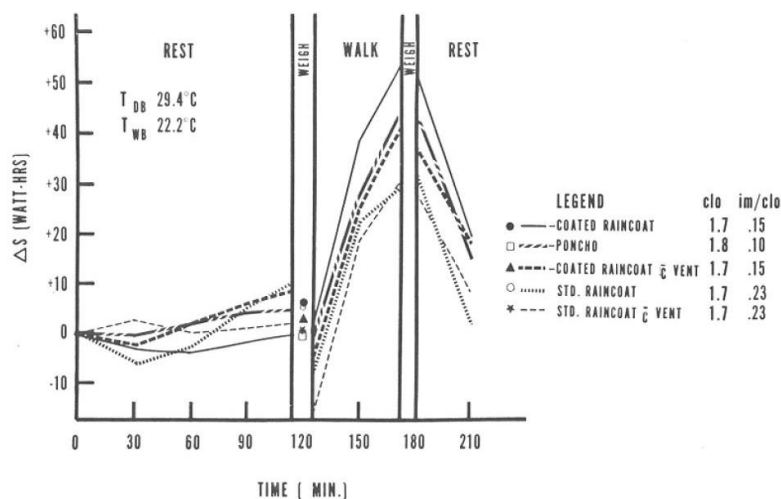
Obr. 87 – Vlevo: Tabulka vlastností různých skladeb uniforem pro horké pouštní podmínky. Z hodnot Clo je patrné, že nejmenší tepelný i vypařovací odpor má skladba bez podvlekového prádla (no underwear), zatímco ostatní skladby jsou „teplejší“ a mají prakticky stejný index propustnosti vlhkosti nezávislý na použitém materiálu. Vpravo: Ověření předpokladů pomocí testů úrovně 3 s dobrovolníky. Měřitelně nižší povrchové teploty a tělesné teploty byly pozorovány pouze u testů bez podvlekového prádla (NONE). U ostatních typů (STANDARD, LADDER, FISHNET) byly výsledné teploty vyšší a vzájemně se nijak nelišily = nezáleželo na typu tkaniny. Převzato z [289].

V roce 1964 byl ve Velké Británii zkonstruován nový typ manekýna označený jako Almannin využívající jako hlavní materiál hliník, který je lehčí než měď, ale při zachování dobré tepelné vodivosti. Manekýn byl rozdělen do 11 nezávisle regulovatelných a měřených segmentů.

Období 1970 – 1980: Další vývoj v oblasti techniky manekýnů se ubíral směrem k upřesnění vlastností oděvů při jejich použití reálnými uživateli a zahrnutí vlivu pohybu. Vznikli takzvaní artikulovaní/pohybliví manekýni umožňující pohyblivost v kloubech v kombinaci s mechanizmy zajišťujícími pohyb (většinou v podobě elektromotorů a táhel ovládajících pohyb paží a nohou, označovaný jako „walking stand“).

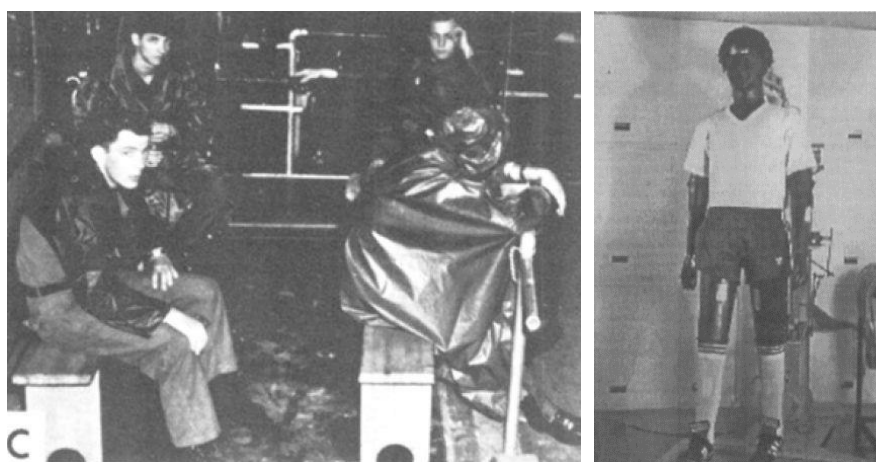
K rozvoji opět přispěly experimenty R. Goldmana v USARIEM, který při testech s oděvy proti dešti pozoroval rozpor mezi očekávaným výsledkem měření a skutečností. Goldman očekával, že nejvyšší tepelné zátěži budou vystaveny pokusné osoby při použití ponča z voděodolného materiálu ($0.1 I_m/Clo$), dále pak při použití impregnované pláštěnky bez nebo i s malými větracími otvory na ramenou ($0.15 I_m/Clo$) a nejmenší zátěži budou vystaveny osoby při použití běžného pláště do deště, který byl relativně dobře propustný pro vodní páru ($0.23 I_m/Clo$). Výsledek reálného testu na úrovni 3 (viz Obr. 89 vlevo) byl však jiný, jak je vidět na Obr. 88. Při testech a pohybu pokusných osob totiž umožňovalo pončo (základní střih viz

Obr. 40) opakované provětrávání objemu pod pončem (pumpovací efekt) a efektivnější odvod páry než uzavřená impregnovaná pláštěnka. Tento výsledek vedl ke konstrukci pohyblivého manekýna (označení CUMAN, který vycházel se série COPPERMAN), který by umožnil měření efektů pohybu na tepelný a vypařovací odpor oděvů [290], [295]. Tepelný a výparný odpor změřený na pohybujícím se manekýnovi se označuje přídomkem „resultant“ překládaný jako „výsledný“ odpor (viz kapitola 3.2.3).



Obr. 88 – Výsledky testů na pokusných osobách, oděvy pro ochranu před deštěm. Dle měření na statickém manekýnovi mělo největší tepelný stres způsobovat pončo s nejvyšším tepelným odporem a nejnižší propustností pro vodní páru. Při testech a pohybu pokusných osob však umožňovalo pončo opakované provětrávání (pumpovací efekt) a efektivnější odvod páry než uzavřená impregnovaná pláštěnka. Převzato z [289].

V roce 1974 byl v Dánsku zkonstruován manekýn HENRIK2, který byl prvním manekýnem vyrobeným z plastové sendvičové konstrukce, měl pohyblivé klouby a umožňoval simulaci chůze a pohybu rukou a nohou [296]. V roce 1978 byl v Německé spolkové republice zkonstruován manekýn CHARLIE (viz Obr. 89 vpravo), který byl určen pro měření tepelných vlastností oděvů. Vytvořen byl v Hohenstein Institutu a díky pohonu rukou a nohou umožňoval měření výsledných vlastností oděvů při pohybu uživatele. Manekýn byl rozdělen do 15 nezávisle regulovatelných a měřených segmentů [297], [298].



Obr. 89 – Vlevo: Dobrovolníci při testech oděvů proti dešti v klimakomoře USARIEM kolem roku 1972. Vpravo: Pohyblivý manekýn Charlie, zkonstruovaný v roce 1978 v Hohenstein Institute, SRN. Umožňoval měření výsledného tepelného odporu oděvu. Dnes se používá čtvrtá generace tohoto manekýna. Převzato z [295], [297].

Období 1980 – 1990: V tomto období lze jednoznačně zaznamenat nástup a rozvoj digitální regulační techniky a osobních počítačů v technice manekýnů a jejím vývoji. Prosazují se plastové a vrstvené materiály, umožňující snížení váhy manekýna při zachování pevnosti figuríny. Tyto konstrukce umožňují snadnější integraci různých aktivních (vyhřívání, pocení) a senzorických systémů do konstrukce povrchu manekýna. Manekýni také nalézají uplatnění jako měřicí zařízení pro výzkum vnitřního prostředí, hlavně pak v oblasti HVAC kabin dopravních prostředků, výzkumu tepelného komfortu a kvality větrání v budovách.

Za účelem výzkumu prostředí v kabinách osobních vozidel vzniká ve Švédsku v automobilce Volvo v roce 1982 manekýn VOLTMAN jehož jméno je akronymem z Volvo's thermal manikin [299]. Manekýn měl mužskou geometrii s polohou vsedě a pohyblivými klouby v ramenou, kolenou a kotních pro možnost usazení ve voze. Byl rozdělen do 17 (později do 19) nezávisle regulovaných segmentů, jejichž povrchovou teplotu bylo možné udržovat PID regulátory s přesností ± 0.1 °C v rozmezí teplot 31 až 34 °C [300]. Hlavním výstupem manekýna byly hustoty tepelného toku [W/m^2] z jednotlivých segmentů a následně výpočet segmentové ekvivalentní teploty (viz rovnice 4.10 až 4.12).

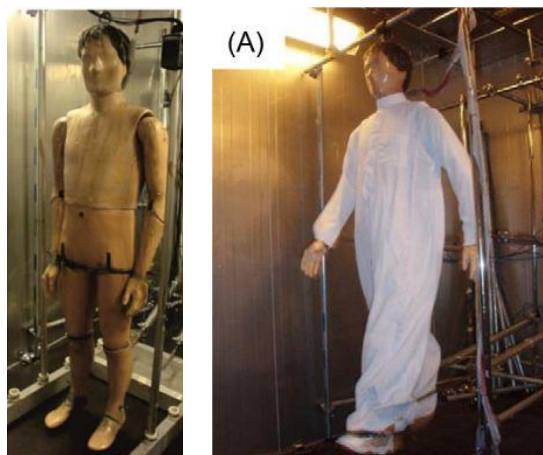
Pokračoval také vývoj tzv. artikulovaných manekýnů pro určování tepelných vlastností oděvů v podmínkách reálného použití na pohybující se osobě. V roce 1984 je v USARIEM uveden do provozu manekýn nazývaný UNCLE WIGGLY (viz Obr. 90) vyrobený z mědi s klouby z hliníku. Manekýn umožňoval simulaci chůze do rychlosti 4.5 km/h a měření vypařovacích odporů oděvů prostřednictvím vlhčeného overalu [301]. Regulace manekýna byla řízena počítačem s grafickým zobrazením okamžitých hodnot a tiskovým výstupem výsledků měření. Manekýn byl umístěn v samostatné klimatické komoře, která umožňovala regulaci teploty, vlhkosti a precizní kontrolu rychlosti proudění vzduchu. V roce 2003 byl vyhřívací, regulační a měřicí systém podroben retrofitu a doplněn o simulaci pocení pomocí distribučních portů vody. Byl také modernizován řídicí a záznamový počítač pro uchování a zpracování záznamů z měření [302]. V roce 2015 byl provoz manekýna ukončen a následně byl předán do sbírek Národního muzea medicíny a zdraví v USA [303].



Obr. 90 – Vlevo: USARIEM 1984, nový pohyblivý manekýn UNCLE WIGGLY. Vpravo: Retrofit vyhřívacích elementů a řídicí elektroniky 2003 od firmy Thermetrics. Zařazen do sbírek National Museum of Health and Medicine v roce 2015. Převzato z [301], [303].

Ve Švédsku byl v roce 1984 vyvinut artikulovaný manekýn TORE, který byl tvořen pěněným plastem rozděleným do celkem 19 samostatně regulovaných a měřených segmentů. Manekýn nebyl vybaven samostatným systémem pro simulaci pocení, ale bylo na něm možné měřit

výparné odpory oděvů pomocí vlhčeného overalu [202], [203]. Manekýn byl řízen počítačem a umožňuje simulaci chůze do rychlosti 4 km/h. V současné době je stále v provozu v laboratořích univerzity v Lundu [203], [291].



Obr. 91 – Vlevo: Manekýn TORE vyvinutý ve Švédsku v roce 1984. Vpravo: Manekýn při měření výsledného tepelného odporu oděvu pro pouštní oblasti (blíže viz Obr. 39). Převzato z [291], [304].

Na základě zkušeností s vývoje manekýna TORE, byl v roce 1988 ve Finsku na Universitě v Tampere vyvinut manekýn Coppelius (jméno manekýna je odkazem na klasický romantický balet Coppelia z roku 1870 [305], kde doktor Coppelius vytváří realistické loutky v životní velikosti a svůj nejlepší výtvar chce nechat obživnout [306]). Manekýn anatomicky odpovídal oděvní velikosti 40 a byl vybaven pohyblivými klouby v ramenou, loktech, kyčlích, kolenou a kotnících což umožňovalo simulaci chůze do rychlosti 4 km/h.

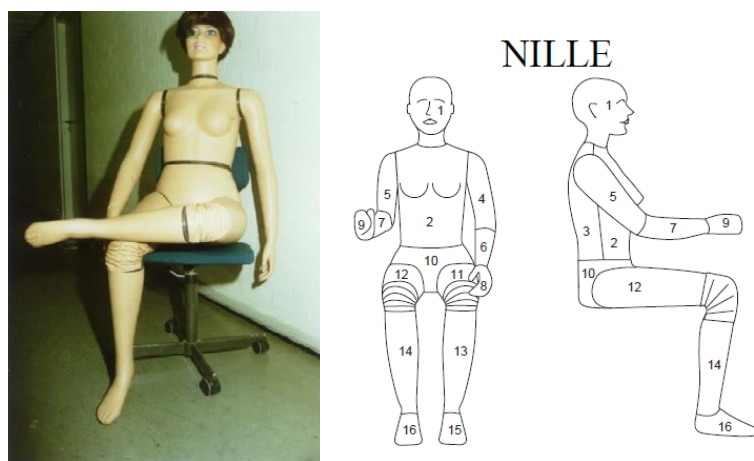


Obr. 92 – Vlevo: Originální COPPELIUS vyvinutí v roce 1988 na Universitě v Tampere, Finsko po vedení Dr. Harriet Meinander. Uprostřed: Dr. Ben Malstorm s konstrukčními částmi manekýna COPPELIUS licencovaného na NC State University, USA. Fotografie zobrazuje průběhu výroby manekýna, kdy na povrch ještě není aplikována bílá textilie pro distribuci vody z pórů. Vpravo: Pohled od útroby manekýna s detailem na trubičky systému pro simulaci pocení. Převzato z [252], [301], [307].

Povrch manekýna byl rozdělen do 18 odděleně vyhřívaných, regulovaných a měřených segmentů. Aby bylo možné určení výparných odporů oděvních sestav bez nutnosti manipulace s oděvem v průběhu měření, byl manekýn vybaven celkem 187 póry pro distribuci vody simulující sekreci potu (segmenty hlava, dlaně a chodidla byla vzhledem k technologické obtížnosti přívodu vody bez pórů). Systém umožňoval dodávat maximálně 200 g/m²h, přičemž

voda z pórů byla nejprve přiváděna do vrstvy netkané textilie, která zajišťuje rozvod vody po povrchu a poté prostupovala do vrstvy mikroporézního materiálu, tvořící povrch manekýna (bílý plošný materiál na Obr. 92 uprostřed). Manekýn byl provozován v samostatné klimatické komoře s teplotním rozsahem -50 až $+50$ °C a regulací vlhkosti vzduchu v rozsahu 15 až 90 % RH. Při měření vypařovacích odporů oděvních sestav byl manekýn nejprve oblečen a byla určena hmotnost manekýna s oblečením v suchém stavu (váha byla součástí závěsu manekýna). Následně byl povrch manekýna navlhčen z pórů, do kterých byla přivedena voda ze zásobníku, přičemž množství vody bylo určováno dle změny hmotnosti zásobníku. Množství odpařené vody bylo následně vyčísleno z rozdílu hmotnosti vody dodané ze zásobníku a změny hmotnosti manekýna po navlhčení povrchu a ustálení tepelných toků z jednotlivých segmentů. Ze změny hmotnosti oděvu před experimentem a po provedení měření bylo možné také usuzovat na množství vody, která zkondenzovala v oděvu [291].

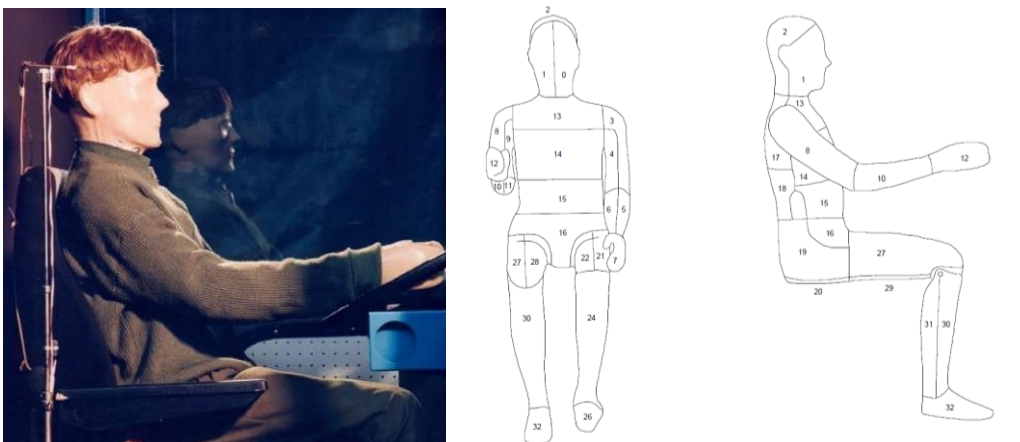
Až do roku 1989 vycházely geometrie všech manekýnů z anatomie mužského těla. První manekýn s ženskou anatomí byla manekýna NILLE zkonstruovaná v roce 1989 na DTU, Lyngby, Dánsko [192]. Manekýna byla původně vytvořena pro testování tepelných vlastností dámského oblečení, které je obecně rozmanitějšího střihu, využívá více druhů materiálů (viz kapitola 3.2.1) a anatomické proporce ženského těla jsou odlišné od mužského hlavně v oblasti prsou, pánve a stehen. Dále však byla také využita pro měření komfortu a kvality prostředí v budovách a kabinách dopravních prostředků. Manekýna byla vytvořena v konfekční velikosti 38, s výškou odpovídající ženě vysoké 168 cm a vážila přibližně 31 kg. Jako základ geometrie byla využita figurína pro vystavování oblečení, která byla upravena a doplněna o vrstvu pro vyhřívání povrchu. Verze z roku 1989 měla celý povrch manekýny řízený jako jeden segment. Zvláštností v technickém řešení bylo využití stejného niklového drátku pro vyhřívání a měření povrchové teploty jednotlivých segmentů. Řídicí počítač mohl přepínat až s frekvencí cca 100 Hz mezi vyhříváním a měřením povrchové teploty [308]. Na manekýně byl také poprvé aplikován regulační mód adaptabilní povrchové teploty dle Fangerova (blíže viz kap. 4.2.2).



Obr. 93 – Vlevo: První manekýna s geometrií na základě ženské anatomie byla NILLE, zkonstruovaná v roce 1989 na DTU, Dánsko. Vpravo: Druhá verze manekýny NILLE z roku 1996 využitá v projektu EQIV a ukázka dělení manekýny na 16 segmentů. Převzato z [308].

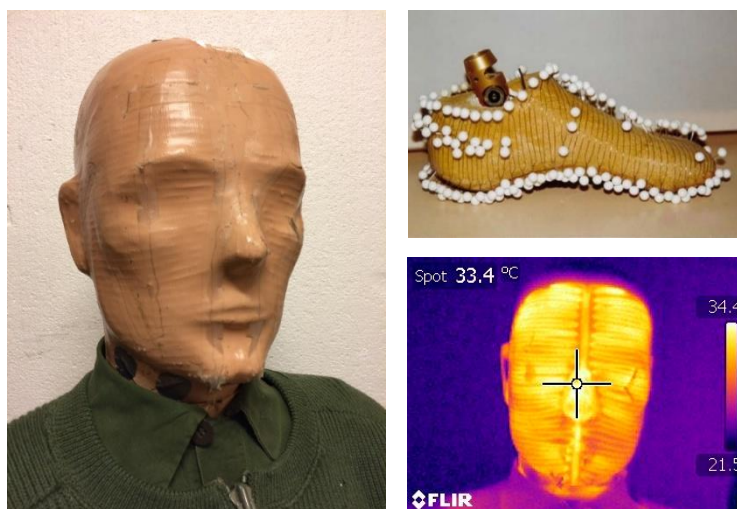
Období 1990 – 2000: Období posledního desetiletí 20. století je v oblasti tepelných manekýnů charakterizováno postupným zmenšováním obslužných systémů manekýnů především díky rozvoji, integraci a zmenšování elektroniky a počítačů typu PC. Také dochází k vývoji dalších systémů simulujících nové fyziologické funkce jako např. dýchání [308]. V americkém Seattlu vzniká firma Measurement Technology Northwest (sekce manekýnů je později vydělena pod značku Thermetrics), která se specializuje na výrobu manekýnů a stejně tak v Dánsku vzniká firma PT Teknik. Koncem desetiletí je realizován projekt EQIV, který definuje systémy a měření ekvivalentní teploty [283] (viz kap. 4.2.1) a ve Vehicle Climate Control Laboratory, NREL, USA začínají aktivity, které vedou ke stavbě manekýna ADAM [309]. Na Technické universitě v Hong Kongu se experimentuje s vodními manekýny z nichž později vznikne systém WALTER a intenzivně se rozvíjí oblast modelů lidské termofyziologie [310], které budou v následujícím desetiletí propojeny s regulací manekýnů [291], [309].

V roce 1991 byl ve Švédsku zkonstruován manekýn HEATMAN (také MANIKIN2) na Department of Technology and Built Environment, Royal Institute of Technology, který byl také hojně využíván pro projekty laboratoře Department for Work and Health, National Institute for Working Life, který vznikl počátkem 90. let pro výzkum účinků pracovního prostředí na zdraví pracovníků. V některých zdrojích lze také nalézt označení MANIKIN2 [252] či Swedish electrically heated thermal manikin [311]. Manekýn vycházel z konstrukce staršího švédského manekýna ASSMAN (1983), u něhož byly ale problémy se spolehlivostí a robustností mechanických kloubů, jako i se čtyřmi počítači pro regulaci a měření 33 segmentů. Manekýn HEATMAN byl tedy zkonstruován jako pouze sedící manekýn (viz Obr. 94 vlevo), jehož povrch byl rozdělný do 33 zón (viz Obr. 94 vpravo). Jádrem manekýna tvořil pěnový plast, na jehož povrch byly přichyceny vyhřívací a měřicí drátky (Obr. 95 vpravo nahoře), které byly posléze zality polymerem, který tvořil výsledný povrch manekýna (Obr. 95 vlevo – prosím povšimněte si úsměvného faktu, že manekýn má na obrázcích 94 a 95 stejné oblečení, ačkoliv mezi jejich pořízením uplynulo více jak 20 let). Při konstrukci podpurných a obslužných systémů bylo využito upořádání do 3 základních boxů (které se používá s mírnými obměnami dodnes) spočívající v propojení řídicího počítače, separátního boxu pro napájecí zdroj a boxu pro připojení čidel (3x teplota vzduchu) a regulaci manekýna (33x povrchová teplota segmentů).



Obr. 94 – Vlevo: Manekýn HEATMAN při testování prostředí v simulátoru kabiny. Manekýn byl zkonstruován ve Švédsku v roce 1991. Vpravo: Manekýn byl rozdělen do celkem 33 nezávisle regulovatelných segmentů. Převzato z [252].

Manekýn byl využit například jako jedno z experimentálních zařízení projektu EQIV (viz také kap. 4.2.1), a také jako hlavní experimentální systém pro disertační práci Håkana O. Nilssona [252], kde je podrobně zdokumentován v příloze A i celý postup výroby manekýna. Protože manekýn byl stěžejním zařízením při experimentech, které vedly k vývoji diagramu komfortních zón, byla v roce 2018 prověřena funkce vyhřívacích segmentů na obličeji. Cílem prověření bylo nalezení příčiny nesouladu publikovaných výsledků Håkana O. Nilssona [312] a výsledků, které pozoroval autor při měření se systémem NEWTON [313]. Díky stáži Róberta Tomy na universitě v Lundu bylo možné manekýna po letech uvést do provozu a prověřit, že obličejové části fungují korektně (viz Obr. 95). Řešení bylo později nalezeno v chybně zapsané tabulce 1 v článku [312], a předběžné výsledky byly publikovány v článku na konferenci 12i3m St.Gallen, Švýcarsko [314].



Obr. 95 – Vlevo: Manekýn HEATMAN v roce 2018 ve skladu university v Lundu, Švédsko. Je dobře patrný povrchový polymer, v kterém jsou zalaty vyhřívací a měřicí drátky. Zdroj archiv R. Toma. Vpravo nahoře: Fotografie z výroby manekýna a způsob rozložení vyhřívacího drátu na chodidle z pěnového plastu. Převzato z [252]. Vpravo dole: Infračervený snímek zapnutých segmentů 0 a 1 na obličeji názorně ukazuje vedení jednotlivých drátků. Zdroj archiv R. Toma.

V roce 1992 byl v Japonsku uveden do provozu tepelný manekýn TARO se simulací pocení, který měl regulován celý povrch jako jeden segment. Zvláštností konstrukce tohoto skořepinového manekýna byl materiál označovaný jako „porézní bronz“. Tento materiál umožňoval simulaci pocení tím, že zajišťoval přenos vlhkosti z vnitřku manekýna na jeho povrch. Množství přenesené vlhkosti bylo úměrné množství vzduchu, které bylo přiváděno do vnitřní dutiny manekýna, a vlhkostně saturovaný vzduch pak byl póry distribuován po celém povrchu manekýna. Toto technické řešení však v režimech s vyšším množstvím generované vlhkosti/potu vedlo k nerealistickému proudění vzduchu po oděvem [291]. Princip porézního kovu však byl dále využit při konstrukci manekýna ADAM (viz další sekce).

V roce 1996 byla v Dánsku vytvořena nová verze manekýny NILLE, u které by zvýšen počet segmentů na 16 (Obr. 93, vpravo) a byla rozšířena o systém simulující dýchání. Bylo tak možné napodobit další interakci lidského těla s okolním prostředím s cílem umožnit monitorovat kvalitu vnitřního prostředí z pohledu znečišťujících látek ať již plyných či aerosolů přímo v obličejové části manekýna [315]. Systém umělých plic umožňoval nastavit průtok dýcháním v rozmezí 5 až 30 l/min s dechovou frekvencí 6 až 30 Hz [308].

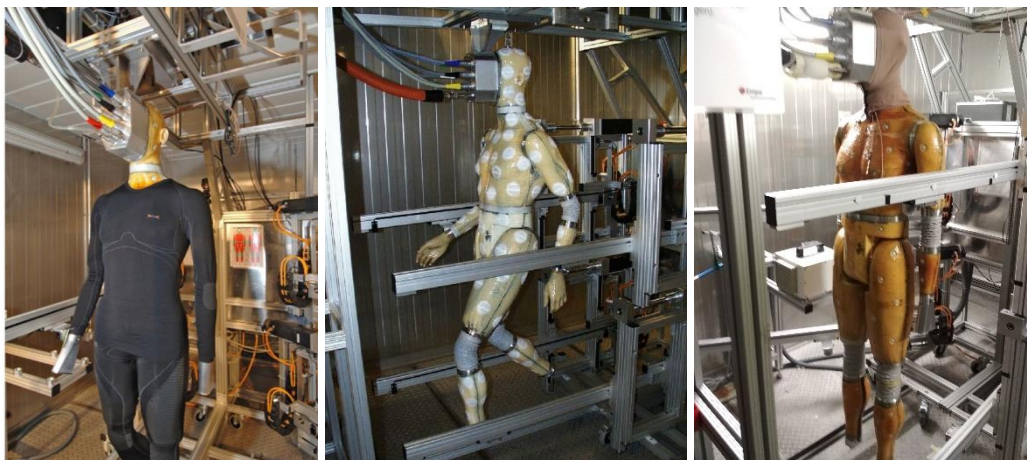
Období 2000 až doposud: Toto období lze označit za zlatý věk tepelných manekýnů, v němž byla zkonstruována a uvedena do praxe celá řada špičkových systémů jako ADAM, SAM, NEWTON atd. Díky propojení manekýnů s termofyziologickými modely lze imitovat základní termofyziologické děje a umožňují tak sledovat jejich interakci s oděvy, okolím a okolními technologiemi (např. větrané sedačky) [291]. Manekýni se stávají komerčně dostupnými (hlavně výrobky Thermetrics a PT Teknik), ačkoliv stále velmi investičně náročnými měřicími systémy [192], ale rozvíjí se i levné a in-house varianty tepelných manekýnů [94], [255]. Rozšiřuje se využití manekýnů v oblasti tepelného komfortu v budovách, kabinách automobilů, vlaků a letadel s cílem optimalizace spotřeby HVAC systémů, úspory energie a znečišťujících látek vnikajících při její výrobě (viz také kapitola 3.3.2).

Speciálním typem manekýna, jehož vývoj započal již v 90. letech, byl manekýn WALTER, který má unikátní konstrukci provedenou z membránových materiálů typu Gore-Tex prodyšných pro vodní páru, ale nepropustných pro vodu v kapalném skupenství [257]. Figurína „ušitá“ z tohoto materiálu je naplněna vodou, která může prostupovat póry (uvádí se počet pórů až 1.4 miliardy na cm^2) na povrch manekýna, kde dochází k jejímu odpařování. Cirkulaci vody mezi torsem a končetinami zajišťují oběhová čerpadla, ohřev vody je realizován v externím ohříváči [291]. Množství odpařené vody je určováno prostřednictvím změny hmotnosti zásobníku, z kterého je doplňována odpařená voda v průběhu měření (maximální hmotnost odpařené vody je cca 559 g/m^2h). Manekýn vzhledem ke své konstrukci musí být vždy zavěšen v rámu umístěném v klimatické komoře a umožňuje měření pouze v poloze „ve stoje“. Prostřednictvím táhel může pohybovat končetinami až do simulované rychlosti pohybu cca 2.5 km/h . Typické použití je pro určení výparného odporu oděvních sestav a to jak pro celkové tak výsledné hodnoty [301]. Dle publikace [257] je WALTER a manekýn COPPELIS vzhledem k principu prostupu vody na povrch nejlépe schopni dosáhnout izotermních podmínek na povrchu manekýna, které jsou základní podmínkou pro snížení nejistoty měření při určování výparných odporů testovaných oděvů. Limitem je však nemožnost simulace mokrého pocení při vyšších metabolických zátěžích organismu, kdy je pot vylučován v podobě kapaliny na povrchu pokožky.



Obr. 96 – Vodní tepelný manekýn Walter pro testování oděvů. Uvedení do provozu 2002, Hong Kong. Převzato z [291].

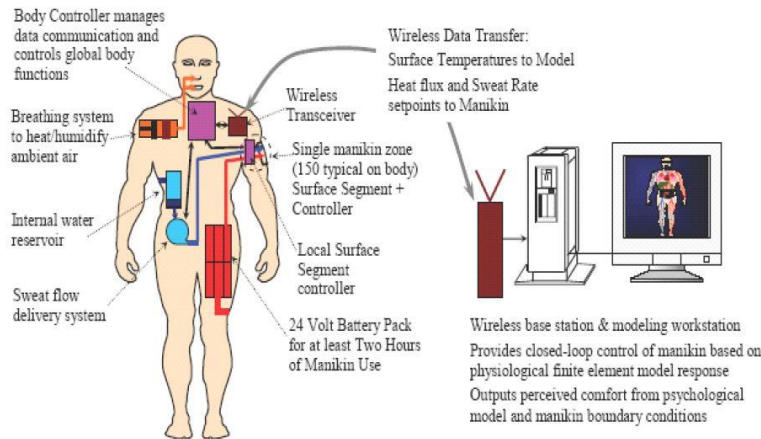
Vývoj manekýna SAM (Sweating Agile Thermal Manikin) započal koncem 90. let na základě požadavku určování vlastností nových textilních materiálů, celých oděvních sestav a jejich výsledných (resultant) tepelných a vypařovacích odporů. Laboratoř EMPA v St. Gallenu disponovala již dílčími zařízeními v podobě částí těla (hlava, pohyblivá paže, potíci válec) či statickými manekýny, ale dosud chybělo zařízení na provádění celkových měření [316]. Manekýn je rozdělen do 30 nezávisle regulovatelných segmentů, které jsou při typickém provozu vyhřívány na povrchovou teplotu 34 ± 0.1 °C, disponuje 125 porty pro simulaci pocení (až 4 litry/h) a motorizovaným standem pro realistickou simulaci pohybu do rychlosti 3 km/h. Manekýn je umístěn v samostatné klimatické komoře, která umožňuje vytvoření prostředí v rozsazích parametrů: teplota vzduchu -30 až $+40$ °C, vlhkost vzduch 20 až 90 % RH a rychlost proudění vzduchu 0.2 až 40 m/s (144 km/h). Do provozu byl uveden v roce 2001, ale jeho konstrukce a vybavení bylo postupně upravováno. Například v roce 2006 byl upraven systém ventilů pro ovládání potíciích portů tak, aby bylo možné nezávisle řídit dávkování vody do každého portu. Dále byl také propojen s termofyziologickým modelem dle Fialy a umožňuje tak realistické simulace povrchových teplot a pocení [317]. Manekýna je možné i vyjmout ze standu a využít pro kontaktní měření sedaček a dalšího vybavení, nicméně vzhledem k náchylnosti povrchu manekýna k poškození se pro tyto účely nepoužívá. Podrobné výsledky a možnosti manekýna jsou dokumentovány v celé řadě publikací Agnes (Agnieszka) Psikuta, která je dlouholetou vedoucí skupiny Body monitoring group v EMPA, St. Gallen, Švýcarsko.



Obr. 97 – Vlevo: tepelný manekýn SAM (uspořádání s oděvem) uvedení do provozu 2001, EMPA, Švýcarsko. Převzato z [291]. Uprostřed: úprava manekýna s detailní geometrií dlaní a s potíciimi porty přelepenými páskou pro odpařování a prevenci odkapávání vody. Převzato z [301]. Vpravo: Manekýn SAM v roce 2018. Zdroj archiv autora.

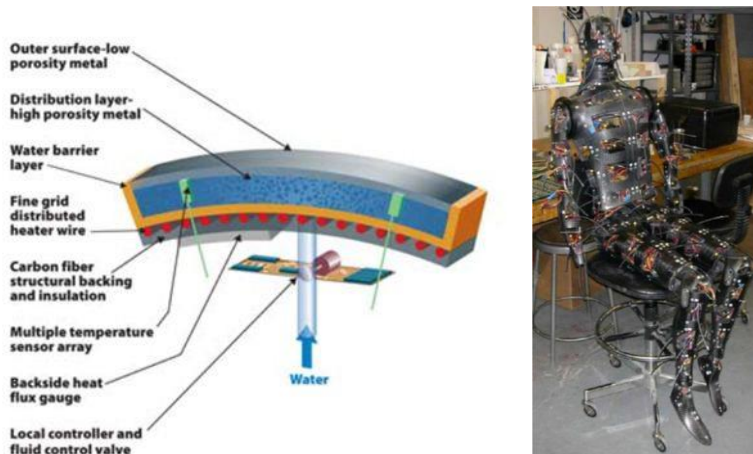
Dalším velmi sofistikovaným manekýnem uvedeným do provozu po roce 2000 byl manekýn ADAM (ADvanced Automotive Manikin) vyvinutý firmou Measurement Technology Northwest pro Národní laboratoř obnovitelných zdrojů energie v USA (NREL – National Renewable Energy Laboratory). Konkrétním zákazníkem byla sekce Vehicle Climate Control Laboratory pro vývoj efektivních HVAC systémů v kabinách vozidel [318]. Součástí zadání od NREL byl i požadavek, aby manekýn byl zcela nezávislý na podpůrných systémech z okolí a umožňoval, tak například měření v kabině jedoucího vozidla. Všechny systémy včetně napájení (akumulátory o napětí 24 V), simulace pocení, dýchání i regulace a přenosu dat byly

integrovány přímo do těla manekýna (viz Obr. 98 vlevo). Povrch manekýna byl rozdělen do 126 samostatně regulovatelných segmentů, v kterých lze regulovat nejen množství generovaného tepla, ale i produkci vlhkosti. Voda je přiváděna do segmentu přes tzv. „porézní kov“, který tvoří povrch segmentu (viz Obr. 99 vlevo).



Obr. 98 – Vnitřní uspořádání systémů v manekýnovi ADAM, uvedeno do provozu 2003, NREL, USA. Převzato z [301].

Takto vytvořené segmenty byly poté osazeny na vnitřní konstrukci (viz Obr. 99 vpravo), která zajišťovala celkovou pevnost figuríny a propojení v jednotlivých kloubech (ramena, lokty, kyčle, kolena). Vzhledem k integraci všech systémů do manekýna byla jeho celková váha 61 kg. Dýchací systém umožňoval průtok vzduchu 8 litrů/min s úpravou teploty a vlhkosti na hodnoty typické pro člověka. Povrchové teploty a intenzita pocení na jednotlivých segmentech byla určována pomocí termofyziologického modelu s celkem 40 000 uzly, vytvořeném v komerčním software ANSYS a kombinovaném s UCB modelu lidské tepelného komfortu dle Zhang [309] (více viz kapitola 5).



Obr. 99 Vlevo: konstrukce segmentu manekýna s povrchovou vrstvou porózního kovu umožňující nezávislé vyhřívání i simulaci pocení každého ze 126 segmentů. Převzato z [301]. Vpravo: kostra manekýna ADAM s uhlíkových vláken pro připevnění jednotlivých segmentů. Převzato z [291].

Systém byl tedy velmi komplexní až komplikovaný a vzhledem k počtu vyhříváných segmentů docházelo občas k selhání vyhřívání některých segmentů. Vzhledem k jejich

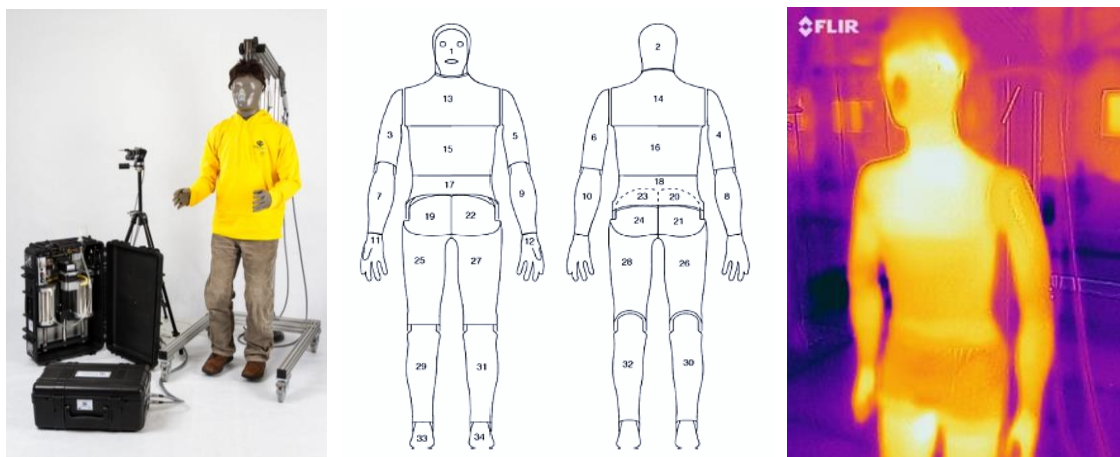
vysokému počtu a malé ploše však ztracená data bylo možné interpolovat z výsledků segmentů okolních. Prostřednictvím ADAMA byla provedena různá měření nejen pro NREL a výrobce automobilů (viz Obr. 100) ale i pro vesmírný program NASA s testováním aktivně vyhřívaných/chlazených vesmírných skafandrů [318].



Obr. 100 – Kompletní tepelný manekýn ADAM vytvořený speciálně pro testování prostředí v automobilech. Uvedení do provozu 2001-2003, USA. Převzato z [285].

Zkušenosti i poučení z vývoje ADAMA byl v následujících letech využity pro vývoj tepelného manekýna NEWTON, jehož základní model byl uveden na trh pro komerční využití v roce 2005. V roce 2009 byla uvedena nová verze v kombinaci s termofyziologickým modelem ManikinPC [291]. Jeho povrch je rozdělen maximálně na 34 nezávisle vyhřívaných segmentů (obličej, hlava, hrudník, břicho atd., viz Obr. 101), u kterých je možné zjišťovat intenzitu přenosu tepla do okolí ve formě velikosti generovaného tepelného toku (regulační mód CST) nebo poklesu povrchové teploty (regulační mód CHF). Maximální hustota generovaného tepelného toku je 700 W/m^2 . Manekýn je dostupný v geometrii figuríny odpovídající průměrnému muži z Evropy/USA (výška 178.5 cm , povrch manekýna 1.8 m^2) nebo Asie (výška 168.5 cm) a jeho hmotnost v závislosti na vybavení dosahuje 21 až cca 40 kg. Do uvedení manekýny LIZ (viz dále) bylo možné NEWTONA dovybavit i speciálním dílem, který se instaloval na hrudník a vytvářel tak geometrii odpovídající ženskému poprsí. Systém pro simulaci pocení se skládá z rezervoáru vody s předhřevem, systému pro dopravu vody do manekýna (max. množství 1 litr/h) a celkem 134 portů pro distribuci vody v kombinaci s overalem na povrchu manekýna. Manekýn je možné vybavit zařízením pro simulaci dýchání (max. objem nádechu 2.3 dm^3 , max. frekvence 20 min^{-1} , max. poměr rychlosti nádech/výdech 1:5), systému pro simulaci chůze (maximální rychlost 6 km/h). Elektronika a regulační systémy v manekýnovi jsou vyrobeny ve voděodolném provedení, takže rozsah použití manekýna je: vlhkost vzduchu 0 do 100 % RH a teplota -20 až $+50 \text{ }^\circ\text{C}$. Aktuální nabídku a možnosti manekýna jsou dostupné na webových stránkách firmy Thermetrics (thermetrics.com/products/) [319]. V současné době je po celém světě v provozu více než 60 manekýnů tohoto typu [320], přičemž pracoviště autora má k tohoto manekýna k dispozici od roku 2011 (vybavení viz Obr. 101, vlevo) a během té doby byl zapojen do řady výzkumných aktivit (např. testování oděvů, HVAC automobilů a jejich vliv na tepelný komfort apod.). Opakovatelnost a přesnost měření přenosu tepla z manekýna byla prokázána v práci [91]. Z hodnot hustoty tepelného toku je možné určit hodnoty součinitelů přestupu tepla do okolního prostředí nebo tyto hodnoty dále zpracovat a určit například ekvivalentní teploty pro jednotlivé segmenty manekýna. Od roku 2019 je

k dispozici i nástroj pro řízení povrchové teploty manekýna na základě výpočtu termofyziologického modelu [321]. V tomto módu pak povrchové teploty jednotlivých segmentů manekýna blíže odpovídají teplotám skutečného lidského těla v daném prostředí a při dané fyzické aktivitě (viz Obr. 101 vpravo). Tento mód má u většiny testů HVAC systémů jen omezené využití, ale může se například uplatnit při testech přechodových stavů v kabině automobilu (vyhřátí chladného auta/zchlazení přehřáté kabiny), kdy dochází v kabině vozidla i v lidském těle k dynamické změně v míře vzájemné výměny tepla.



Obr. 101 – Vlevo: Tepelný manekýn Newton s vybavením dostupný na OTTP. Uprostřed: Rozdělení manekýna na 34 segmentů. Vpravo: Povrchové teploty manekýna při aktivním řízení teplot manekýna termofyziologickým modelem. Zdroj archiv autora.

V letech 2017 až 2021 byly na trh uvedeny nové manekýny z produkce firmy Thermetrics s produktovým označením TOMI (dětský manekýn věku 8 až 10 let), RUTH (dětský manekýn velikosti dítěte věku 9 měsíců – viz Obr. 102 vlevo), LIZ (manekýna s dámskou geometrií odvozená od systému NEWTON – viz Obr. 102 vpravo) a ANDI (manekýn se simulací celkové tepelné kapacity lidského těla pomocí aktivního chlazení povrchu – viz Obr. 103). Bližší informace lze nalézt na stránkách firmy Thermetrics (thermetrics.com/products/) [319].



Obr. 102 – Vlevo: RUTH dětský manekýn s 11 segmenty a možností simulace pocení o velikosti dítěte věku 9 měsíců, uvedení na trh 2017, USA. Vpravo: LIZ manekýna s dámskou geometrií odvozená od systému NEWTON. Uvedení na trh 2021, USA. Převzato z [319]

V současnosti jsou na komerčním trhu dostupné různé typy tepelných manekýnů, které pokrývají všechny běžné geometrie lidského těla od malého dítěte až po dospělého muže či ženu. Manekýni jsou schopni imitovat všechny hlavní projevy termofyziologie lidského těla a jeho interakce s okolním prostředím (přenos tepla, pocení, dýchání, pohyb). Při propojení s termofyziologickými modely, běžícími v reálném čase, je možné simulovat i lokální změny povrchové teploty manekýna, intenzity pocení a u manekýna ANDI (viz Obr. 103) i negativní tepelné toky z okolního prostředí do lidského těla.



Obr. 103 – Vlevo: První funkční exemplář manekýna ANDI při zprovoznování v laboratořích EMPA, léto 2018. Zdroj archiv autora. Vpravo: Ten samý exemplář v domovské laboratoři prof. G. Havenitha (na snímku vlevo), Human Environmental Ergonomics Research Centre, Loughborough University, UK. Zdroj Twitter účet G. Havenith.

4.3.2 Aspekty využití manekýnů v experimentální praxi

Tepelní manekýni prošli od svého vzniku ve 40. letech 20. století vývojem od velmi jednoduchých systémů se základními funkcemi až po velice komplexní měřicí systémy s celou řadou subsystémů. Historie jejich vývoje a postupné zdokonalování jejich schopností je podrobně popsáno v předešlé podkapitole 4.3.1. Dle zdroje [192] jsou hlavní výhody při využití tepelných manekýnů spatřovány v:

- Odpovídající simulace tepelné výměny mezi lidským tělem a okolím.
- 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 (např. realistické úhlové faktory, vzájemné ovlivnění jednotlivých částí těla, ovlivnění proudění v okolí těla [322]).
- Souvztažnost a ovlivnění přenosu suchých tepelných ztát konvekcí a radiací.
- Objektivní měření tepelných vlastností oděvů.
- Cenově a časově efektivní srovnávací měření při vývoji produktů (HVAC systémy, oděvy, podrobněji viz kapitola 0).
- Určení hodnot veličin důležitých pro predikční modely tepelného komfortu (součinitele přestupu tepla, tepelné vlastnosti oděvů, vypařovací odpor oděvů, tepelná ztráta, součinitel zvětšení povrchu oděvem atd.)

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 milionů korun.
- 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 koeficientu pro výpočet ekvivalentní teploty).
- Vzhledem k složitosti systému mohou měření a vyhodnocení výsledků provádět pouze kvalifikované osoby, jejichž zaškolení a výchova je dlouhodobý proces.
- Naměřená data jsou velmi komplexní a jejich zpracování a interpretace někdy vyžaduje speciální software, dostatek času a zkušeností.
- Manipulace s manekýny vzhledem k jejich rozměrům a váze může být obtížná. Záleží však na provedení a účelu manekýna. Například manekýni na měření sedaček musí mít odpovídající hmotnost, aby věrně napodobily stlačení sedačky reálným lidským tělem.
- 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. I tak je však tepelná kapacita manekýna relativně malá, protože v případě reálné kapacity lidského těla by uvedení do provozu trvalo ještě mnohem déle.
- Autorův osobní dovětek: Někdy se širšímu a neznalému okolí těžko vysvětluje, proč jeho dítě ve školce tvrdí, že „tatínek v práci obléká a svléká velkou panenku, která hřeje“.

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 stříhu oděvu (volný vs. těsný) a konstrukce oděvu na měření.
- Přímé zahrnutí efektu plošného faktoru oděvu f_{cl} na přenos tepla z povrchu oděvu.
- Zahrnutí všech přidaných vlastností oděvu. Větrací otvory, kapuce, náplety a jejich efektu na přenos tepla.
- 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 oděv a z povrchu oděvu (chůze, změny dynamiky pohybu atd.)

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

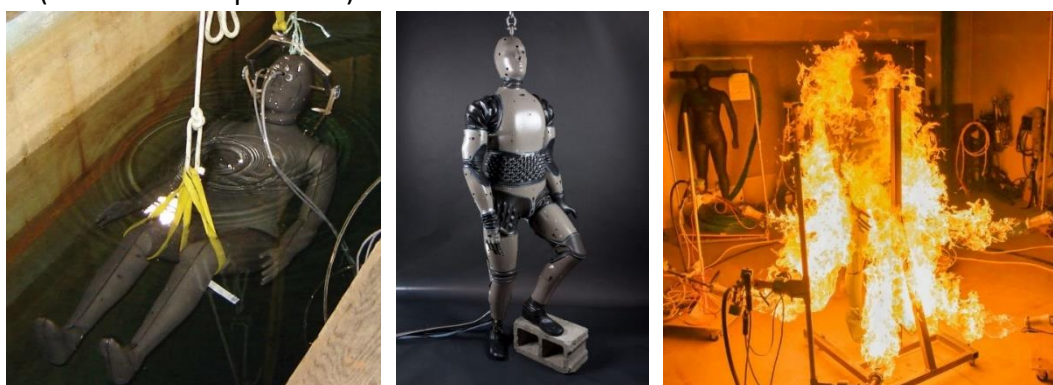
- Jedná se o objektivní metodu.
- Výsledky nejsou závislé na faktorech ovlivňující pokusné osoby - zdravotní a psychický stav, únava, nuda při delším experimentu atd.
- Zařízení je i přes některé uvedené nevýhody prakticky vždy připraveno k použití.
- Je možno provádět i velmi dlouhá měření ve velmi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

Opakovatelnost měření tepelného odporu oděvů v rámci jedné laboratoře na testovacím vzorku oděvu je dle [192] normálně v rozsahu 2 – 4% z naměřené hodnoty (4 % rozdíl hodnot dvou měření stejného oděvu stanovuje i norma ČSN EN ISO 15831 [323] Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny jako limit pro uznání výsledku za korektní. Při překročení této hranice se musí provést ještě třetí měření pro vyčíslení směrodatné odchylky a určení hodnoty nejistoty typu A). Reprodukovatelnost hodnot mezi laboratořemi je obecně uváděna na v rozsahu 5 až 10 % [324], [325]. Tato hodnota odpovídá i výsledkům kruhových zkoušek, do kterých bylo zapojeno pracoviště autora a Textilní zkušební ústav v Brně (viz příklady kapitola 0).

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 [192], [326]. V roce 2005 byla provedena revizní studie s využitím šesti různých manekýnů vybavených systémem pro simulaci pocení a byly srovnány i výsledky z manekýna SAM, EMPA (viz. Obr. 97). 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 % [325]. Doposud poslední srovnávací studie a vylepšení metodologie bylo provedeno F. Wangem v roce 2017 [257]. Ten identifikoval jako základní zdroje vysoké variability výsledků mezi laboratořemi rozdílnost v konstrukci manekýnů a principů simulace pocení, materiálech vlhčených overalů, míry pocení manekýnů, podmínek při testech, různosti testovacích protokolů a postupech při výpočtu. Při měření výparných odporů oděvů jde totiž nejen o měření přenosu tepla, ale také hmoty a je nezbytné ošetřit více proměnných prostředí než u měření tepelných odporů. Doporučovanou metodou nastavení prostředí je izotermická metoda, kdy $t_{sk} = t_a = \bar{t}_r$ a pokud nejsou požadovány lokální hodnoty odporů, je doporučována metoda určení hmotnosti odpařené vody na základě změny váhy manekýna. 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 [199], [203], [204], kde se potvrdily doporučení publikované F. Wangem, přičemž hlavním závěrem je zjištění, že nejnižší opakovatelnosti měření je dosaženo u neprodyšných oděvů, kdy jsou dosahovány malé tepelné toky/změny váhy manekýna a měřicí systémy pracují na hranici svých systematických nejistot měření. Hlavní srovnávací publikace je v době psaní této práce stále v procesu přípravy.

4.3.3 Speciální manekýni a další možný technický vývoj manekýnů

Speciální typy manekýnů jsou používány v obranných aplikacích, kde jde především o výzkum a vývoj prostředků ochrany vojáků/záchranářů před extrémním prostředím. Například první manekýn pro výzkum přenosu tepla z těla ve vodě byl uveden do provozu v USAIREM, USA v 60. letech 20. století (viz Obr. 85, druhý zleva)[289]. Moderní manekýn se schopností kompletního ponoření do vody s označením NEMO je vyráběn firmou Thermetrics, USA (viz Obr. 104 vlevo). Stejný výrobce vytvořil v roce 2010 v kooperaci s firmou Boston Dynamics speciálního robotického manekýna IPEMS pro testování vlastností ochranných oděvů a jejich interakce s lidským tělem při složitých pohybových vzorcích jako je sed, skrčení, rotace, chůze, běh a další (viz Obr. 104 uprostřed).



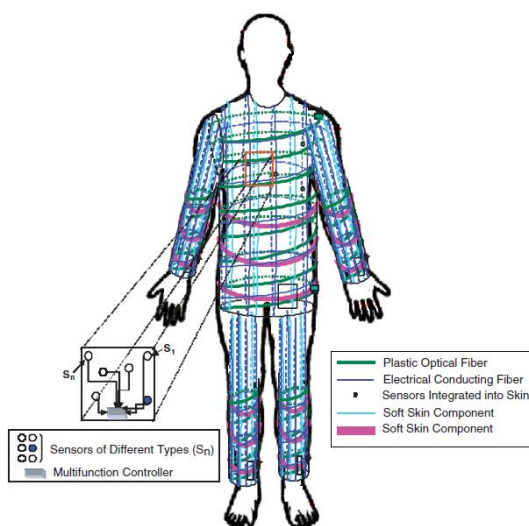
Obr. 104 – Vlevo: Manekýn NEMO určený pro výzkum přenosu tepla ve vodním prostředí. Uprostřed: Robotický manekýn IPEMS, pro testování ochranných oděvů při složitých pohybových úkonech. Vpravo: Flame Natick manikin při testu v plamenné komoře. Převzato z [291].

Speciálním typem manekýnů jsou tzv. flame manekýni používaní pro testování odolnosti oděvů a vybavení chránících před radičním a konvektivním přenosem tepla i působením samotného plamene. Příkladem je Natick flame manikin (viz Obr. 104 vpravo) nebo Burnnie na univerzitě v Šanghaji, který se může přes plameny i pohybovat (viz Obr. 105 vlevo). Na Západočeské univerzitě v Plzni vzniklo v roce 2019 ve spolupráci s firmou Holík int. s.r.o. speciální testovací zařízení pro testování odolnosti hasičských rukavic vůči radičnímu tepelnému toku. Zařízení simuluje tepelný tok radiací až do 40 kW/m^2 , který se může vyskytnout v blízkosti požárů a prostřednictvím celkem 272 měřících bodů určuje odolnost použitých materiálů a změnu povrchové teploty na umělé ruce (viz Obr. 105 vpravo).



Obr. 105 – Vlevo: Manekýn Burnnie před průchodem plameny. Převzato z [291]. Vpravo: Speciální testovací ruka pro vývoj hasičských rukavic a testů odolnosti před radičním přenosem tepla. ZČU-RICE 2019. Zdroj archiv autora.

Další možnosti rozvoje techniky tepelných manekýnů jsou shrnuty v dokumentu *Soldier Protective Clothing and Equipment* z roku 2008 [301] a v knize *Manikins for textile Evaluation* 2017 [291]. Některé z vlastností definovaných v dokumentu byly realizovány v manekýnovi IPEMS (robotický pohyb, viz Obr. 104 uprostřed)[327] a ANDI (aktivní chlazení povrchu manekýna do 350 W/m^2 a dynamické měření kladných i záporných tepelných toků, viz Obr. 103) [328]. Největší výzvou však dosud zůstává napodobení mechanických vlastností lidského těla a pokožky jako je měkkost, pružnost, ohebnost, tepelná vodivost a prostupnost pro vodu v kombinaci se sensorickým měřením povrchové teploty, tlaku a tepelných toků. Technicky schůdným řešením by mohl být dle [301] overall založený na chytrých textilích a integrované senzorce, který by vytvořil „pokožku“ manekýna v podobě „sensor-integrated body suit“ (viz Obr. 106). Overall se skládá nejen ze sítě senzorů, která je rozdělná do jednotlivých segmentů, ale i z optických vláken pro měření stlačení materiálů, která simulují mechanické vlastnosti pokožky a podkožního vaziva člověka. Vytvořit takový overall je v současnosti technicky pravděpodobně schůdné (a v některých neveřejných aplikacích k němu již mohlo dojít) nicméně pro komerční účely a běžné nasazení ve výzkumné a vývojové praxi bude jeho cena extrémně vysoká, přičemž spolehlivost a odolnost tako komplexní struktury není zřejmá.



Obr. 106 – Ideový návrh overalu typu *sensor-integrated body suit* napodobující mechanické vlastnosti lidské pokožky v kombinaci s integrovanou senzoricou. Převzato z [301].

Další oblastí k vývoji v budoucnu je dle [291] vytvoření standardizovaného měřicího systému, který by zahrnoval ověřený termofyziologický model propojený s reálným systémem tepelného manekýna. Dle [196] je nutné vylepšit propojení modelů s hardwarovými systémy manekýnů tak, aby systémy byly schopné realizovat simulované termoregulační odezvy a to především v hraničních režimech a změnách zatížení s vysokou dynamikou (například nízké/vysoké intenzity pocení, skokové změny teploty okolí atd.). Samostatnou problematikou je pak vývoj spolehlivých modelů termofyziologie pro průměrného člověka, neboť množství a kvalita dokumentace jednotlivých termofyziologických testů nutných pro validaci modelů je často nízká [201], [256], [304]. Validita predikcí termofyziologických modelů a věrný přenos výsledků na systémy tepelných manekýnů je tedy zatím stále v počátcích a vyžaduje další vývoj, vylepšení a standardizaci, aby je bylo možné používat jako běžný experimentální a vývojový nástroj [196], [304]. Více k termofyziologickým modelům viz kapitola 5.2.

4.4 Hodnocení na základě dotazování 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 [123], [329], [330]. 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. viz kapitola 2.4). Správné provedení této metody a nastavení experimentu je tedy relativně obtížné a ze všech metod zmíněných v kapitole 4 i nejvíce komplikované. Z pohledu finálního hodnocení HVAC technologie [330] 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 [331]. V následujících podkapitolách budou shrnuty poznatky a zkušenosti autora s testy s pokusnými osobami, které lze považovat za vhodnou praxi při experimentech, a vycházejí z postupů platných v době psaní habilitační práce. Etické normy však prodělaly v posledních deseti letech velký vývoj a v budoucnu lze zřejmě očekávat, že se budou i nadále vyvíjet.

4.4.1 Hloubka analýzy a zacílení experimentu - *Design of experiment*

Dle prof. Ralpa Goldmana je vhodných 5 úrovní analýzy/experimentů nového produktu/postupu/technologie, které na základě svých více jak 50ti letých zkušeností ve vývoji oděvů a výzkumu lidské termofyziologie formuloval v roce 2006 v motivační přednášce na konferenci 6i3m. Níže je uveden překlad z této přednášky [289] rozšířený a doplněný o autorovy poznatky z jeho vlastní praxe, kdy uskutečnil různé analýzy a experimenty v rozsahu úrovní 1 až 4. Popsaná metodologie je obzvláště užitečná, protože experimenty s pokusnými osobami jsou nejsložitějším experimentálním přístupem a je vždy velmi vhodné pečlivě volit, kdy je test s lidmi zcela nezbytný a kdy lze využít některé z jednodušších a levnějších metod.

Úroveň 1: Analýza fyzikální podstaty problému – cílem této první úrovně je identifikovat jaký fyzikální děj/proces je hlavním účinným elementem daného produktu, na jakém fyzikálním ději či kombinaci dějů lze zamýšlený produkt „postavit“ a/nebo co je fyzikální podstatou problému, který chceme/musíme řešit a co tedy bude muset daná technologie řídit/kontrolovat. Jedná se např. o vlastnosti vláken u oděvu, vlastnosti vrstev textilie, parametry prostředí, zatížení osob, dominantní způsob přenosu tepla, možné kombinace efektů atd. Na této úrovni nejsou potřeba žádné testy s pokusnými osobami, cena je minimální a výsledky jsou obvykle extrémně užitečné pro rozhodnutí, jak dále pokračovat a které cesty a přístupy mohou vést k cíli.

Analýzu úrovně 1 uplatnil autor na začátku projektu vývoje chlazení neprodyšného ochranného oděvu pro teplé podmínky pomocí ventilace prostoru mezi tělem a oděvem k

umožnění odvodu tepla pocením. Nejprve byly zjednodušeným způsobem vypočítány tepelné toky odpařováním potu na základě objemového průtoku pod oděvem a variantních podmínek okolí (teplota, RH). Výsledky naznačily schůdnost zamýšleného řešení při daných rozsazích metabolické produkce, parametrů okolí a uvažovaných průtoků vzduchu oděvem, které bylo možné realizovat dostupnými kompaktními ventilátory. Bylo tedy možné pokračovat na úrovni 2.

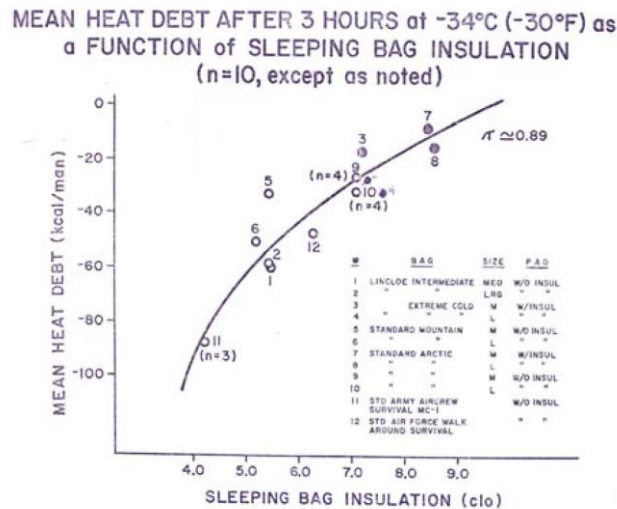
Ve své praxi se autor několikrát setkal s tím, že elementární analýza úrovně 1 je zcela vynechána nebo přeskočena. Hlavně vyšší management má u výzkumných projektů v průmyslu často tendenci tlačit výzkum a vývoj rovnou na experimenty úrovně 3 a výše, aby byla funkčnost prokázána s uživateli systému a nejlépe rovnou s pouze mírně upraveným sériovým produktem. Hlavně v automobilovém průmyslu je tento přístup bohužel běžnou praxí, neboť vývoj a výzkum je pod neustálým tlakem termínů a prokazování „užitečnosti řešení vyvinutého daným oddělením“. Často se tedy při řešení „problému“ opomine analýza kořenu problému, přesné vydefinování fyzikální podstaty a následné určení technologie, která by tento problém mohla řešit.

Úroveň 2: Modelování účinků produktu/technologie na lidskou termofyziologii – tato úroveň je zaměřená na vlastnosti konkrétní části technologie, oděvu, materiálů a jeho funkcí v interakci s lidským tělem a prostředím. Predikce vlastností, efektů a jejich vlivů na člověka pomocí modelování/simulace je hlavním nástrojem na této úrovni analýzy. Používají se přístupy pomocí modelů (regresní, výpočetní, CFD), maket, manekýnů, specializovaných měření atd. Nevyužívají se testy s pokusnými osobami a z toho důvodu jsou analýzy této úrovně opět relativně levné.

Jako příklad můžeme opět uvést projekt chlazení neprodyšného ochranného oděvu větráním meziodvětvového prostoru. Byl využit tepelný manekýn Newton s vlhčeným overalem, neprodyšný oděv a zdroj větracího vzduchu, zavedený pod oděv. Cílem byl demonstrovat chladičí účinek ventilace pod oděvem. Efekt byl ověřen a bylo možné postoupit na úroveň 3 (v době psaní práce je tato úroveň projektu v řešení).

Úroveň 3: Laboratorní testy interakce produktu a lidské termofyziologie (malý rozsah 6 až 8 pokusných osob) „validační“ studie v přísně kontrolovaných podmínkách (např. v klimatické komoře, na běžeckém pásu, s přesně definovaným testovacím protokolem) s cílem potvrdit, zda funguje očekávaný efekt produktu v kombinaci s lidskou termofyziologií. Pomocí modelování na Úrovní 2 musíme určit vhodnou řídicí veličinu/parametr testu (pracovní zátěž, délka expozice, podmínky prostředí atd.) jinak prokázání funkčnosti/efektu produktu v testech Úrovně 3 nebude úspěšné. Proto jsou precizní rozvaha a experimenty na Úrovní 2 extrémně důležité. Na Obr. 107 je dokumentováno ověření správného výběru řídicí veličiny/parametru pro ověření produktu pomocí testů úrovně 3. V prostředí o teplotě -34 °C byly testovány spací pytle o různých hodnotách tepelné izolace a byla měřena celková tepelná ztráta z lidského těla při experimentu trvajícím 3 hodiny. Funkce proložená získanými body z testů má korelační koeficient $r = 0.89$. Je tedy ověřeno, že tepelná ztráta těla a na ni navázaná výdrž člověka/kvalita spánku je funkcí tepelného odporu pytle, který je hlavním/řídicím parametrem pro vývoj kvalitního spacího pytle pro chladné podmínky. Hodnota tepelné

izolace jednotlivých pytlů a zároveň vhodná testovací teplota $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla určena pomocí testů s tepelnými manekýny na úrovni 2.



Obr. 107 – Ukázka ověření „správné volby“ řídicí veličiny, kde „tepelná ztráta lidského těla“ je závislá na řídicí veličině „tepelný odpor spacího pytle“. Výběr řídicí veličiny a vhodné testovací teploty prostředí byl proveden na základě experimentů s tepelnými manekýny (testy úrovně 2). Správnost výběru pak byla potvrzena výsledky pomocí testů s dobrovolníky (úrovně 3). Převzato z [289]. Blíže k vývoji spacích pytlů viz kapitola 4.3.1.

Jako příklad z praxe autora, lze uvést experimenty s ventilovanými sedačkami v klimatické komoře VUT. Cílem studie bylo určit efekt jednotlivých módů větrání sedačky (bez větrání/odsávání/vtlačování vzduchu) na chlazení a sušení kontaktních částí lidského těla v simulovaných podmínkách horkého letního dne, po nastoupení do kabiny vyhřátého automobilu a aktivaci klimatizace. Test se konal za účasti 9 pokusných osob, které postupně testovaly sedačky bez ventilace (kontrolní případ), s odsáváním vzduchu z kontaktní části a přívodem vzduchu do kontaktní oblasti. Řídicí funkce v tomto případě byl průtok vzduchu a psychrometrické parametry vzduchu v kontaktní ploše sedačky. Více viz kapitola 6.2.1.

Úroveň 4: Řízené/kontrolované testy v provozních podmínkách - jsou prováděny na středně velkých skupinách (cca 20 až 50 pokusných osob); předměty/produkty jsou používány cílovými uživateli ve skutečných podmínkách pro provoz. Tento typ úrovně testování rozšiřuje podmínky testování z Úrovně 3 tím, že přidává variabilitu reálného světa. Uvažovat takovou variabilitu v testech Úrovně 3 by bylo zbytečně složité a neadekvátní. Testy jsou už vzhledem k rozsahu relativně náročné a drahé. Pokud se vyskytnou nějaké zásadní odchylky od předpokladů a „překvapení“ znamená to zpět na Úroveň 3 pro doplnění poznatků o chování produktu/systému.

V současné době je tato úroveň většinou nejvyšší úroveň testů, které je při vývoji dosaženo. Autor byl zapojen do tří projektů, kde se výsledné technologie testovali v provozních podmínkách, a to sice Měření náběhových teplot vytápěných sedadel v reálných klimatických podmínkách, Testování senzorů systému iHVAC v podmínkách v reálném provozu a Testování systémů personalizovaného větrání v projektu iSPACE (viz Obr. 108). Více viz kapitola 6.2.2.



Obr. 108 – Část letecké kabiny uzavřená v podtlakové komoře je určena pro testování nových systémů a vybavení kabiny dopravních letadel. V letectví je to maximální možné přiblížení reálným podmínkám při testech s necertifikovanými technologiemi. Testování v projektu iSPACE probíhalo v této kabině za účasti 3 skupin po 18ti osobách v roce 2013. Fotografie byla pořízena večer před začátkem prvního testovacího týdne v listopadu 2013. Zdroj archiv autora.

Úroveň 5: Uživatelské testy – („test marketing“ v civilních aplikacích, „wear or operational trials“ polní testy v armádě, „field construction projects“ v oblasti ochrany pracovníků v průmyslu) jsou posledním krokem; obvykle jsou rozsáhlé, časově náročné a drahé a mohou se ukázat jako neplodné, obtížné nebo poskytovat sporné informace, pokud jim nepředcházely vhodně provedené testy Úrovně 3 a 4.

Podrobné testy na této úrovni si dnes mohou prakticky dovolit pouze armády velkých a bohatých států či výzkumné laboratoře velkých oděvních značek zaměřených na sportovní a outdoorové vybavení. V oblasti HVAC a osobních automobilů je možné za tento typ testů považovat „klinické studie“ prováděné v rámci „roční modelové péče“ u jednotlivých modelů vozidel. Dle hlášení od servisů a zpětné vazby od zákazníků lze odhalit nedostatky jednotlivých funkcí systému či například vybavení interiéru. Dle závažnosti a typu nutného zásahu jsou pak provedeny změny konstrukce tak, aby reportované nedostatky byly odstraněny. Bohužel lze také konstatovat, že vzhledem k tomu, že v tomto oboru je velký tlak na výsledky a často je tak přeskočena analýza na úrovni 1 a 2, je náprava některých problémů obtížná či v daném konstrukčním pojetí systému nemožná. Nový přístup v této oblasti v posledních letech zavedla firma Tesla Motors, která uvádí na trh vozidla, která v některých aspektech nejsou zcela doladěna, a teprve až na základě dat o užívání vozidel v reálném provozu se doladují jednotlivá nastavení a funkce samozřejmě jen u nekritických systémů. Přístup je však nový v tom, že vozidlo má propracovanou architekturu systémů, které lze z velké části ovládat softwarově a je zaveden podrobný monitoring chování a výkonu vozidla s kontinuálním odesíláním dat k analýze. Analyzovaná data pak slouží jako podklad pro úpravu funkcí a řízení vozidla. Podstatnou podmínkou uplatnitelnosti takového řešení je systém vzdálené instalace upraveného řídicího software, což umožňuje bez obtěžování uživatele opravu starší chyby a může přidávat i nové funkcionality. Některé úpravy se však samozřejmě stále neobejdou bez fyzické výměny dílčích komponent.

4.4.2 Etika a doporučená praxe při výzkumu s pokusnými osobami

Metody výzkumu kvality prostředí pomocí modelování (viz kapitola 5) a měřicí techniky dnes zmenšují nutnost zapojení pokusný/testovacích do experimentů, nicméně jak bylo uvedeno výše, pro experimenty Úrovně 3 (a vyšší) je zapojení pokusných osob nezbytné. Před započtím experimentu je nutné nejprve návrh experimentu, jeho provedení a cíle nechat posoudit etickou komisí instituce, kde bude experiment prováděn. Ta by měla návrh posoudit, zda jsou cíle experimentu v souladu s obecnými etickými zásadami výzkumu a etickým kodexem dané instituce, posoudit a popřípadě upravit podmínky, jakým mohou být testovací osoby vystaveny a odsouhlasit i způsob zpracování a využití shromažďovaných data. Tato zpětná vazba je pro návrh experimentu vždy cennou informací, neboť přináší názor nezainteresovaných osob, které návrh experimentu vidí tzv. „z venku“. Příklad žádosti o etické posouzení experimentu je uveden na obrázku Obr. 109. Žádost typicky obsahuje:

- Základní informace o projektu, jehož je experiment součástí a vymezení doby trvání experimentu.
- Popis cílů projektu, experimentu a jeho procedury/protokol.
- Popis skupiny osob, které budou do experimentu zapojeny.
- Popis zajištění bezpečnosti osob při experimentu.
- Vzor informovaného souhlasu pro osoby zapojené do experimentu.
- Základní popis ošetření a úhrad případných škod, které by mohly v průběhu experimentu či v jeho důsledku nastat.

**Žádost o vyjádření Etické komise UBMI
Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysokého učení technického v Brně**

k projektu výzkumné, habilitační, doktorské, diplomové (bakalářské) práce, zahrnující lidské účastníky

Název: Contact comfort

Forma projektu:

- projekt aplikovaného výzkumu

Autoři (hlavní řešitel, spoluřešitel):

hlavní řešitel: Ing. Jan Fišer, Ph.D., fiser@fme.vutbr.cz; +420 54114 3242
spoluřešitelé: Ing. Jan Pokorný, Ph.D., Ing. Miloš Fojtlín

Popis projektu:

1. **Popis projektu:** Alternativní způsoby vytápění a chlazení jsou v centru pozornosti výzkumu pro jejich potenciál při snižování energetické náročnosti úpravy bytových prostředí při zachování tepelné pohody uživatele. Jedním z nejčastěji využívaných systémů, především v dopravě, je vytápění a větrání sedadel. Záměrem navrhovaného výzkumu je rozšíření poznatků v oblasti kontaktního vytápění a chlazení prostřednictvím sériově vyráběných technologií, jimiž jsou sedadla automobilů opatřena zmiňovanými technologiemi. Pro posouzení vlivu těchto technologií na tepelnou pohodu (komfort) je však potřeba subjektivního hodnocení uživatelů a sběru objektivních, měřitelných dat v mikroklimatu člověka. Tyto informace přispějí k modelování lidské termofyziologie, budování indexů tepelného komfortu v asymetrických tepelných prostředích, které následně povedou k snížení potřeby budoucích měření s dobrovolníky. Metodika práce spočívá v expozici člověka mírným tepelným podmínkám v klimakomoře a porovnání efektu kontaktního vytápění/chlazení s kontrolními podmínkami. Sběr objektivních, měřitelných parametrů je zaměřen na měření teploty, relativní vlhkosti a tepelného toku na rozhraní se sedadlem a oděvu posazené osoby. Dále pro potřebu rozšíření validace fyziologických modelů je potřebné měření povrchové teploty pokožky (kontaktně a bezkontaktně) a antropometrických veličin, zejména tělesné výšky, hmotnosti a kontaktní plochy se sedadlem. Aby bylo možné identifikovat efekty měřitelných veličin

Obr. 109 – Příklad titulní strana žádosti o posouzení projektu etickou komisí na VUT v Brně.

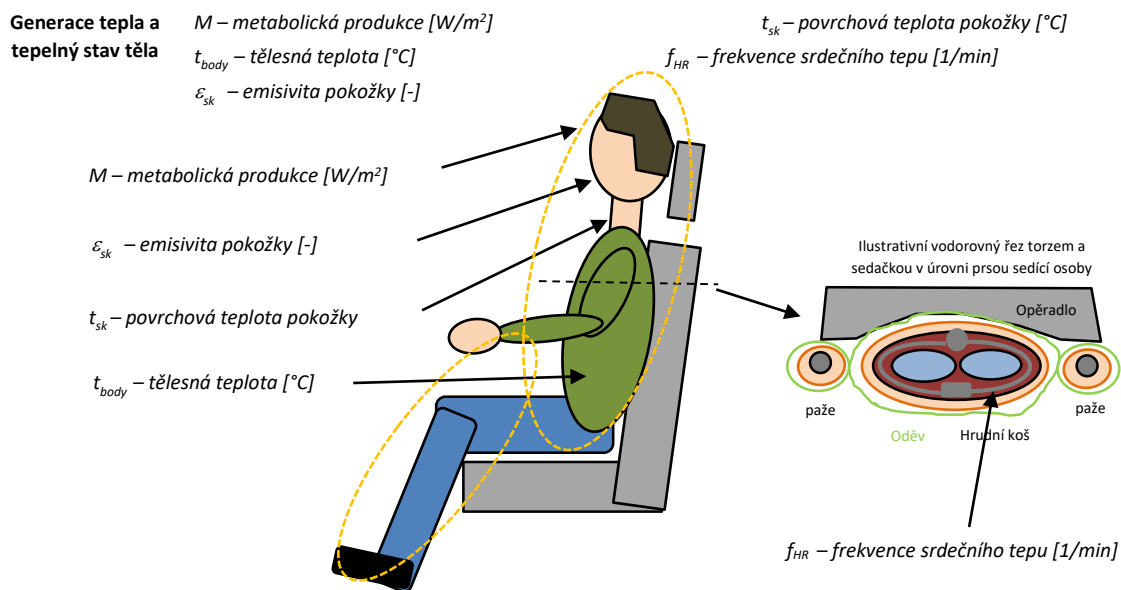
Další etické a procesní aspekty experimentů za účasti pokusných osob jsou:

- Účast na experimentu musí být vždy dobrovolná a pokusná osoba musí mít vždy možnost pokus kdykoliv ukončit bez nátlaku od experimentátorů na pokračování v experimentu. Tento požadavek je přímý důsledek poznatků z Milgramova experimentu [332], který byl poprvé realizován v roce 1963 a jehož výsledkem je pozorování, že až 65 % pokusných osob není schopno vzepřít se pokynům osoby, kterou považují za autoritu, ačkoli pokyny, které od ní dostávají, jsou v rozporu s jejich běžnou etikou. Pokusné osoby měly v experimentu trestat figuranta za špatné odpovědi elektrickými šoky, jejichž napětí se postupně zvyšovalo až za hranici, která by figuranta normálně usmrtila. Studie [333] publikovaná v roce 2009 potvrdila, že i v současné společnosti jsou výsledky stále platné, nicméně záleží i na přesných okolnostech a nastavení experimentu.
- Jako pokusné osoby lze využít pouze osoby zletilé a právně odpovědné. Experimenty s dětmi pod 15 let nejsou až na výjimky možné.
- Pokusné osoby by neměly být v jakkoliv podřízeném či závislém postavení vůči osobě experimentátora. Vhodná není ani rekrutace studentů, pokud pokus provádí někdo z akademických pracovníků, který studenty vyučuje. Z praxe autora: je zřejmé, proč je toto pravidlo doporučováno, ale například u laboratoře autora by jeho aplikace snížila počet osob dostupných pro testy skoro na nulu.
- V běžné experimentální praxi nelze pokusné osoby vystavovat nebezpečným hodnotám okolního prostředí (příliš vysoké či nízké teploty), mezním fyzickým zátěžím organismu (intenzivní zátěž v horkém prostředí nebo naopak nízká zátěž v chladném prostředí), či podmínkám, které způsobují fyzickou bolest či psychické nepohodlí až strádání.
- Při vyšších zátěžích či extrémnějších podmínkách by měl být u experimentů přítomen lékař a pokusné osoby by měly být před začátkem testu podrobeny zevrubnému vyšetření aktuálního zdravotního stavu.
- U každého experimentu je nezbytné provést podrobné zaškolení všechna pokusných osob, vysvětlit dopodrobna postup experimentu, použitou měřicí techniku, bezpečností pokyn a na základě těchto informací by pokusné osoby teprve měly podepsat informovaný souhlas.
- Ideální je vyzkoušet jedno měření „na nečisto“, aby pokusné osoby měly přímou zkušenost s průběhem experimentu a praxi s vyplňováním použitého dotazníku. Toto zaškolení také eliminuje nebezpečí znehodnocení prvního reálného měření rušivými vlivy, pokud by osoby byly v laboratoři poprvé a teprve se seznamovaly s postupem testu.
- Pokusné osoby také musí být správně motivované, aby korektně vyplnily dotazníky, a musí mít důvěru v osoby provádějící experiment.
- Zapojení rodinných příslušníků jako pokusných osob je možné, ale je nutné natrénovat s těmito osobami postupy při měření. Rodinní příslušníci bývají v některých případech přemotivováni a je nutné vysvětlit jim, že efekt „zkoumané veličiny“ mají hodnotit tak, jak jej pociťují a nikoliv tak, aby výsledky „vyšly pěkně“. (příklad z praxe: „Já jsem tam nechtěla psát, že to topí málo, aby Vám to pak nevyšlo špatně“).
- Pro záznam subjektivních hodnocení pokusných osob se využívají dotazníky. Podrobně je o jejich konstrukci pojednáno v kapitole 2.5 a příklady jsou uvedeny v kapitole 6.

- Pokud je to možné, mělo by se jednat o tzv. slepý test. Pokusná osoba musí být seznámena s průběhem testu, ale nesmí znát přesně jeho nastavení, účel a cíle, aby nedošlo k ovlivnění výsledku. Ideální je pak dvojitě slepý test, kdy pokusné osoby ani osoby řídící experiment neznají přesně účel pokusu, aby svým jednáním, byť třeba i nepřímo, neovlivnily výsledky experimentu.
- Obsluhující personál se musí chovat tak, aby u účastníků nevyvolával pozitivní/negativní očekávání ohledně nastavení experimentu. Například: pokud někdo z obsluhujícího personálu vyjde z klimakomory a přímo řekne „brr tam je dnes kosa“, může způsobit negativní očekávání pokusných osob, které čekají na experiment a stabilizují se.
- Pokud test v jednu chvíli vykonává více osob, neměla by před testem ani v jeho průběhu probíhat mezi osobami komunikace ohledně testovaných veličin. Po testu je naopak vhodné zařadit oddechovou pauzu spojenou s možností podělit se o dojmy z testu volitelně doplněnou i o nabídku drobné občerstvení (v případě testů chladných podmínek je ideální teplý čaj či káva, pokud jejich konzumace nenaruší další testy).
- V průběhu testu v klimatické komoře je vhodné eliminovat vliv nudy při delších testech. Osvědčilo se využití velkoplošné televize se spuštěnou prezentací „zajímavých fotografií“, které však musí být emočně (žádné nepříjemné, vzrušivé ani roztomilé výjevy – bližší viz kapitola 2.4) a tepelně neutrální (nepoužívat výjevy oheň, sníh, voda). Prezentaci lze využít i vydávání pokynů k vyplnění dotazníku v určitém čase.
- Z pohledu ovlivnění výsledku testu fyziologickými procesy v těle by testy měly podstupovat pouze osoby zdravé, bez chronických onemocnění kardiovaskulárního systému a metabolických poruch. Z pohledu denní doby není vhodné konat testy v brzkých ranních hodinách a do 2 *hodin* po hlavním jídle. Osoby, které nejsou řádně odpočaté či jsou pod vlivem alkoholu či jiných návykových látek je z testu třeba vyloučit.
- V oblasti ochrany osobních dat, je dnes vyžadována striktní anonymizace osob. To také napomáhá snížení ovlivnění při vyhodnocení dat, kdy by osoba experimentátora mohla nechtěně ovlivňovat na základě znalostí pokusné osoby vyhodnocovaná data („jak ho znám, tak tyto podmínky by pro něj byly nepříjemné“).
- Pro přípravu pokusných osob je dobré mít místnost nebo místo, které je odděleno od hlavních prostorů laboratoře. To umožňuje například převlečení osob do požadovaného oděvu či připevnění sond na tělo v místech, která nejsou běžně odhalená (viz Obr. 159).
- Pro většinu experimentů je nezbytné, aby osoby vykonávající test měly podobný výchozí tepelný stav těla. K tomu účelu je v protokolu měření většinou zahrnuta tzv. stabilizační fáze, které typicky trvá alespoň 1 *hodinu*. Pro snížení nejistoty měření musí být pokusné osoby také tzv. sezóně aklimatizované, čili v nejtěžší zimě neprovádět testy horkých podmínek a v praném létě neměřit chladné zimní případy (ukázka viz kapitola 6.3.2).
- Technologie, které jsou v přímém kontaktu s tělem pokusných osob, musí být vždy provozovány pouze na bezpečné napětí a zabezpečeny proti úrazu elektrickým proudem. Kontrolní a řídicí systémy musí být zálohovány, aby v případě selhání primárního kontroléru bylo možné včas identifikovat chybu (například příliš vysokou teplotu u kontaktního vyhřívání) a učinit manuální regulační zásah nebo zařízení včas vypnout.
- Možnost okamžitého vypnutí zkoušeného systému by měla mít i pokusná osoba, což může pozitivně snížit případný stres při testu.

4.4.3 Měření parametrů souvisejících s tepelným stavem těla

Jedná se o vysoce sofistikovaná měření projevů lidského těla a jeho termofyziologie, které vyžadují citlivou měřicí techniku, která je navíc většinou v přímém kontaktu s lidským tělem (viz Obr. 110). Je tedy potřeba dobré znalosti a praxe při provádění těchto měření, neboť jakákoliv chyba a špatné užití měřicí techniky může vést k tělesné újmě testované osoby. U měření, kdy jsou pokusné osoby vystaveny vyšší zátěži či extrémnějším podmínkám je vhodná ba spíše nutná přítomnost lékaře, který provede základní vyšetření osob před testem a zajistí dohled nad osobami i v průběhu a po skončení testu. Přítomnost lékaře je vhodná i v případě, že by došlo k zdravotní indispozici některé osoby v průběhu testu.



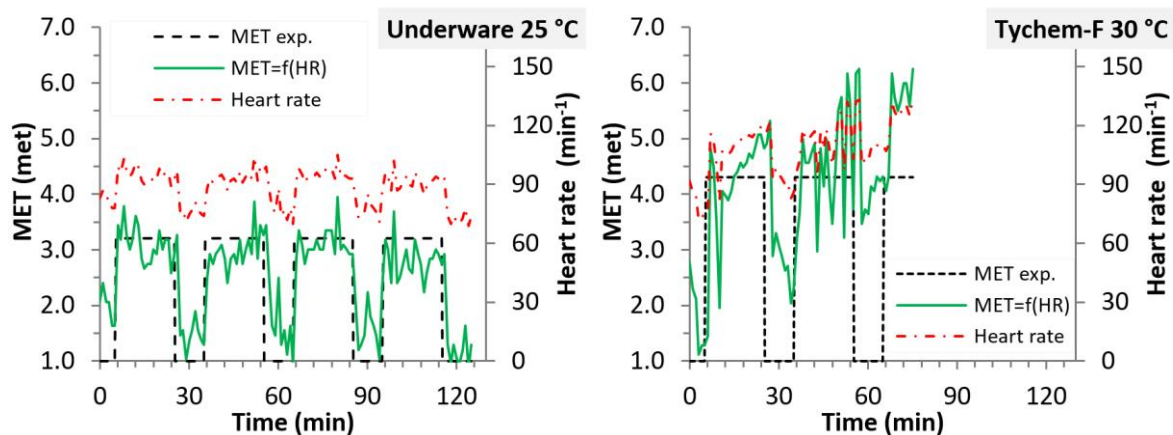
Obr. 110 – Bližší znázornění základních veličin pro popis tepelného stavu lidského těla. Nákres je pouze ilustrativní.

Metabolická produkce (v návaznosti na činnost člověka): Metabolická produkce (používané jsou také označení metabolická aktivita, rychlost metabolismu či jen metabolismus) udává energetickou produkci lidského těla související se základními životními funkcemi organismu (tzv. bazální metabolismus), energií uvolňovanou při zpracování potravy trávicím systémem a činnostmi svalů člověka. Metabolická produkce se označuje M [W] a nejčastěji je uváděna jako měrná metabolická produkce vztažená na plochu povrchu těla [W/m^2]. Základní vztahnou jednotkou pro vyjádření lidské činnosti v metabolickém ekvivalentu je $1\ met = 58.2\ W/m^2$, který vyjadřuje metabolickou produkci průměrného člověka při klidném sezení (met = metabolic equivalent of task, metabolický ekvivalent úkolu [20]). V tomto případě je pak mechanická práce svalů $W \approx 0\ W$ a metabolická produkce se tak prakticky kompletně transformuje v produkci tepla (členy q_{sk} a q_{res} , rovnice 2.1) [334]. Tato přibližná rovnost platí pro všechny činnosti s nízkou intenzitou mechanické práce např.: sezení, čtení, řízení vozidla, psaní na počítači, kancelářské práce atd.) [20]. Minimální metabolické produkce je dosahováno při klidném spánku, kdy její hodnot klesá k bazálnímu metabolismu, jehož velikost je závislá na věku, konstituci těla a pohlaví (pro průměrného muže, věk 40 let, 185 cm, 85 kg je například v průměru rovna $0.82\ met = 48\ W/m^2$ [335]). Naopak maximální krátkodobá

produkce metabolismu může u trénovaných sportovců dosahovat až k hodnotě $20 \text{ met} = 1\,146 \text{ W/m}^2$, přičemž průměrně dospělý člověk v závislosti na fyzické kondici je schopen kontinuálně po dobu několika hodin podávat výkon mezi 2 až 6 met [336].

Jak měřit: Měří se buď přímo pomocí spotřeby kyslíku metabolismem (na základě rozdílu koncentrace kyslíku a CO_2 v nadechovaném a vydechovaném vzduchu, přístroj se označuje jako spirometr) [337], nebo se vypočítává postupy založenými na korelaci metabolické produkce se srdečním tepem či pohybem osoby (snímání počtu kroků, pohybu, zrychlení atd.). Podrobněji je výpočet popsán v normě ČSN EN ISO 8996 - Ergonomie tepelného prostředí - Určování metabolismu [338]. V dnešní době také existuje celá řada typů nositelné elektroniky, chytrých hodinek a fitness náramků, které umožňují měření/odhad metabolické produkce. Přehledné srovnání, ověření hodnot a přesnosti měření pro různé aktivity a přístroje uvádí práce D. Kopeckého z roku 2021 [339].

Z praxe: určení metabolické produkce tepla z frekvence srdečního tepu může být zatíženo velkou nejistotou především v situacích, vysoké fyzické zátěže (například v kombinaci s neprodyšným ochranným oděvem viz kapitola 3.2.2), která způsobuje vzrůst tělesné teploty (viz Obr. 111). V takových situacích je tepová frekvence zvýšená i ve stavech nízké zátěže (např. sezení) o cca 30 úderů/min při zvýšení tělesné teploty o $1 \text{ }^\circ\text{C}$ [337]. Cílem termoregulačního systému je stimulovat přenos tepla do okolí prostřednictvím vazodilatace a zvýšeného průtoků krev kůží a dovařováním potu. Odpařování je však blokováno nepropustným oděvem, tělesná teplota jen vyšší oproti normálnímu stavu a srdeční akce i v klidu neodpovídá reálné fyzické zátěži [88].



Obr. 111 – Výpočet metabolické produkce z frekvence srdečního tepu při testu s přerušovanou zátěží. Vlevo: Test probíhal pouze ve spodním prádle a hodnoty vypočtené ze srdečního tepu odpovídají udávané zátěži. Vpravo: Test v neprodyšném ochranném oděvu typu Tychem, který zapříčinil postupný vzrůst tělesné teploty, což mělo za následek i zvýšení frekvence srdečního tepu a následně negativně ovlivnilo výpočet metabolické produkce $\text{MET}=\text{f}(\text{HR})$. Převzato z [88].

V roce 2019 vydal P. Bröde studii s korekčními postupy založenou na pokusech s osobami při 11 různých typech zátěže vyvolávající tepelný stres. Korekce jsou založeny na sledování hodnoty frekvence srdečního tepu v klidové fázi experimentu (trvající alespoň 5 min) a následné korekci měřené frekvence srdečního tepu pro výpočtu metabolické produkce při pokračování zátěže. Nezbytná je však individuální korekce pro každého jedince zvlášť, neboť variabilita ve zkoumaném vzorku dosahovala hodnot až 63 % [337].

Tělesná teplota: Je teplota lidského těla odpovídající vnitřní teplotě orgánů v břišní dutině, hrudním koši a hlavě (označení t_{body} [°C]). Stabilní tělesná teplota je jednou ze základních podmínek správné funkce všech orgánů a celého těla (blíže viz kapitola 2.2). Nedávné výzkumy [340] naznačily, že od 19. století došlo u obyvatel Evropy/USA k poklesu průměrné tělesné teploty v populaci u mužů o 0.59 °C a u žen o 0.32 °C (monotónnost poklesu je cca -0.03 °C dle dekády narození). Jako hlavní příčina je uváděn pokles penetrace populace chronickými zánětlivými onemocněními (tuberkulóza, záněty zubů, záněty kloubů a další), která vyvolávají trvale vyšší tělesnou teplotu [341]. Aby bylo možné určení přesné tělesné teploty neovlivněné přenosem tepla do okolí, je většinou nutné zavedení měřicí sondy do některého z tělesných otvorů [342], na kryté místo (v podpaží) [343], popřípadě spolknutí miniaturní sondy do trávicího traktu [344]. Pozornému čtenáři asi není potřeba vysvětlovat, že takové měření není u pokusných osob příliš oblíbené, ale při základním výzkumu termofyziologie v širokém rozsahu metabolické produkce bohužel není k dispozici jiná stejně přesná a realitně levná metoda měření.

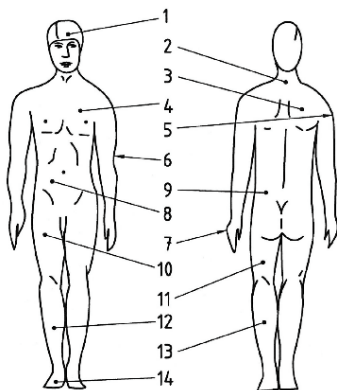
Jak měřit: Tělesná teplota se mění v rozsahu jednotek stupňů °C a požadované rozlišení je na 0.1 °C [343]. Měřicí sondy se zavádí do některého z tělesných otvorů: úst – orální sonda, análního – rektální sonda, vagíny – vaginální sonda. Bezkontaktní měření teploty lze provádět s dostatečnou přesností pouze ve středním uchu a na bubínku [345], [346], kdy dnes dostupné lékařské teploměry určené pro měření teploty v uchu poskytují již dostatečnou přesnost a opakovatelnost měření [343]. Měření radiačními teploměry na čele pokusné osoby lze považovat pouze za orientační [347]. Dále je možné využít polykatelné gastro sondy o rozměrech větší pilulky, která prochází trávicím traktem a odesílá naměřené hodnoty teploty a polohy bezdrátově do záznamového zařízení. Použití této sondy je však limitována časem průchodu sondy trávicím traktem a také je potřeba zohlednit polohu sondy v dutině břišní, neboť poloha blízko jater (nejvyšší teplota) či v blízkosti žaludku (případ, kdy se osoba napije studené tekutiny) může do měření vnášet falešné změny teploty [344]. V současnosti jsou na trhu i tzv. termostatické/adiabatické (zero heat flux) sondy pro měření tělesné teploty přes povrch kůže (například produkt SpotON od firmy 3M). Jedná se o neinvazivní způsob měření odstraňující problémy se zaváděnými sondami, ale užití této metody je vhodné jen pro nižší zátěže s pomalými změnami intenzity činnosti, neboť časová konstanta je vzhledem k principu měření v řádu jednotek až nižších desítek minut [348].

Z praxe: Měření tělesné teploty pomocí bezdotykových radiačních teploměrů nebo infrakamer na čele či jiné části povrchu těla má jen velmi omezenou vypovídací hodnotu, neboť povrchová teplota těchto částí může být silně ovlivněna okolním prostředím a zásahy termoregulačního systému jako je vazokonstrikce/vazodilatace (viz Obr. 7) nebo pocení (viz Obr. 9.). Trend ve změně povrchové teploty získaný z dat IR teploměrů může být využit jako indikátor změny přenosu tepla mezi tělem pokusné osoby a okolím, ale nelze jej spolehlivě využít jako indikaci absolutní hodnoty tělesné teploty.

Povrchová teplota pokožky: je povrchová teplota kůže člověka, označení t_{sk} [°C]. Jelikož povrchová teplota může dle metabolické produkce a přenosu tepla do okolí značně kolísat a rozložení teploty po povrchu vykazuje značné nehomogenity je nezbytné vícebodové měření

dle ČSN EN ISO 9886 Ergonomie - Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření [349] nebo plošné metody na bázi infračervených kamer [347], [350].

Jak měřit: Pro měření povrchové teploty lidského těla platí většina poznatků uvedených v kapitole 4.1 týkající se měření povrchové teploty, ovšem s přihlédnutím k tomu, že lidská pokožka je živý biologický systém a použité metody musí být takové, aby ji nepoškodily, či negativně neovlivňovaly její činnost. V principu je tedy vhodné využití nalepovacích sond (např. termočlánek, odporová čidla, NTC čidla atd.), kompaktních teploměrů typu iButton [351], či měření povrchové teploty termokamerou, které ale poté vyžaduje relativně složité zpracování obrazového záznamu [347].



	Místa	4 body	8 bodů	14 bodů
1	čelo		0,07	1/14
2	krk	0,28		1/14
3	pravá lopatka	0,28	0,175	1/14
4	levý vrchní hrudník		0,175	1/14
5	pravá paže na vyšším místě		0,07	1/14
6	levá paže na nižším místě		0,07	1/14
7	levá ruka	0,16	0,05	1/14
8	pravá část břicha			1/14
9	levý paravertebral			1/14
10	přední část pravého stehna		0,19	1/14
11	zadní část levého stehna			1/14
12	pravá hleň	0,28		1/14
13	levé lýtko		0,2	1/14
14	pravý nárt			1/14

Obr. 112 – Místa dobručená v normě ISO 9886 pro měření povrchové teploty pokožky a jejich váha při výpočtu průměrné povrchové teploty pokožky s využitím 4, 8 a všech 14 teplot. Převzato z [349].

Norma ISO 9886 pro vyčíslení průměrné povrchové teploty lidského těla doporučuje měření na celkem 14 místech, přičemž lze teplotu vyjádřit za využití všech teplot nebo zjednodušenou metodu při využití 4 či 8 teplot a přepočtu přes vážený průměr (viz Obr. 112).



Obr. 113 – Vlevo: Připevnění termočláneku k pokožce na tváři pokusné osoby. Využití „obyčejné“ náplasti se neosvědčilo a bylo později nahrazeno prodyšným materiálem Omnifix fy Hartmann. Vpravo: Kompaktní teploměr s loggerem typu iButton připevněným páskou Omnifix na paži pokusné osoby. Zdroj archiv autora.

Z praxe: S výhodou bylo v praxi autora využito kompaktních teploměrů od typu iButton od firmy Dallas, které umožňují i záznam dat (viz Obr. 113 vpravo). Nezbytné je však precizní a obezřetné umístění těchto teploměrů na těle pokusných osob, protože i malá změna v poloze může znamenat velké odchylky (například v případě umístění sondy do blízkosti povrchové žíly na horních končetinách). Kvalitní připevnění čidel a senzorů je zásadní pro kvalitu a

spolehlivost měření, nicméně spolehlivé připevnění na povrch pokožky, které by bylo bezpečné a nezpůsobovalo podrážení pokožky je velmi složité. Je zásadní, aby lepicí materiál odolával zvýšené vlhkosti pokožky při pocení, avšak umožňoval prostup potu a nevyvolával alergické reakce pokožky. Vhodný materiál je např. výrobek Omnifix od firmy Hartmann, zatímco „obyčejné“ lepicí náplasti se neosvědčily (viz Obr. 113 vlevo).

Emisivita pokožky: je základním parametrem pro výpočet přenosu tepla radiací, označení ε_{sk} [-]. Obvykle nabývá hodnoty v rozmezí 0.94 až 0.98 bez rozměru [343]. Studie [352] z roku 2020 potvrdila, že na emisivitu pokožky nemá žádný vliv její barva/pigmentace a pro všechny typy pigmentace kůže lze při měření infračervenými přístroji využít hodnotu emisivity 0.98. Viditelné světlo s vlnovou délkou $\lambda = 380 \text{ nm} - 780 \text{ nm}$ je schopné projít povrchovými vrstvami kůže až k vrstvě *stratum basale*, která je zodpovědná za pigmentaci a barvu kůže. Povrchové vrstvy *stratum corneum* jsou však pro dlouhovlnné záření s vlnovou délkou $\lambda = 0.76 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ netransparentní, a proto je pro všechny typy kůže emisivita stejná [353].

Frekvence srdečního tepu: je parametr udávající počet stahů srdečního svalu (tepů srdce) za minutu, označení f_{HR} [min^{-1}]. Stahy srdečního svalu jsou vyvolány elektrickou aktivitou, která vzniká v sinoatriálním uzlu pravé předsině a dále se šíří po myokardu, má určitý časový průběh a časovým záznamem vzniká tzv. EKG - elektrokardiogram. Signál se šíří z myokardu poměrně snadno všemi směry do celého těla, proto jej můžeme zaznamenat v poměrně velké amplitudě (jednotky až desítky mV) prakticky na libovolném místě tělesného povrchu [354]. Z jeho analýzy lze určit nejen frekvenci srdečního tepu, ale celou řadou dalších parametrů funkce srdce [355].

Jak měřit: Signál/potenciál elektrické aktivity srdce je dobře detekovatelný na většině povrchu těla a lze jej měřit pomocí sond, které jsou ve vodivém kontaktu s pokožkou. Dalším možností jak změřit frekvenci srdečního tepu jsou metody založenými na detekci pulsu pomocí pulsní oxymetrie. Metoda pracuje na principu prosvěcování dobře prokrvených a přístupných tkání (konečky prstů, zápěstí, ušním boltec atd.) dvěma zářeními o různé vlnové délce a vyhodnocením signálu změny optických vlastností tkáně [356]. Stručný postup pro měření srdeční frekvence a jeho interpretace pro zátěž lidského organismu je uveden v normě ČSN EN ISO 9886 Ergonomie - Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření [349].

Z praxe: Frekvence srdečního tepu je jedním ze základních signálů pro určení metabolického výdeje organismu a jeho celkového zatížení. Pokud je osoba pod fyzickou zátěží, ale bez dalších fyzických a psychických stresorů má hodnota srdeční frekvence v čas mírně kolísající hodnotu, zatímco v případě stresové zátěže se stává frekvence srdce více monotónní a pravidelnou. (podobně jako kolísající prokrvení pokožky v termoneutrální stavu versus nástup vazokonstrikce při chladném stimulu viz kapitola 2.2 a Obr. 8). Pravidelnost frekvence srdečního tepu tedy také naznačuje, jaká je stresová zátěž měřené osoby [355], [357].

5 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/m^2). 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 a počtem dostupných licencí simulačního nástroje/softwaru. Následující kapitola bude zaměřena na přehled dostupných postupů a modelů, které lze aplikovat v hodnocení tepelného stavu prostředí a nezabývá se tak podrobným matematickým popisem jednotlivých simulačních metod a aspektů jejich aplikace. Podrobnější informace k matematickému popisu simulačních metod lze nalézt ve zdrojích [358]–[360].

Pro in-silico experimenty v oblasti optimalizaci 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** (či jiných 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 stav okolního prostředí** (fyzikální parametry viz kap. 4.1)
- **Model oděvu nebo technologií, které jsou jeho součástí** (fyzikální parametry viz kap. 4.1)
- **Model přenosu tepla z lidského těla do okolí** (fyzikální parametry viz kap. 2.3)
- **Model generace a přenosu tepla v těle** (fyzikální parametry viz kap. 4.4.3)
- **Model termoregulace lidského těla** (viz dále v kapitole 5.2.5)
- **Model tepelného pocitu a modelu tepelného komfortu** (viz dále v kapitole 5.2)

Simulace v oblasti tepelného komfortu jsou tedy většinou velmi komplexní a skládají se z využití více různých modelů a přístupů k modelování. Vzhledem k popisu a skutečnostem uvedeným v předešlých kapitolách (popisu tepelného stavu prostředí 4.1, vlastnosti oděvů

3.2.3 a činnosti člověka 3) je působení okolního prostředí i zatížení člověka 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 (u těchto modelů bývá obvykle řádově složitější jejich matematický popis, typicky vedoucí k diferenciálním rovnicím). 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
- **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

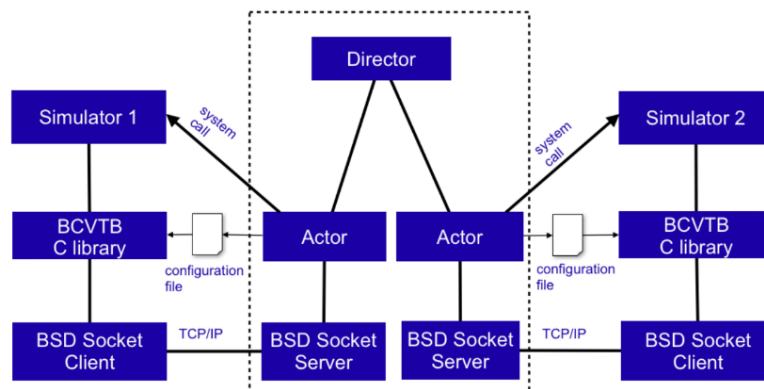
V současné době však neexistuje model plně dostačujících pro pokrytí všech prostředí, situací, technologií zátěží, nesymetrií a dynamických změn. Naštěstí však takto univerzální model asi není úplně zapotřebí, neboť je jen málo úloh, kde je nezbytné takto komplexní přístup. S rostoucím výkonem výpočetní techniky a dostupné paměťové kapacity je však v posledních letech tendence takový komplexní model vytvořit, nicméně se nejedná o čistou simulaci, ale propojení Fialova termofyziologického modelu a teplého manekýna označované jako Human simulator (Koelblen, Psikuta 2018 [201]).

K řešení výše popsaným fenoménů a modelů lze využít následující přístupy:

- **Bilanční 0D/1D metody** – vychází ze základních energetických bilancí, které popisují řešené fenomény (vedení tepla, konvekci, stavy velkého vzduchu) a to buď jako 0D problém, kdy jsou řešené čistě bilanční rovnice, či 1D problém, kdy je možná prostorová diskretizace v jedné ose/směru (prostup tepla stěnou ve směru kolmém k povrchu, rozdělanou na více vrstev). V časové oblasti může být model buď statický pro základní výpočet ustálených stavů, anebo dynamický, kdy je model diskretizován v čase a do parametrů simulovaných dějů jsou vneseny časové členy a konstanty (například tepelná kapacita). Těmito přístupy je možné řešit i přenos tepla radiací, ale pouze případy, které

mají zjednodušené analytické řešení. Typické výpočetní popředí je Matlab/Simulink, Dymola, Amesim, Modelica, Trnsys atd.

- **Bilanční 2D a kvazi3D metody** – metody vycházejí z 0D/1D metod, ale přidávají diskretizaci v dalším směru, čímž lze řešit vedení tepla v 2D povrchu/ploše. Řešení přenosu tepla konvekcí většinou zůstává stále v podobě bilančního přístupu, popřípadě lze řešit přenos tepla mezi více zónami definovanými jejich objemem a advekcí mezi nimi. Přenos tepla radiací může být řešen s využitím 3D geometrie a výpočtu úhlových faktorů jednotlivých ploch relativně detailně. Základní simulační nástroje v oblasti simulace kabin jsou Theseus-FE od firmy P+Z (Německo) a TAItherm od Thermoanalytics (USA). Bližší popis možností nástrojů viz [43] .
- **CFD metody (výpočtová mechanika tekutin) 3D metody** – Pro tvarovou optimalizaci a podrobnou 3D simulaci přenosu tepla se používá CFD softwarů, které obvykle disponují podrobnou simulací přenosu tepla konvekcí, radiací a vedením (např. OpenFOAM, StarCCM+, Ansys CFX, apod.). Model je většinou plně trojrozměrný, prostorově diskretizovaný ve všech třech směrech a je možná i časová diskretizace. Vzhledem k prostorové diskretizaci je však složitost modelu podstatně vyšší (oproti 0D/1D modelům), čemuž pak odpovídá i hardwarová a časová náročnost simulací těmito modely. U CFD nástrojů, které obecně představují velmi složité softwarové balíky, je často hlavním limitujícím faktorem pro jejich použití cena licencí. Volně dostupná prostředí jako OpenFOAM jsou sice zdarma, ale běžný uživatel často naráží na velmi omezenou základní škálu modelů, které často neumožňují řešit složitější problémy proudění kombinovaného s přenosem tepla. Uživatelsky přívětivější nadstavby jsou pak opět komerčně licencovány.
- **Kosimulační metody** – Neboť numerické řešení komplexních 3D CFD modelů bývá často velmi časově a hardwarově náročné, využívají se s výhodou nástroje propojující 0D/1D a CFD modely do jedné simulace tzv. kosimulace (viz Obr. 114). Zvláště pak u virtuálních modelů vozidel, bývá často model kabiny jedním z nejsložitějších a časově nejnáročnějších modelů [361]. Využití propojení různých simulačních prostředí do jedné simulace je dnes běžnou součástí simulačních softwarů a existují i standardizovaná rozhraní pro výměnu dat a simulačních modulů mezi různými prostředími (například standard FMI - Functional Mock-up Interface).

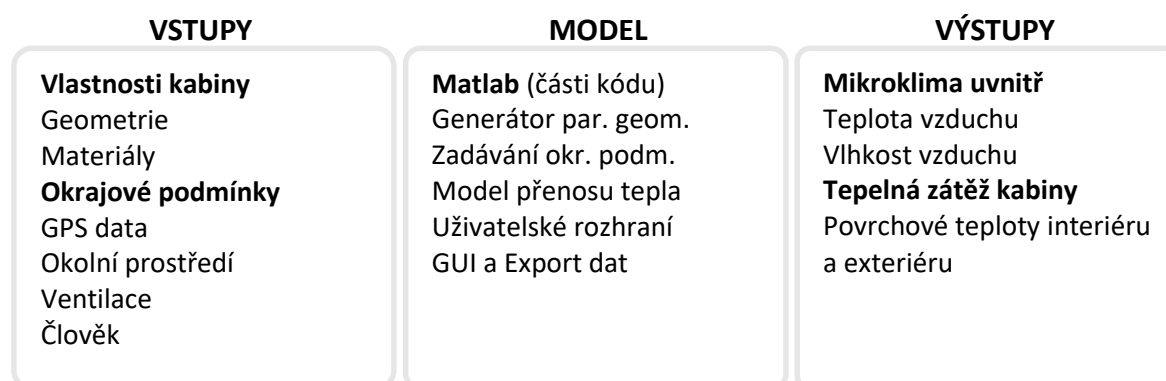


Obr. 114 – Princip kosimulačního prostředí pro simulaci řízení systémů HVAC v budově. Schéma obsahuje dva modely, jejichž synchronizaci a předávání dat zajišťuje řídicí SW (ve středu obrázku v čárkovaném boxu). Převzato z [362].

5.1 Modelování okolního prostředí

Cílem modelů pro simulaci parametrů vnitřního prostředí je vyčíslení hodnot parametrů, které ovlivňují tepelnou bilanci mezi lidským tělem a jeho okolím. Podrobný výčet a popis parametrů je uveden v kapitole 4.1. V následujících odstavcích jsou na příkladech simulace tepelné zátěže kabiny osobních vozidel uvedeny přístupy v řešení simulace vnitřního prostředí v kabině osobního vozidla a to za pomoci všech uvedených simulačních metod. Cílem je ukázat možnosti, výhody a limity jednotlivých přístupů. Části textů v této kapitole vznikly při řešení projektů VOPES - Výmena odborných poznatků a zkušenosti z oblastí energetických systémů INTERREG V-A SK-CZ/2016/01 [363], Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka – WP22, TE01020020, a diplomové práce C. Kučery, CFD simulace proudění vzduchu v kabině automobilu [364].

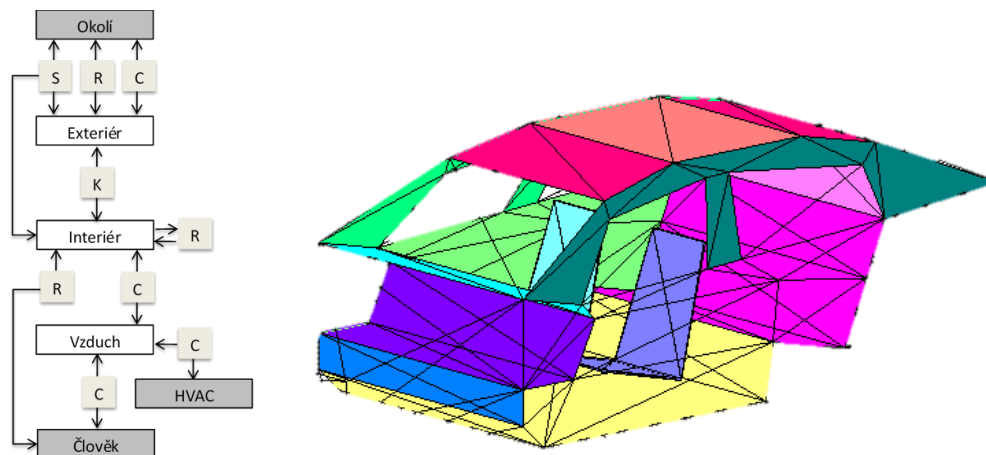
0D/1D model kabiny – Pro dynamické výpočty zkoumaných systémů je vhodným nástrojem např. prostředí Matlab/Simulink, Dymola, Trnsys. Jejich hlavní výhodou spočívá v rozsáhlých knihovnách numerických solverů a v dobré podpoře pro řešení různých programových struktur a bloků. V rámci CKAP byl vytvořen Virtuální zkušební stand vozu (VTSCC viz Obr. 117), který simuluje dynamické chování prostředí v kabině vozu s pomocí řešení soustavy obyčejných diferenciálních rovnic. Hlavní stupě modelu, modely a výstupy jsou uvedeny na Obr. 115.



Obr. 115 – Přehled vstupů, částí modelu a výstupů dynamického modelu tepelné zátěže kabiny vozidla.

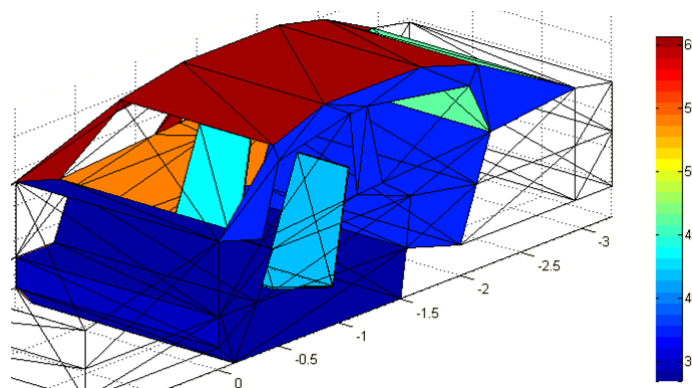
Model kabiny se skládá ze soustavy bilančních rovnic popisující zákony zachování energie, hmoty a tepelné rovnováhy ve výpočetních uzlech. V modelu se vyskytují tři typy uzlů: Exteriér (index E v následujících rovnicích), Interiér (index I) a tzv. Air-zone neboli zóna s konstantním objemem vzduchu (index A), které jsou propojeny s okrajovými podmínkami. V modelu jsou tři typy okrajových podmínek: Okolní prostředí (bez indexu), Klimatizace a ventilace (V) a Člověk (H). Přenos tepla je řešen zvláště pro vnější a vnitřní povrchy včetně uvažování akumulace tepla. Uvnitř kabiny je pouze jeden prostor, ve kterém je uvažováno dokonalé mísení vzduchu popsané zákonem zachování energie a hmoty. Na Obr. 116 je znázorněno schéma přenosu tepla v modelu kabiny automobilu. Na vnějším povrchu kabiny probíhá tepelná výměna mezi kabinou a okolním prostředím konvekcí, krátkovlnnou a dlouhovlnnou radiací. Část krátkovlnné radiace je transmitována prosklenými částmi do kabiny automobilu a následně absorbována povrchy interiéru, jako jsou např. palubní deska, sedadla, čalounění dveří, střechy atd. Nezanedbatelný podíl na tepelné zátěži kabiny má

prostup tepla vedením skrz povrchy kabiny. Uvnitř kabiny probíhá tepelná výměna konvekcí a také radiací mezi jednotlivými povrchy interiéru kabiny a člověka. Přenos tepla konvekcí zprostředkovává proudění vzduchu v kabině, které může být přirozené či nucené. Přirozená konvekce je způsobena vztakovými silami, které zapřičiňují pohyb teplého vzduchu vzhůru. Nucená konvekce je způsobena spuštěnou ventilací, kdy přichází výstky do kabiny čerstvý či klimatizační jednotkou upravený vzduch. Nucená konvekce způsobená přiváděným vzduchem výstky je nejběžnějším způsobem pro regulaci teploty vzduchu v kabině.



Obr. 116 – Vlevo: Schéma přenosu tepla v kabině automobilu. R – tepelná radiace, S – sluneční záření, C – konvekce, K – vedení. Vpravo: 3D geometrie kabiny vozidla pro definici ploch pro výpočet přenosu tepla mezi okolím a vzduchem v kabině. Převzato z [363].

Pro výpočet radiace (tj. dopadající sluneční záření a tepelné záření povrchů) model využívá 3D parametrizované geometrie a tím zohledňuje vliv vzájemné polohy povrchů vozu vůči sobě a vůči slunci (viz Obr. 116).



Obr. 117 – Vizualizace výsledků simulace. Povrchové teploty interiéru [°C] zaparkovaného vozu v letní den – slunce svítí na spolujezdcovu stranu. Převzato z [363].

Relativní vlhkost vzduchu v kabině je určena z rovnice mísení přivodního vzduchu se vzduchem v kabině, vycházející ze zákona zachování hmoty a energie. Výsledkem modelu je tedy predikce mikroklimatu v kabině, tj. teploty a relativní vlhkosti vzduchu, dále pak povrchové teploty jednotlivých částí interiéru a exteriéru a jednotlivé tepelné toky mezi výpočetními uzly a tím i celková tepelná zátěž kabiny. Podrobný popis dynamického modelu tepelné zátěže kabiny lze nalézt ve zdroji [43].

Tepelná bilance exteriéru kabiny

$$c_E m_E \frac{dt_E}{d\tau} = \dot{Q}_{r,E} + \dot{Q}_{c,E} + \dot{Q}_{sr,E} + \dot{Q}_{d,E}, \quad (5.1.1)$$

kde c [J/kgK] je měrná tepelná kapacita, m [kg] je hmotnost, τ [s] je čas, t [°C] je teplota a \dot{Q} [W] označuje tepelné toky mezi okolím a exteriérem kabiny: $\dot{Q}_{r,E}$, $\dot{Q}_{E,conv}$ dlouhovlnná radiace, $\dot{Q}_{c,E}$ konvekce, $\dot{Q}_{sr,E} = \alpha \dot{Q}_{sr}$ absorbované sluneční záření a \dot{Q}_d vedení skrz stěny kabiny.

$$\dot{Q}_{r,E} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(\bar{t}_r + 273.15)^4 - (t_E + 273.15)^4] \cdot A_E, \quad (5.1.2)$$

$$\dot{Q}_{c,E} = h_{c,E} \cdot (t_{amb} - t_E) \cdot A_E \quad (5.1.3)$$

$$\dot{Q}_{E,E} = k \cdot \frac{(T_I - T_E)}{\delta} \cdot A_E \quad (5.1.4)$$

kde ε je emisivita povrchu jednotlivé části exteriéru kabiny, A_E jeho plocha a T_E jeho teplota. T_I je teplota interiéru téže části kabiny. T_{amb} je teplota okolního vzduchu a T_{rad} je střední radiační teplota, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, k je součinitel tepelné vodivosti mezi exteriérem a interiérem, a δ je tloušťka jednotlivé části kabiny, $h_{c,E}$ je součinitel přestupu tepla konvekcí mezi vnějším povrchem kabiny a okolním prostředím.

Tepelná bilance interiéru kabiny

$$c_I m_I \frac{dt_I}{d\tau} = \dot{Q}_{c,I} + \dot{Q}_{r,I} + \dot{Q}_{sr,I} - \dot{Q}_{d,E} + \dot{Q}_{r,H} \quad (5.1.5)$$

kde $\dot{Q}_{c,I}$ [W] je tepelný tok konvekcí mezi objemem vzduchu a povrchy interiéru, $\dot{Q}_{sr,I} = \mu \dot{Q}_{sr}$ je transmitované sluneční záření, které se následně absorbuje do povrchů interiéru, přenos tepla konvekcí uvnitř kabiny je dán vztahem:

$$\dot{Q}_{c,I} = h_{c,I} \cdot (t_a - t_I) \cdot A_I, \quad (5.1.6)$$

$h_{c,I}$ je součinitel přestupu tepla konvekcí mezi vzduchem o teplotě t_a a vnitřním povrchem kabiny o teplotě t_I , jehož plocha je A_I . Přenos tepla radiací z dané části interiéru (i) na ostatní části je dáno vztahem $\dot{Q}_{r,I}^{(i)} = \sum_j \dot{Q}_{r,I}^{(i \rightarrow j)}$, tj. jako součet přeneseného tepla radiací mezi danou částí (i) a jednotlivými ostatními částmi (j). Pro jednu část je přenos tepla radiací vyjádřen rovnicí:

$$\dot{Q}_{r,I}^{(i \rightarrow j)} = \varepsilon^{(i)} \varepsilon^{(j)} \sigma \cdot [(t_I^{(j)} + 273.15)^4 - (t_I^{(i)} + 273.15)^4] \cdot F_{i \rightarrow j} A_I^{(i)} \quad (5.1.7)$$

kde $F_{i \rightarrow j}$ je úhlový faktor mezi daným povrchem (i) a okolním povrchem (j). Výpočet úhlových faktorů s uvažováním stínění je náročný a lze jej provést např. pomocí CFD programu StarCCM+, který mimo jiné obsahuje právě řešič na výpočet úhlových faktorů metodou surface-to-surface, nebo pomocí specializovaných nástrojů [270].

Tepelná bilance člověka

Pro vyjádření tepelné bilance člověka v mírném neutrálním a homogenním prostředí lze použít rovnici z modelu PMV-PPD (viz kapitola 5.2.3). Velice zjednodušeně lze předpokládat, že metabolismus každého člověka sedícího v kabině produkuje přibližně tepelný výkon

$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{r,H} + \dot{Q}_{c,H} = 70 + 30 = 100$ W. Jeden člověk přenáší 70 W tepla radiací a vedením a 30 W konvekcí, vypařováním a dýcháním. Pro n osob uvnitř se výraz vynásobí $\times n$.

Tepelná bilance v objemu vzduchu kabiny

$$m_A c_A \frac{dt_a}{d\tau} = \dot{Q}_{c,V} + \dot{Q}_{c,H} - \dot{Q}_{c,I} \quad (5.1.8)$$

Tepelná rovnováha v objemu vzduchu je ovlivněna konvekcí mezi vzduchem a interiérem $\dot{Q}_{c,I}$ a osobami $\dot{Q}_{c,H}$ a ventilací, tj. mísením přiváděného vzduchu výustkami v prostoru kabiny,

$$\dot{Q}_{c,V} = (h_V - h_A) \frac{dm_V}{d\tau} - m_A \frac{dh_A}{dx_A} \frac{dx_A}{d\tau} \quad (5.1.9)$$

kde x_A [kg/kg_{sv}] je měrná vlhkost vzduchu v kabině, což je hmotnost vodních par vztažená na hmotnost suchého vzduchu. 1. člen na pravé straně rovnice (5.1.9) vyjadřuje celkovou změnu entalpie v kabině, která je způsobena ventilací, tj. jako rozdíl mezi vstupující a vystupující entalpií do kabiny. 2. člen pravé strany v rovnici (5.1.9) zohledňuje to, že část energie se spotřebuje pouze na změnu entalpie vodní páry (vlhké složky vzduchu) v kabině.

Bilance vlhkosti vzduchu

Přiváděný vzduch výustkami se dokonale mísí s objemem vzduchu v kabině a pro vlhkost vzduchu v kabině platí zákon zachování hmoty:

$$m_A \frac{dx_A}{d\tau} = (1 + x_A) \left(\frac{x_V - x_A}{1 + x_V} \right) \frac{dm_A}{d\tau} + \dot{m}_{H,H_2O} \quad (5.1.10)$$

kde x_V [kg/kg_{sv}] je měrná vlhkost vzduchu přiváděného do kabiny. \dot{m}_{H,H_2O} je množství vody, které odchází z osob v kabině vypařováním jak z pokožky tak i dýcháním. Lidský organismus je citlivý zejména na parciální tlak vodní páry ve vzduchu, která vystupuje v definici relativní vlhkosti definované pomocí poměru parciálního tlaku vodních par p_a a parciálního tlaku sytých vodních par p_a'' .

$$\varphi_A = \frac{p_a}{p_a''} = \frac{p_{atm}}{p_a'' \cdot (1 + 0,622/x_A)} \quad (5.1.11)$$

kde p_{atm} [Pa] je tlak vzduchu v kabině blízky atmosférickému tlaku, ale může vznikat mírný přetlak u nuceného větrání, nebo mírný podtlak u vypnuté ventilace.

Výsledné mikroklima a tepelná zátěž kabiny

Teplota vzduchu v kabině a jeho relativní vlhkost jsou základní parametry mikroklimatu v kabině automobilu. Společně s povrchovými teplotami povrchů interiéru (viz Obr. 117) a exteriéru lze určit výslednou pasivní tepelnou zátěž kabiny automobilu. Pasivní tepelná zátěž kabiny je dána součtem tepelných toků vedených skrz stěny kabiny $\dot{Q}_{d,E}$, transmitovaných slunečním zářením $\dot{Q}_{sr,I}$, a produkovaným lidským organismem \dot{Q}_H ,

$$\dot{Q}_{PHL} = \dot{Q}_{d,E} + \dot{Q}_{sr,I} + \dot{Q}_H \quad (5.1.12)$$

Pro ustanovení tepelné rovnováhy v kabině automobilu je nutné, aby pasivní tepelná zátěž kabiny byla rovna tepelnému toku přicházejícímu se vzduchem z klimatizační jednotky, neboli

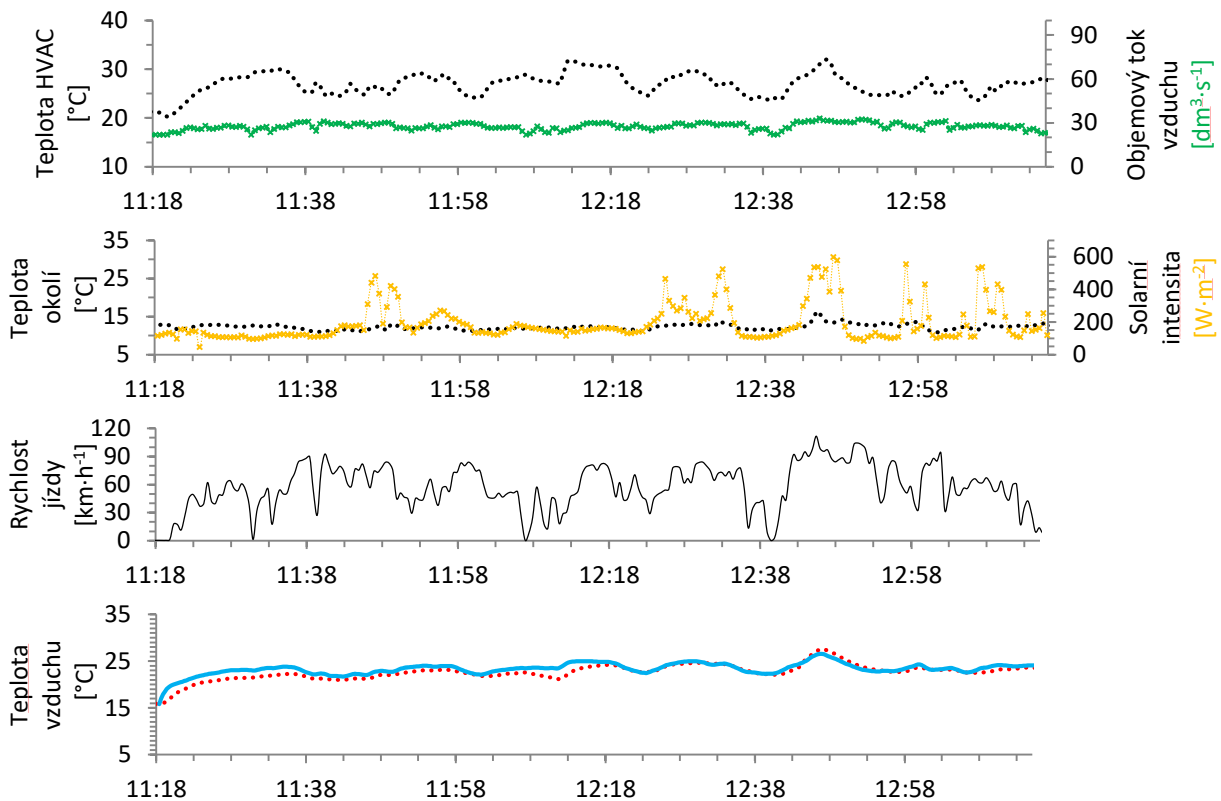
$$\dot{Q}_{PHL} + \dot{Q}_V = 0 \quad (5.1.13)$$

Pokud má pasivní tepelná zátěž kabiny kladné znaménko $\dot{Q}_{PHL} > 0$, znamená to, že kabina přijímá teplo z okolí a je nutné ji ochlazovat $\dot{Q}_V < 0$. V pasivní tepelné zátěži není uvažován vliv spotřeby energie v klimatizační jednotce na ohřátí/ochlazení čerstvého vzduchu zvenčí na teplotu přiváděného vzduchu. Energie spotřebovaná na ochlazení/ohřátí nasávaného vzduchu zvenčí $\dot{Q}_{A/C}$ je definována jako rozdíl entalpií za čas přiváděného vzduchu do HVAC jednotky a odváděného upraveného vzduchu do kabiny a musí být také započtena do celkové tepelné zátěže kabiny \dot{Q}_{HL}

$$\dot{Q}_{HL} = \dot{Q}_{PHL} + \dot{Q}_{A/C} \quad (5.1.14)$$

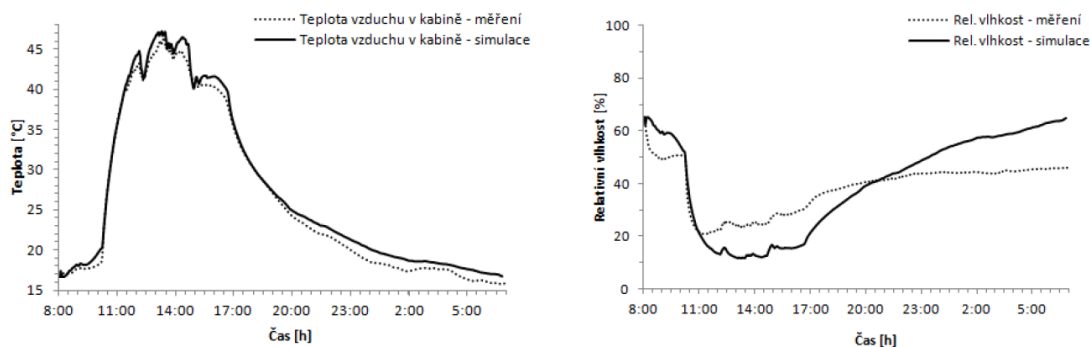
Predikované parametry prostředí v kabině je možné využít jako vstupní data pro predikci tepelného komfortu na základě modelu PMV-PPD (viz kapitola 5.2.3). Je nutné odhadnout tepelné parametry oděvu a metabolickou aktivitu osob v kabině, která je většinou rovna sezení či, v případě řidiče, velmi lehké fyzické práci (60 až 115 W·m⁻² [20]). Hodnocení modelem PMV-PPD však lze doporučit jen pro stabilní podmínky vnitřního prostředí v kabině bez zátěže solárním zářením (například noční jízda, či simulace jízdy při zataženém dni). V silně dynamických či nehomogenních podmínkách může být predikce PMV-PPD modelu zatížena velkou chybou, neboť model na tyto podmínky nebyl navrhován ani validován (viz kapitola 5.2.3). Model kabiny je možné propojit i s modelem podrobné lidské termofyziologie dle Fialy (viz kapitola 5.2.5), nicméně tento postup se nedoporučuje, protože může dávat zavádějící výsledky. Model dle Fialy je více-segmentový model pro podrobné hodnocení nehomogenních prostředí a zjednodušený OD/1D model kabiny mu tak není schopen poskytnout okrajové podmínky v dostatečném rozlišení tak, aby nebylo hodnocení modelu degradováno. Zvýšená výpočetní náročnost by tak pravděpodobně nepřinesla efekt v detailní predikci tepelného pocitu po jednotlivých segmentech lidského těla. Využití Fialova modelu lze spíše doporučit v oblasti CFD simulací a kosimulací [363].

Příklad použití dynamického modelu tepelné zátěže kabiny: Obr. 118 znázorňuje příklad použitých vstupních okrajových podmínek pro OD/1D model (teplota přiváděného vzduchu, objemový průtok, intenzita solárního záření, teplota okolního vzduchu a rychlost pohybu vozidla) a výsledky predikce teploty vzduchu v kabině v porovnání s teplotou vzduchu naměřenou ve skutečné kabině při jízdním experimentu. Celková doba jízdy byla cca 120 minut a stejný časový úsek byl simulován modelem. Výhoda OD/1D přístupu spočívá především v časové úspoře při řešení numerické simulace, neboť výpočet 120 minut simulovaného jízdního času v modelu trval jen cca 10 min strojového času běžného stolního počítače (rok 2012). Pomocí tohoto modelu lze spočítat globální parametry prostředí v kabině (teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, tepelnou zátěž/ztrátu kabiny atd.), ale nelze simulovat detailní podmínky v jednotlivých částech kabiny či distribučního systému vzduchu. Pro tyto simulace je nezbytný přístup pomocí metod založených na CFD (viz dále).



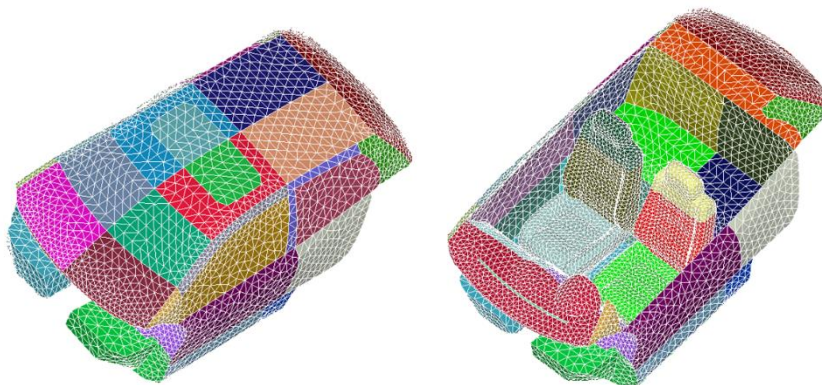
Obr. 118 – Ukázka jízdních dat z experimentu na reálném vozidle (Škoda Felicia combi) a porovnání výsledků měření a predikce vnitřní teploty v kabině vozu (spodní graf: plná čára - predikce, tečkovaná čára - měření).

Dovětek k modelu: Při odlaďování modelu kabiny, byl pozorován zásadní rozpor mezi měřenou a predikovanou vlhkostí v kabině parkujícího automobilu, zatímco predikce teploty byla v pořádku (viz Obr. 119). Nejprve bylo usuzováno, že rovnice 5.1.10 není správně implementovaná. Když se nedařilo problém odstranit, byla ověřena přesnost měření vlhkosti v kabině pomocí psychrometrického postupu (viz kapitola 4.1), ale ani zde nebyla nalezena chyba. Pak bylo ověřeno, že v noci nedocházelo ke kondenzaci vlhkosti na sklech, ale také bez úspěchu. Nakonec bylo vysvětlení nalezeno v akumulaci vlhkosti v textilních materiálech vybavení kabiny, kdy při vyšší teplotě je vlhkost z materiálů uvolňována do vzduchu v kabině (roste měrná vlhkost x a tím pádem méně klesá RH) a při nižší teplotě v noci je vlhkost opět pohlcována (klesá měrná vlhkost x a i když klesá i teplota neroste RH tak výrazně jak v modelu).



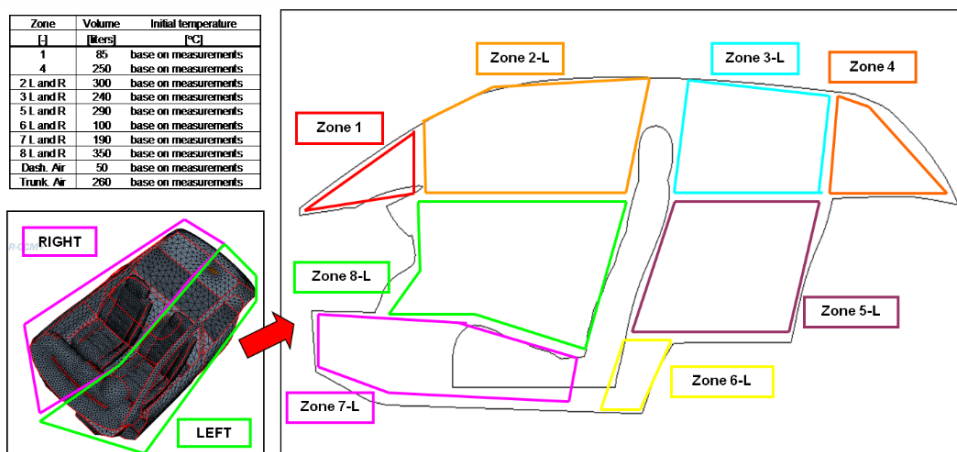
Obr. 119 – Vlevo: Predikce teploty v kabině parkujícího vozidla, vykazovala dobrou shodu s měřením. Vpravo: Shoda predikce relativní vlhkosti však vykazovala jiné trendy než měření v důsledku nezapočtení absorpce/desorpce vlhkosti v textilních materiálech vybavení kabiny. Převzato z [363].

kvazi3D model kabiny – je přístup založený na kombinaci 1D a 3D modelů, který je zvláště vhodný pro simulaci přenosu tepla radiací u tvarově složitějších geometrií, kde není možné efektivní zjednodušení tvaru do jednoduchých ploch (jako je tomu u modelu na Obr. 116), a kde je vyžadována vyšší úroveň detailu predikce (a je tedy nutné využít obecně orientovaných 3D ploch). Řešení radiace je realizováno pomocí 3D prostorového solveru, kondukce bývá řešena 1D nebo 2D přístupem a advekce a přenos tepla konvekcí zůstává v podobě 0D bilančního přístupu.



Obr. 120 – Zjednodušený 3D model konstrukce kabiny, který je již rozdělen tak, aby jednotlivé okrajové podmínky bylo možné přiřadit ke konkrétním advekčním zónám.

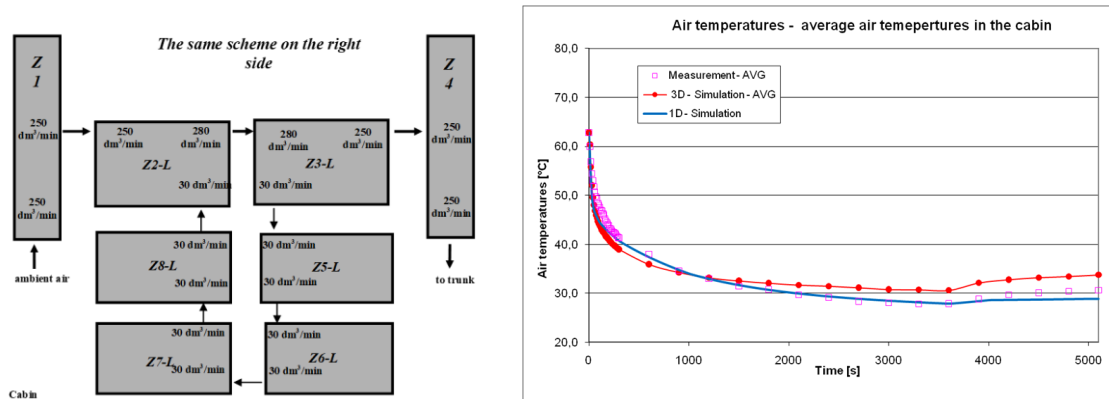
Pro toto nastavení je nezbytné vytvořit vhodně dělený model, v uvedeném příkladu opět model kabiny, jehož povrch je dělen tak, aby bylo možné přiřadit jednotlivé konstrukce k advekčním zónám, které reprezentují jednotlivé části objemu vzduchu v kabině (viz Obr. 121). Jednotlivé advekční zóny tvoří výpočetní uzly v nichž je pak vypočítávána bilance přenosu tepla, vlhkosti a akumulace tepla pomocí rovnic 5.1.8 a 5.1.10. Zóna je definovaná svým objemem a příslušností k jedlovým okrajovým podmínkám (Obr. 121).



Obr. 121 - Příklad definice advekčních zón v kabině malého osobního vozidla. Objem kabiny je rozdělen na pravou a levou stranu a u každého sedadla jsou vytvořeny tři zóny dělící prostor na oblast hlavy, trupu a dolních končetin. Zóna 1 – pod čelním sklem a zóna 4 – pod zadním sklem nejsou stranově dělené. Publikováno v [361].

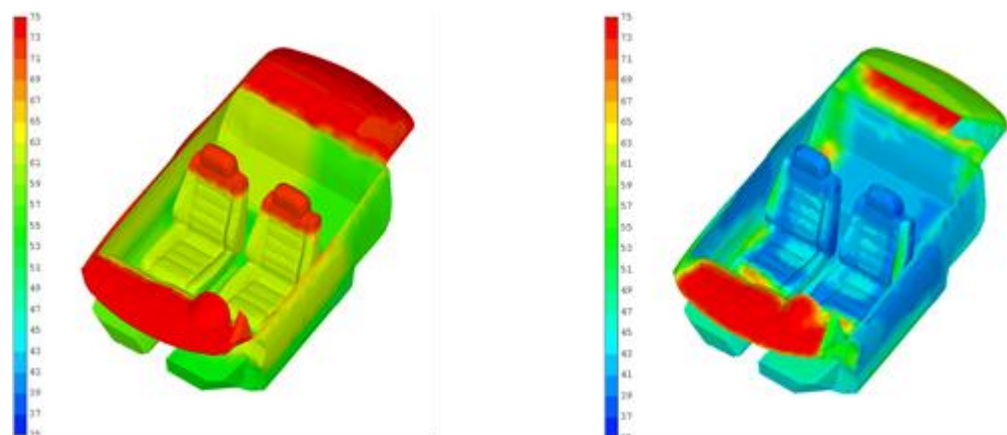
Advekce mezi jednotlivými uzly/zónami je řešena na základě předepsaného advekčního schématu, které může vycházet z aproximovaných dat získaných u podobných reálných kabin (viz Obr. 122) [365]. Nebo je možné na řešení matice advekce využít sofistikovanější metody na principu neuronových sítí, které však musí být natrénovány na řešení obdobně technicky

řešených HVAC systémů [366]. Toto však naráží na obecný problém neuronových sítí, které potřebují dostatek variabilních dat pro natrénování, což u simulací dosud nerealizovaných kabin a HVAC systémů může být překážka.



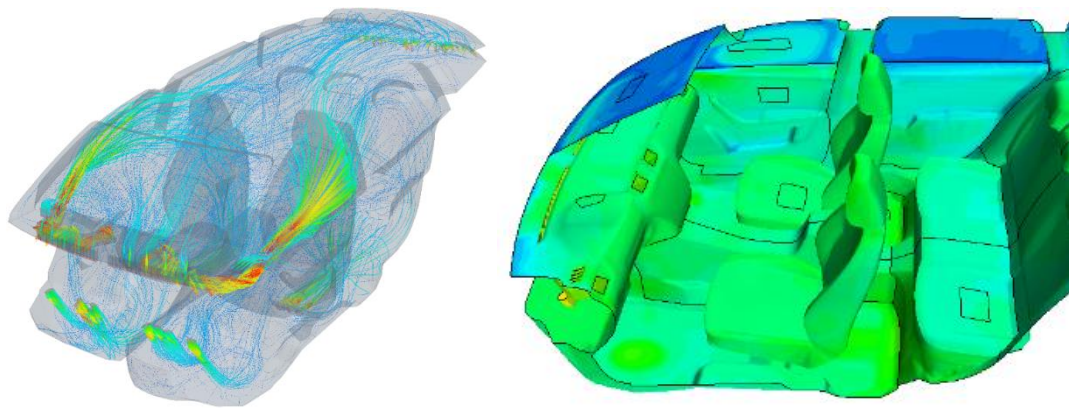
Obr. 122 - Vlevo: Advekční schéma definované v kabině vozidla mezi jednotlivými advekčními zónami pro případ simulace vychlazování rozehřáté kabiny. Vpravo: Porovnání výsledků průměrné teploty vzduchu v kabině pro 1D model, kvazi3D model a měření.

Porovnání predikce teploty vzduchu prostřednictvím 1D modelu a kvazi3D modelu s daty z měření je uvedeno na Obr. 122 vpravo. Predikce 1D modelu je pro tento simulovaný případ velice dobrá, kvazi3D model vykazuje nejprve dobrou shodu s rostoucí chybou predikce směrem v konečné fázi simulace. Mohlo by se tedy jevit, že přidání složitosti nepřineslo zkvalitnění predikce. Na Obr. 123 je ukázka predikovaných povrchových teplot v kabině vozidla na začátku simulovaného případu a na jeho konci. Při srovnání detailu řešení s 1D modelem (viz Obr. 117) je patrné, že kvazi3D přístup přináší zpřesnění simulace vedení tepla v modelovaných pevných konstrukcích a vlivu tepelné radiace a přímého slunečního záření na povrchové teploty v kabině. Vzhledem k dělení na tři zóny na každé sedadlo je již možné propojení s modely komfortu pro nehomogenní a nesymetrická prostředí jako je t_{eq-DKZ} (viz kapitola 5.2.2), nebo některé tepelné indexy např. PHS (kapitola 5.2.1). Pro termofyziologické modely je rozlišení modelování parametrů prostředí v kabině stále nízké a nelze je doporučit.



Obr. 123 – Příklad vývoje povrchových teplot v kabině vozidla při simulaci letního vychlazení rozehřátého vozidla. Vlevo: Prohřátá kabina vozidla na začátku simulace v čase $t = 0s$. Vpravo: Povrchové teploty po 5 000s simulovaného času.

3D CFD model kabiny vozu - CFD simulace jsou podstatně časově náročnější než 0D/1D a kvazi3D simulace, ale poskytují komplexní 3D obraz popisující rychlostní/teplotní pole v uvažované doméně i simulaci ostatních parametrů vnitřního prostředí. Pro simulaci HVAC systémů je stěžejní především možnost simulace proudění vzduchu (včetně turbulence), přenosu tepla, simulace zdrojů vlhkosti, přenosu vlhkosti v interiéru či simulace tepelného zatížení od solárního záření včetně započtení stínících efektů neprůhledných ploch. Dalším užitečným nástrojem je například využití simulace pasivních skalárů a indexu age-of-air, který umožňuje určit kvalitu a efektivitu větrání ve všech částech kabiny. V neposlední řadě tyto modely také poskytují všechna potřebná data pro vícesegmentové termofyziologické modely pro určení tepelného pocitu a komfortu. Pro propojení těchto modelů je však většinou nutné využít kosimulační metody (viz dále), neboť termofyziologické modely používají typicky jiná prostředí pro numerická řešení.



Obr. 124 - Ukázka CFD výpočtu prostředí v kabině automobilu pro zimní období (vytápění). Rychlostní pole (vlevo) a rozložení teplot v interiéru (vpravo). Převzato z [364]

Dnes se CFD běžně využívá v automobilovém průmyslu pro tvarovou optimalizaci aerodynamických parametrů určitých komponent či celého vozu. Stále častěji se však tento přístup využívá i pro optimalizaci tepelného managementu kabin (viz Obr. 124). Běžně dostupnými a hojně užívanými softwarovými balíky jsou dnes například prostředí Fluent, CFX, Ansys, Star-CCM+ nebo OpenFOAM. Tyto programy mají zabudované modely pro simulaci fyzikálních procesů, které umožňují simulovat všechny podstatné jevy související s prouděním, turbulencí, přenosem tepla, přenosem hmoty, vedením tepla či dalšími difusními a transportními jevy.

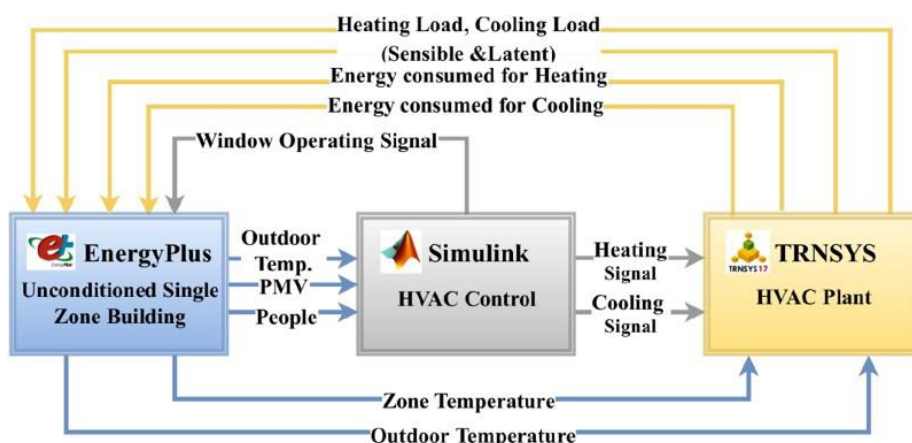
Příklady využití této metody jsou uvedeny v kapitole 6. Autor práce vytvořil několik různě velkých a složitých modelů kabin v CFD softwarech počínaje malým dopravním letadlem EV-55, kabinu automobilu, kabinu autobusu a konče kabinou velkého dopravního letadla Airbus A380 a A320. Všechny zmíněné modely byly zaměřeny na predikci vnitřního prostředí a jeho vlivů na tepelný komfort. Pro posuzování tepelných účinků v simulaci se jednoznačně osvědčil model t_{eq} -DKZ (viz kapitola 5.2.2), který lze relativně snadno implementovat do CFD modelu pomocí virtuálního manekýna a v následně vyhodnotit diagram komfortních zón. Největší rozvoj zaznamenal tento přístup v Laboratoři tepelného managementu v projektu iSPACE, kde byly provedeny nejenom simulace predikce komfortu, ale i jejich validace prostřednictvím experimentů s pokusnými osobami (viz kapitola 6.1.1).

Kosimulační metody

V technické praxi týkající se návrhu HVAC zařízení a tepelného managementu budov a kabin mají simulace přenosu tepla nepostradatelnou úlohu. V automobilovém průmyslu je například obvyklé mít výpočetní nástroje (virtuální model vozu) popisující dynamické chování automobilu ještě předtím, než je reálný automobil vyroben. Týká se to pevnostních výpočtů, návrhu motoru, elektroniky a komunikačních systémů, systému chlazení (power-train cooling), HVAC jednotky apod. Samotné CFD simulace řeší velmi komplexní problémy a je obvyklé, že na dílčí úlohy jsou výhodné různé, třeba i podstatně jednodušší 0D/1D simulační modely. Jelikož se jednotlivé submodely mohou navzájem ovlivňovat (např. model motoru + model chlazení + model HVAC) a zároveň mohou tyto modely být vyvinuty v různých simulačních nástrojích, je nutné, aby si i tyto nástroje mohly mezi sebou předávat data [363]. Pro propojení více modelů do jedné simulace se používají tzv. kosimulační metody, které lze rozdělit na dva typy:

- **1 way coupling** – jeden simulační nástroj poskytuje data druhému bez zpětné vazby,
- **2 way coupling** – vzájemná obousměrná výměna dat mezi simulačními nástroji (viz Obr. 125).

Functional mock-up interface (FMU nebo FMI) definuje standardizované rozhraní pro tvorbu komplexních kosimulací a je jednou z cest, jak vytvářet složité modely a případně i HIL (Hardware-in-loop) simulace. Do dnešního dne FMU podporuje více jak 100 výpočetních nástrojů. Z komerčních se jedná např. o: FMI Add-in for Excel, NI LabVIEW, Matlab/Simulink, Dymola/Modelica, Trnsys, CFX, Star-CCM+, apod. Mezi opensource programy patří např. OpenModelica, PyFMI, FMUSDK. Kromě tohoto standardizovaného a pro inženýry uživatelsky přívětivého přístupu je také možné naprogramovat si vlastní rozhraní pro předávání dat, viz např. (MpCCI Coupling Environment od Fraunhofer institute), kdy se jedná o předávání dat pomocí vlastních skriptů využívajících datových souborů či komunikace pomocí socketů [363].



Obr. 125 – Kosimulace umožňují propojení modelů z různých prostředí do jednoho funkčního celku. Na obrázku je znázorněna 2way coupling simulace budovy a HVAC systému.

5.2 Modelování tepelného stavu a komfortu člověka

Tepelný stav lidského těla lze simulovat na několika úrovních složitosti modelu. 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 zátěž lidského organismu (WBGT [367], PHS [368], UTCI [2]). 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 [249], a postup založený na využití ekvivalentní teploty a diagramu komfortních zón pro nehomogenní/nesymetrická prostředí vyvinutý H. O. Nilssonem [252]. 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 složitá, nehomogenní, 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 [369], Tanabe [370]). Samotnou kapitolou jsou pak modely pro simulaci tepelného pocitu a tepelného komfortu, které predikují hodnocení výsledného tepelného stavu lidského těla, které by pociťoval průměrný člověk v dané simulované situaci. Jedná se například o modely PMV-PPD vyvinutý O. Fangerem [249], regresní model Diagram komfortních zón vyvinutý H. O. Nilssonem [252], nebo nejnovější a velmi komplexní model dle Hiu Zhang [52].

5.2.1 Indexy tepelných účinků okolí na lidské tělo

Od počátku 20. století byla vyvinuta celá řada indexů pro hodnocení tepelných účinků okolí na přenos tepla z lidského těla a hodnocení následné tepelné zátěže/tepelného stresu člověka, který v takovém prostředí pobývá a vykonává určitou činnost. Kompletní výčet všech známých indexů lze nalézt v publikaci Havenith a Fiala 2016 [334] a srovnání hodnocení prostředí jednotlivými indexy v publikaci Blazejczyk 2012 [371]. Dále budou blíže uvedené ty indexy a modely, které se dnes v ČR využívají v oblasti hodnocení pracovního prostředí/tepelného stresu nebo v současné době patří ve světě k „state of the art“ indexům.

Operativní teplota – označení t_o [°C] byla definována P. Gaggem v roce 1937 na základě experimentů s měřením přenosu tepla konvekcí (C), radiací (R), vypařováním (E) a akumulací tepla (S) v těle neoblečeného člověka [372]. Gagge v publikaci definoval, že tepelnou ztrátu konvekcí a radiací lze vyjádřit jedním kombinovaným členem zapsaným do rovnice

$$R + C = h_o(t_{sk} - t_o) \quad (5.2.1)$$

kde člen t_o nazval operativní teplota, t_{sk} byla průměrná povrchová teplota pokožky neoblečeného člověka a člen h_o označil jako „konstantu prostředí“, která vyjadřuje souhrnný součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací v daném prostředí a lze ji zapsat jako

$$h_o = h_r + h_c \quad (5.2.2)$$

Gagge operativní tepotu definoval jako „odvozenou/vypočtenou teplotu, která určuje účinek teploty okolních stěn a teploty okolního vzduchu na přenos tepla z lidského těla. Operativní teplota představuje průměr teplot stěn (střední radiační teplota \bar{t}_r) a teploty vzduchu t_a ,

vážený podle efektivity přenosu tepla radiací a konvekcí. Váhy R a C jsou reprezentovány velikostí součinitelů přenosu tepla h_r a h_c . Tam, kde jsou teploty vzduchu a stěn stejné, je operativní teplota shodná s těmito teplotami“ [372], což lze zapsat

$$h_r(t_{sk} - \bar{t}_r) + h_c(t_{sk} - t_a) = (h_r + h_c) \cdot (t_{sk} - t_o) \quad (5.2.3)$$

a po úpravě vede na hojně používaný [20], [276], [373] definiční vztah pro určení operativní teploty (v originální publikaci používal P. Gagge [°F], dnes převládá využití [°C])

$$t_o = \frac{h_r \cdot \bar{t}_r + h_c \cdot t_a}{h_r + h_c} \quad (5.2.4)$$

Současná slovní definice operativní teploty je uváděna ve znění „Operativní teplota představuje rovnoměrnou teplotu radiálně černého uzavřeného prostoru, ve kterém osoba vymění stejné množství tepla konvekcí a radiací, jako ve skutečném teplotně nehomogenním prostředí.“ [20], [276], [373]. Neboť rovnice 5.2.4 v sobě zahrnuje součinitel přenosu tepla konvekcí h_c a radiací h_r (viz kapitola 3.2.3), byl pro praktické účely definován zjednodušený výraz, jehož tvar dle [276] je

$$t_o = B \cdot t_a + (1 - B) \cdot \bar{t}_r \quad (5.2.5)$$

kde koeficient $B = 0.5$ pro rychlosti proudění vzduchu $w_a < 0.2 \text{ m/s}$, $B = 0.6$ pro hodnoty $w_a = 0.2$ až 0.6 m/s a následně $B = 0.7$ pro $w_a = 0.6$ až 1 m/s . Vyjádření koeficientu B v sobě sice zahrnuje rychlost proudění vzduchu, ale pouze pro účely zachycení změny poměru mezi přenosem tepla konvekcí a radiací z lidského těla v imaginárním prostoru. Z originální práce Gagge je patrné, že operativní teplota byla definována pro zjednodušené laboratorní podmínky, což potvrzuje i Madsen [276] s poukazem na to, že rovnice pro t_o představuje pouze vážený průměr relativních účinků t_a , \bar{t}_r , jehož váhy se mění v dané závislosti na změně w_a (viz. Obr. 137). Operativní teplota je však vzhledem ke své jednoduchosti využívána jako základní index pro posouzení kvality ergonomie tepelného prostředí, její doporučené rozsahy jsou tabelovány v normě ČSN EN ISO 7730 - Ergonomie tepelného prostředí [373] a je také využívána jako parametr v hygienických předpisech pro pracovní prostředí v ČR, aktuálně například Nařízením vlády č. 68/2010 Sb. Stanovení podmínky ochrany zdraví při práci (viz Obr. 126).

Třída práce	M (W.m ⁻²)	Operativní teplota t_o (°C) Výsledná teplota kulového teploměru t_g (°C)		v_a (m.s ⁻¹)	Rh (%)
		t_o min nebo t_g min	t_o max nebo t_g max		
I	≤ 80	20	28	0,1 až 0,2	30 až 70
II a	81 až 105	18	27	0,1 až 0,2	
II b	106 až 130	14	26	0,2 až 0,3	
III a	131 až 160	10	26	0,2 až 0,3	
III b	161 až 200	10	26	0,2 až 0,3	
IVa	201 až 250	10	26	0,2 až 0,3	
IVb	250 až 300	10	26	0,2 až 0,3	
V	301 a více	10	26	0,2 až 0,3	

Obr. 126 – Doporučený rozsah operativní teploty t_o ve vnitřním pracovním prostředí v závislosti na třídě práce a metabolické produkci. Zdroj Nařízením vlády č. 68/2010 Sb.

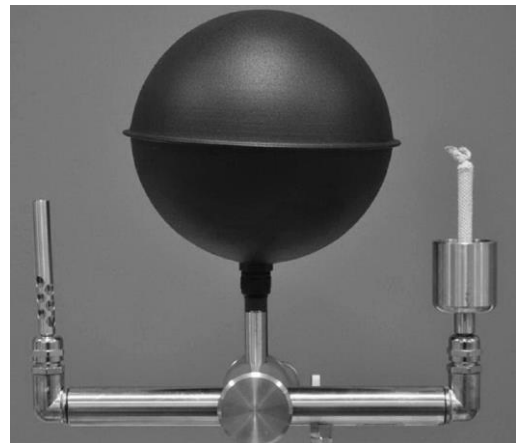
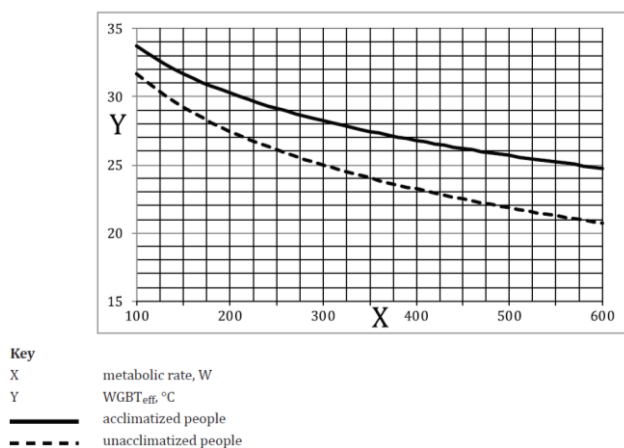
Wet Bulb Globe Temperature index – zkráceně označovaný jako WBGT [°C], byl definován v roce 1957 [367] pro potřeby americké armády, kde jen v roce 1952 bylo hlášeno více než 500 závažných případů hypertermie, přičemž 5 vojáků na její následky zemřelo. Hledal se tedy postup, který by vhodně reprezentoval tepelné účinky teplého až horkého prostředí a zároveň měl snadno měřitelné vstupy (viz Obr. 127 vpravo) [334]. Index je založen na hodnotách suchého teploměru t_a [°C], jehož hodnota reprezentuje míru přenosu tepla konvekcí, přirozeně větraného mokrého teploměru t_{nw} [°C], jehož teplota reprezentuje přenos tepla vypařováním, a kulového teploměru t_g [°C], jehož hodnota zohledňuje radiační účinky prostředí i ochlazovací účinek proudění vzduchu/větru. Index je standardizován dle ISO 7243 [374] a pro budovy a venkovní prostředí bez slunečního záření je definován rovnicí

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{nw} + 0.3 \cdot t_g \quad (5.2.6)$$

Pro venkovní prostory se slunečním zářením pak rovnicí

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{nw} + 0.2 \cdot t_g + 0.1 \cdot t_a \quad (5.2.7)$$

Z hodnoty indexu WBGT lze predikovat přípustné typy činností v daných teplotních a vlhkostních podmínkách prostředí a v případě, že jsou vyčíslené hodnoty vyšší, než jsou uvedené referenční hodnoty (viz Obr. 127 vlevo), je potřeba snížit adekvátním způsobem fyzickou zátěž člověka, aby u něj nedošlo k nebezpečí rozvoje hypertermie.



Obr. 127 – Vlevo: Limitní hodnoty indexu WBGT v závislosti na celkové metabolické produkci lidského těla. Plná čára je limit pro osoby aklimatizované na teplé prostředí, přerušovaná pak pro osoby neaklimatizované. Převzato z [374]. Vpravo: zařízení pro měření vstupů indexu WBGT, stíněný suchý teploměr, kulový teploměr průměru 15 cm a přirozeně větraný mokrý teploměr. Převzato z [334].

Průběh pro aklimatizované osoby (plná čára) na obrázku Obr. 127 lze pospat rovnicí

$$WBGT_{ref} = 56.7 - 11.5 \log_{10}(M) \quad (5.2.8)$$

Průběh pro neaklimatizované osoby (přerušovaná čára) na obrázku Obr. 127 lze pospat rovnicí

$$WBGT_{ref} = 59.9 - 14.1 \log_{10}(M) \quad (5.2.9)$$

kde celková metabolická produkce člověka M je v rozsahu $115 < M < 520$ W a za aklimatizovanou osobu se považuje osoba pobývajících v daném prostředí déle jak 3 týdny [334].

Index WBGT je jedním z nejrozšířenějších a nejvíce používaných indexů pro predikci tepelného stresu [334], má však i limity použití. Například, pokud není v prostředí vyšší radiční složka, je teplota kulového teploměru stejná, jako teplota vzduchu a kulový teploměr pak není citlivý na rychlost větru, ačkoliv na lidské pokožce, která má obvykle vyšší teplotu než prostředí, bude ochlazovací účinek větru stále patrný. Stejně tak, pokud je v prostředí relativní vlhkost 100 %, bude mít mokřý teploměr stejnou teplotu jako suchý teploměr, což by mohlo naznačovat, že ochlazování odpařováním není možné, ačkoliv tomu u reálného lidského těla často tak není [244]. Z těchto důvodů byl WBGT index podrobován různým úpravám a vylepšením například o účinek různých oděvů nazývaný „WBGTpenalty“ [375] a další, jejichž detaily lze nalézt například v [334], [376].

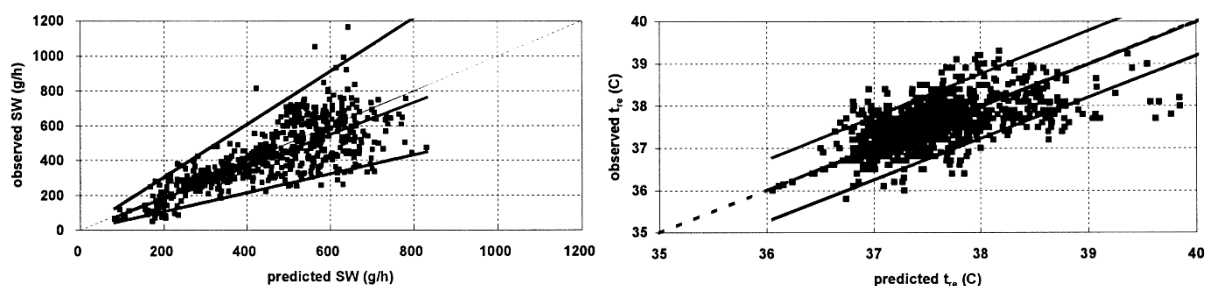
Predicted Heat Strain index – index/model pro predikci tepelné zátěže/námahe (zkráceně PHS) je index vyvinutý J. Malchaire v roce 2001 za spolupráce osmi laboratoří [368] a lze pomocí něj predikovat intenzitu a efektivitu pocení, tělesnou teplotu člověka a přípustnou dobu expozice člověka daným prostředím a zátěží. Cílem vývoje bylo také systematicky revidovat postup výpočtu tepelné zátěže dle ISO 7933, který byl zaveden v roce 1989 a využití těchto postupů bylo pro hodnocení dynamické tepelné zátěže jen velmi nepřesné a omezené (viz Obr. 131). Vzhledem ke své komplexnosti lze PHS index zařadit na pomezí indexů a termofyziologických modelů [334], neboť ve své podstatě se jedná o analytický regresní model, který je schopen predikovat časový průběh teploty jádra, což jej posouvá do blízkosti fyziologických modelů [377]. Postup vývoje a validace indexu je podrobně popsán v publikaci J. Malchaire z roku 2001 [368]. Jako vstupy do modelu slouží parametry popisující tepelný stav okolí (viz kapitola 4.1), metabolická produkce a tepelné vlastnosti oděvu. Model byl validován pomocí dat z 672 laboratorních testů (úroveň 3) a také z 237 experimentů v reálném prostředí (úroveň 4), jejichž rozsah je uveden na Obr. 128.

		672 lab experiments	237 field experiments	Range of validity	
		Mean (standard deviation) m (s)	Mean (standard deviation) m (s)	Min	Max
Air temperature	t_a (°C)	30.8 (9.1)	28.5 (5.3)	15	50
Humidity	p_a (kPa)	1.95 (1.26)	1.88 (0.82)	0	4.5
Radiation	$t_r - t_a$ (°C)	15.4 (21.8)	8.6 (16.7)	0	60
Air velocity	v_a (ms ⁻¹)	0.40 (0.25)	1.14 (0.92)	0	3
Metabolic rate	M (W)	243 (114)	245 (106)	100	450
Clothing insulation	I_{cl} (clo)	0.38 (0.34)	0.77 (0.18)	0.1	1.00

Obr. 128 – Rozsah prostředí a zátěží realizovaných v laboratorních a polních testech využitých při vývoji PHS indexu. Převzato z [368].

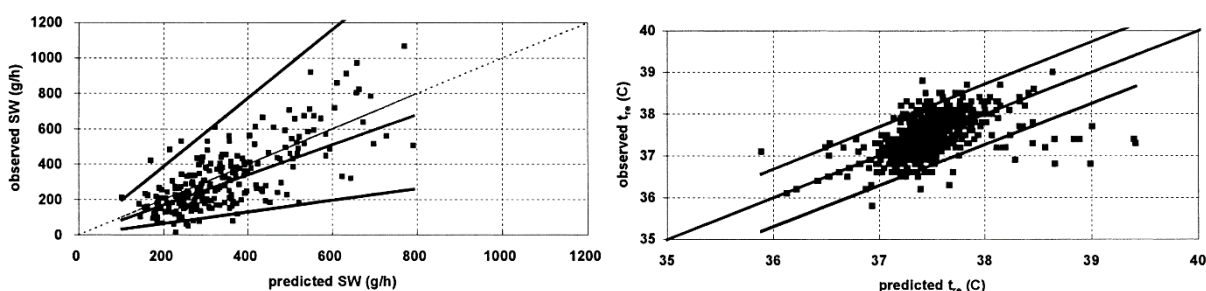
Jak je patrné z Obr. 128 pro vývoj modelu byla využita data z testů v teplých/horkých podmínkách při vyšších metabolických produkcích a s oděvy, které měly nízký tepelný odpor. Tyto vstupní podmínky pak determinují i rozsah validity a oblast použití modelu především pro vyšší zátěže vykonávané v teplé/horkém prostředí s minimálně izolujícím oděvem [368]. Upravené vztahy pro predikci tepelné zátěže byly podrobně validovány a bylo možné konstatovat dobrou shodu predikce přípustné doby expozice DLE (Duration Limit of Exposure) s výslednou výdrží reálných osob [368]. Výsledky validace predikce produkce potu a rektální teploty daty z laboratorních experimentů jsou uvedeny na Obr. 129. Je patrné, že predikce rektální teploty je relativně přesná s nejistotou do ± 0.5 °C (s výjimkou teplot nad 38.5 °C, kde model predikuje vyšší rektální teplotu) a konstantním průběhem šířky 95%

intervalu spolehlivosti. Predikce produkce potu vykazuje nižší nejistotu u nízkých hodnot produkce potu a směrem k vyšším hodnotám roste i šířka 95% intervalu spolehlivosti.



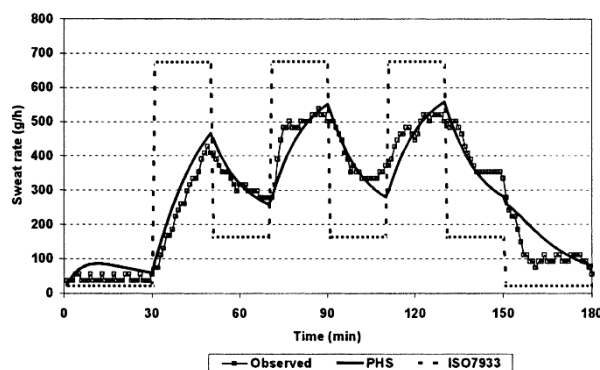
Obr. 129 – Porovnání predikcí PHS modelu a výsledků z laboratorních testů s vyznačením hranic 95% intervalu spolehlivosti. Vlevo: Porovnání predikovaného a skutečného množství potu [g/h]. Vpravo: Porovnání predikované a skutečné rektální/tělesné teploty [°C]. Převzato z [368].

Porovnání výsledků predikce a měření v reálných podmínkách je pak uvedeno na Obr. 130. Bylo dosaženo prakticky totožných trendů jako v laboratorních podmínkách (Obr. 129), pouze nejistota (a 95% interval spolehlivosti) predikce množství potu se zvyšuje výrazněji s vyšší intenzitou pocení. To je pravděpodobně důsledkem složitějšího a méně přesného měření celkového množství vyprodukovaného potu v terénních podmínkách [378]–[380] a problematika věrnosti reprodukce komplexních okolních podmínek ve zjednodušené simulaci.



Obr. 130 – Porovnání predikcí PHS modelu a výsledků z testů v reálném prostředí s vyznačením hranic 95% intervalu spolehlivosti. Vlevo: Porovnání predikovaného a skutečného množství potu [g/h]. Vpravo: Porovnání predikované a skutečné rektální/tělesné teploty [°C]. Převzato z [368].

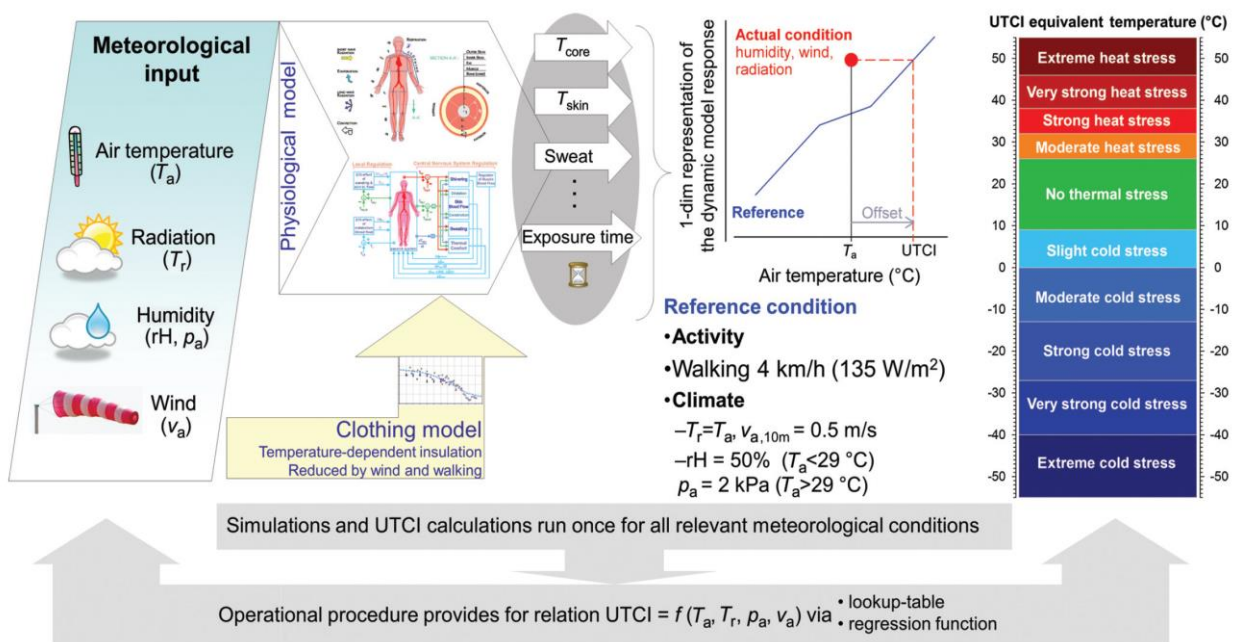
Od roku 2004 je standardizovaná podoba modelu a interpretace výsledků dostupná v normě ČSN EN ISO 7933 Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného stresu pomocí výpočtu předpovídáné tepelné zátěže [381].



Obr. 131 – Porovnání predikce produkce potu PHS modelem a postupem dle ISO 7933 (1989) s výsledky experimentu s časově proměnnou zátěží. PHS predikuje produkci přesněji než starý postup. Převzato z [368].

Universal Thermal Climate Index – univerzální tepelný klimatický index (zkráceně UTCI), vznikl v důsledku potřeby univerzálního indexu, který by byl schopen postihnout široký rozsah klimatických podmínek a regionů od chladného po horké prostředí a byl by tak aplikovatelný jako součást předpovědi počasí, v epidemiologických studiích souvisejících s vlivem klimatu na mortalitu a morbiditu, nebo pro predikci dopadů klimatické změny [382]. Cíle vývoje indexu byl představeny v roce 2009 [2], a aby je bylo možné realizovat, byla definována následující kritéria:

- Metodika indexu bude založena na systematické simulaci termofyziologie prostřednictvím nejvíce pokročilých víceuzlových modelů lidské termofyziologie.
- Termofyziologický model bude schopen predikovat celkové termofyziologické děje v lidském těle a jejich mezní stavy (hypotermie, hypertermie, tepelný diskomfort), dále i lokální vlastnosti lidského těla a z něj plynoucí mezní stavy (např. různou citlivost částí jako obličej, dlaně, chodidla na přenos tepla a jejich náchylnost k omrzlinám).
- Index bude vyjádřen pomocí vztažné škály založené na teplotě, aby byla snadná jeho interpretace.
- Nástroj pro určení hodnoty indexu bude mít minimální nároky na výpočetní výkon, aby byl model aplikovatelný i pro predikci v kombinaci s daty celosvětové sítě meteorologických stanic (typické rozlišení cca 10 x 10 km [334]).



Obr. 132 – Vstupy, algoritmus + modely, referenční podmínky, výstupy a popis zjednodušeného postupu pro určení hodnoty UTCI indexu na základě vyhledávacích tabulek. Převzato z [334].

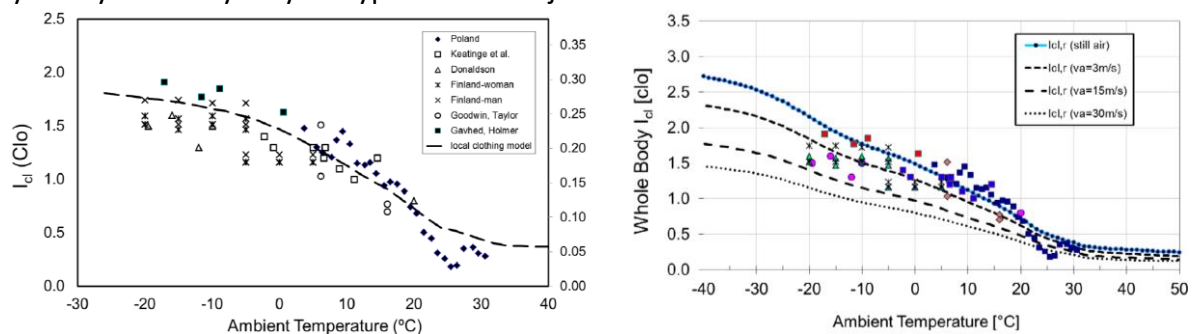
Index byl tedy vytvořen tak, aby jeho škála vyjadřovala teplotu vzduchu při referenčních podmínkách, která vyvolá stejné fyziologické účinky jako prostředí a zatížení osob v posuzovaných podmínkách (referenční podmínky a popis škály indexu viz Obr. 132). Na základě vstupních dat o počasí, oděvu, zátěži a době trvání zátěže lze dle [334], [383], [384] vytvořit referenční funkci pro výpočet UTCI indexu, která může být matematicky popsána jako:

$$UTCI = f(t_a, \bar{t}_r, w_a, p_a) = t_a + \text{offset}(t_a, \bar{t}_r, w_a, p_a) \quad (5.2.10)$$

Při vývoji indexu bylo posuzováno několik komplexních modelů lidské termofyziologie a dvojuzlových modelů, jako potenciálních modelů pro tvorbu nástroje [44], [334], [385]. V testu byly srovnávány výsledky predikce tělesné teploty, teploty pokožky, přenosu tepla mezi tělem/prostředím, i predikce reakce jednotlivých termoregulačních mechanismů. Nakonec byl z limitovaného množství modelů (u kterých bylo možné získat přístup ke zdrojovému kódu a jejichž využití nebylo blokováno licenčními podmínkami) vybrán Fialův termofyziologický model [334] (bližší popis viz kapitola 5.2.5), jehož predikce vykazovaly nejlepší shodu s daty z termofyziologických experimentů (kvadratický průměr rozdílu predikce a experimentálních dat byl 1.35 ± 1.0 °C u střední povrchové teploty pokožky a 0.32 ± 0.20 °C u tělesné teploty, průměrováno pro všechny porovnávané případy [386]). Vstupní data Fialova modelu tvoří meteorologická data v kombinaci s regresním modelem oděvu pro venkovní prostředí (závislost výsledného tepelného odporu oděvu $I_{cl,r}$ na teplotě vzduchu t_a a rychlosti větru značené v_a). Termoregulační chování a z něj plynoucí změnu vnitřního tepelného odporu oděvu I_{cl} [clo] v závislosti na teplotě okolí lze dle [384], [387] popsat rovnicí

$$I_{cl} = 1.372 - 0.01866 \cdot t_a - 0.0004849 \cdot t_a^2 - 0.0000009333 \cdot t_a^3 \quad (5.2.11)$$

Výsledný model využitý ve výpočtu indexu je uveden na Obr. 133.

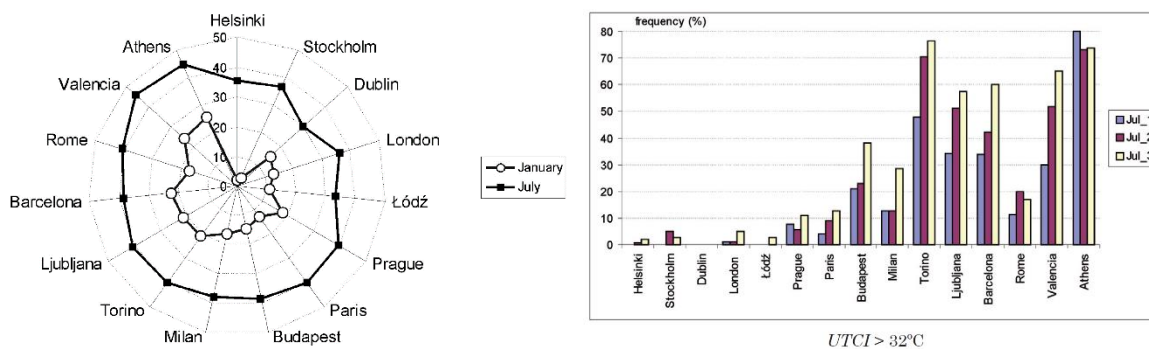


Obr. 133 – Vlevo: Celkový vnitřní tepelný odpor oděvu I_{cl} [clo] v závislosti na teplotě vzduchu ve venkovním prostředí sestavený z výsledků studií provedených v Evropě. Vpravo: Regresní model pro určení celkového výsledného tepelného odporu oděvu ($I_{cl,r}$) v modelu indexu UTCI. Regresní funkce jsou uvedeny v závislosti na rychlosti větru (v_a) měřené v referenční výšce 10 m nad zemí (údaj využívaný typicky v meteorologii). Převzato z [384], [387].

Výstupem modelu je zjednodušená jednodimenzionální funkce pro určení hodnoty UTCI indexu (Obr. 132) [388]. Vzhledem k tomu, že je UTCI založený na Fialově modelu a pro výpočet je potřeba spustit fyziologický model, který je výpočetně náročnější, bylo přistoupeno k předpočítání hodnot UTCI indexu pro všechny smysluplné kombinace klimatických podmínek [377]. Byl tedy vyvinut statistický model, který je schopen určit hodnoty UTCI přímo z parametrů prostředí pomocí vyhledávacích tabulek a regresních funkcí. Pro vytvoření zjednodušeného statistického modelu bylo provedeno přibližně 100 000 termofyziologických simulací Fialova modelu a výsledný jednodimenzionální výstup byl získán lineární kombinací průběhu 7 termofyziologických parametrů (tělesná teplota, průměrná teplota pokožky, teplota pokožky na obličeji, produkce potu, vlhkost pokožky, prokrvení pokožky a intenzita svalového třesu) při krátkodobé (30 min) a dlouhodobé zátěži (120 min). Bližší popis postupu a výsledky lze nalézt v publikaci P. Bröde z roku 2012 [383]. Zde jsou také definovány hlavní omezení výpočtu indexu, který nezahrnuje vliv aklimatizace člověka na dané prostředí (blíže

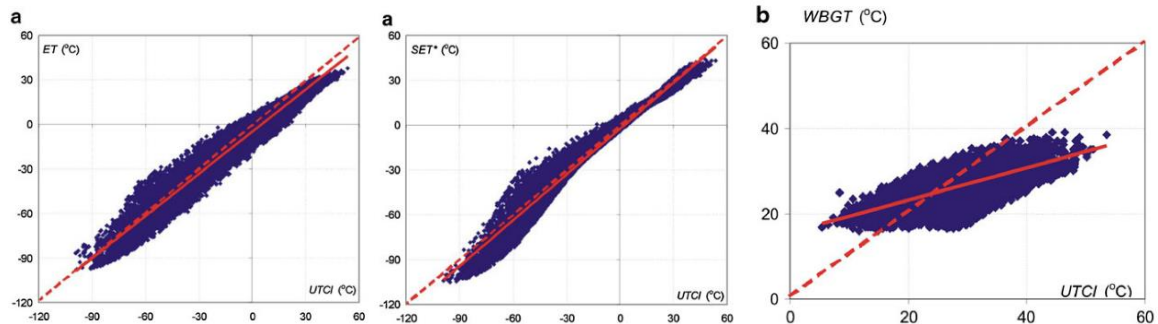
viz kapitola 3.1.1), fixace indexu na jedny referenční podmínky a zjednodušený model oděvu, který na základě teploty venkovního vzduchu predikuje pravděpodobný tepelný odpor oděvu, což nemusí být ve všech případech správný odhad [389]. Limit modelu oděvu pro venkovní aplikace je také spatřován v nemožnosti zahrnout do něj vliv vlhkosti a „promočení“ materiálu oděvu na izolační vlastnosti oděvu (například v námořních aplikacích a vlhkých podnebních se jedná o velmi častý jev) [311], [390].

Index UTCI je v praxi více jak deset let [391] a za tu dobu byl podroben nejrůznějším srovnávacím studiím [371], [392] i aplikacím například na aktuální problematiku související se změnou klimatu [393]. Příklady typických hodnot UTCI indexu pro leden a červenec v evropských metropolích vyplývající z meteorologických statistik let 1991 až 2000 jsou uvedeny na Obr. 134 vlevo, četnost výskytu tepelného stresu ($UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) na posuzovaném místě pak vpravo. Zeměpisná šířka a geografie posuzovaného místa má přímý vliv na pravděpodobnost výskytu tepelného stresu. Například lze pozorovat značný rozdíl pravděpodobnosti výskytu tepelného stresu mezi Milánem, Turínem a Ljubljání, ačkoliv zeměpisná šířka měst je prakticky shodná. Nicméně geograficky se Ljubljana a Turín nacházejí v údolích ohraničených horami, což způsobuje vyšší letní teploty než v Miláně.



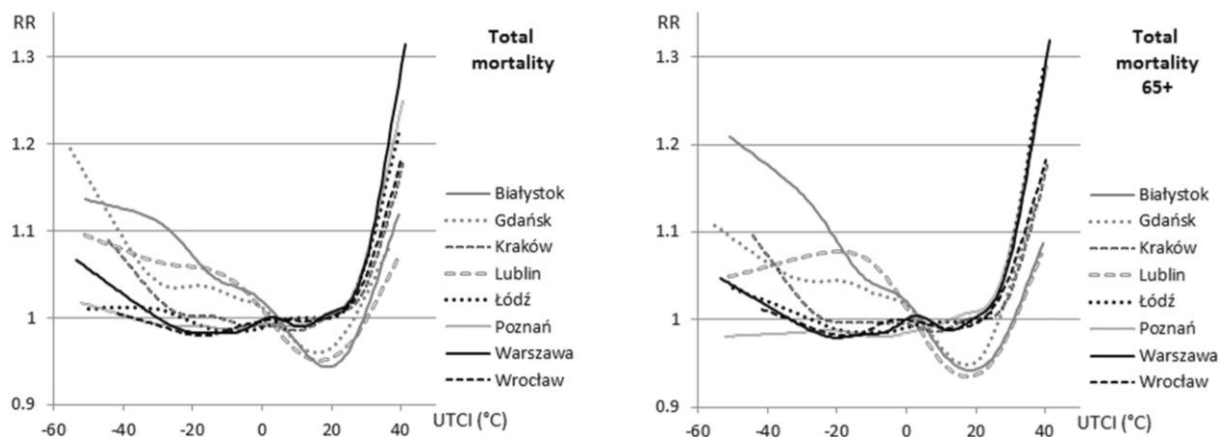
Obr. 134 – Vlevo: Průměrné měsíční hodnoty indexu UTCI (měsíce leden a červenec) pro jednotlivá města v Evropě (průměrná meteorologická data z let 1991 až 2000). Vpravo: Četnost výskytu tepelného stresu ($UTCI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) v závislosti na posuzovaném místě v Evropě. Zeměpisná šířka a geografie posuzovaného místa má přímý vliv na pravděpodobnost výskytu tepelného stresu. Převzato z [384].

V studii K. Blazejczyk z roku 2012 [371] je srovnána hodnota UTCI indexu s celou řadou indexů (ET, AT, SET*, Humidex, WBGT, WCI/WCT, PMV, PHS, PET, PE, PST) používaných pro hodnocení tepelného stresu vyvolaného prostředím a zátěží/činnostmi lidského organismu. Ukázka výsledků je uvedena na Obr. 135, kde je patrné, že zatímco korelace mezi indexem UTCI a indexy ET a SET* je velmi dobrá v širokém rozmezí hodnot prostředí ($R^2 > 0.96$), shoda mezi UTCI a indexem WBGT je podstatně nižší ($R^2 = 0.43$). Závěr studie naznačuje, že UTCI index dobře koreluje s indexy založenými na podobném principu, které nějakým způsobem zohledňují možnou akumulaci tepla v těle a jeho celkovou tepelnou kapacitu (PET, ET, PT, SET*, PST, PHS, PMV) a naopak vykazuje velmi špatnou shodu s jednoduššími indexy založenými pouze na zjednodušených vztazích kombinujících parametry okolního prostředí a jejich vlivu na přenos tepla z těla do okolí (HI, AT, Humidex, WBGT, WCT). Je tedy patrné, že pro použití indexů pro predikci tepelné zátěže v širokém rozsahu podmínek prostředí a činností je nezbytné alespoň základní zohlednění termofyziologie lidského těla v algoritmu výpočtu indexu [371].



Obr. 135 – Korelace hodnot indexu UTCI s indexy ET (Effective temperature), SET* (Standard effective temperature) a WBGT. Hodnoty indexů ET a SET* korelují s UTCI velmi dobře ($R^2 > 0.96$), WBGT index pak podstatně hůře ($R^2 = 0.43$). Převzato z [371].

Ve studii [394], která byla zaměřena na využití UTCI indexu k hodnocení dopadů změny klimatu na zdraví obyvatel, je uvedeno, že ve většině měst v Polsku v období 1975 - 2014 rostl počet dní s nebezpečím vzniku výrazného tepelného stresu ($UTCI > 32$ °C) o hodnotu $+0.3$ až $+0.6$ dne/rok a naopak rychlostí -0.8 až -3.3 den/rok klesal počet dní s nebezpečím vzniku výrazného stresu z chladu ($UTCI < -13$ °C). Relativní zvýšení pravděpodobnosti úmrtí v důsledku vlny veder v centrální části Polska stoupl o 25 až 30 %, pokud hodnota UTCI indexu překročila $+38$ °C. Výjimkou byla města Gdaňsk a Lublin, která díky geografickým podmínkám, nejsou vlnami veder tolik ovlivněna (viz Obr. 136).



Obr. 136 – Relativní zvýšení pravděpodobnosti úmrtí v závislosti na hodnotě indexu UTCI ve sledovaných městech v Polsku. Vlevo: Pro celkovou populaci. Vpravo: Pro populaci ve věkové kategorii 65+. Je dobře patrné minimum pravděpodobnosti pokud je UTCI index v rozsahu 10 až 25 °C (termoneutrální zóna) a naopak výrazný růst pravděpodobnosti pokud je hodnota UTCI nad $+30$ či pod -10 °C. Převzato z [394].

Výzkumem aplikace indexů a modelů termofyziologie pro predikci tepelné zátěže se v Laboratoři tepelného managementu, FSI-VUT blíže zabývá B. Kopečková. Dílčí výsledky její práce v této oblasti jsou uvedeny v publikacích [88], [339], [377], [395].

5.2.2 Diagram komfortních zón - DKZ

Ekvivalentní teplota, většinou označovaná jako t_{eq} [°C] nebo EHT (equivalent homogenous temperature), byla definována A. Duftonem v roce 1932 [274] a podrobnější popis jejího vzniku, definice a systémů pro měření lze nalézt v kapitole 4.2. Dle Madsena [276] lze jinými

slovy interpretovat ekvivalentní teplotu jako „teplotu, kterou člověk pociťuje jako výsledek působení skutečných podmínek okolního prostředí“. Základní princip ekvivalentní teploty je také postaven na předpokladu, že suché tepelné ztráty z lidského těla ($R + C$ a tím pádem i tepelný komfort), zůstávají nezměněny pro všechny kombinace t_a , \bar{t}_r a w_a , které dávají stejnou výslednou hodnotu ekvivalentní teploty. V roce 1936 navrhnul Bedford následující rovnici pro výpočet ekvivalentní teploty

$$t_{eq} = 0.522 \cdot t_a + 0.478 \cdot \bar{t}_r - 0.21 \cdot \sqrt{w_a}(37.8 - t_a) \quad (5.2.12)$$

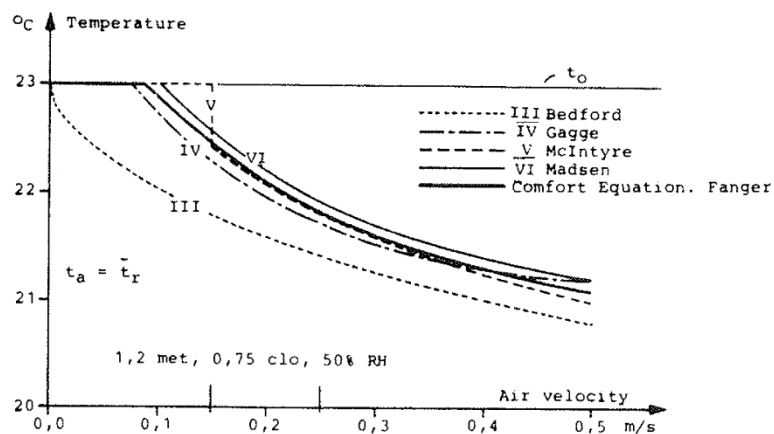
P. Gagge poté v roce 1940 představil model standardní operativní teploty

$$t_{so} = 0.478 \cdot \bar{t}_r + 0.52 \cdot \left[\sqrt{\frac{w_a}{0.076}} \cdot t_a - \left(\sqrt{\frac{w_a}{0.076}} - 1 \right) \cdot t_{cl} \right] \quad (5.2.13)$$

kde t_{cl} [°C] je střední teplota povrchu oděvu osoby, jejíž tepelný komfort má být určen. Zahrnutí t_{cl} do výpočtu, bylo prvním zahrnutím vlivu oděvu do predikce tepelných účinků oděvu na přenos tepla z lidského těla do okolního prostředí. Dalšího posunu v matematickém popisu ekvivalentní teploty bylo dosaženo až v 70. letech, kdy Madsen v roce 1978 definoval rovnici pro ekvivalentní teplotu se zahrnutím vlivu oděvu

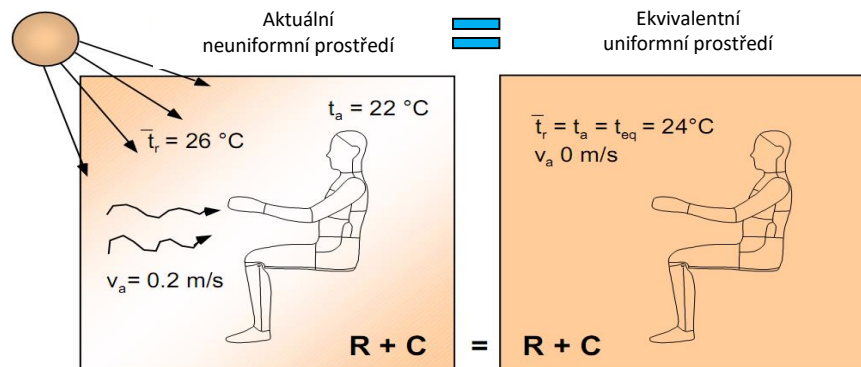
$$t_{eq} = 0.55 \cdot t_a + 0.45 \cdot \bar{t}_r + \frac{0.24 - 0.75\sqrt{w_a}}{1 + I_{ct}} \cdot (36.5 - t_a) \quad (5.2.14)$$

kde I_{ct} je celkový odpor oděvu [clo] a poslední člen rovnice je aplikován pouze pokud $w_a > 0.1$ m/s. Porovnání výsledků pro jednotlivé modely je uvedeno na Obr. 137. Z pohledu současné definice je rovnice 5.2.14 modelem pro výpočet Ekvivalentní teploty celého těla (viz definice v kapitole 4.2).



Obr. 137 – Porovnání výstupů rovnic pro operativní teplotu a ekvivalentní teplotu v závislosti na rychlosti proudění vzduchu. Porovnány jsou výsledky rovnic 5.2.5 (operativní teplota), 5.2.12 (Bedford), 5.2.13 (Gagge), 5.2.14 (Madsen) a rovnice 5.2.19 (Fanger, za podmínky $t_a = t_r$). Je patrné, že výsledky rovnic 5.2.13, 5.2.14 a 5.2.19 jsou v dobré shodě, zatímco rovnice 5.2.12 (Bedford) dává nižší hodnoty. Výsledek rovnice pro výpočet operativní teploty t_o je v tomto rozsahu rychlosti konstantní a na rychlosti proudění vzduchu nezávislý. Převzato z [276].

Další rozvoj metody založené na principu ekvivalentní teploty přišel koncem 80. let a v 90. letech v souvislosti s rozvojem měřicí techniky speciálních senzorů a tepelných manekýnů (viz kapitoly 4.2 a 4.3). Byla definována segmentová, směrová a všesměrová ekvivalentní teplota, protože pro měření v tepelně nehomogenních a nesymetrických prostředích bylo nezbytné vyčíslení lokální změny přenosu tepla na dílčích částech/zónách těla člověka. Hlavní fyzikální princip ekvivalentní teploty je zobrazen na Obr. 138, kde je uveden princip ekvivalence prostředí přes rovnost tepelného toku konvekcí a radiací ($R + C$) a zároveň je ilustrováno použití tepelného manekýna pro určení ekvivalentní teploty.



Obr. 138 – Ekvivalentní (homogenní) teplota t_{eq} [°C] zahrnuje vliv radiace (R) a konvekce (C). V obou případech je z povrchu těla do okolního prostředí přenášen radiací a konvekcí stejný tepelný tok, proto jsou prostředí tzv. ekvivalentní. Převzato z [252]

Dle Nilssona 1999 [283] lze ekvivalentní teplotu pro tepelného manekýna vyhříváného na konstantní povrchovou teplotu matematicky definovat dle vztahů:

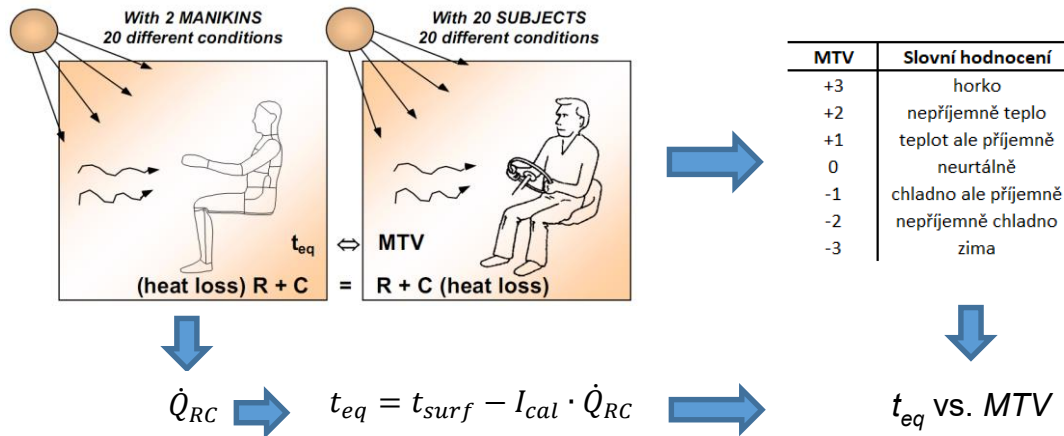
$$t_{eq} = t_{surf} - \frac{\dot{Q}_{RC}}{h_{cal}} = t_{surf} - \dot{Q}_{RC} \cdot I_{cal} \quad (5.2.15)$$

$$\dot{Q}_{RC,cal} = h_{cal} \cdot (t_{surf} - t_{eq}) = \frac{t_{surf} - t_{eq}}{I_{cal}} \quad (5.2.16)$$

kde t_{surf} [°C] je povrchová teplota manekýna/senzoru, \dot{Q}_{RC} [W/m²] hustota tepelného toku radiací a konvekcí v testovaném prostředí, h_{cal} [W/m²] (nebo celkový tepelný odpor $I_{cal} = 1/h_{cal}$ [m²K/W]) kalibrační součinitel přestupu tepla získaný z kalibrace v ekvivalentním prostředí, $\dot{Q}_{RC,cal}$ [W/m²] hustota tepelného toku z povrchu manekýna/senzoru v kalibračním prostředí a t_{eq} [°C] teplota kalibračního prostředí, které odpovídá definici ekvivalentní teploty.

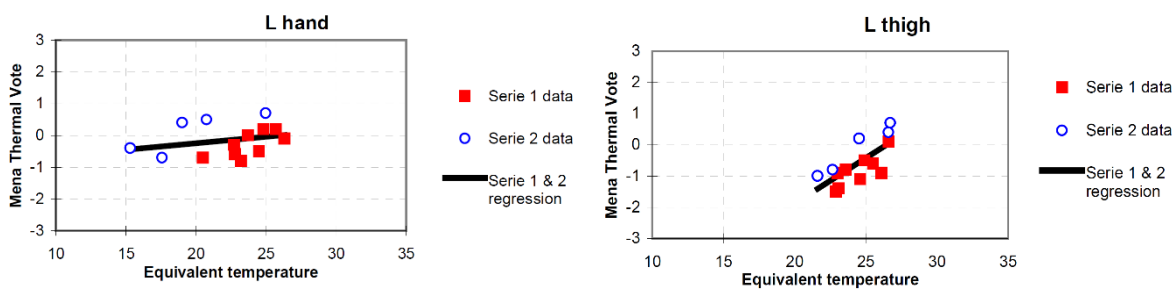
Samotná ekvivalentní teplota však nic nevypovídá o tepelném pocitu či komfortu člověka v daném prostředí. Následně je tedy nutné ekvivalentní teploty vyhodnotit pomocí tzv. Diagramu komfortních zón (DKZ), který definuje komfortní rozsahy (zóny) ekvivalentní teploty pro jednotlivé části těla na základě tepelně izolačních vlastností oděvu a vrstvičky vzduchu tvořící mezní vrstvu (celkový odpor oděvu I_{ct} , viz kapitola 3.2.3). Aktuální měřená hodnota ekvivalentní teploty (faktory prostředí), je pak porovnávána s empiricky určeným diagramem komfortních zón (viz Obr. 142), který ve své disertační práci publikoval v roce 2004 H. O. Nilsson [252]. Diagram komfortních zón byl definován na základě experimentů s dobrovolníky a tepelnými manekýny (viz kapitola 4.3.1, HEATMAN a projekt EQUIV), jak je znázorněno na Obr. 139. Tepelní manekýny byly společně s pokusnými osobami vystavovány různým mikroklimatickým podmínkám, které způsobovaly různé kombinace poměru

výsledného tepelného toku radiací a konvekci. Pokusné osoby hodnotily tepelný pocit a komfort (kombinovaná sedmistupňová Bedfordova škála, Mean Thermal Vote – MTV [252], viz kapitola 2.5) jednotlivých částí těla a souběžně byl zaznamenáván tepelný tok přenášený ze shodných částí tepelných manekýnů. Ze zaznamenaných tepelných toků byla dle rovnice 5.2.15 vyčíslena ekvivalentní teplota a k ní přiřazen tepelný pocit pokusných osob (MTV).



Obr. 139 - Empirický vztah mezi tepelnými ztrátami, respektive t_{eq} a MTV, vyjadřující střední tepelný pocit lidí dle ISO 14505-2. Převzato a doplněno z [252].

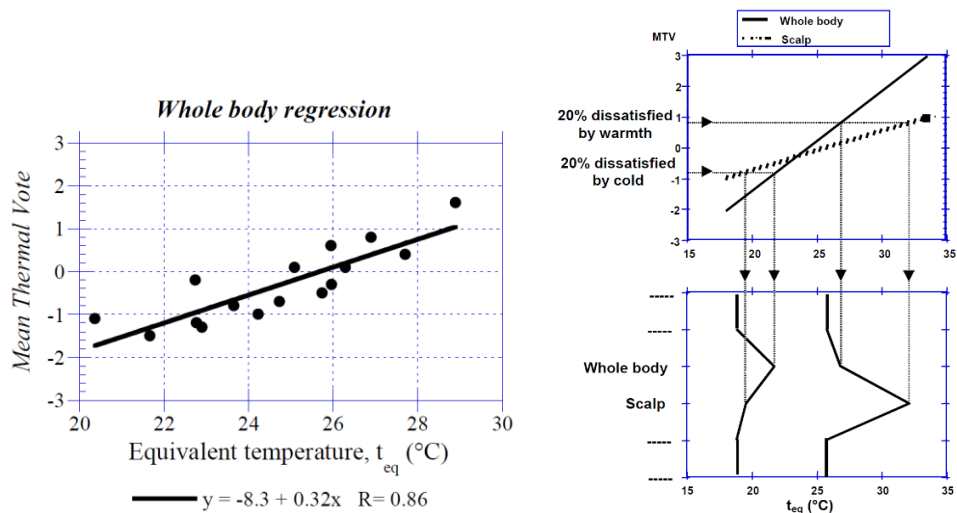
Na obrázku Obr. 140 je uveden příklad závislosti MTV na ekvivalentní teplotě pro části těla dlaň a stehno pro případ zimních podmínek a zimního oblečení. Podobné regrese byly stanoveny pro jednotlivé části těla, druhy oděvů a okolních prostředí, přičemž bylo pozorováno, že různé části těla mají různý sklon výsledných regresních funkcí a jsou tak různě citlivé na celkový tepelný tok ($R + C$), který je z dané části přenášen do okolí. Nejméně citlivé byly běžně neoblečené části těla jako dlaně a obličej, naopak největší sklon funkce $MTV = f(t_{eq})$ vykazovaly části hrudník, záda a dolní a horní končetiny [312].



Obr. 140 – Regresní funkce závislosti MTV na ekvivalentní teplotě pro zimní podmínky a zimní oděv. Je dobře patrná rozdílná citlivost částí dlaň (L hand) a stehno (L thigh). Převzato z PhD práce H.O. Nilsson 2004 [252].

Po dalším statistickém zpracování a přesné definici regresních vztahů pro jednotlivé části těla i celé tělo (příklad viz Obr. 141 vlevo) bylo možné definovat rozsah komfortních zón pro jednotlivé části následujícím postupem: na ose y pro MTV byla určena okolo neutrálního bodu ($MTV = 0$) termoneutrální zóna $MTV = \pm 0.8$ (celková šířka 1.6 stupně škály MTV, 80 % respondentů spokojeno s pocitem na dané části těla [252], pozdější práce uvádějí ± 0.5 , šířka zóny 1 stupně škály MTV [312]) a na ose x pak byly určeny hodnoty ekvivalentních teplot pro hranice tohoto pásma (na Obr. 141 vlevo například pro celé tělo (Whole

body) $-0.8 MTV = 22\text{ °C}$ a $+0.8 MTV = 27\text{ °C}$, pro hlavu s vlasy (Scalp) $-0.8 MTV = 19\text{ °C}$ a $+0.8 MTV = 32\text{ °C}$). Další hranice zón byly $+1.5 MTV$ pro přechod zóny „teplo ale příjemně“ do zóny „nepříjemně teplo“ a $-1.5 MTV$ ze zóny „chladno ale příjemně“ do zóny „nepříjemně chladno“. Tímto postupem tedy vznikly pro všechny části hodnoty hranic zón: neutrálně, chladno ale příjemně, teplo ale příjemně, nepříjemně chladno a nepříjemně teplo. Jejich sestavením do jednoho diagramu bylo možné vytvořit Diagram komfortních zón pro konkrétní oděv a geometrické uspořádání okolí člověka (typ židle/křesla, poloha rukou, vlasy na hlavě atd.).



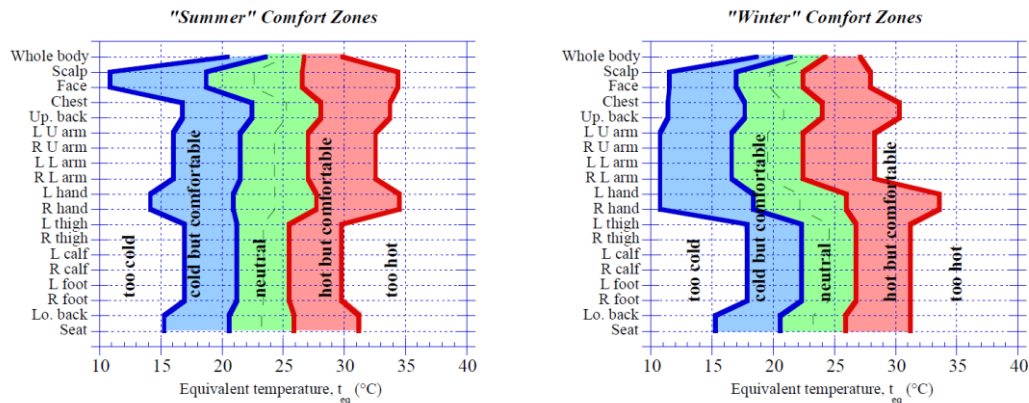
Obr. 141 – Vlevo: Příklad regresní funkce $MTV = f(t_{eq})$ pro celé tělo. Vpravo: Postup vytvoření hranic zón pro jednotlivé části těla a konstrukce Diagramu komfortních zón. Převzato z [252].

Na Obr. 142 jsou uvedeny příklady diagramů komfortních zón pro letní a zimní oblečení tak, jak byly definovány na základě dat z PhD práce H. O. Nilssona v roce 2004. První shora je v diagramu uveden rozsah ekvivalentních teplot pro celé tělo (část Whole body) a poté další části těla ve směru od hlavy dolů (části Seat a Lo. back byly přidány později, proto jsou nelogicky umístěny zcela dole). Z diagramů je patrné, že různé části těla mají různé rozsahy teplot pro jednotlivé zóny. Například pro letní oděv (Summer) je u obličeje (Face) a hlavy (Scalp) rozsah teplot pro neutrální zóny od teploty 17 do 26.5 °C, zatímco u levého chodidla je tento rozsah pouze od 21 do 25.5 °C. V případě více izolujícího zimního oděvu (Obr. 142 vpravo) se pak jednotlivé komfortní zóny rozšiřují a díky „izolačním schopnostem oděvu“ se posouvají směrem k nižším ekvivalentním teplotám. Metoda tedy dobře zohledňuje rozdílnou citlivost vnímání tepelného stavu prostředí na různých částech těla, umožňuje hodnotit asymetrická/nehomogenní prostředí a zohledňuje lokální vliv oděvu na různé části těla. Protože přenos tepla z lidského těla závisí hlavně na tepelném odporu oděvu a citlivosti jednotlivých částí těla na celkový tepelný tok ($R + C$), je možné pro různé kombinace oděvů a částí těla vypočítat hranice komfortních zón dle následující rovnice, kterou publikoval H. O. Nilsson v roce 2007 [312].

$$t_{eq,zone} = t_{surf} - I_{cal} \cdot (a + b \cdot MTV_{zone}) \quad (5.2.17)$$

Členy a a b jsou regresní koeficienty pro jednotlivé části těla (konkrétní hodnoty viz kapitola 6.4.1), proměnná MTV_{zone} určuje velikost MTV pro hranice mezi jednotlivými zónami (viz výše).

Celkového tepelného komfortu je z pohledu definice dosaženo, pokud jsou všechny části těla včetně ekvivalentní teploty celého těla (Whole body) v neutrální oblasti [252]. Při aplikaci tedy může nastat případ, kdy jsou všechny jednotlivé části těla v neutrální zóně, ale protože se nacházejí v blízkosti přechodu do zón 'chladno ale příjemně', nebo 'teplé ale příjemně' je celková ekvivalentní teplota mimo neutrální zónu. Takový stav není komfortní přesně podle definice, ale jedná se o hodnocení „ale příjemně“ (viz Obr. 139.) a nelze jej považovat za diskomfortní.

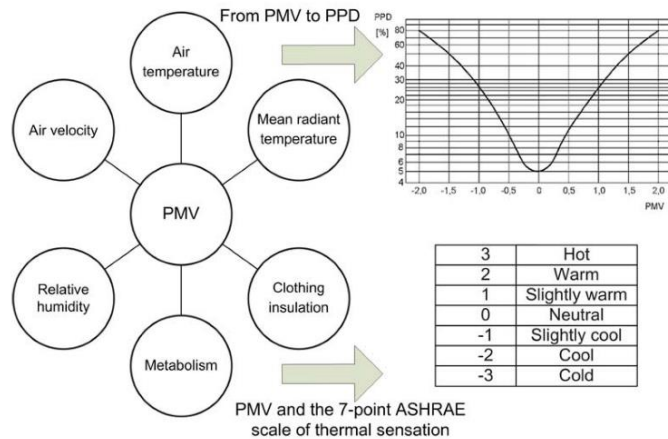


Obr. 142 – Originální diagramy komfortních zón pro letní oblečení (vlevo) a zimní oblečení (vpravo) jak je definoval H. O. Nilsson v roce 2004. Převzato z [252].

Při využití Nilssonova modelu v CFD simulacích se ekvivalentní teplota pro každý segment těla určuje dle vztahu 5.2.15. Teplota povrchu figuríny vychází z podmínek, za jakých Nilsson prováděl měření a na jejichž základě vznikly diagramy komfortních zón uvedené na obrázku Obr. 142. Model manekýna a okolí je v uspořádání, jaké by měla reálná situace a okrajové podmínky na manekýnovi jsou nastaveny tak, aby odpovídaly tepelným vlastnostem použitého oděvu. Jelikož v rovnici 5.2.15 vystupuje kalibrační koeficient h_{cal} , ovlivňuje správné určení kalibračních koeficientů přenosu tepla významnou měrou kvalitu výpočtu ekvivalentní teploty a kvalitu predikce modelu. Určení kalibračního součinitele přenosu tepla závisí také na kvalitě výpočetní sítě a použitých modelech pro přenos tepla (konvekce + turbulence, radiační model). Koeficienty mohou být získány pomocí simulace, která se nazývá virtuální kalibrace. Ta spočívá ve vytvoření speciální geometrie, kdy je figurína umístěna do kalibračního boxu o rozměrech $2 \times 2 \times 2 \text{ m}$, v kterém je prakticky celá podlaha boxu využita jako vstup pro přívod vzduchu o nízké rychlosti (0.03 m/s) a celá plocha stropu pak slouží jako výstup. Velká plocha vstupu a výstupu zaručuje dobrý odvod tepla generovaného figurínou a zajišťuje tak zachování požadovaných homogenních kalibračních podmínek. Teplota přiváděného vzduchu i všech okolních stěn je nastavena na $+24 \text{ °C}$ (bližší popis kalibrace viz kapitola 6.4.1). Z výsledků simulace lze získat potřebné kalibrační koeficienty h_{cal} (viz rovnice 5.2.16), které se využívají pro výpočet ekvivalentní teploty v dalších simulovaných situacích/případech. Takto vytvořeného virtuálního manekýna lze kombinovat například s modelem kabiny a získat podobná data, jaká by naměřil skutečný manekýn v reálném vozidle. Příklad takového virtuálního manekýna a jeho virtuální kalibrace dle ISO 14505-2 je uveden na Obr. 184.

5.2.3 Fangerův model - PMV/PPD

Model PMV/PPD vyvinul profesor Ole Fanger na základě celé řady experimentů zaměřených na podrobné zmapování přenosu tepla z lidského těla do okolí ve vnitřním prostředí. Většina experimentů a prací proběhla v 60. letech a model byl publikován v roce 1970 [249]. Model určuje dva indexy: Předpokládané střední hodnocení *PMV* (Predicted mean vote) a následně Předpokládané procento nespokojených *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied), který je funkční závislostí *PMV*. Neboť je model založen na výpočtu tepelné bilance mezi člověkem a okolním prostředím, jsou hlavními vstupy modelu: metabolické produkce člověka *M*, tepelný odpor oděvu *I_{cl}* a parametry okolního prostředí *t_a*, \bar{t}_r , *RH* a *w_a* (viz Obr. 143).



Obr. 143 – Vstupní parametry PMV, slovní vyjádření PMV na 7 stupňové škále dle ASHRAE a grafické znázornění funkční závislosti $PPD = f(PMV)$. Převzato z [396].

Na základě experimentů definoval Fanger výpočet *PMV* jako funkční závislost rozdílu metabolické produkce člověka (*M*) snížené o mechanickou práci (*W*) a tepelného toku, který je z těla oblečeného člověka (parametr *I_{cl}*) odváděn okolním prostředím. Pomocí výpočtu indexu *PMV* lze předpovídat stupeň tepelného pocitu skupiny lidí při určité činnosti vystavených prostředí o daných parametrech [249]. Index *PMV* lze vypočítat z rovnice

$$PMV = (0.303 \cdot e^{-0.036 \cdot M} + 0.028) \cdot L \quad (5.2.18)$$

Měrný tepelný tok *L*, který je odváděn z lidského těla do okolního prostředí, je vyjádřen rovnicí

$$L = (M - W) - \left(3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] + 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] + 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a) + 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) + 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \right) \quad (5.2.19)$$

kde teplota povrchu oděvu *t_{cl}* je dána implicitně vztahem

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \left\{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (5.2.20)$$

součinitel zvětšení povrchu těla oděvem *f_{cl}* je dán vztahem

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0.078 \frac{m^2 K}{W}, 0.5 \text{ clo} \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{pro } I_{cl} > 0.078 \frac{m^2 K}{W}, 0.5 \text{ clo} \end{cases} \quad (5.2.21)$$

a součinitel přenosu tepla konvekcí na povrchu oděvu h_{cl} je definován

$$h_{cl} = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{pro } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} \geq 12.1 \cdot \sqrt{w_a} \\ 12.1 \cdot \sqrt{w_a} & \text{pro } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{w_a} \end{cases} \quad (5.2.22)$$

Procentuální podíl nespokojených (*PPD*) z přítomných osob v určitém prostředí pak lze vypočítat na základě znalosti *PMV* dle následujícího vztahu

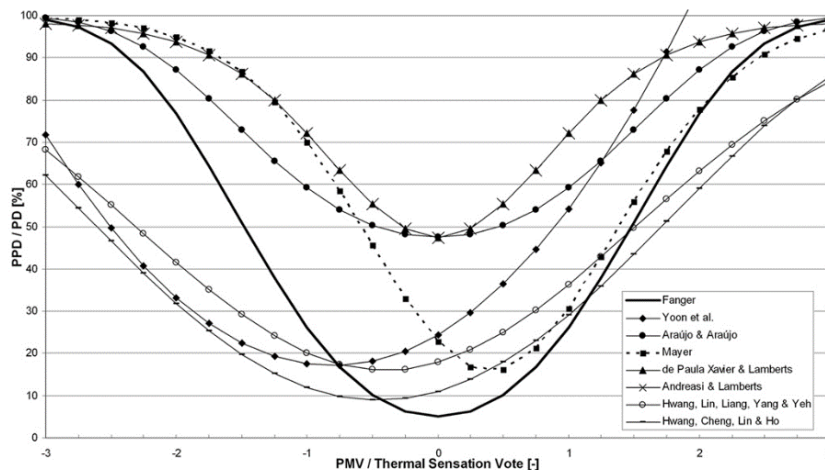
$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2} \quad (5.2.23)$$

Omezení rozsahu modelu

$$M = 46 \text{ W/m}^2 \div 232 \text{ W/m}^2 \text{ (} 0.8 \text{ met} \div 4 \text{ met)}, I_{cl} = 0 \div 0.310 \text{ m}^2\text{K/W (} 0 \text{ clo} \div 2 \text{ clo)}$$

$$t_a = 10 \text{ }^\circ\text{C} \div 30 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{t}_r = 10 \text{ }^\circ\text{C} \div 40 \text{ }^\circ\text{C}, w_a = 0 \text{ m/s} \div 1 \text{ m/s}, p_a = 0 \div 2 \text{ 700 Pa}$$

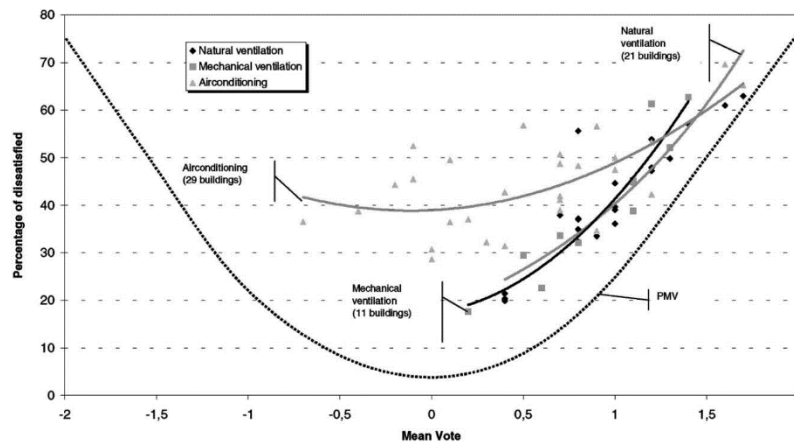
Pro $PMV = 0$ je vztah (5.2.18) rovnicí termoneutrálního stavu (5 % nespokojených). Podmínky se považují za přípustné, pokud se index *PMV* pohybuje v intervalu ± 0.5 , což odpovídá 10 % nespokojených. Průběh *PPD* v závislosti na *PMV* je uveden na obrázku Obr. 144, vyznačen silnou plnou čarou. Ostatní průběhy jsou výsledky nejrůznějších modifikací původního modelu nebo výsledky dalších studií a indexů, které mají zohlednit vyšší vnímavost člověka k chladu (Mayer), teplu (Hwang a kol.), či různě modifikují minimální hodnotu procentuálního podílu nespokojených (Araújo, Andreasi) [396].



Obr. 144 – Porovnání průběhu Fangerova modelu *PMV-PPD* a ostatních studií hodnocení tepelného komfortu ve vnitřním prostředí. Je patrné, že u některých modelů je větší preference k teplým podmínkám (Mayer), u některých k chladnějším podmínkám (Hwang a kol.) a u jiných je zase podstatně vyšší procento nepokojených *PPD* v termoneutrálních podmínkách (Araújo, Andreasi). Převzato z [396].

Fangerův model by také podroben různým srovnávacím studiím v prostředích budov s různým vybavením pro HVAC: přirozeně větrané budovy, nuceně větrané budovy, klimatizované budovy (viz Obr. 145). Menšího rozdílu mezi predikcí *PMV-PPD* modelu a hodnocením prostředí pokusnými osobami bylo dosaženo u budov, kde bylo možné individuální nastavení

teploty a větrání (Natural, Mechanical ventilation) než u budov s centrálním HVAC systémem (Airconditioning). Toto zjištění koresponduje s poznatkem ohledně vyšší akceptace prostředí lidmi, pokud mají kontrolu nad nastavením/řízením prostředí (blíže viz kapitola 2.4).

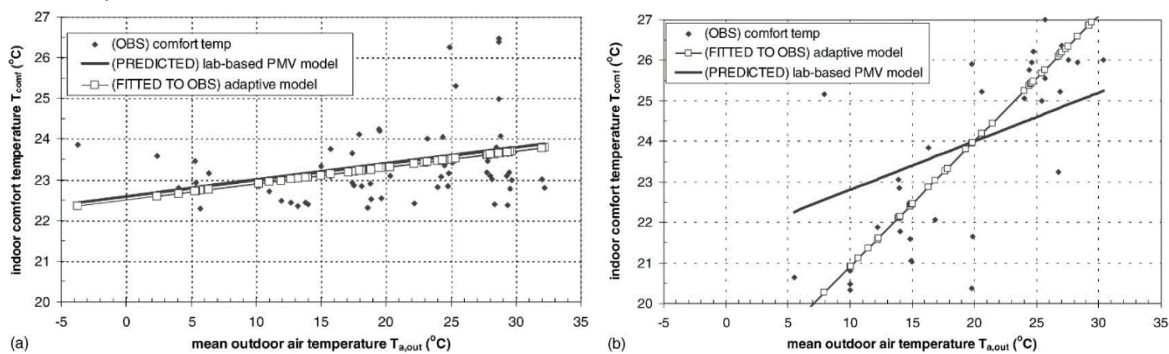


Obr. 145 – Porovnání Fangerova modelu (PMV) s výsledky studií v budovách s celkovou klimatizací (Airconditioning), v budovách s individuální kontrolou teploty a přirozeným větráním (Natural ventilation) nebo nuceným větráním (Mechanical ventilation). Lze pozorovat, že podstatně menší diskrepance mezi klasickým PMV modelem a hodnocením pokusných osob je u budov s možností individuální kontroly prostředí. Převzato z [397].

Pro predikci tepelné pohody v kabinách dopravních prostředků není tento model příliš vhodný, neboť je navržen pro homogenní podmínky prostředí a tělo člověka popisuje jako jednu zónu. Ve studii [103] je uvedeno, že PMV-PPD model není vhodný pro predikci komfortu, pokud jsou ve vnitřních prostorách budov používána zařízení pro personální větrání či individuální přizpůsobení lokálního prostředí požadavkům určité osoby. Ve studii [398] byla porovnávána shoda predikce PMV-PPD modelu s jednoduchým regresním modelem/indexem založeným na rychlosti proudění vzduchu v blízkosti člověka v administrativní kanceláři, která byla vybavena stropními ventilátory s individuálním ovládáním. Autoři docházejí k závěru, že zjednodušený regresní model má pro daný typ prostředí vyšší shodu predikce s tepelným komfortem pokusných osob, nicméně připouštějí, že model byl vyvinut a testován jen pro jedno prostředí a omezenou skupinu osob. Dle studie [112] také není vhodné model používat pro budovy se smíšeným provozem, kdy část roku je využívána úplná klimatizace a část roku je budova provozována v režimu přirozeného větrání (free running). V takových budovách je vhodnější kombinovat PMV-PPD s Adaptivním modelem tepelného komfortu dle R. de Dear [166], který je pro hodnocení budov s přirozeným větráním přímo navržen. V PMV-PPD modelu nelze také rozlišit vliv prostředí na jednotlivé části těla, není řešen přenos tepla kondukcí, model nijak neřeší akumulaci tepla v těle (S) a není tedy vhodný pro simulaci časově závislých úloh s vyšší dynamikou změn parametrů prostředí. Nutno však podotknout, že model byl validován na cca 1300 pokusných osobách (z Dánska a USA) [249], čili se jedná o model, který je založen na největším vzorku pokusných osob. V simulační praxi se model *PMV-PPD* využívá jako etalon pro ověření dalších modelů v případě ustálených stacionárních podmínek a ověření termoneutrálního stavu simulovaného prostředí [276], [371], [399].

5.2.4 Model adaptivního komfortu

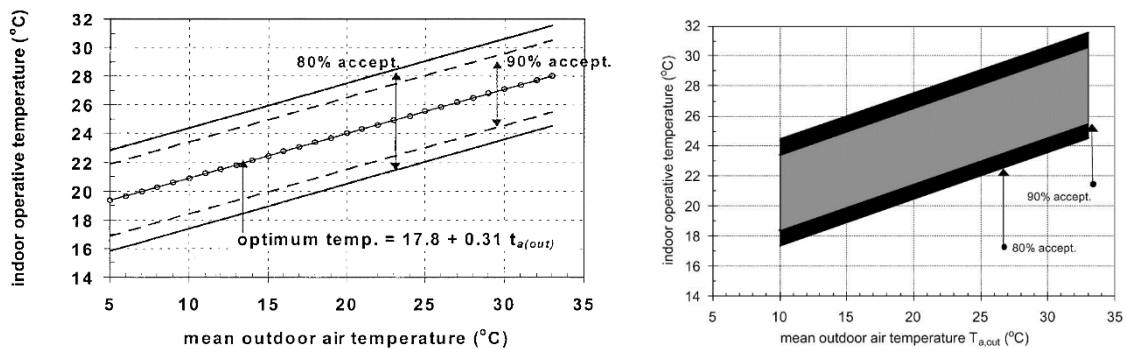
Model adaptivního komfortu (Adaptive comfort model - ACM nebo také ACS) – koncept modelu/standardu byl představen R. de Dearem v roce 1998 [33], neboť bylo nezbytné reagovat na pozorované nesrovnalosti mezi predikcí tepelného komfortu dle standardu ISO 7730/ASHRAE Standard 55 (model PMV-PPD) a komfortem osob v přirozeně větraných budovách (free running/natural ventilated buildings) [400]. Tyto budovy se začaly více stavět a využívat v 80. a 90. letech především v teplejších klimatických oblastech (Austrálie, Británie, USA, Středomoří, Blízký východ atd.) s cílem snížit energetickou spotřebu budov na HVAC [401]. Pro budovy s klasickými HVAC systémy byla shoda predikce dle modelu PMV-PPD a dat získaných při experimentech v reálných budovách relativně dobrá, nicméně u budov s přirozeným větráním byla pozorována jasná neshoda predikce a naměřených dat [402] (viz Obr. 146).



Obr. 146 – Vlevo: Predikce PMV modelu se u budov s klasickými HVAC systémy dobře shodovala s pozorováním. Vpravo: U budov s přirozeným větráním byl patrný jasný nesoulad mezi predikcí PMV modelu a pozorovanými daty z reálných budov. Převzato z [402].

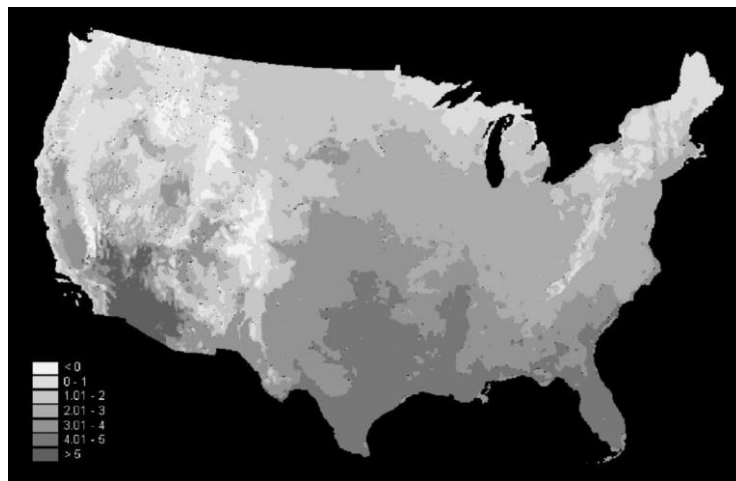
Komplikací při využití PMV-PPD modelu v terénním výzkumu je fakt, že jako vstup je nezbytné zadat do modelu hodnotu metabolické produkce M a tepelného odporu oděvu I_{cl} . Tyto hodnoty se však během dne při běžném provozu v budovách mění, a pokud je lidmi pocítován diskomfort z důvodu změny parametrů prostředí či vykonávané činnosti, obvykle na tuto skutečnost reagují tím, že se snaží na nové podmínky adaptovat (především změna oděvu – termoregulační chování, změna aktivity atd.) [116]. Tento fakt je výchozím předpokladem pro model adaptivního komfortu. Model určuje rozsah operativní teploty t_o ve vnitřním prostředí, která by měla být akceptovatelná pro 80 či 90 % osob v závislosti na průměrné venkovní teplotě (viz Obr. 147). Model tedy implicitně zahrnuje termoregulační chování osob v podobě změny průměrného tepelného odporu oděvu v závislosti na ročním období a aktuálním počasí (viz například Obr. 133, Obr. 63) a předpokládá plné využití termoregulačního chování a možnosti přizpůsobovat se změně prostředí, anebo vykonávané činnosti. Je ale nezbytné připomenout, že v některých situacích (povolání s předepsaným dresscode – viz kapitola 3.2.1) a prostředích (práce či prostředí vyžadující ochranný oděv – viz kapitola 3.2.2) není taková adaptace možná a adaptivní model komfortu v nich nelze uplatnit. Metodika modelu je také založena na psychologických aspektech vnímání tepelného komfortu v dynamických tepelných prostředích a pracuje s principem allostézie (viz kapitola 2.1), kdy změny eliminující diskomfort vyvolávají pozitivní pocit. Aby se ale tento fenomén mohl projevit, musí být člověk v průběhu dne vystaven dynamickým změnám prostředí, které také pomohou zabránit vzniku

tzv. „tepelné nudy“. Ta může nastat, pokud je člověk dlouhodobě vystaven homogennímu a příliš statickému prostředí (viz kapitola 2.4), které je však typické spíše pro budovy s klasickými HVAC systémy.



Obr. 147 – Vlevo: Původní podoba Adaptive comfort model představená v roce 2001. Vpravo: Podoba modelu převzatá do standardu ASHRAE Standard 55 v roce 2002. Rozsah po nízké teploty je omezen oproti původnímu návrhu teplotou 10 °C, neboť pod touto teplotou je již většinou nutné aktivní vytápění vnitřního prostředí. Převzato z [166], [402].

Dle studie [72] bylo také prokázáno, že nezávisle na ročním období, pohlaví a věku lidé obecně akceptují denní dynamické změny teploty ve vnitřním prostředí v rozsahu do 8 °C (např. 17 až 25 °C). Podstatným principem je také zapojení možnosti kontroly nad nastavením parametrů vnitřního prostředí, což je další předpoklad, který zlepšuje akceptaci stavu vnitřního prostředí a dosažení tepelného komfortu (viz kapitola 2.4). V kontextu dnešní doby je také podstatné, že free running buildings vykazují úspory při chlazení v evropském regionu v rozsahu 10 až 18 % a celosvětově pak cca 50% úsporu oproti budovám s klasickými HVAC systémy [116].



Obr. 148 – Regiony USA s tendencí k přechlazení vnitřních prostor klasickými HVAC systémy. Čím tmavší je barva, tím větší je potenciál úspor (především Arizona, Nové Mexiko, Texas, Florida). Převzato z [402].

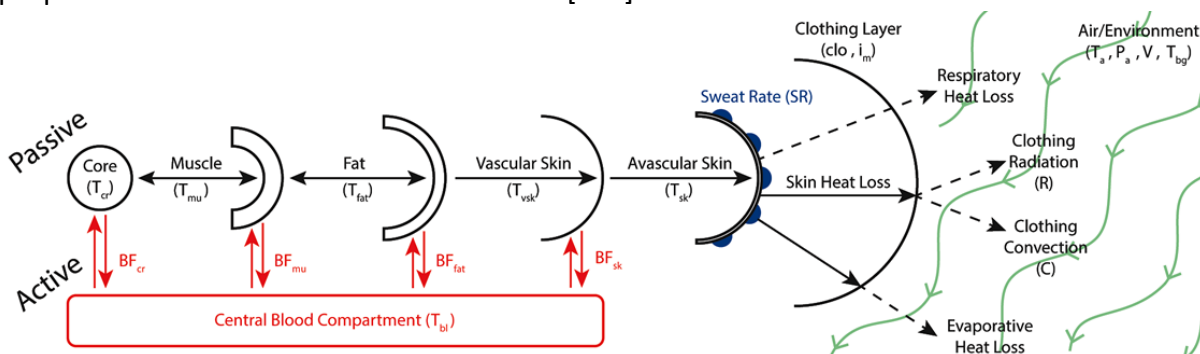
Koncept přirozeného větrání a adaptivního komfortu je však především využitelný tam, kde to umožňuje uspořádání vnitřních prostor (např. přístup k oknu) a převládající využití budovy. Jsou to například obytné a kancelářské budovy a využití konceptu je omezeno spíše na oblasti s teplejším klimatem [166]. Vývoj konceptu adaptivního komfortu však také upozornil na zásadní problém v užívání a nastavení regulace HVAC systémů, a tím je přechlazení vnitřního prostředí v letním období. Právě zde lze hledat hlavní potenciál úspor při chlazení, kdy je termostat správně nastavený a nechladí se na zbytečně nízkou teplotu (viz. Obr. 148) [402].

5.2.5 Termofyziologické modely a modely komfortu

Modely pro simulaci lidské termofyziologie a dynamického tepelného komfortu jsou sofistikované nástroje, které lze uplatnit v oblasti hodnocení tepelného stavu prostředí prostřednictvím modelování. V kapitole jsou uvedeny pouze základní informace ke stěžejním termofyziologickým modelům, neboť samotná problematika lidské termofyziologie a její simulace je mimo rozsahové možnosti a zaměření této práce. Podrobný popis vývoje modelů je možné nalézt v publikacích Havenith a Fiala 2016 [334] nebo Hensley a kol. 2013 [10]. Termofyziologické modely se liší od tepelných indexů (např. PHS) a bilančních modelů (PMV, DKZ) především tím, že k modelování přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím přidávají také modelování generace a přenosu tepla v lidském těle a modelování termoregulačních mechanismů (viz kapitola 2.2). 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 [334]. Termofyziologické modely dnes existují ve škále od jednoduchých po velmi sofistikované modely dle toho, jak realisticky reprezentují anatomii lidského těla (jednoduchý válec [403], [404] vs. vícesegmentové modely [369], [405]), jak detailně modelují nervový systém s termoreceptory [406], jak detailně je řešena simulace aktivních termoregulačních systémů a dějů [369] a jak predikují tepelný pocit a tepelný komfort [52], [310]. Tímto rozdělením jsou také definovány základní funkční celky, které tvoří většinu současných modelů.

- **Pasivní systém** – reprezentuje a simuluje anatomii lidského těla, jeho tepelné vlastnosti, generaci a přenos tepla v těle a z povrchu těla do okolí.
- **Aktivní systém** – simuluje přenos signálů spojených s tepelným stavem jednotlivých tkání v těle a modeluje odezvy aktivních termoregulačních podsystemů lidského těla.
- **Model vnímání tepelného stavu těla** – simuluje tepelný pocit a tepelný komfort.

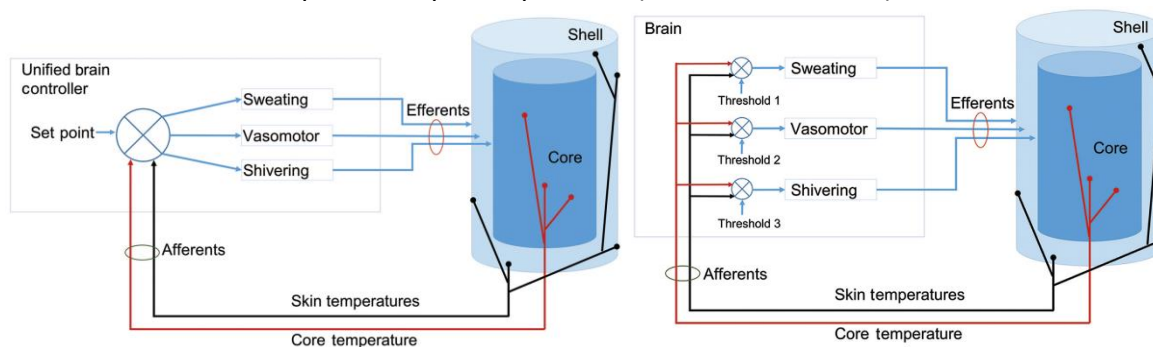
Pasivní systém - k reprezentaci anatomických částí lidského těla (segmentů) může být přistoupeno prostřednictvím využití základních jednovrstvých homogenních prvků, přes dvouvrstvé prvky zahrnující jádro a povrch [407] až po vícevrstvé prvky, které jsou typicky reprezentovány soustřednými válci různých průměrů či jejich částí tak, aby odpovídaly proporcím konkrétní modelované části těla [404].



Obr. 149 – Schéma termofyziologického modelu SCENARIO (USARIEM, USA). Model aproximuje lidské tělo jako jednoduchý válec, který se skládá z pěti vrstev: jádra, svalů, tuku, vrstvy pokožky s vlásenčnicemi a pokožky. V pravé části je zobrazen model oděvu. Převzato z [403], [408].

Tyto elementy/segmenty jsou poté propojeny krevním oběhem zajišťujícím advektivní přenos tepla krví (viz Obr. 149). Vícesegmentové modely obvykle využívají postupy pro explicitní simulaci přenosu tepla, hmoty a regulačních procesů v tkáních [409], [410] s tím, že jsou brány v potaz parametry lidského těla, jako je anatomický tvar, rozměry, hmotnost, tepelná kapacita, rozložení tkání jako je tuk, svaly a další tkáně [334], [403]. Tato část modelu se obvykle označuje jako pasivní systém.

Aktivní systém – Zahrnuje modely podsystémů, jejichž funkce jsou blíže popsány v kapitole 2.2 a lze je rozdělit na **pocení** (Sweating, jinak také sudomotorický systém, sudomotor system), **vazomotriku cév** (jinak také vazomotorický systém, vasomotor system), **svalový třes a chemickou termogenezi** (Shivering, Non-shivering thermogenesis). Obecně existují dva přístupy k simulaci řídicích signálů těchto podsystémů. Základní přístup, který je hojně využíván, integruje aferentní signály (signály jdoucí směrem z tkání do míchy) do jednoho „regulátoru“, kde jsou porovnány s jedním setpointem a výsledný rozdíl generuje jednotnou zpětnou vazbu pro simulaci odezvy jednotlivých termoregulačních podsystémů. Výstupem této simulace jsou eferentní signály (signály jdoucí směrem zpět do tkání) působící na úpravu produkce či přenosu tepla v jednotlivých vrstvách modelu např. aktivace produkce tepla ve svalech třesem, nebo aktivace produkce potu v pokožce (viz Obr. 150 vlevo).



Obr. 150 – Vlevo: Základní přístup k simulaci odezvy termoregulačních systémů s integrovanou zpětnou vazbou vyjádřenou centrálním regulátorem s jedním setpointem (u většiny modelů tělesná teplota). Vpravo: Rozšířený přístup se separátní zpětnou vazbou pro každý podsystém. Působení jednotlivých podsystémů se „integruje“ až v jednotlivých segmentech modelu těla. Tím je nalezen tzv. „balance point“, „výsledný stav“ pro dané podmínky. Převzato z [334].

Tento přístup tedy funguje podobně jako pokojový termostat [334], kdy jsou podle odchylky od nastavené teploty jednotně řízeny systémy pro její úpravu (vytápění vs. chlazení). Toto pojetí naplňuje tradiční paradigma fyziologie, kdy termoregulační systém těla funguje na principu „klasického kontroléru“ [51]. Z pohledu kybernetiky umožňuje přístup řízení systému tak, aby se pohyboval v pásmu kolem předepsaného setpointu, což je tradiční přístup využívaný pro regulaci v různých inženýrských aplikacích [334]. Protože však přístup založený na „jednom regulátoru“ neumožňuje simulovat některé běžně pozorované stavy termofyziologie lidského těla (například vzrůst tělesné teploty při zátěži v prostředí, které je tzv. „tepelně kompenzované“ a umožňuje tak z povrchu lidského těla odvádět kompletní tepelnou produkci), byl vyvinut rozšířený koncept „nezávislých regulátorů“ (viz Obr. 150 vpravo). V tomto přístupu není generován jeden zpětnovazební signál, ale každý podsystém termoregulace má svůj vlastní regulátor a své vlastní setpointy. Tepelná stabilita těla tzv.

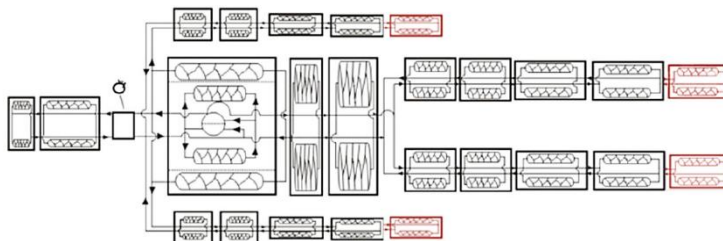
„balance point“ je poté dosažena překrývajícími se a v některých případech i protichůdnými akcemi jednotlivých termoregulačních podsystemů (effectors). Právě takovým způsobem je dosaženo stabilní tělesné teploty při vyšší metabolické produkci související s mechanickou zátěží těla [411]. Většina modelů využívá jako hlavní aferentní signál teplotu jádra/tělesnou teplotu, ale jsou i modely využívající jako signál metabolickou produkci/zatížení těla či tepelný tok na povrchu těla. Ačkoliv je tělesná teplota dominantním signálem pro zpětnou vazbu, modely, které ji využívají jako hlavní signál, mají často tendenci nadhodnocovat intenzitu pocení po skončení zátěže. Predikují pak strmější pokles tělesné teploty, než je pozorovaný pokles v reálných měřeních, protože modely predikují delší dobu intenzivního pocení. V reálných experimentech však přerušení svalové aktivity vede i k okamžitému poklesu produkce potu [334] (viz Obr. 131). Tato pozorování podporují i probíhající úpravu paradigmatu ohledně funkce lidského termoregulačního systému. Nové paradigma se přiklání k vyšší autonomii jednotlivých podsystemů termoregulace, které nejsou řízeny jedním centrem srovnávajícím aktuální stav s „nějakým hlavním setpointem“, ale kdy je aktuální tepelný stav lidského těla „balance point“ výsledkem působení jednotlivých nezávisle regulovaných podsystemů, jejichž hlavním „komunikačním signálem“ je tělesná teplota [51]. Tento koncept dobře vysvětluje i možnost vzniku zvýšené teploty, či horečky v případě obranné reakce imunitního systému, která by v konceptu „jednoho centrálního signálu“ byla jen obtížně realizovatelná. Nicméně dle souhrnného článku Nakamura 2011 [87] je patrné, že regulační mechanismy lidské termoregulace a jejich mezních stavů (horečka) jsou extrémně složitým a stále ne zcela probádaným tématem.

Historický vývoj termofyziologických modelů – Základy pro simulaci lidské termofyziologie položily pionýrské práce fyziologů počátku 20. století, kteří na základě pozorování a experimentů postupně rozkryli základní fyzikální vlastnosti lidského těla a jeho termoregulace. V roce 1927 H. C. Bazett a B. McGlone poprvé změřili teplotní gradient v podkožní tkáni lidské paže, která byla vystavena „studenému vzduchu“ [412]. V roce 1934 A. C. Burton publikoval tezi, že fyzikální zákony pro přenos tepla lze aplikovat na živé organizmy a výpočet energetické bilance jejich metabolismu [413]. V roce 1948 H. H. Pennes definoval vztah pro určení přenosu tepla generovaného metabolismem do krve a tkání na základě měření teplotních gradientů v předloktí. Rovnice byla později nazvána „bioheat equation“ a v různých obměnách tvoří základ většiny současných termofyziologických modelů. Tuto základní rovnici začal v roce 1959 rozpracovávat E. Wissler pro aplikaci na všechny anatomické části lidského těla a v roce 1961 vznikla první verze Wisslerova modelu (viz dále) [414]. (V roce 1998 E. Wissler navrhnul korekci této rovnice, neboť originální data z roku 1948 byla zatížena některými nepřesnostmi [415]). Ve stejném roce, avšak nezávisle na E. Wisslerovi, publikoval R. J. Crossbie první práci zabývající se matematickým popisem odezvy termoregulačního systému na základě tělesné teploty a její simulací na analogovém počítači [416]. Pro účely posouzení tepelného komfortu ve vnitřním prostředí definoval v roce 1971 P. Gagge dvojuzlový model, který simuloval teplotu jádra (tělesná teplota) a povrchu (pokožka) propojených jednoduchým termoregulačním mechanismem [407]. Model byl několikrát modifikován a byl úspěšně používán i pro aplikace predikce tepelné zátěže v horkých prostředích, neboť v této situaci jsou rozdíly v prokrvení a povrchových teplotách jednotlivých částí těla podstatně nižší než v chladných podmínkách a pro základní predikci tak postačují

i jednoduché modely [334]. Ve stejný rok publikoval J. Stolwijk model s celkem 25 výpočetními uzly, který se skládal z 6 segmentů, rozdělených do 4 vrstev, přičemž 25.tý uzel reprezentoval centrální krevní řečiště. Model také rozšiřoval způsob modelování termoregulace a zahrnoval jako zpětnovazební signál nejen průměrnou tělesnou teplotu, ale i teplotu svalů a pokožky [417]. Model byl vyvinut pro NASA se speciálním zaměřením na simulaci termofyziologie astronautů a pro aplikace při vývoji skafandrů a oděvů využívaných při kosmickém programu USA [334]. Další model byl spojen s oblastí armádního výzkumu v USARIEM, kde B. Giovani a R. Goldman v roce 1972 publikovali empirický model pro výpočet tělesné teploty a teploty pokožky v závislosti na použitém oděvu (R. Goldmana také významně přispěl k rozvoji v oblasti tepelných manekýnů, viz kapitola 4.3.1)[418]. V 80. letech docházelo k úpravám a zpřesňování modelů a stejně tak i k rozvíjení modelování jednotlivých podsystémů termoregulačního systému [419]. V roce 1997 byl publikován nový model z USARIEM, označený jako SCENARIO. Byl to jednosegmentový model aproximující tělo válcem již s klasickým dělením na pasivní systém, aktivní systém a model přenosu tepla a vlhkosti přes oděv do okolí (viz Obr. 149). Model byl využíván pro simulaci zátěže vojáků v extrémních prostředích či v podmínkách extrémní fyzické zátěže. Na přelomu tisíciletí publikoval D. Fiala model založený na kompletní simulaci lidské termofyziologie kombinovaný s modelem dynamického tepelného komfortu [310]. Jedná se o velmi sofistikovaný model, který byl podrobně validován [88], [334], [386], [388], [420]. V roce 2002 publikoval S. Tanabe vícesegmentový model, který je však výpočetně výrazně jednodušší než Fialův model [421]. V roce 2003 představila H. Zhang model pro predikci tepelného pocitu a komfortu. Hlavní aplikační oblast modelu byl tepelný komfort v kabinách dopravních prostředků a budov [52]. V roce 2012 a 2014 publikoval B. Kingma model ThermoSEM, který je implementací Fialova modelu, ale jehož zpětnovazební simulace je založena na modelování odezvy termoreceptorů v pokožce člověka [7], [406]. Tento přístup modelující neurofyziologii termoreceptorů zapadá do úpravy paradigmatu termofyziologie, které začalo vznikat koncem nultých let a klade vyšší důraz na roli autonomní regulace jednotlivých podsystémů [51], [87], [422]. Přístupu je stále ve vývoji a poslední publikace v tomto ohledu je B. Kingma z roku 2017 [406]. V roce 2013 S. Takada zveřejnil nový model pro predikci celkového tepelného pocitu v dynamických prostředích [423]. V roce 2017 J. Bienertová-Vašků publikovala koncept nového přístupu k modelování tepelného stresu založený na změně entropie v lidském těle Stress Entropic Load (SEL) [424]. Koncept vychází z výpočtu přenosu energie mezi tělem a okolím v podobě tepla a jeho přepočtu na změnu entropie v čase. Jedná se o nový koncept, který však vyžaduje podrobnější experimentální ověření [425].

Z výše uvedeného je patrné, že termofyziologické modely lidského těla většinou vznikaly pro konkrétní oblasti použití, pro konkrétní aplikace nebo jako aplikace a zobecnění poznatků z oblasti výzkumu lidské termofyziologie. Proto je potřeba mít na vědomí, že data, na kterých byly modely vytvořeny, jsou často i základním limitem pro oblast jejich použití [331]. Podrobnější kvalitativní popis vybraných simulačních přístupů je popsán v dalším textu, kde jsou také uvedeny odkazy na literaturu s kompletním matematickým popisem modelů.

Wisslerův model – první verze modelu byla publikována E. H. Wisslerem v roce 1961. Jednalo se o první víceuzlový model lidské termofyziologie [414], model byl analytický a bylo jej možné/nutné řešit „ručně“ [10]. Model simuloval časově ustálené tepelné stavy lidského těla a již ve své první verzi obsahoval: distribuci produkce metabolického tepla v těle, přenos tepla vedením mezi jednotlivými tkáněmi, advektivní přenos tepla prostřednictvím krve, přenos tepla konvekcí, radiací a evaporací z povrchu těla do okolí, přenos tepla dýcháním a protiproudou výměnu tepla mezi velkými žilami a tepnami. Model byl tedy od začátku založen na důsledném modelování a simulaci základních fyzikálních jevů pro generaci a přenos tepla v těle a mohl tak být postupně vylepšován (1964, rozšíření na 250 uzlů, řešení pomocí metody konečných diferencí, první počítačový model pro digitální počítač [410]) a rozšiřován o další vlastnosti (1985, modely termoregulace a dynamiku dějů [419], což však na tehdejší dobu přineslo velké zvýšení složitosti modelu, nutného výpočetního výkonu a paměti pro jeho řešení [334]). Poslední verze rozšířená o detailní simulaci dlaní a chodidel se speciálním zaměřením na simulaci vlastností neochlupené pokožky (glabrous skin) a vlivu zakončení cévek a žilek (arteriovenous anastomoses) v ní na přenos tepla a termoregulaci [426] byla publikována v roce 2013 [10]. V této verzi modelu je tělo rozděleno do 25 segmentů, každý rozdělený do 12 úhlových výsečí a 21 radiálních vrstev což celkem představuje 6 300 výpočetních uzlů (viz Obr. 151). Model byl tedy za více jak 50 let vývoje rozvinut ze základního modelu, kde bylo celkem 6 základních interagujících částí, do podoby, kdy je segmentace modelu podrobnější o tři řády.



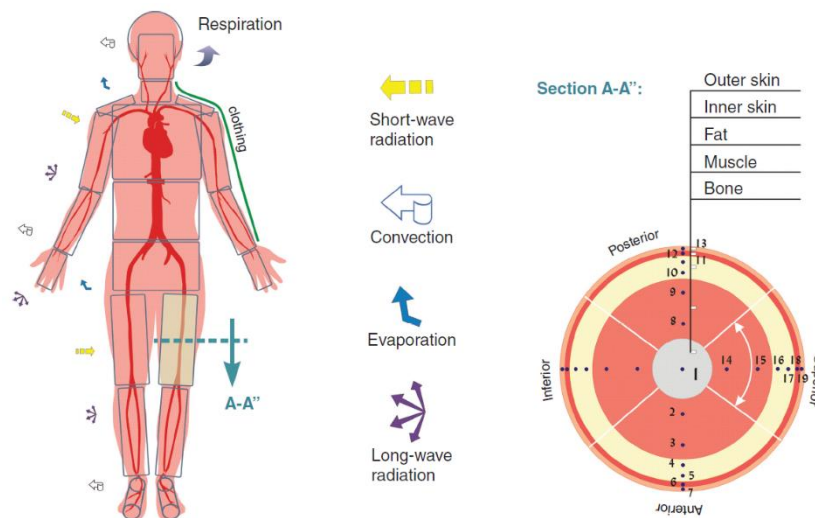
Obr. 151 – Grafická reprezentace Wisslerova modelu. Segmentace klasické verze (vyznačená černě) končila na ruce u zápěstí a na nohou u kotníků. Rozšíření o dlaně a chodidla pochází z roku 2013, kdy byla uvedena poslední verze modelu, kde se každý z 25 segmentů modelu skládá z 21 radiálních vrstev, rozdělených do 12 úhlových výsečí, celkem tedy 6300 výpočetních uzlů. Převzato z [10].

Model byl za dobu své existence využit v různých aplikacích, především pro detailní predikci odezvy lidského těla a termoregulačního systému na specifické zátěže v náročných prostředích s využitím definovaných oděvů [10]. Především díky podrobné reprezentaci všech fyzikálních a silně nelineárních termoregulačních dějů bylo možné využít Wisslerův model například pro testování funkce automatické regulace ve skafandru pro astronauty [427], speciálních kapalinou chlazených overalů pro skafandry [428], či simulovat děje v lidském těle pokud se v důsledku nehody octne ve velmi studené vodě oceánu [429]. Model byl však také předmětem kritiky, neboť pro svou komplexitu až komplikovanost vyžadoval velký výpočetní výkon, což například v 80. letech znamenalo, že pro simulaci jednoho segmentu bylo nutné využít jedno průměrné PC [334]. To byl také důvod, proč v té době vznikaly méně přesné, ale výpočetně podstatně jednodušší modely P. Gagge [407] nebo J. Stolwijka [334].

Fialův model – Fiala thermal Physiology and Comfort model (FPC) publikoval Dušan Fiala (rodiče jsou původem z ČSSR) v roce 1998 ve své disertační práci [310]. Model je složen ze tří hlavních částí: pasivního systému a přenosu tepla v těle [385], aktivního systému

termoregulace [369] a modelu tepelného pocitu vyjádřeného indexem DTS [430]. V současné době se jedná se o jeden z nejkompexnějších modelů, který byl i velmi podrobně validován [88], [334], [386], [388], [420] a také je velmi dobře dokumentován. Pracoviště autora disponuje implementací Fialova modelu označovanou jako FMTK model (Fialův model tepelného komfortu) [88]. Většina textu v této sekci je s drobnými úpravami a doplněním přebrána (se svolením autora) z publikace Pokorný 2012 [43].

Při definici pasivního systému vycházel Fiala z Wisslerova modelu (viz výše). Pasivní systém reprezentuje anatomii průměrného člověka o hmotnosti 73.5 kg a ploše povrchu pokožky 1.86 m². V modelu je tělo rozděleno na 10 hlavních anatomických částí: hlava, tvář, krk, ramena, trup, pánev, paže, ruce, nohy a chodidla. Vzhledem k tomu, že model vychází z Wisslerova modelu je možná variabilní segmentace od původního modelu s 15 segmenty až po podrobné modely s 23 segmenty (viz Obr. 152). Kromě hlavy, která je tvořena částí koule, jsou všechny části reprezentovány válcovými segmenty. Většina segmentů je navíc ještě dále rozdělena do 3 až 4 úhlových výsečí. Každý segment obsahuje 4 až 6 vrstev tkání a také vrstvu oděvu (viz Obr. 152 vpravo).



Obr. 152 – Základní schéma dělení pasivní části Fialova modelu do segmentů, úhlových výsečí, vrstev tkání a prostorová definice výpočetních uzlů. Model má označení FPC (Fiala thermal Physiology and Comfort model). Převzato z [334].

Fialův pasivní systém je matematický model přenosu tepla uvnitř lidského těla a tepelné výměny člověka s okolím. Tepelná výměna člověka s okolím je vyjádřena bilanční rovnicí zahrnující přenos tepla vedením, konvekcí, krátkovlnnou i dlouhovlnnou radiací, vypařováním a dýcháním (viz Obr. 152). Vnitřní přenos tepla je popsán parciálními diferenciálními rovnicemi vedení tepla v živých tkáních dle Pennese, která uvažuje pouze radiální směr vedení tepla [415], [431]. Rovnice v sobě zahrnuje vliv akumulace tepla v tkáni, vedení tepla válcovým segmentem, metabolickou produkci tepla a vliv krevního oběhu v cévách. V modelu je navíc uvažována protiproudá výměna tepla krví.

$$\rho c \frac{dt}{d\tau} = k \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + q_m + c_{bl} \rho_{bl} W_{bl} (t_{ar} - t) \quad (5.2.24)$$

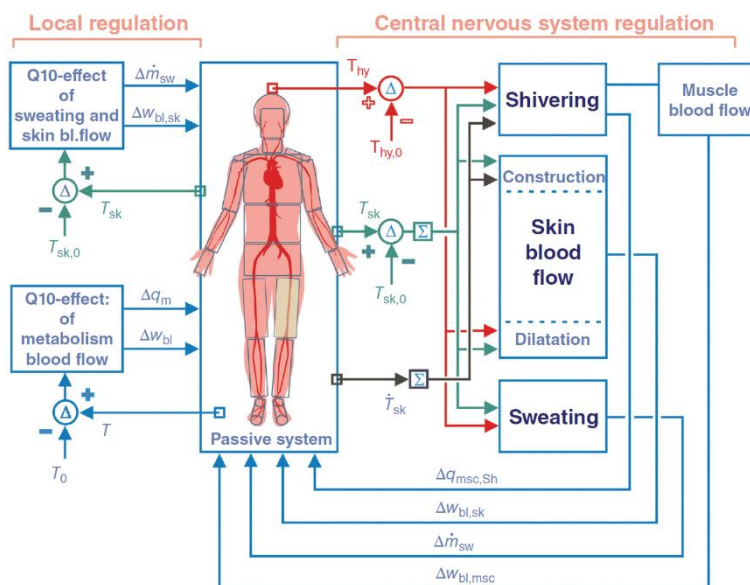
kde k je součinitel tepelné vodivosti, ρ je hustota a c je měrná tepelná kapacita tkáně. Zmíněné fyzikální vlastnosti jednotlivých druhů tkání jsou definovány pro každý segment zvlášť a liší se

v závislosti na radiální vzdálenosti r od jádra, τ je čas, t je teplota tkáně, t_{ar} je teplota žilní krve, $\omega = 1$ (válec), $\omega = 2$ (koule pro segment hlavy) je geometrický faktor, ρ_{bl} je hustota krve, c_{bl} je měrná tepelná kapacita krve a w_{bl} je průtok krve přes tkáň [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$]. Člen q_m je metabolická produkce tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$] daná součtem basální metabolické produkce $q_{m,bas,0}$ a jakéhokoliv dalšího zdroje tepla Δq_m

$$q_m = q_{m,bas,0} + \Delta q_m \quad (5.2.25)$$

Pro numerický výpočet teplotního profilu v radiálním směru je použita Crank-Nicholsonova implicitní metoda konečných diferencí, která umožňuje rozdělit segment na libovolný počet výpočetních uzlů. Pokud je střední teplota pokožky dlouhodobě rovna 34.4°C , nachází se dle Fialy člověk v neutrálním stavu, který je definován jako stav tepelné rovnováhy člověk vs. okolí (rovnice 2.1) a není zapotřebí aktivace žádného z podsystémů termoregulace (aktivní systém).

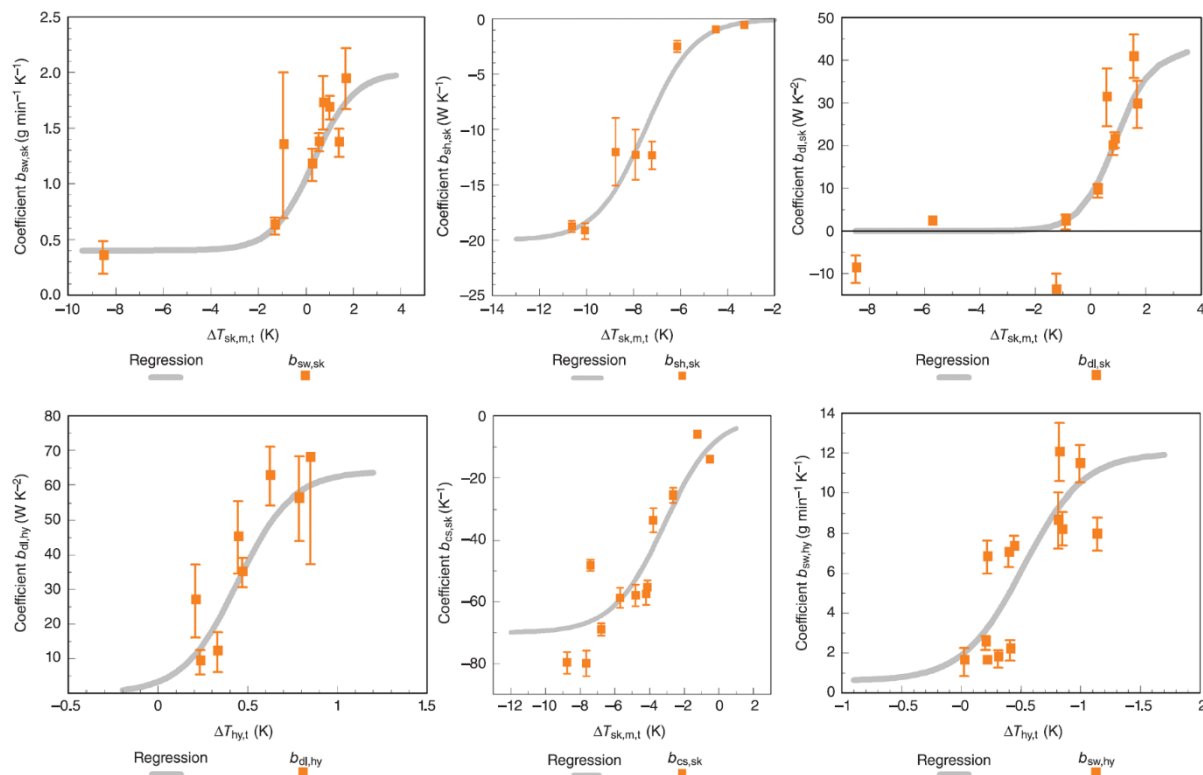
Aktivní systém ve Fialově modelu se aktivuje při vychýlení tepelné bilance z neutrálního stavu. Na základě odchylek teploty hypotalamu T_{hy} , střední teploty pokožky $T_{sk,m}$ a její časové derivace $\frac{\partial T_{sk,m}}{\partial \tau}$ jsou aktivovány termoregulační odezvy, které slouží k regulaci pasivního systému a udržení přípustné tělesné teploty. Mezi ně patří svalový třes, který způsobuje zvýšenou produkci tepla, vazomotorika ovlivňující průtok krve cévami a její distribuci do vrstvy pokožky a pocení, které zvyšuje odvod tepla vypařováním potu z pokožky (viz Obr. 153).



Obr. 153 – Schéma aktivní části Fialova modelu simulující termoregulační systém lidského těla. Zpětná vazba je určena na základě signálu o lokální teplotě pokožky a tkáně, teplotě hypotalamu (teplota centrální vrstvy segmentu hlava) a derivaci změny teploty pokožky. Set pointy všech zpětných vazeb odpovídají termoneutrálnímu stavu neoblečeného člověka v místnosti o teplotě $+30^\circ\text{C}$. Převzato z [334].

Matematickou formulaci aktivního systému Fiala definoval pomocí regresní analýzy experimentálních dat zahrnujících stabilní i časově proměnná prostředí v rozsahu od prostředí s tepelnou zátěží chladem po horké podmínky ($+5$ až $+50^\circ\text{C}$) a metabolickou produkci od klidného ležení pro intenzivní cvičení (46 až 600 W/m^2) [369]. Jednotlivé aferentní signály zapojené od řídicích procesů a jejich příspěvek k vytvoření výsledné zpětné vazby byl

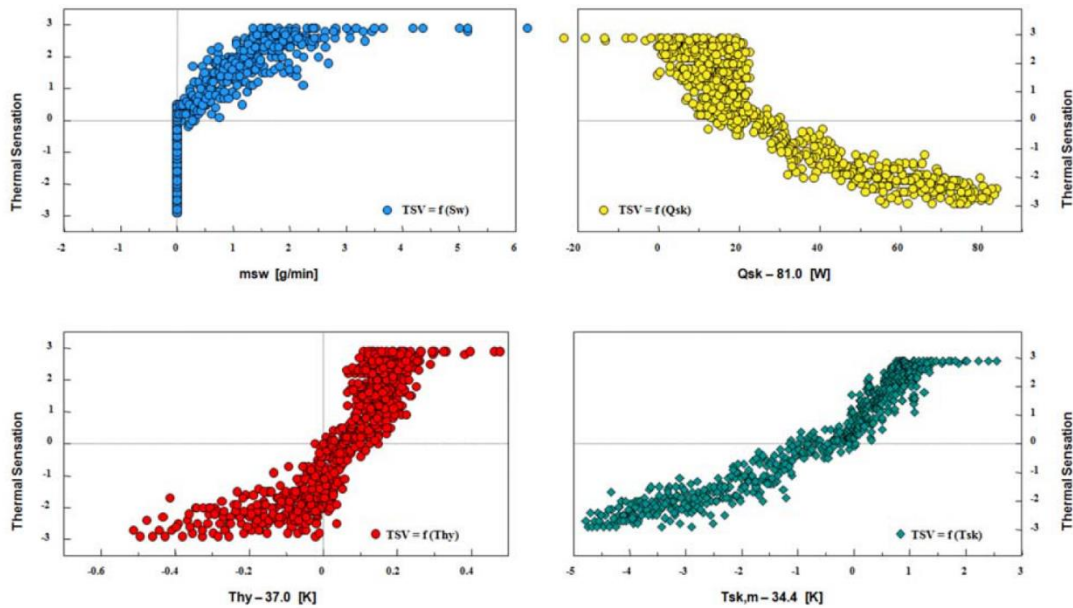
definován pomocí regresní analýzy na měřených i simulovaných datech [369]. Průběh a tvary výsledných nealiárních řídicích funkcí (založených na hyperbolické funkci \tanh) získaných z meta regresní analýzy jsou uvedeny na Obr. 154.



Obr. 154 – Nelineární řídicí funkce aktivního systému Fialova modelu vztažené k teplotě pokožky a teplotě hypotalamu/tělesné teplotě jako hlavním řídicím signálům. Funkce byly získány regresí dat z měření na pokusných osobách. Převzato z [334].

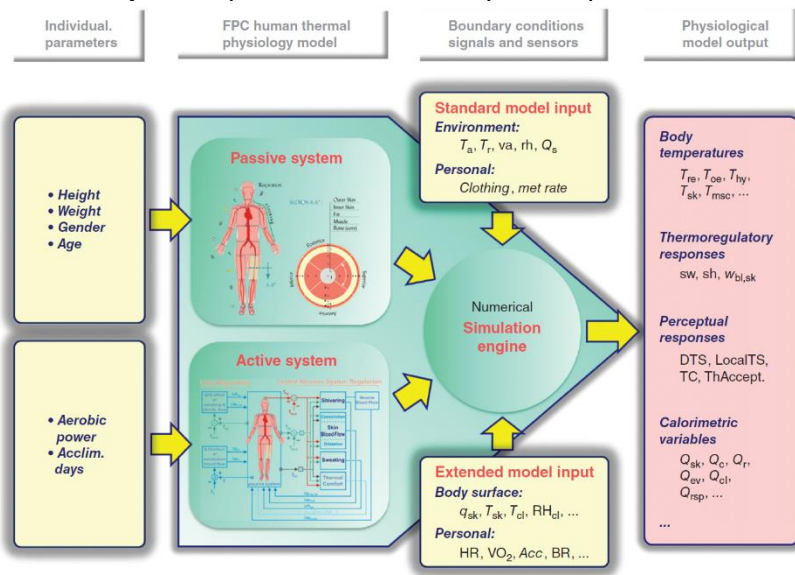
Výsledkem fyziologického modelu je předpověď vývoje střední teploty pokožky a teploty jádra pro zadané okrajové podmínky okolního prostředí a člověka. Předností modelu je jeho důkladná validace. Nejprve byl model validován na základě starších měření dostupných v literatuře [369], a pak i pomocí nových měření [88], [334], [386], [388], [420].

Navíc Fiala na základě predikce teploty hypotalamu T_{hy} , střední teploty pokožky $T_{sk,m}$ a její časové derivace $\frac{\partial T_{sk,m}}{\partial \tau}$ vytvořil způsob vyhodnocení tepelného pocitu, který nazval DTS index (Dynamic Thermal Sensation index). Index je stejně jako index PMV definován dle 7 bodové ASHRAE škály tepelných pocitů. Matematická formulace indexu DTS opět vychází z regresní analýzy naměřených dat dostupných v literatuře (viz Obr. 155) [432].



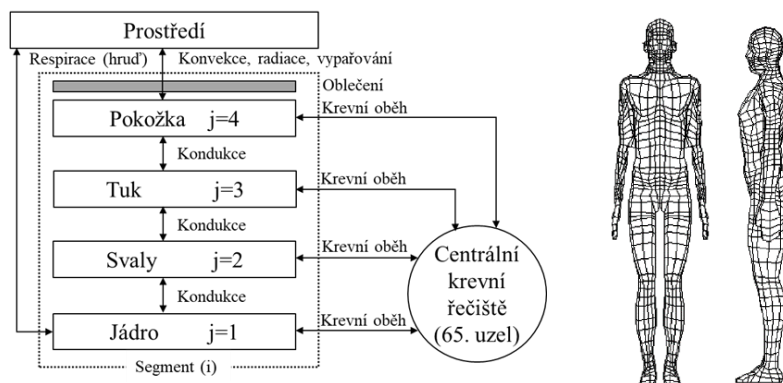
Obr. 155 – Termofyziologická data využitá pro regresní analýzu a vytvoření indexu DTS ve Fialově modelu, pro případ klidného sezení pokusné osoby za podmínek $15.6 < t_a < 36.7$ °C a $15 < RH < 85$ %. Pro tuto činnost nejlépe koreluje s tepelným pocitem průměrná teplota pokožky $T_{sk,m}$ (T_{hy} teplota hypotalamu, Q_{sk} tepelný tok z pokožky, m_{sw} produkce potu). Převzato z [432].

Protože však proporce lidského těla, nastavení termoregulačních mechanismů i kondice/trénovanost jednotlivých osob se může značně lišit, pokračoval Fiala dále ve vývoji modelu směrem k individualizaci pasivního a aktivního systému [334]. U pasivního systému se jedná hlavně o zakomponování parametrů výška, váha, podíl tuku, věk a pohlaví, na jejichž základě se pomocí tzv. body builderu upraví anatomická reprezentace pasivního systému a jednotlivých segmentů [409]. Zde se opět využívá skutečnosti, že pasivní model je založen na Wisslerově přístupu, který tyto změny plně umožňuje. U aktivního systému se pak jedná o parametry VO_{2max} a aklimatizace. Schéma funkce plně individualizovaného FPC modelu je uvedeno na Obr. 156. Individualizaci a termofyziologii se v Laboratoři tepelného managementu blíže věnuje B. Kopečková a J. Pokorný, viz např. [88], [377].



Obr. 156 – Schéma vstupů, submodelů a výstupů plně individualizovaného FPC modelu dle Fialy. Převzato z [334].

Tanabeho model – publikoval S. Tanabe v roce 2002, přičemž hlavním cílem bylo propojení tohoto modelu s CFD simulací a poskytnutí realistických povrchových teplot a přenosu vlhkosti pro CFD model (kosimulační princip) [421]. Tanabe tedy záměrně sledoval při vývoji nízkou výpočetní náročnost modelu, která byla podmínkou pro využití v CFD simulacích. Model je založen na Stolwijkově modelu [417], přičemž pasivní systém reprezentuje lidské tělo o hmotnosti 74.4 kg a ploše pokožky 1.87 m^2 , rozdělené do 16 segmentů a 4 vrstev tkáně na segmenty: jádro, svaly, tuk a pokožka (viz Obr. 157 vlevo). Vstupem modelu jsou parametry prostředí a oděvu (I_{cl} , R_{et}), které jsou definované pro jednotlivé segmenty zvlášť, což umožňuje snadnější propojení s jednotlivými okrajovými podmínkami v CFD simulaci (viz Obr. 157 vpravo).



Obr. 157 – Vlevo: Základní schéma Tanabeho modelu s popisem vrstev v jednom segmentu. Převzato z [377]. Vpravo: Originální geometrie lidského těla, využitá Tanabem pro reprezentaci povrchu člověka v CFD simulaci. Převzato z [421].

Výstupem modelu je predikce vnitřních teplot, teplot pokožky, vlhkosti pokožky, tepelných toků a pro predikci komfortu je využit tepelný index standardní efektivní teplota (SET^*). Pro každou vrstvu tkáně je definována rovnice tepelné rovnováhy, kde neznámou je teplota vrstvy tkáně, přičemž centrální krevní řečiště tvoří další výpočetní uzel (viz rovnice 5.2.26). Dohromady je model reprezentován 65 obyčejnými diferenciálními rovnicemi, což snižuje výpočetní náročnost modelu. Aktivní systém zahrnuje termoregulační mechanismy pocení, svalového třesu, vasodilatace a vasokonstrikce [377], [421].

$$\text{Vrstva jádra:} \quad C^{(i,1)} \cdot \frac{dt^{(i,1)}}{d\tau} = \dot{Q}_m^{(i,1)} - \dot{Q}_b^{(i,1)} - \dot{Q}_d^{(i,1)} - \dot{Q}_{res}^{(2,1)}$$

$$\text{Vrstva svalů:} \quad C^{(i,2)} \cdot \frac{dt^{(i,2)}}{d\tau} = \dot{Q}_m^{(i,2)} - \dot{Q}_b^{(i,2)} + \dot{Q}_d^{(i,1)} - \dot{Q}_d^{(i,2)}$$

$$\text{Vrstva tuku:} \quad C^{(i,3)} \cdot \frac{dt^{(i,3)}}{d\tau} = \dot{Q}_m^{(i,3)} - \dot{Q}_b^{(i,3)} + \dot{Q}_d^{(i,2)} - \dot{Q}_d^{(i,3)} \quad (5.2.26)$$

$$\text{Vrstva kůže:} \quad C^{(i,4)} \cdot \frac{dt^{(i,4)}}{d\tau} = \dot{Q}_m^{(i,4)} - \dot{Q}_b^{(i,4)} + \dot{Q}_d^{(i,4)} - \dot{Q}_e^{(i)} - \dot{Q}_{cl}^{(i)}$$

Centrální krevní
zásobiště:

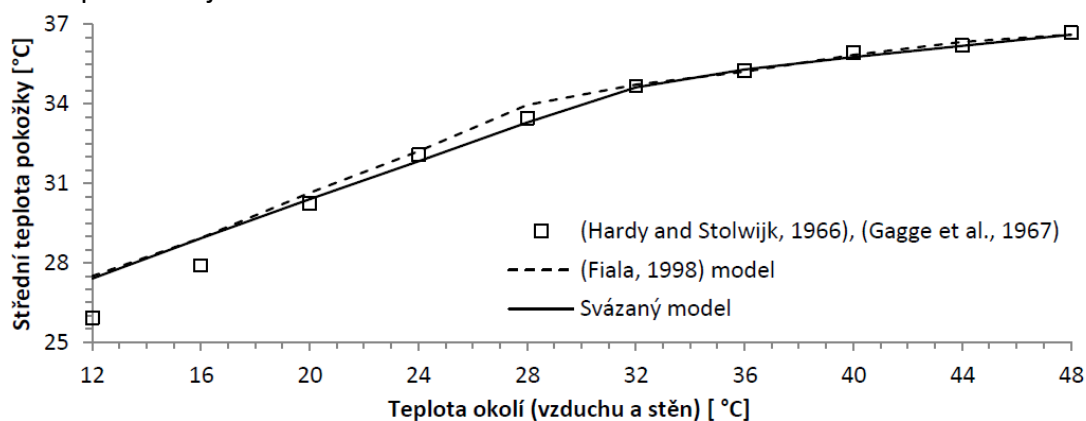
$$C^{(65)} \frac{dt^{(65)}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^4 \dot{Q}_b^{(i,j)}$$

$t^{(i,j)}$ je teplota tkání, $C^{(i,j)}$ je tepelná kapacita tkání (v původním modelu uváděná v neobvyklé jednotce [Wh/°C]), $\dot{Q}_m^{(i,j)}$ je vnitřní metabolická produkce tepla, $\dot{Q}_b^{(i,j)}$ tepelný tok přenesený krevním prouděním mezi jednotlivými vrstvami tkání a centrálním krevním řečištěm, $\dot{Q}_a^{(i,j)}$ je tepelný tok přenesený vedením mezi jednotlivými vrstvami tkáně, $\dot{Q}_{res}^{(i,1)}$ je tepelný tok přenesený dýcháním (odvádí se pouze z jádra hrudníku), $\dot{Q}_e^{(i)}$ je tepelná ztráta vypařováním z povrchu kůže a $\dot{Q}_{cl}^{(i)}$ reprezentuje prostup tepla oděvem [43], [377].

V roce 2012 publikoval J. Pokorný v rámci své disertační práce upravený Tanabeho model, pro predikci tepelného stavu lidského těla v dynamických prostředích kabin osobních vozidel [43]. Model je rozšířen a upraven především v těchto aspektech:

- Původně konstantní lokální součinitele přestupu tepla radiací a konvekcí byly nahrazeny empirickými vztahy, které jsou validovány pro vnitřní prostředí [252], [433].
- Je využit detailnější popis krevního oběhu se zahrnutím protiproudé výměny tepla mezi žilami a tepnami, který je převzat z Fialova modelu [310].
- Jednotlivé segmenty jsou propojeny systémem tepen a žil. Pro každý segment je uvažována vlastní tepenná a žilní teplota namísto předpokladu jedné teploty krve pro celé lidské tělo. Výpočet teploty centrálního krevního řečiště u Tanabeho modelu byl nahrazen rovnicí, která popisuje dokonalé mísení krve přicházející z jednotlivých segmentů (jejich žil) v centrálním řečišti.
- Je přidán přenos tepla vedením s kontaktními plochami.
- Je přidán přenos tepla krátkovlnnou radiací (slunečním zářením).

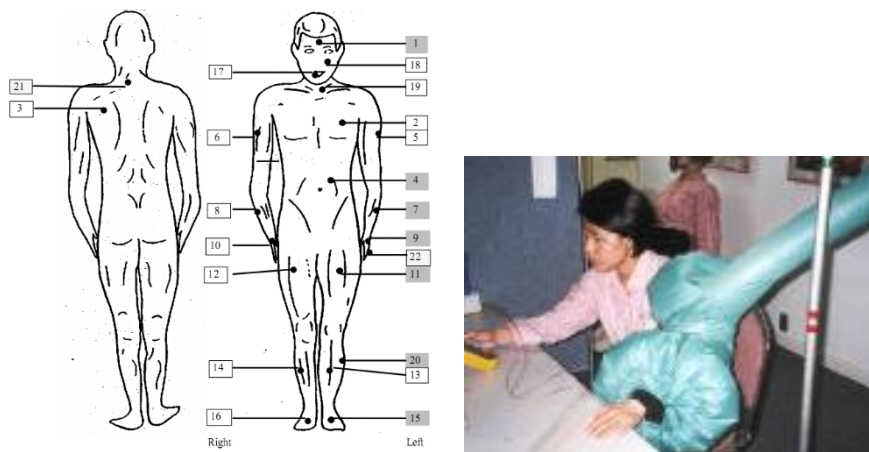
Podrobná matematická definice provedených úprav je uvedena v práci J. Pokorný 2012 [43], stejně tak i výsledky a validace modelu. Ukázka výsledků simulace modelu pro střední teplotu pokožky a prování s experimentálními daty pro stojícího člověka bez oděvu a v různých teplotách prostředí je uvedena na Obr. 158.



Obr. 158 – Porovnání výsledků predikce střední teploty pokožky pomocí Fialova modelu a upraveného Tanabeho modelu (Pokorný 2012) s experimentálními daty (čtverečky). Stojící člověk, 1 met, bez oděvu, různé teploty okolí. Výsledky simulací a měření vždy po 60 minutové expozici. Převzato z [43].

Model komfortu dle Hui Zhang (Berkeley model) – je empirický model subjektivního vnímání tepelného pocitu a komfortu, který vznikl statistickým zpracováním naměřených dat pomocí regresní analýzy (podobná metodologie jako u indexu DTS, viz Fialův model). Měření byla prováděna v klimatické komoře na univerzitě v Berkeley, USA v rámci disertační práce Hui Zhang v roce 2003 [52]. Společně s termofyziologickým modelem, který vytvořil Huizenga a kol. v roce 2001 [44], tvoří simulační model pro predikci tepelného komfortu v nehomogenních prostředích známý také jako Berkeley model [434]. Model dle Zhang tedy potřebuje vždy vstupy z termofyziologického modelu a nemůže pracovat sám o sobě. Pracoviště autora disponuje implementací modelu dle Zhang, kterou vytvořil J. Pokorný v rámci své disertační práce. Většina textu v této sekci je s dílčími úpravami a doplněním přebrána (se svolením autora) z publikace Pokorný 2012 [43].

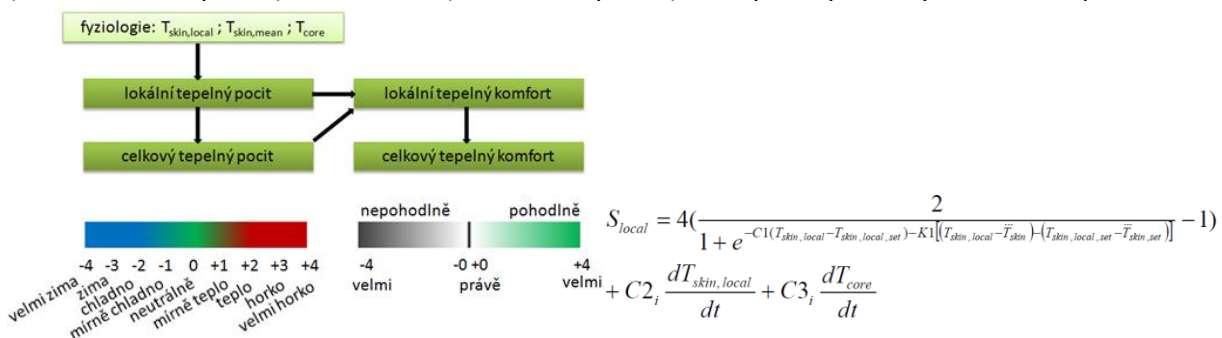
Model dle Zhang rozděluje lidské tělo na 19 částí, přičemž 16 z nich odpovídá rozdělení dle Tanabeho. Ovšem oblasti hlavy Zhang věnovala zvýšenou pozornost, neboť ji rozdělila na čtyři části: hlava (temeno hlavy a zátylek), krk, tvář a oblast úst. Měření pro získání dat probíhala na skupině 27 osob různého věku, pohlaví a tělesné konstituce [52], což však byl z pohledu jiných modelů a jejich validace relativně malý vzorek. Celkem bylo provedeno 109 různých měření (v rozsahu $t_a = t_r = 20$ až 32 °C, 0.3 clo, 1.0 až 1.2 met), jejichž cílem bylo nalézt korelaci mezi tepelným stavem člověka a tepelným komfortem v transientních a nehomogenních prostředích, která byla cíleně vytvořena pomocí individuálního ohřevu a chlazení jednotlivých částí lidského těla (viz Obr. 159 vpravo). Aby bylo možné dosažení libovolné kombinace tepelného stavu prostředí, tepelného stavu lidského těla a také následné transientní změny, bylo k dosažení počáteční uniformní povrchové teploty těla použito ponoření osob do vířivé vany s přesně regulovanou teplotou. Tento postup umožnil snížení času tepelné stabilizace osob před začátkem testu z 2 hodin na cca 15 min (viz také kapitola 4.4.2)[52].



Obr. 159 – Vlevo: Body 1-19 označují umístění senzorů pro měření povrchových teplot, na základě nichž Zhang sestavila svůj 19 segmentový model tepelného komfortu. Body 20-22 nebyly použity. Vpravo: Ukázka měření lokálního tepelného pocitu pomocí zahřívacího rukávce na levé paži. Převzato z [43], [52].

Následná měření probíhala v přesně definovaných podmínkách prostředí a u testovaných osob byla sledována tělesná teplota a teploty pokožky na 22 místech. Pro vlastní tvorbu modelu pak bylo použito pouze 19 teplot pokožky. Na Obr. 159 vlevo je znázorněna lokalizace všech 22 senzorů, které byly vždy nalepeny na kůži testované osoby po výstupu z

vířivé vany a osušení. Osoby si poté oblékly speciální overal, který zajišťoval tepelný odpor 0.3 clo po celém těle. V modelu se vyskytují veličiny střední teplota pokožky $T_{sk,m}$ a vnitřní/tělesná teplota T_{co} . Tělesná teplota jádra T_{co} byla měřena pomocí polykatelných gastro-kapslí. Byla zahrnuta možnost měření tympanické teploty v uchu z důvodů menší přesnosti a měření rektální teploty kvůli časové prodlevě při instalaci rektální sondy (současné možnosti měření těchto teplot jsou uvedeny v kapitole 4.4.3). Během vlastního měření testované osoby průběžně vyplňovaly na počítači dotazník, a to v časovém intervalu jedna až tři minuty. Dotazník obsahoval otázky na tepelné pocity na jednotlivých částech těla a na celkový tepelný pocit. Další otázky se týkaly tepelného komfortu na jednotlivých částech těla a celkového komfortu. Subjektivní vnímání působení okolního prostředí bylo zaznamenáváno do dotazníků pomocí předem daného slovního hodnocení. Byla použita 9 stupňová škála tepelných pocitů dle ASHRAE (-4 velmi zima až +4 velmi horko) a pro tepelný komfort byla použita odlišná 9 stupňová škála (-4 velmi nepohodlně, -0 právě nepohodlně, +0 právě pohodlně, +4 velmi pohodlně), viz Obr. 160. Komfortní prostředí pro člověka je tedy takové, v kterém je vnímaný celkový tepelný pocit roven 0, a tepelný komfort +2 až +4. Naopak prostředí velmi nevhodné je takové, kde člověk vnímá celkový tepelný pocit ± 4 a komfort -4. Škála pro komfort tedy není symetrická a nemá neutrální bod (více viz kapitola 2.5). Výsledky měření byly statisticky zpracovány a byly identifikovány citlivosti jednotlivých částí lidského těla na chlad i teplo. Na základě výsledků měření byly vytvořeny regresní funkce popisující závislost tepelného pocitu (viz Obr. 160 vpravo) a komfortu (Obr. 161 vpravo) na teplotě pokožky a vnitřní teplotě [43].

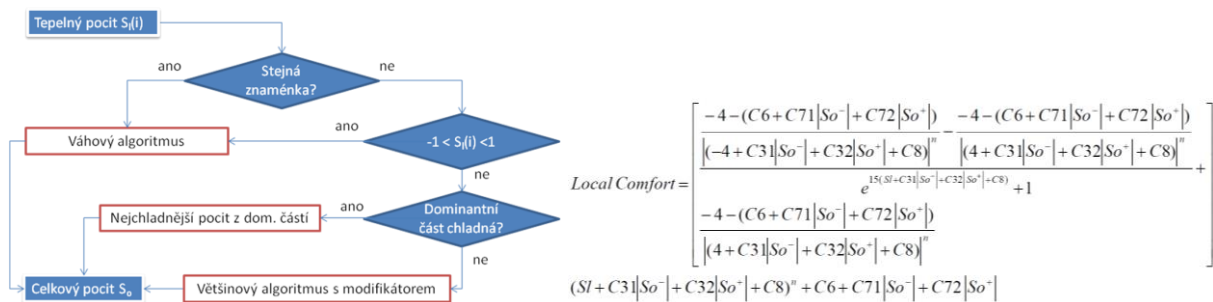


Obr. 160 – Vlevo: Schéma modelu dle Zhang se škálami pro tepelný pocit a komfort. Převzato z [43]. Vpravo: Universální rovnice pro vyjádření průběhu závislosti lokálního tepelného pocitu na teplotě pokožky, tělesné teplotě a jejich derivacích. Koeficienty rovnice pro každou část těla byly získány regresí z naměřených dat. Převzato z [52].

Na Obr. 160 je schéma jednotlivých částí modelu, jejich vzájemné propojení a použité škály pro definici tepelného pocitu a komfortu. Model se skládá ze čtyř částí, které predikují: lokální tepelný pocit, lokální tepelný komfort, celkový tepelný pocit a celkový tepelný komfort. Lokální tepelný pocit je základní veličinou určující vnímání okolního prostředí a závisí přímo na tepelném stavu člověka, ostatní veličiny jsou z něj odvozeny. Vstupem modelu jsou teploty pokožky jednotlivých částí těla, tělesná teplota (teplota jádra) a jejich časové změny. Model byl validován měřeními v kabině automobilu umístěném v klimatické komoře společnosti Delphi Harrison, která se nachází v Lockportu, NY, USA. Celkem bylo provedeno 64 validačních testů simulujících podmínky, které se mohou vyskytnout v kabině automobilu během letních i zimních provozních podmínek.

V roce 2010 H. Zhang publikovala upravenou verzi modelu [128], [129], [435]. Na základě validačních měření byl původní model upraven, např. došlo k opravě některých regresních

koeficientů zejména u nohou. Hlavní změnou byl také přepracovaný výpočet celkového tepelného pocitu. Výpočet pomocí váženého průměru byl nahrazen novým algoritmem, který zohledňuje vliv opačných tepelných pocitů na celkový tepelný pocit (viz Obr. 161).



Obr. 161 – Vlevo: Algoritmus pro určení celkového tepelného pocitu z pocitů lokálních. Postup zahrnuje i princip alliestezie a vliv tepelných pocitů na dominantních částech. Převzato z [43]. Vpravo: Universální rovnice pro vyjádření průběhu závislosti lokálního tepelného komfortu. Koeficienty v rovnice pro každou část těla byly získány regresí z naměřených dat, členy So jsou vstupy z modelu tepelného pocitu. Převzato z [52].

Model celkového tepelného komfortu je založen na pravidlech, ale autorka plánovala vylepšit i tuto část modelu. V roce 2014 byl vydán článek (Y.Zhao, H. Zhang a kol.) s další úpravou modelu a to především v části váhového algoritmu, který v některých případech způsoboval kmitání řešení, či skokové změny výstupu. Nová „vyhlazovací“ funkce a adaptivní přizpůsobování setpointů tepelnému odporu použitého oděvu měly tento problém odstranit [436]. Předností modelu dle Zhang je striktní rozdělení tepelného pocitu a komfortu na dvě samostatné škály. Důvodem je podstata vnímání tepelného komfortu při dynamické tepelné zátěži, kdy pojmy tepelný pocit a komfort nelze zaměňovat (viz kapitola 2.5). Dle autorky člověku poskytne nejlepší komfort skutečnost, že ta část, na které vnímal chlad/teplo, je ohřátá/ochlazená, čímž je uspokojen požadavek člověka na zlepšení jeho tepelného stavu (princip alliestezie viz kapitola 2.1) [52]. Model zohledňuje rozdílnou citlivost jednotlivých částí těla na teplo či chlad, ale nezohledňuje vliv mokré pokožky na vnímání tepelného komfortu. Model byl například implementován do softwarů zaměřených na predikci prostředí v kabinách automobilů jako Theseus-FE či RadTherm, které mají i vlastní implementace Fialova modelu [43]. Model byl však také podroben kritice pro příliš malý vzorek pokusných osob, z jejichž testů se vycházelo při konstrukci modelu, malému rozsahu testovacích podmínek a nepřesné dokumentaci [331]. Vzhledem k místu vzniku modelu a aktuální zjištění v oblasti využívání škál (komfort pro osoby v horkých podnebních je asociován s chladnými pocity, Schweiker a kol. z roku 2020 [127]) se jeví jako oprávněné upozornění, že model je vhodný pouze pro mírné/teplé podmínky, nízké metabolické produkce (do $1.5\ met$) a lehké oděvy do $0.8\ clo$. Je nutné však podotknout, že podrobnější model tepelného pocitu a komfortu zatím nebyl vyvinut [423] a z pohledu komplexity problému, rozmanitosti vstupů a rozdílů mezi jednotlivými osobami se jedná o extrémně složitý úkol. Podrobný popis modelu a jeho matematické implementace lze nalézt v originálních pracích H. Zhang nebo v disertační práci J. Pokorného [43] s doplněním a poznámkami v článku B. Koelblen z roku 2017 [331].

6 PŘÍKLADY VYUŽITÍ POSTUPŮ V EXPERIMENTÁLNÍ A TECHNICKÉ 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 Laboratoři tepelného managementu nebo v kooperaci se spolupracujícími laboratořemi a výzkumnými/vývojovými teamy v letech 2010 až 2021. Bylo využito přístupů modelování prostředí a tepelného komfortu pomocí CFD, měření prostřednictvím tepelného manekýna Newtona, měření parametrů prostředí čidly a senzory, hodnocení prostředí a technologií pokusnými osobami. Aplikační problematiku lze přibližně rozdělit do následujících oblastí:

1) **Virtuální navrhování a experimenty:** je postup založený na simulačních modelech a v Laboratoři tepelného komfortu, byl využit v případě, že výrobek či testované prostředí nebylo možné vytvořit nebo by testování v odpovídajícím rozsahu nebylo časově či finančně únosné. Je uveden příklad z projektu iSPACE a příklad Modelování větracího systému v kabině městského autobusu.

2) **Vývojový experiment a testování inovací:** v tomto případě je systém navržený a fyzicky realizovaný na úrovni funkčního vzorku či demonstrátoru, takže je možné otestovat vliv technologie na tepelný stav prostředí či přímo na tepelný komfort jeho uživatelů. Je uveden příklad ověření funkce větrané sedačky v horkém prostředí a experiment pro ověření funkce lokálních HVAC systémů a predikce komfortu v kabině dopravního letadla.

3) **Hodnocení existujících technologií či prostředí:** pokud již technologie či výrobek existuje ve formě funkčního vzorku, prototypu či sériového výrobku, lze experimentálně upřesnit jaké má užité parametry vzhledem k použitým materiálům a konstrukcím (např. určení tepelného odporu speciálních oděvů, rukavic, bund), nebo lze u HVAC systémů určit jak systémy regulovat, aby přínos pro tepelný komfort byl maximalizován při minimalizaci vstupní energie (měření vyhříváních sedaček). Je uveden příklad Měření vyhříváních sedačka a Testování komfortu v kabině sériového vozidla.

4) **Ověření metody, rozvoj metod a speciální aplikace:** Pro rozvoj práce laboratoře a udržení patřičné kvality experimentů je nezbytné opakované ověřování měřících metod a také jejich další rozvoj. Je uveden příklad Kalibrace tepelného manekýna pro metodu ekvivalentní teploty, Určení součinitelů přenosu tepla konvekcí a radiací a pilotní experiment pro Ověření predikce termofyziologie FMTK modelem.

Aby bylo možné udržet kompaktnost kapitoly, byly pro popis každého případu vyhrazeny maximálně tři strany s tím, že další informace lze popřípadě nalézt v publikacích, které byly s využitím dat z experimentů vytvořeny.

Klimatická komora FSI, VUT v Brně

Pro provedení většiny experimentů byl využit nejen tepelný manekýn Newton (viz 4.3.1), ale také další stěžejní zařízení klimatická komora FSI, VUT v Brně. Klimatická komora je zařízení, které slouží k vytvoření a řízení klimatických podmínek závislých na typu testu, přičemž v klimatické komoře FSI je možné řídit teplotu, relativní vlhkost vzduchu a také simulovat sluneční záření. Naopak komora neumožňuje nastavení teploty stěn a umožňuje jen velmi omezenou regulaci rychlosti proudění vzduchu. Vzhledem k rozměrům komory (š: 5 m, d: 8.85 m, v: 3.8 m) lze testovat i rozměrnější objekty jako například celá vozidla. Laboratoř disponuje také dvěma sériovými vozidly i maketou reálné kabiny, které umožňují testování různých technologií pro tepelný management a distribuci vzduchu v kabinách vozidel. Z pohledu zkušenosti autora je klimakomora nezbytným vybavením pro experimenty a testy HVAC systémů, neboť umožňuje opakované a přesné nastavení pracovních podmínek/pracovní zátěže pro testovaný systém.

Základní technické parametry klimatické komory:

- teplotní rozsah (se solární simulací): -10 °C až $+50\text{ °C}$
- teplotní rozsah (bez solární simulace): -40 °C až $+85\text{ °C}$
- rychlost teplotní změny: $\pm 1\text{ °C/min}$
- vlhkostní rozsah (se solární simulací): 30% – $60\% RH$
- vlhkostní rozsah (bez solární simulace): 30% – $95\% RH$
- stabilita udržování vlhkosti: $\pm 5\%$
- rosný bod: 5 °C až 49 °C
- solární simulace 10 kW / max. $1\ 000\text{ W/m}^2$
- výměna vzduchu při větrávání: $3\ 000\text{ m}^3/\text{h}$
- výměna vzduchu při provozu: $300\text{ m}^3/\text{h}$



Obr. 162 – Vlevo: Klimatická komora FSI, VUT v Brně s částečně zapnutým solárním simulátorem. Vpravo: Kolega O. Pech kontroluje nastavení makety kabiny pro testování HVAC systémů umístěnou v klimatické komoře při testech větracího systému se stropní výustkou. Zdroj archiv autora.

6.1 Virtuální navrhování a experimenty

V podkapitole jsou představeny experimenty založené na simulační metodě CFD (viz kap. 5.1) s využitím metody modelování ekvivalentní teploty t_{eq} (viz kap. 4.2), virtuálního manekýna a predikce tepelného komfortu prostřednictvím diagramu komfortních zón DZK (viz kap. 5.2.2)

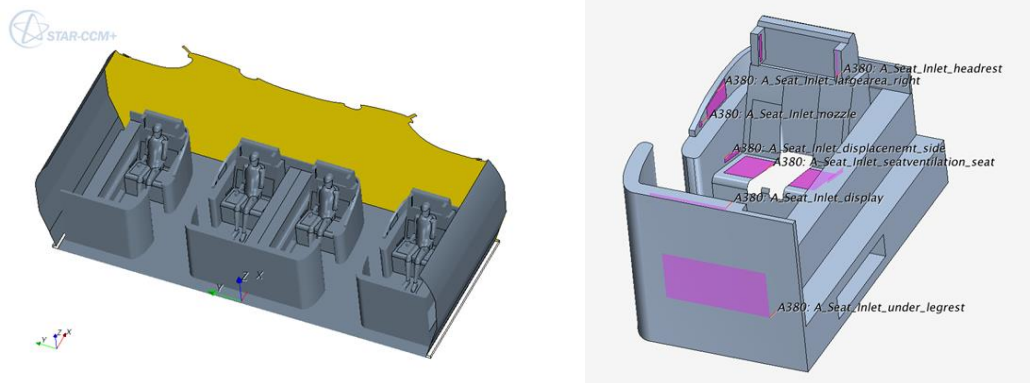
6.1.1 Simulace prostředí v kabině A380 projekt iSPACE

Projekt iSPACE (innovative Systems for Personalized Aircraft Cabin Environment) byl projektem 7. rámcového programu EU, jehož cílem bylo odstranit tepelný diskomfort v kabinách letadel a to prostřednictvím nových technologií pro dílčí individuální nastavení parametrů prostředí na úrovni každého cestujícího. Jednalo se hlavně o individuální nastavení teploty vzduchu, rychlosti proudění vzduchu, vlhkosti vzduchu a kontaktní plochy sedadla (vytápění/větrání). Na základě výsledků studie technické proveditelnosti personalizovaných HVAC systémů 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 svázanou se simulacemi, byla pilotní studie pro posouzení vhodného umístění a nutného průtoku vzduchu individuálními výstky pro přívod tepelně a vlhkově úpravného vzduchu a dopad lokální ventilace na tepelný pocit pasažérů. Vzhledem k tomu, že v této fázi projektu nebyla k dispozici reálná geometrie výstky ani nebyla připravena kabina pro testy s pokusnými osobami (viz Obr. 108), byl využit přístup CFD simulace a modelování prostředí v kabině s využitím metod a modelů dle Tabulka 3.

Tabulka 3 – Metody využití při projektu simulace prostředí A380

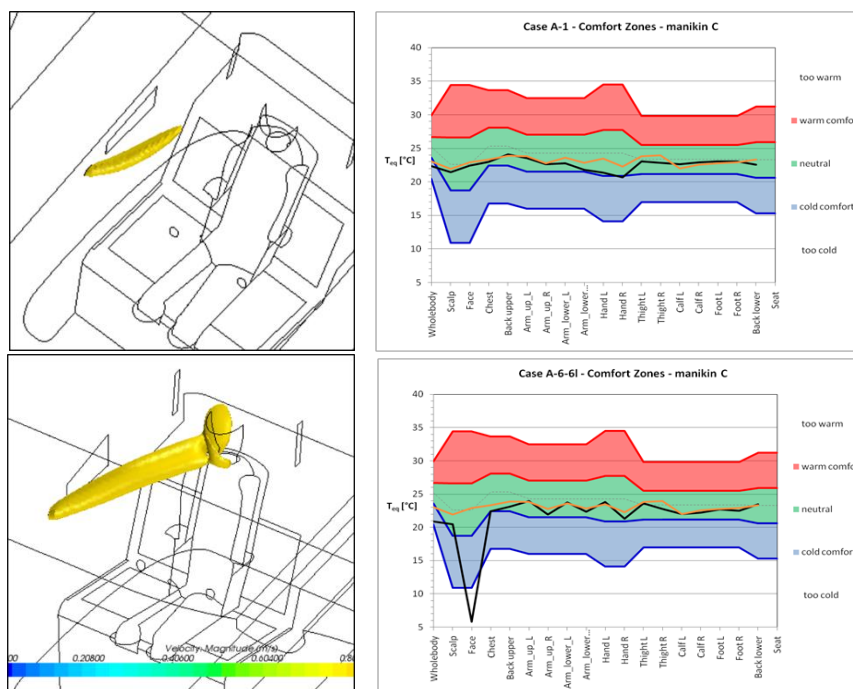
Metoda		Dílčí metody a parametry
Měření prostředí sondami	NE	-
Využití tepelného manekýna	NE	-
Zapojení pokusných osob	NE	-
Modelování prostředí	ANO	3D CFD, t , w_a , t_{eq} , Age of air
Modelování termofyziologie	NE	-
Predikce tep. pocitu a komfortu	ANO	DKZ a virtuální manekýn

Geometrický model byl založen na tvaru dolní 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. 163 vlevo). V obestavbě sedadla, bylo definováno celkem 7 různých lokací distribučních výstky pro přívod individuálně úpravného vzduchu (viz Obr. 163 vpravo), které pak byly určeny pro distribuci různých průtoků vzduchu (dm^3/s). Jedním z parametrů studie bylo také nalezení vhodné kombinace distribučních výstky, která by zabezpečila přívod individuálně upraveného vzduchu do obličejové zóny pasažéra bez ohledu na interakci individuálního proudového pole s proudovým polem, které v kabině vytváří hlavní ECS (Environment Control System) 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. Dále byla simulována intenzita větrání prostřednictvím indexu Age-of-air (stáří vzduchu).



Obr. 163 – Vlevo: Geometrie simulované výseče kabina Airbus A380 se čtyřmi sedadly první třídy a čtyřmi virtuálními manekýny. Vpravo: Detail sedadla s lokalizací posuzovaných distribučních výustek. Zdroj archiv autor.

Hlavní zaměření pak bylo směřováno na kombinaci distribuce vzduchu z boční dýzové výustky (Inlet_nozzle), výustky nad displejem (Inlet_display) a bočních výustek u sedadla (Displacement side). Kvantitativní analýza dosahu proudu z boční dýzové výustky je uveden na Obr. 164. Zatímco při průtoku $3 \text{ dm}^3/\text{s}$ a izotermních podmínkách proud z výustky nedosáhl obličeje, při průtoku $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ již vzduch z individuální výustky obličeje bezpečně dosáhl. Další zvyšování průtoku bylo možné, ale přinášelo jen chladnější tepelný pocit na obličeji a při průtocích nad $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ 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. 164.).



Obr. 164 – Horní řada: Při průtoku $3 \text{ dm}^3/\text{s}$ zaniká proud z dýzové výustky aniž by dosáhl obličeje, což je patrné i na diagramu komfortních zón, kde se neliší t_{eq} pro simulaci bez lokálních výustek (oranžová čára) a pro lokální výustky (černá čára). 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. Podrobnější informace lze nalézt v publikaci M. Forman, J. Fišer a kol (2011) [437].

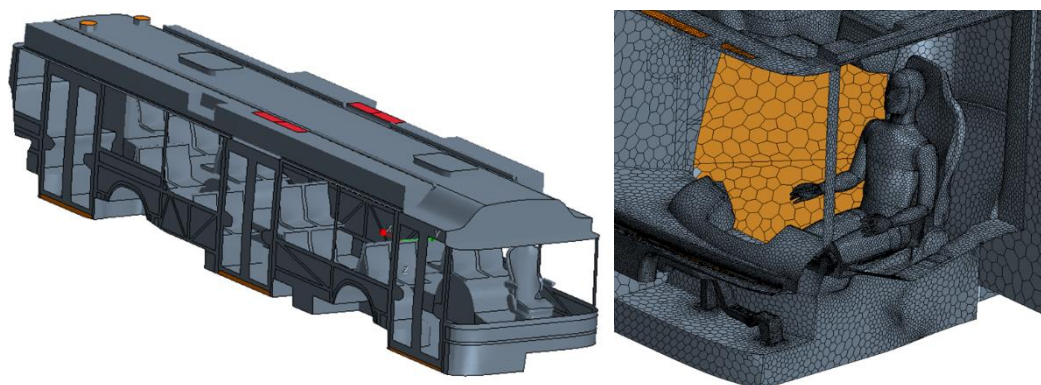
6.1.2 Větrání a komfort v kabině řidiče autobusu

Cílem dvouletého projektu byla simulace dynamického chování proudového pole v kabině městského autobusu, který měl být vybaven novým typem distribučního systému vzduchu a také bylo cílem ověřit vliv otevírání dveří na tepelný komfort řidiče v letním a zimním období. Autobus byl totiž nabízen v celé řadě zákaznických úprav pracoviště řidiče, přičemž někteří zákazníci vyžadující co nejvíce otevřenou kabinu řidiče reportovali nejvíce stížností na tepelný diskomfort řidiče při provozu autobusu v horkých letních či chladných zimních podmínkách. První fáze projektu spočívala v tvorbě modelu, porovnání výsledků statických (steady) a časově závislých (transient) simulací proudění v kabině. V druhé fázi byl již model řešen pouze transientsním přístupem a model byl rozšířen o model kabiny řidiče a virtuálního manekýna založeného na manekýnovi Newtonovi. Model byl také doplněn o nový typ distribučního systému vzduchu založeného na náporovém efektu, který měl snížit spotřebu energie na přívod vzduchu do kabiny cestujících za jízdy autobusu. Geometrie modelu kabiny autobusu a pracoviště řidiče viz Obr. 165. V době řešení projektu byla k dispozici pouze jedna prototypová varianta autobusu vyhrazená pro testy dílčích komponent vozidla, proto byl využit přístup CFD simulace a modelování prostředí v kabině s využitím metod a modelů dle Tabulka 4.

Tabulka 4 – Metody využití při projektu simulace prostředí v městském autobusu

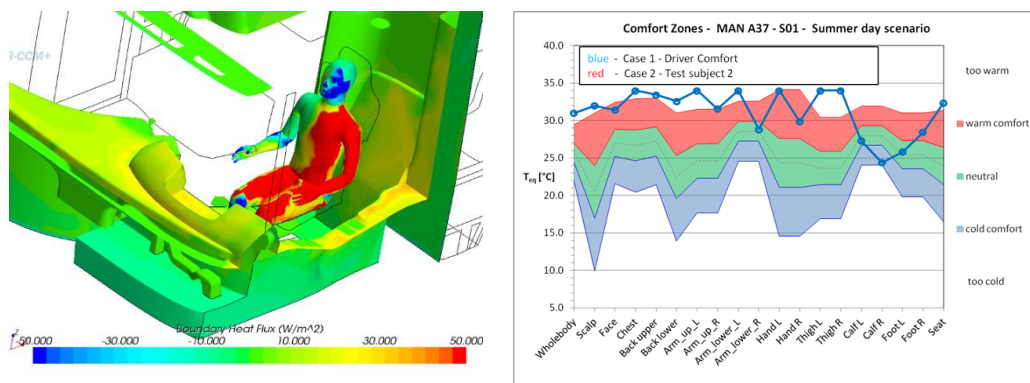
Metoda		Dílčí metody a parametry
Měření prostředí sondami	NE	-
Využití tepelného manekýna	NE	-
Zapojení pokusných osob	NE	-
Modelování prostředí	ANO	3D CFD, t , w_a , t_{eq} , Age of air
Modelování termofyziologie	NE	-
Predikce tep. pocitu a komfortu	ANO	DKZ a virtuální manekýn

V první verzi modelu byl uvažován pouze jednoduchý scénář krátkého otevření dveří a celkový simulovaný čas dosahoval 30 s. V druhé verzi byl celkový simulovaný čas 150 s na jeden případ rozdělený do úseků: 20 s jízdy, 10 s otevření / nástup a výstup / zavření dveří a následně 120 s jízda. Scénář byl odvozen z průzkumu jízdy městského autobusu na běžné městské lince 67 v Brně.

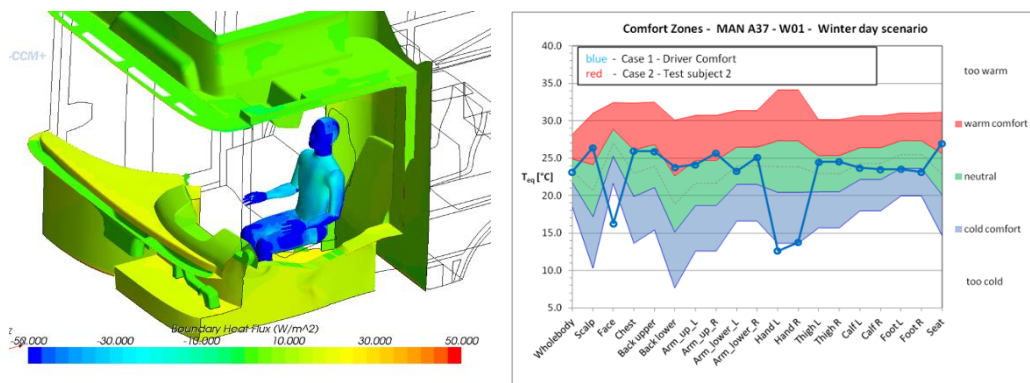


Obr. 165 – Vlevo: Geometrie kabiny městského autobusu. Červené oblasti jsou místa vstupu teplotně upraveného vzduchu z nástřešní klimatizační jednotky do distribučních vzduchovodů. Oranžové oblasti jsou místa extrakčních ventilátorů. Vpravo: Kabina řidiče s virtuálním manekýnem. Druhá verze modelu. Zdroj archiv autora.

V první variantě modelu výsledky simulací pro zimní případ odhalily, že při krátkém otevření dveří na 10 s dochází k průniku velmi studeného vzduchu do prostoru nohou řidiče a nebezpečí vzniku tepelného diskomfortu. Model však ještě neobsahoval manekýna, který by umožňoval podrobnější vyhodnocení tepelného stavu prostředí. V další verzi modelu byl doplněn a výsledky lze vidět na Obr. 166 a Obr. 167. V letních podmínkách pokud je řidič vystaven přímé sluneční radiaci, není ani při využití klimatizace možné efektivně kompenzovat tepelný účinek solárního záření a je nutné stínění. V zimních podmínkách je naopak obtížné kompenzovat tepelnou ztrátu neoblečených částí těla (obličej, dlaně), která vzniká vyšším přenosem tepla z chladného velkoplošného zasklení kabiny a vyšší rychlosti proudění vzduchu z výustek. Řešením může být změna vlastností skel a směřování primárních proudů z výustek.



Obr. 166 – Vlevo: Hustoty tepelného toku z manekýna při letních podmínkách, kdy na levou polovinu manekýna dopadá sluneční záření (červeně zbarvené oblasti). Manekýn je oblečen do trička, kraťasů a bot s ponožkami. Vpravo: Digram komfortních zón pro letní podmínky. Všechny části, které nebyly před solární radiací chráněné, jsou v pásmu „nepříjemně teplo“. Naopak u lýtek je predikován chladný pocit, neboť jsou vystaveny chladnému vzduchu z klimatizační jednotky.



Obr. 167 – Vlevo: Hustoty tepelného toku z manekýna při zimních podmínkách. Manekýn je oblečen do trička, košile s dlouhým rukávem, kalhot a bot s ponožkami. Vpravo: Digram komfortních zón pro zimní podmínky. Většina částí je v neutrální zóně, pouze dlaně a obličej vykazují chladný pocit v důsledku kombinace přenosu tepla radiací z okolních prosklených ploch a vyšší rychlosti proudění vzduchu.

Výsledky modelování byly hlavně využity jako podklady pro optimalizaci uspořádání kabiny řidiče a distribuci vzduchu z jednotlivých výustek tzv. front boxu. Na základě simulací byla také identifikována hůře větraná místa v kabině cestujících, což bylo podnětem pro dílčí úpravy hlavních vzduchodů. Podrobnější informace o výsledcích simulací nebyly vzhledem k podmínkám zadavatele projektu zveřejněny.

6.2 Vývojový experiment a testování inovací

V podkapitole jsou představeny experimenty založené na hodnocení prostředí a vlivu HVAC technologií na tepelný komfort osob. Prezentované experimenty byly vytvořeny se zapojením pokusných osob (viz kap. 4.4) s využitím metody měření ekvivalentní teploty t_{eq} pomocí reálného manekýna (viz kap. 4.3) a predikce tepelného komfortu prostřednictvím diagramu komfortních zón DZK (viz kap. 5.2.2).

6.2.1 Ventilované sedačky v podmínkách teplého prostředí

Cílem dvouletého projektu byl vývojový experiment pro nový typ větraných sedaček do osobních automobilů, které byly vybaveny reverzibilním ventilátorem a bylo tak možné vtlačování vzduchu (push) nebo odsávání vzduchu (pull) z kontaktních ploch sedáku a opěrky zad. Cílem bylo také najít a ověřit vhodné regulační prahy pro automatickou regulaci intenzity odsávání/vtlačování vzduchu do kontaktních ploch sedačky. Pro experiment byly využity dvě sedačky, jedna klasická sedačka bez ventilace (kontrolní případ) a speciálně upravená sedačka s nezávislou ventilací sedáku a opěrky zad. Ventilace byla ovládána manuálně pokusnou osobou testující sedačku ve třech krocích pro push/pull režim nebo vypnuto. Obě sedačky byly umístěny v klimatické komoře za zástěnou, která eliminovala vliv proudění vzduchu v komoře na ochlazování pokusných osob (viz Obr. 168). Aby byly napodobeny reálné provozní podmínky odpovídající kabině vozidla s klimatizací, byl pomocí klimatické komory simulován teplotní profil odpovídající nastoupení do kabiny vyhřátého automobilu $+41 \pm 0.5$ °C a zapnutí klimatizace s postupným poklesem na $+25 \pm 0.3$ °C v průběhu 15 min, při udržování relativní vlhkosti 40 ± 2.5 %. Teplotně stabilizované pokusné osoby do klimatické komory vstoupily vždy 10 min před usednutím na sedačky a lehkou aktivitou odpovídající cca 3 met v teplotě +41 °C bylo dosaženo sekrece potu, který je předpokladem pro účinné chlazení při využití ventilované sedačky. Celý pobyt v komoře trval celkem 40 min. Protože bylo uvažováno o využití získaných dat pro validaci a ověření termofyziologických modelů, bylo na obou sedadlech provedeno měření hustoty tepelného toku q_{sk} mezi kontaktními plochami a lidským tělem (viz Obr. 168, vlevo) a také byla měřena povrchová teplota všech pokusných osob kontaktními teploměry iButton prostřednictvím 8bodové metody dle ISO 9886 (viz kap. 4.4.3). Pro záznam hodnocení tepelných pocitů, komfortu a žádané změny byl využit dotazník s detailním dělením kontaktních částí zad a hýždí (viz Obr. 169). Pokusné osoby také zaznamenávaly jaký režim ventilace a jakou intenzitu mají nastavenou. Použité metody jsou uvedeny v Tabulka 5.

Tabulka 5 – Metody využití při projektu ventilovaných sedaček

Metoda		Díličí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	t, RH, w_a, x, t_g
Využití tepelného manekýna	NE	-
Zapojení pokusných osob	ANO	9 osob, dotazník, měření t_{sk} , q_{sk} tepelný tok mezi osobou a sedačkou
Modelování prostředí	NE	-
Modelování termofyziologie	ANO	speciální model
Predikce tep. pocitu a komfortu	ANO	MTV, Zhang, TSV



Obr. 168 – Vlevo: Větraná sedačka se speciální sítí pro měření hustoty tepelného toku [W/m²] v kontaktních plochách sedadla a kontrolní sedačka bez větrání. Vpravo: Pohled do klimatické komory s kompletním vybavením pro experiment. Zdroj archiv autora.

Ze získaných dat bylo možné vyvodit závěry, že nebyly nalezeny statisticky významné rozdíly mezi tepelným pocitem a komfortem na částech těla v kontaktu s ventilovanou sedačkou, pokud byl použit režim push či pull. Statisticky významný rozdíl v tepelném pocitu a komfortu však byl patrný mezi ventilovanou a kontrolní sedačkou s tím, že ventilovaná sedačka umožnila dosažení hodnocení komfortu „právě komfortní/komfortní“ zatímco na kontrolní sedačce bylo dosaženo hodnocení „nekomfortní/právě nekomfortní“. Potvrzena také byla rozdílná citlivost zad a hýždí na chlazení, kde bylo patrné, že testované osoby začaly snižovat otáčky ventilátoru na opěrce zad a tím i intenzitu chlazení od 6. minuty od usednutí na sedačku, zatímco u sedáku do regulace prakticky nezasahovaly (ve většině měření tedy pracoval ventilátor sedáku na plný výkon po celou dobu měření).

Číslo měření	ČÁSTI V KONTAKTU SE SEDAČKOU										OSTATNÍ ČÁSTI							GLOBÁLNÍ		SEDAČKA	
	Záda lopatky		Záda lebniny		Záda kostič		Hýždě		Tvář	Hruď	Paže	Dlaně	Nohy	Chodidla	Globální komfort	Základní změna	Sezení	Operační			
	pečet	komfort	pečet	komfort	pečet	komfort	pečet	komfort											pečet	komfort	pečet
-1																					
0																					
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8																					
9																					
10																					

Obr. 169 – Dotazník využitý v projektu ventilovaných sedaček. Dotazník byl rozdělen na části, které byly v kontaktu se sedačkou, ostatní části, celkové hodnocení a záznamy nastavení ventilované sedačky. Škály viz kapitola 2.5. Zdroj archiv autora.

Výsledky měření byly využity jako podklad pro vývoj sedaček do osobních vozů vyšší třídy a jejich automatické regulace. Přesné hodnoty regulačních prahů nebyly vzhledem k podmínkám zadavatele projektu zveřejněny. Data z experimentu byla využita pro tvorbu a validaci speciálního modelu pro simulaci přenosu tepla mezi kontaktními částmi těla a sedačkou. Publikováno v práci Fojtlín, Psíkuta, Fišer a kol. 2020 [248].

6.2.2 Ověření predikce tepelného komfortu v kabině letadla

Práce byly provedeny jako další část projektu iSPACE (innovative Systems for Personalized Aircraft Cabin Environment), jehož primární cíle jsou blíže popsány v kap. 6.1.1. Všechny systémy pro lokální HVAC byly vyvinuty jako kompaktní, takže je bylo možné integrovat přímo do sedadel. Ukázka plně vybaveného sedadla business třídy a ovládacího panelu je na Obr. 170. Další fází projektu byla instalace sedadel do simulační kabiny FTF (Flight test facility - viz Obr. 108) a test s pokusnými osobami, aby bylo možné prokázat vliv vyvinutých systémů na komfort pasažérů. Byly provedeny celkem tři různé série experimentů, které se lišily teplotou v kabině, která byla nastavena na 19.5 , 23.5 a 27.5 ± 0.8 °C. Pokusné osoby střídaly pozice na jednotlivých sedadlech a v průběhu jednoho simulovaného letu (délky 7 hodin) vystřídala každá pokusná osoba vždy 8 různých sedadel. Úkolem VUT bylo provést kompletní simulaci experimentu pomocí CFD, validovat výsledky modelu daty z měření a ověřit predikci tepelného komfortu získaného z virtuálních manekýnů daty od pokusných osob. Byly využity přístupy dle Tabulka 6 a autor se osobně zúčastnil prvního týdne měření v IBP Fraunhofer inst., Holzkirchen.

Tabulka 6 - Metody využití při projektu iSPACE a ověření predikce tepelného komfortu

Metoda		Díličí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	t , RH , w
Využití tepelného manekýna	NE	-
Zapojení pokusných osob	ANO	3x18 osob, dotazník
Modelování prostředí	ANO	3D CFD model
Modelování termofyziologie	NE	-
Predikce tep. pocitu a komfortu	ANO	Virtuální manekýn a DKZ

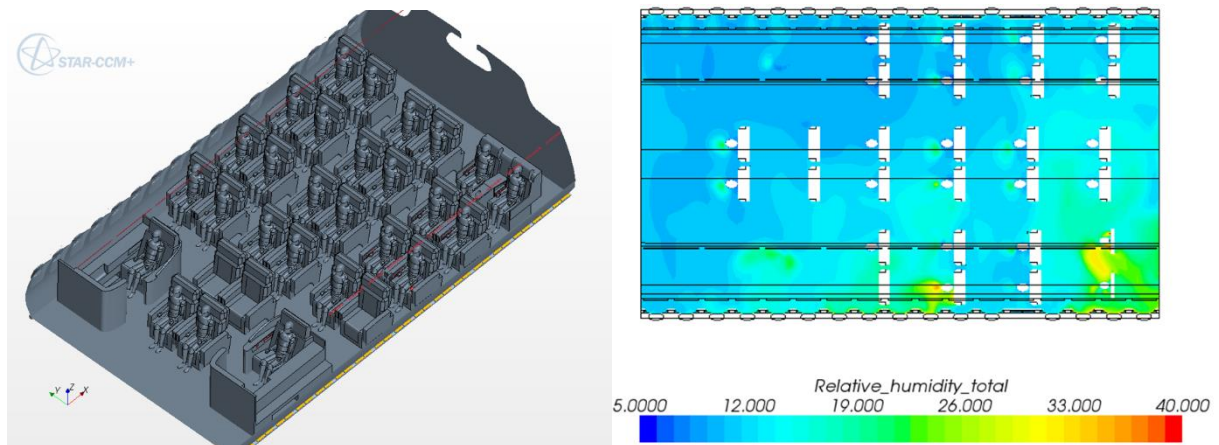
Celý model kabiny je zobrazen na Obr. 171 vlevo. V kabině bylo modelováno celkem 30 sedadel vybavených ve shodě se sedadly v reálném experimentu, přičemž pokusné osoby byly simulovány celkem 27 virtuálními manekýny, kteří byli nejen zdrojem citelného tepla, ale i zdrojem vlhkosti vydechované reálnými osobami. Počet okrajových podmínek přesahoval hodnotu 1 000, proto bylo jejich nastavování realizováno pomocí speciálních maker v programovacím jazyku Java. Řešení simulace bylo provedeno jako steady, neboť vzhledem k dostupnému hardware (rok 2012) nebylo reálné provést simulace jako časově závislé.



Obr. 170 – Vlevo: Plně vybavené dvojsedadlo určené pro business třídu instalované v FTF maketě. Střed: Ovládací panel integrovaných HVAC technologií pro ohřívání vzduchu, zvlhčování vzduchu, vyhřívání a ventilaci kontaktní plochy sedadla. Vpravo: Model sedadla a virtuálních manekýnů v CFD simulaci. Zdroj archiv autora.

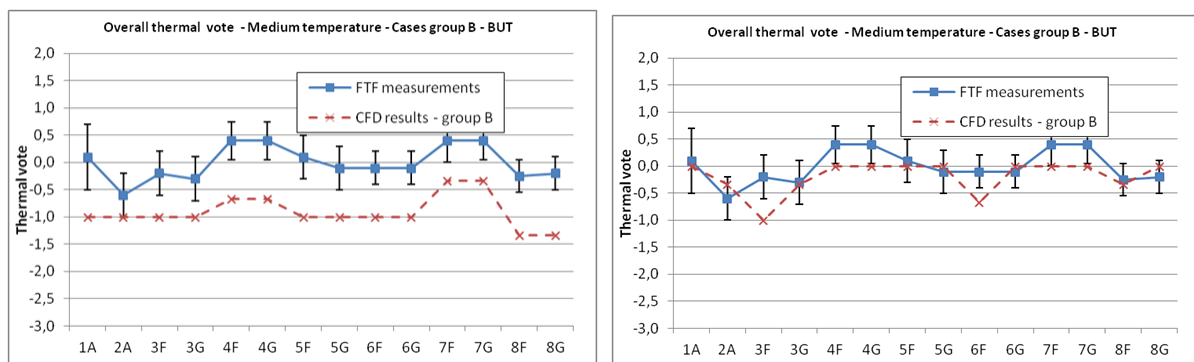
Příklad vypočítaného pole relativní vlhkosti vzduchu je uveden na Obr. 171 vpravo. Jedná se o horizontální řez ve výšce hlavy, kde jsou dobře patrné zdroje vlhkosti situované před

obličejem každého manekýna a také je patrné zvýšení vlhkosti vzduchu v dolní části obrázku (levá řada sedadel v kabině), které je způsobené funkcí lokálního zvlhčování u sedadel business a první třídy. Výsledek je pro chladné podmínky $19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ v kabině. Příklad srovnání výsledků predikce tepelného pocitu v podmínkách střední teploty $23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, s daty od pokusných osob je uveden na Obr. 172. Na levém obrázku je uvedeno porovnání prvotních výsledků simulací, při využití lokálních tepelných odporů oděvu na manekýnech z publikace Nilsson 2004 [252].



Obr. 171 – Vlevo: Celkový pohled na kompletní geometrii modelu s 27 manekýny pro predikci tepelného komfortu. Vpravo: Pole relativní vlhkosti vzduchu [%], horizontální řez ve výšce hlav sedících osob. V dolní části obrázku (levá řada sedadel v kabině) byla umístěna sedadla s lokálním zvlhčováním vzduchu. Zdroj archiv autora.

Predikce sice vykazovala trendovou shodu, ale byla posunuta o cca -0.5 až -1.0 stupně oproti datům od dotazovaných osob. Po změření vlastní sady lokálních odporů oděvu na manekýnovi Newtonovi, předepsání těchto hodnot na virtuální manekýny a resimulaci se rozdíl mezi predikcí a daty snížil do pásma jedné směrodatné odchylky (pouhé přepočtení t_{eq} nebylo možné, neboť různé povrchové teploty v CFD modelu znamenají různé tepelné toky).



Obr. 172 - Vlevo: Rozdíl mezi predikcí a tepelným pocitem osob byl při využití standardního oděvu u virtuálního manekýna (dle Nilsson 2004 [252]), relativně velký cca -0.5 až -1.0 stupně škály. Vpravo: Po přeměření tepelných odporů oděvu na reálném tepelném manekýnovi, dosažení těchto hodnot na virtuální manekýny a resimulaci se rozdíly snížily cca do pásma jedné směrodatné odchylky. Zdroj archiv autora.

Výsledky modelování byly využity jako podklady pro optimalizaci provozních parametrů individuálních zvlhčovačů tak, aby nevznikalo nebezpečí kondenzace za interiérovými panely kabiny. Výsledky validace predikce tepelného pocitu potvrdily důležitost přesné definice vlastností oděvu při simulaci přenosu tepla na virtuálním manekýnovi v CFD simulaci. Podrobnější informace lze nalézt v publikaci Volavý, Fišer, Nöske 2013 [438].

6.3 Hodnocení existujících technologií či prostředí

Pokud již technologie či výrobek existuje ve formě funkčního vzorku, prototypu či sériového výrobku, lze experimentálně upřesnit jaké má užité parametry vzhledem k použitým materiálům a konstrukcím (např. určení tepelného odporu speciálních oděvů, rukavic, bund), nebo lze u HVAC systémů určit, jak systémy regulovat/řídit, aby přínos pro tepelný komfort byl maximalizován při minimalizaci vstupní energie (např. měření vyhřívání sedáček). V podkapitole jsou uvedeny experimenty založené na hodnocení prostředí a vlivu HVAC technologií se zapojením pokusných osob (viz kap. 4.4) s využitím metody měření ekvivalentní teploty t_{eq} pomocí reálného manekýna (viz kap. 4.3) a predikce tepelného komfortu prostřednictvím diagramu komfortních zón DKZ (viz kap. 5.2.2).

6.3.1 Tepelný komfort v kontaktní ploše sedačky s vyhříváním

Cílem víceletého projektu bylo experimentální ověření komfortních povrchových teplot v kontaktní ploše sedáček s vyhříváním vzhledem k doporučeným termofyziologickým limitům lidského těla, které by následně byly vhodné jako regulační setpointy pro automatickou regulaci vyhřívání sedáček v kabinách osobních vozidel. Projekt byl rozčleněn do pilotní fáze pro ověření vlivu okolní teploty na tepelný pocit a komfort a druhé fáze s vybranou teplotou okolí a variantní teplotou vyhřívání a kontrolní skupinou bez vyhřívání. Pro experiment bylo využito pět sériově vyráběných sedáček z automobilu střední třídy, které byly připevněny na pojízdné platformy, byly připojeny na externí napájení 12 V a regulační jednotku s jedním zpětnovazebním čidlem umístěným na ploše sedáku pro každou sedačku. Všechny sedačky byly umístěny v klimatické komoře za zástěnou, která eliminovala vliv proudění vzduchu v komoře na ochlazování pokusných osob (viz Obr. 173). V první fázi byla využita konstantní teplota vyhřívání na cílovou hodnotu $+41\pm 0.5$ °C a ve čtyřech opakovaných měřeních byla teplota v komoře udržována na stabilních hodnotách $+16$, $+18$, $+20$, $+24\pm 0.5$ °C a jedna skupina dobrovolníků testovala i podmínky $+10\pm 0.5$ °C. Všechna měření byla provedena s relativní vlhkostí 30 ± 2.5 %. Teplotně stabilizované pokusné osoby vždy po vstupu do komory usedly na přidělené sedadlo, které bylo stabilizované na teplotu okolí, vyplnily nultý řádek dotazníku a následovalo synchronizované zapnutí výhřevů sedáček. Aktivaci a deaktivaci vyhřívání sedačky ovládala každá pokusná osoba individuálně. Pokusné osoby vyplňovaly dotazník každé 3 min po dobu 30 min. Ukázka dotazníku je uvedena na Obr. 174. 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. Použité metody jsou uvedeny v Tabulka 7.

Tabulka 7 - Metody využití při projektu tepelný komfort v kontaktní ploše

Metoda		Dílicí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	t , RH , w_a , x , t_g
Využití tepelného manekýna	ANO	Newton
Zapojení pokusných osob	ANO	4x4 osob, dotazník
Modelování prostředí	NE	-
Modelování termofyziologie	NE	-
Predikce tep. pocitu a komfortu	ANO	DKZ

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.

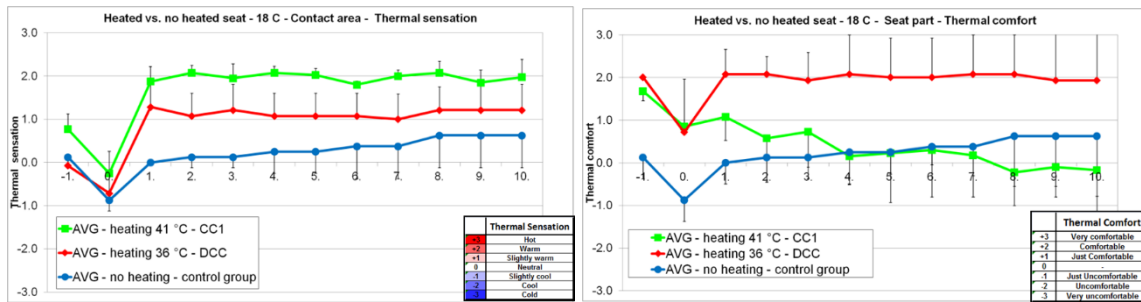


Obr. 173 - Vlevo: první fáze testu, čtyři pokusné osoby a manekýn Newton v testu. Vpravo: druhá fáze – uspořádání pro měření kontrolní skupiny. Zdroj archiv autora.

Hlavním výsledkem měření z pohledu fyziologie a vhodného rozsahu regulace teploty vyhříváných 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. 175 vlevo), jinak řečeno pocit je pozitivně korelovaný s teplotou. 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 klesá a na konci měřicí periody je na rozhraní „komfortní/nekomfortní“. To lze interpretovat již jako nepříjemný pocit a je to horší hodnocení než u kontrolní sedačky bez vyhřívání (Obr. 175 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. 176).

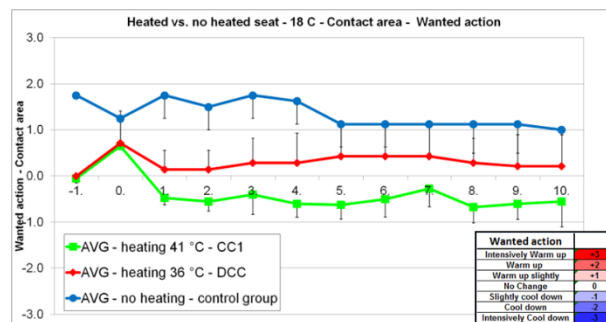
Číslo měření	ČÁSTI V KONTAKTU SE SEDAČKOU								OSTATNÍ ČÁSTI										GLOBALNÍ	
	Záda lopatky		Záda bedra		Hýždě		Stehna spodní		Tvář	Hlava a temeno	Hrud'	Paže	Dlaně	Stehna přední	Lýtka + Holenné	Chodidla	Celkový tepelný komfort	Žádaná změna		
	pocit	komfort	pocit	komfort	pocit	komfort	pocit	komfort												
-1.																				
0.																				
1.																				
2.																				
3.																				
4.																				
5.																				
6.																				
7.																				
8.																				
9.																				
10.																				

Obr. 174 - Dotazník využitý v projektu vyhříváných sedaček. Dotazník byl rozdělen na části, které byly v kontaktu se sedačkou, ostatní části, celkové hodnocení. Škály viz kapitola 2.5. Zdroj archiv autora.



Obr. 175 – Vlevo: Tepelný pocit v kontaktní ploše při teplotách vyhřívání +41 °C (zelená), +36 °C (červená) a bez vyhřívání (modrá). Vyšší teplota zapříčiňuje vyšší tepelný pocit. Vpravo: Při teplotě +36 °C je hodnocení komfortu celou dobu stabilní na hodnotě +2 komfortní, zatímco u teploty +41 °C postupně klesá až k hodnotě právě nekomfortní, což je nižší hodnota než v kontrolní skupině bez aktivovaného vyhřívání. Zdroj archiv autora.

Poučení z přípravy a realizace projektu: zaměstnanci průmyslového partnera mají někdy příliš omezený vhlad do problematiky způsobený jejich rutinou v organizaci při testování např. „musí začínat při teplotě -10 °C, tak jak to u nás běžně testujeme“. Tím se ale experimentátor nesmí nechat ovlivnit, protože za výsledky testu a bezpečnost osob zodpovídá on/ona. Elegantním řešením bylo vytvoření testovacího případu +10 °C, kde byl jako jeden z respondentů přizván i „naléhateľ“, aby si na „vlastní kůži“ vyzkoušel, jaké jsou účinky prostředí o této teplotě na lidské tělo, pokud člověk 30 min „jen klidně sedí“. Po zkoušce musel uznat, že jeho prvotní názor byl milný a že nastavení experimentu bylo adekvátní.



Obr. 176 – Průběh hodnocení veličiny Žádaná změna na částech v kontaktu se sedačkou. Hodnocení kontrolní skupiny bez vyhřívání bylo „mírně ohřát“, při teplotě sedačky +36 °C byl požadavek „žádná změna“ a u teploty +41 °C byl požadavek „mírně ochodit“. Teplota +41 °C tedy byla při 30 min expozici již příliš vysoká a místo vyhřívání bylo požadováno chlazení a to již po 3 minutách od aktivace vyhřívání. Zdroj archiv autora.

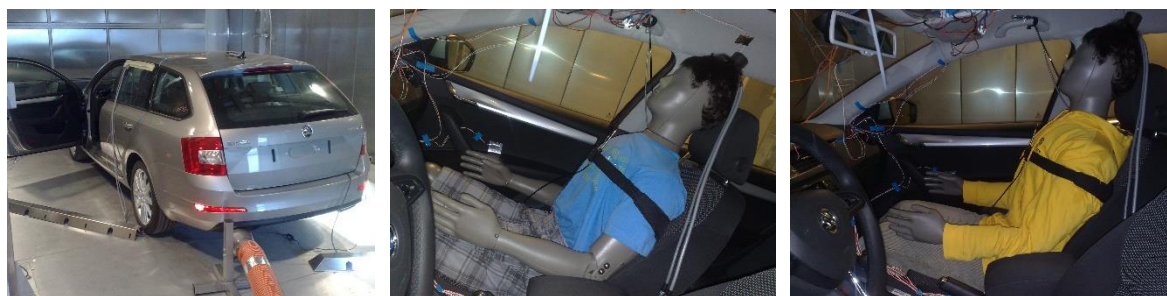
Je také nezbytná důkladná kontrola parametrů a funkce systémů, které testují dobrovolníci a přímo ovlivňují tělo (v tomto případě systém řídicí vyhřívací elementy v sedačkách). U některých testovaných osob byly zaznamenány teploty v kontaktní ploše i přes +46 °C, což by v dlouhodobém působení mohlo vésti i 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. Ideální je pak automatické nastavení upozornění při překročení nastavených prahů (v tomto experimentu překročení teploty +43 °C v kontaktu sedačka a hýždě člověka). 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, Psikuta a kol. 2018 [439] a Fojtlín, Psikuta, Fišer a kol. 2020 [248].

6.3.2 Tepelný komfort v kabině vozidla – letní a zimní podmínky

Práce na tomto experimentu byly provedeny v rámci projektu CKAPJB (Centrum Kompetence Automobilového Průmyslu Josefa Božka) a hlavním cílem byla validace predikce tepelného pocitu a komfortu pomocí metody diagramu komfortních zón (DKZ viz kap. 5.2.2) v kabině osobního vozidla se stabilními parametry prostředí udržovanými automatickou klimatizací. Byl definován letní případ s teplotou okolí $+30\pm 0.5$ °C bez slunečního záření a nastavení automatické klimatizace na automatický režim „AUTO 24 °C“. Zimní případ byl definován teplotou -5 ± 0.5 °C, automatický režim „AUTO 18 °C“. Pro měření ekvivalentní teploty t_{eq} byl využit manekýn Newton, který byl instalován na sedačku spolujezdce a měl vždy stejné oblečení jako pokusné osoby. Experiment byl realizován v klimatické komoře VUT-FSI s využitím sériově vyráběného vozidla nižší střední třídy, vybaveného automatickou klimatizací typu Climatronic (viz Obr. 177). Experimenty byly provedeny v červnu a srpnu roku 2014 se vzorkem 10 pokusných osob mužského pohlaví. Osoby pro letní i zimní případ používaly oděv se stejným vrstvením a materiály jako manekýn (viz Obr. 177 uprostřed a vpravo). Teplotně stabilizované pokusné osoby (záznam v dotazníku na řádce -1) vždy po vstupu do komory, prošly k vozidlu, usedly na sedačku řidiče a byl vyplněn nultý řádek dotazníku. Další řádky byly vyplněny po 20 a 30 min od nasednutí do kabiny. Dotazník byl vyplňován tazatelem, který kladl pokusným osobám postupně dotazy na tepelný pocit a komfort (hodnocený Bedfordovou škálou MTV) na jednotlivých částech těla a také na celkový tepelný pocit. Pokusné osoby tedy neviděly své předešlé hodnocení v dotazníku. Ukázka dotazníku je uvedena na Obr. 174. Použité metody jsou uvedeny v Tabulka 7.

Tabulka 8 - Metody využití při projektu tepelný komfort v kabině vozidla

Metoda		Díličí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	t, RH, W_a, t_{eq}
Využití tepelného manekýna	ANO	Newton
Zapojení pokusných osob	ANO	10 osob, dotazník
Modelování prostředí	NE	-
Modelování termofyziologie	NE	-
Predikce tep. pocitu a komfortu	ANO	DKZ

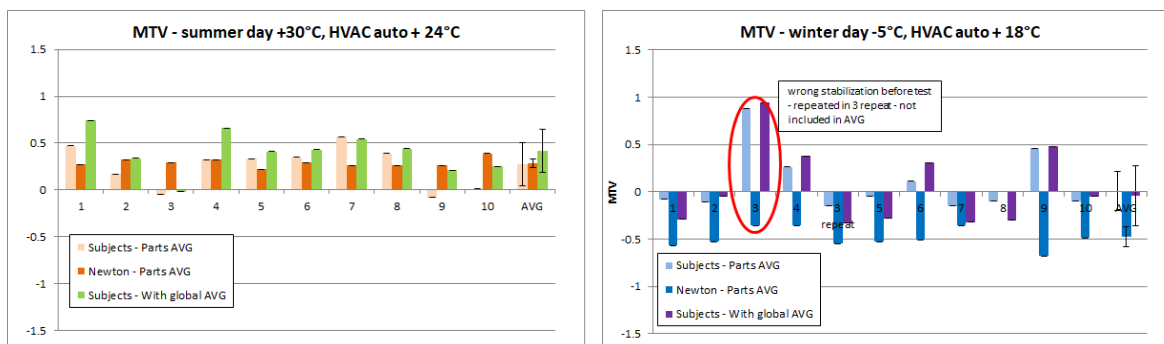


Obr. 177 – Vlevo: Testovací vozidlo v klimakomoře VUT-FSI. Uprostřed: Letní oděv. Vpravo: Zimní oděv.

Num.	Time	Relative Time	Note	MTV Global			Mean thermal vote (local)													AVG	MTV global			AVG		
				MTV - actual	MTV - wish	Comfort	Head	Chest	Back	Arm R	Arm L	Hand R	Hand L	Leg R	Leg L	Foot R	Foot L	MTV - actual	MTV - wish		Comfort	MTV - actual	MTV - wish	Comfort		
							Head	Chest	Back	Arm R	Arm L	Hand R	Hand L	Leg R	Leg L	Foot R	Foot L									
							16.45	15.00	15.00	15.00	15.00	4.06	4.06	5.32	5.32	2.38	2.38									
-1	11:40:00	0	in control room	-0.5	0		0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0	0	0.07	-0.5	0		-0.5	0			
0	11:42:00	0:02:00	after get in	0	0		0	0	0	0	0	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0	0	-0.01	0	0		0	0			
1	12:02:00	0:20:00	after 20 min	0	0		0	0	0.5	0	0	1	1	-0.5	-0.5	0	0	0.10	0	0		0	0			
2	12:12:00	0:30:00	after 30 min	0.5	0		-0.5	0.5	0.5	0	0	1	1	0	0	0.5	0.5	0.17	0.5	0		0.5	0			

Obr. 178 – Dotazník použitý v projektu CKAPJB. S ukázkou vyplnění od pokusné osoby 2. Jednalo se o prvotní typ dotazníku, kde ještě nebyly oddělené škály pro pocit a komfort a na hodnocení byla používána Bedfordova kombinovaná škála. Zdroj archiv autora.

Hlavní výsledky experimentu jsou uvedeny na grafech Obr. 179. Na levém grafu jsou všechny výsledky získané pro letní případ +30 °C. Průměrné hodnocení osob se shodovalo s průměrným hodnocením prostředí manekýnem (označení v grafu popiskem AVG v pravé části) velmi dobře, ačkoliv je zřejmé, že hodnocení osob má vyšší směrodatnou odchylku než hodnocení získané z měření manekýna. Na pravém grafu jsou výsledky získané pro zimní případ -5 °C. Průměrné hodnocení osob vykazovalo přesně neutrální hodnocení, zatímco manekýn prostředí systematicky hodnotil na hranici mezi neutrální zónou a zónou „chladno ale příjemně“ (označení v grafu popiskem AVG v pravé části). Opět lze pozorovat, že hodnocení osob má vyšší směrodatnou odchylku než hodnocení získané z měření manekýnem. V případě, který je označen v kroužku došlo k nedostatečné teplotní stabilizaci osoby před měřením, neboť kolega nestíhal příchod na stanovaný čas experimentu a do klimatické komory tedy doběhl. Jelikož však bylo teplé počasí, byl přehřátý, za dobu stabilizace nedosáhl neutrálního pocitu a jeho měření v kabině tak bylo nutné vyřadit. Měření pak opakovat o den později (v grafu 3 repeat) a zde již začínal z teplotně stabilizovaného výchozího stavu.



Obr. 179 – Porovnání výsledků predikce a hodnocení tepelného pocitu pokusnými osobami. Vlevo: Výsledky pro letní případ. Vpravo: Výsledky pro zimní případ. Zdroj archiv autora.

Bylo ověřeno, že predikce tepelného pocitu manekýnem vykazuje dobrou shodu s hodnocením pokusných osob v letním případě měřeném v létě, ale nižší shodu v zimním případě, který je měřen v horkém létě. Pravděpodobně se projevila sezónní aklimatizace (viz kap. 2.5 a 3.1.1), kdy chladnější podmínky ve voze byly hodnocené jako komfortní, vzhledem k horkému letnímu počasí panujícím venku.

6.4 Ověření metody, rozvoj metod a speciální aplikace

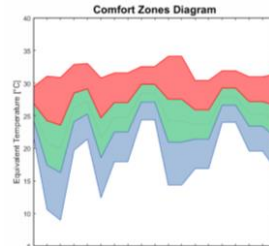
6.4.1 Kalibrace tepelného manekýna pro měření ekvivalentní teploty

Definice ekvivalentní teploty a senzorů pro její měření je uvedena v kapitole 4.2, popis vývoje diagramu komfortních zón a postup tvorby konkrétních diagramů je uveden v kapitole 5.2.2. Posledním krokem je kalibrace příslušného měřicího zařízení (senzoru, tepelného manekýna), která je uvedena v této kapitole. Provázání jednotlivých kroků metody je uvedeno na Obr. 180.

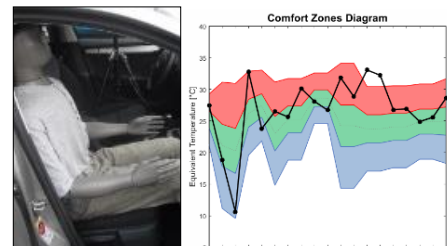
1 kalibrace - klimatická komora



2 vyhodnocení kalibrace – tvorba DKZ



3 měření v reálném prostředí – zakreslení t_{eq} do DKZ



$$h_{cal} = \frac{\dot{Q}_{RC}}{t_{surf} - t_a}, I_{cal} = 1/h_{cal}$$

$$t_{eq, zones} = t_{surf} - I_{cal} \cdot (a + b \cdot MTV_{zone})$$

$$t_{eq} = t_{surf} - I_{cal} \cdot \dot{Q}_{RC}$$

Obr. 180 – Postup vyhodnocení tepelného komfortu pomocí tepelného manekýna. Převzato z [363].

Pro vyhodnocení ekvivalentní teploty pomocí tepelných manekýnů regulovaných na konstantní povrchovou teplotu (CST – viz kapitola 4.2.2) je nezbytné získat kalibrační konstanty h_{cal} [W/m^2K] nebo I_{cal} [m^2K/W], které se poté využívají ve výpočtu ekvivalentní teploty dle vzorců (4.15 a 4.16). Manekýn v oblečení a poloze v jaké bude posléze probíhat měření (viz Obr. 181), je umístěn do prostředí klimatické komory, které odpovídá požadavkům na ekvivalentní prostředí $t_a = \bar{t}_r = t_{eq}$ a v prostředí se vyskytuje pouze proudění vyvolané přirozenou konvekcí. Aby toto bylo splněno, je většinou nutné vypnout systém aktivního řízení teploty, který cirkuluje vzduch z komory přes tepelné výměníky. Pro zachování stability teploty v průběhu měření je tedy nezbytné, aby komora měla dostatečný objem a teplotní setrvačnost, což například komora VUT-FSI svým objemem $155 m^3$ splňuje. Jako výhodné se také doporučují kalibrační teploty blízké teplotám v okolí komory (typicky $24 ^\circ C$), aby tepelné zisky/ztráty z komory do okolí byly minimální a tím byly minimální i změny teploty v průběhu kalibrace [251], [252]. Pokud je potřeba manekýna kalibrovat při zapnuté komoře kvůli udržení stabilní teploty, je nezbytné jej umístit do kalibračního boxu $2 \times 2 \times 2 m$, kde jsou stěny tvořené propustnou netkanou textilií, což umožňuje výměnu vzduchu s okolím, ale zároveň zabraňuje zvýšenému proudění vzduchu v kalibračním boxu (viz Obr. 182 vlevo). Prostředí v box je monitorováno čidly pro měření teploty a rychlosti proudění vzduchu viz Tabulka 9 a Obr. 182 vpravo.

Tabulka 9 - Metody využití při kalibraci tepelného manekýna pro měření ekvivalentní teploty

Metoda		Díličí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	t, RH, w_a, t_{eq}
Využití tepelného manekýna	ANO	Newton
Zapojení pokusných osob	NE	-
Modelování prostředí	NE	-



Obr. 181 - Fotodokumentace různých oděvů a poloh při kalibraci manekýna přímo v klimatické komoře. Zleva: Stojící manekýn bez oděvu a vlasů, sedící manekýn lehký letní oděv, letní oděv. Vše kalibrace přímo v klimatické komoře bez boxu. Zdroj archiv autora.

Klimakomora a manekýn jsou na začátku kalibrace zapnuty a vyčká se na ustálení teploty v komoře ($+24\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) i na povrchu manekýna ($+34\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Klimakomora VUT-FSI je většinou teplotně ustálená 3 hodiny po spuštění a tato doba je dostatečná i pro ustálení tepelného manekýna. Pokud je manekýn v kalibračním boxu, je ponechána klimakomora v provozu celou dobu kalibrace, v případě kalibrace bez boxu je vypnuta a cca 20 min po vypnutí lze začít logovat data pro kalibraci. Časový odstup mezi vypnutím a logováním je ponechán z důvodu vyrovnání případných drobných rozdílů teplot vzniklých po vypnutí technologie komory. Celý proces měření se odehrává s vypnutými halogenovými světly pro orientaci, neboť ty narušují souměrnost radiačního okolí v komoře. Doba logování je cca 20 min, kdy cílem je shomáždit alespoň 60 vzorků (jeden vzorek za 20 s) $\dot{Q}_{RC,segment}$ hustot tepelných toků z jednotlivých segmentů manekýna, t_{surf} teplot povrchu segmentů manekýna (měla by být $+34\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a t_a teplot okolního vzduchu. Následně jsou kalibrační hodnoty vypočteny postupem, jak je uvedeno na schématu Obr. 183.



Obr. 182 – Vlevo: Kalibrační box 2 x 2 x 2 metry pro kalibraci manekýna postavený v klimatické komoře. Vpravo: Kalibrace manekýna s oděvem pro jarní/podzimní podmínky (tričko, košile, kalhoty, uzavřené boty), poloha v sedě. Zdroj archiv autora.

Kalibrační měření s letním oděvem
 $t_a = t_r = 24.5 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $t_{surf} = 34 \text{ } ^\circ\text{C}$



Měrné tepelné
toky pro
všechny části



$$h_{cal} = \frac{\dot{Q}_{RC,segment}}{t_{surf} - t_a}$$



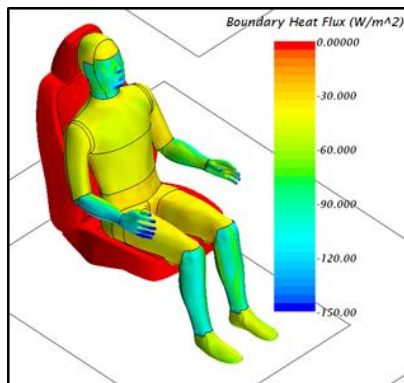
Ukázka výpočtu h_{cal} pro vybrané části

Tvář: $h_{cal} = \frac{86.7}{34 - 24.5} = 9.2 \text{ [W/m}^2\text{K]}$

Hrud': $h_{cal} = \frac{44.7}{34 - 24.5} = 4.7 \text{ [W/m}^2\text{K]}$

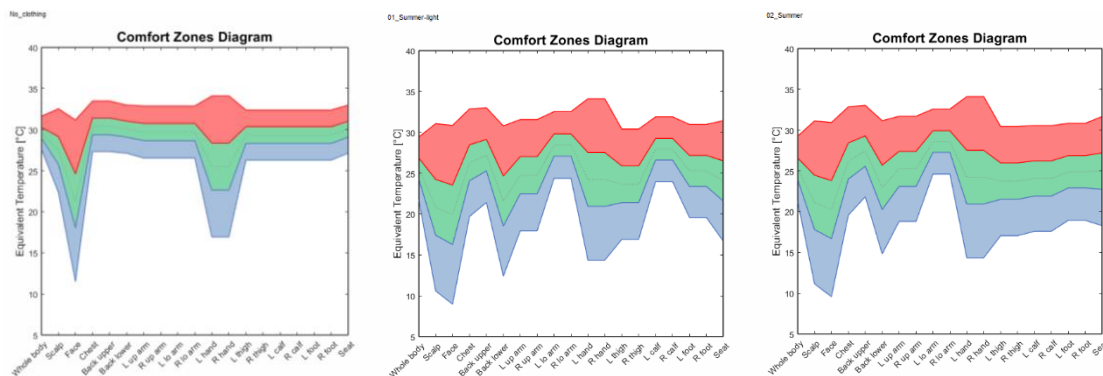
Obr. 183 – Schématický postup výpočtu kalibračních koeficientů h_{cal} pro část manekýna Tvář (Face) a Hrud' (Chest). Převzato a upraveno z [363].

Stejný postup je aplikován při virtuální kalibraci manekýna pro CFD simulaci. Pro zadání okrajových podmínek na segmentech manekýna, které jsou pokryté oděvem se použijí hodnoty změřené na reálném manekýnovi (použito například v projektu iSPACE viz 6.2.2), nicméně se od celkového kalibračního tepelného odporu l_{cal} musí odečíst tepelný odpor mezní vrstvy l_a , který je v CFD simulaci řešen prostřednictvím CFD metod. Zadává se tedy vlastní tepelný odpor oděvu viz rovnice 3.3. kapitola 3.2.3. Části bez oděvu jsou definovány povrchovou teplotou $+34 \text{ } ^\circ\text{C}$. Nastavení výpočetní sítě a všech modelů fyziky musí být v kalibrační simulaci stejné jako poté v dalších simulacích.



Obr. 184 - Virtuální manekýn založený na geometrii a parametrech skutečného tepelného manekýna Newtona. Příklad virtuální kalibrace pro metodu t_{eq} + Diagram komfortních zón. Vyšší tepelné toky na předloktí a holeních jsou způsobeny absencí oděvu, neboť manekýn je „virtuálně oblečen“ do trička s krátkým rukávem, kraťasů a bot.

Po získání kalibračních koeficientů h_{cal} nebo l_{cal} je možné dle rovnice 5.2.17 a postupu uvedeném v kapitole 5.2.2 vygenerovat diagram komfortních zón pro příslušný oděv a pozici manekýna. Příklady diagramů pro oděvy z Obr. 181 jsou uvedeny na Obr. 185. Regresní koeficienty a a b nutné pro výpočet v rovnici 5.2.17 jsou uvedeny na Obr. 186. Hodnoty konstant pro část Scalp mají být $a = 127$, $b = -70$, dle předběžných výsledků korekcí konstant, které byly publikovány v článku Fišer, Pokorný, Fojtlín a kol. na konferenci 12i3m St.Gallen, Švýcarsko 2017 [314].



Obr. 185 – Diagramy komfortních zón získané z kalibrace v klimatické komoře VUT-FSI. Zleva: bez oděvu a vlasů – stojící, lehký letní oděv, letní oděv.

Zone	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²	<i>R</i> _T (m ² K/W)LS	<i>R</i> _T (m ² K/W)EW	<i>I</i> _T (clo) LS	<i>I</i> _T (clo) EW	<i>t</i> _{eq} (°C) neutral LS	<i>t</i> _{eq} (°C) neutral EW
Whole body	43.8	-13.3	0.97	0.160	0.300	1.03	1.94	21.0	21.4
Scalp	65.5	-33.9	0.89	0.199	0.193	1.28	1.25	21.0	21.4
Face	65.5	-33.9	0.89	0.199	0.193	1.28	1.25	25.7	17.2
Chest	36.1	-20.5	0.95	0.229	0.464	1.48	2.99	25.7	17.2
Up. back	36.1	-20.5	0.95	0.229	0.464	1.48	2.99	24.8	15.4
L U arm	43.0	-21.1	0.94	0.215	0.432	1.39	2.79	24.8	15.4
R U arm	43.0	-21.1	0.94	0.215	0.432	1.39	2.79	28.8	15.4
L L arm	43.0	-21.1	0.94	0.122	0.432	0.79	2.79	28.8	15.4
R L arm	43.0	-21.1	0.94	0.122	0.432	0.79	2.79	24.1	21.6
L hand	84.9	-57.2	0.98	0.117	0.146	0.75	0.94	24.1	21.6
R hand	84.9	-57.2	0.98	0.117	0.146	0.75	0.94	28.0	20.4
L thigh	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	20.4
R thigh	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	20.4
L calf	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	20.4
R calf	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	24.0
L foot	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.215	0.83	1.39	28.0	24.0
R foot	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.215	0.83	1.39	24.2	19.0
Lo. back	39.5	-19.5	0.93	0.247	0.381	1.59	2.46	24.2	19.0
Seat	39.5	-19.5	0.93	0.247	0.381	1.59	2.46	21.0	21.4

Obr. 186 – Koeficienty, tepelné odpory oděvů a neutrální ekvivalentní teploty pro výpočet letního a zimního diagramu komfortních zón dle článku Nilsson 2007 [312]. Hodnoty konstant *a* a *b* pro část Scalp nejsou uvedeny korektně.

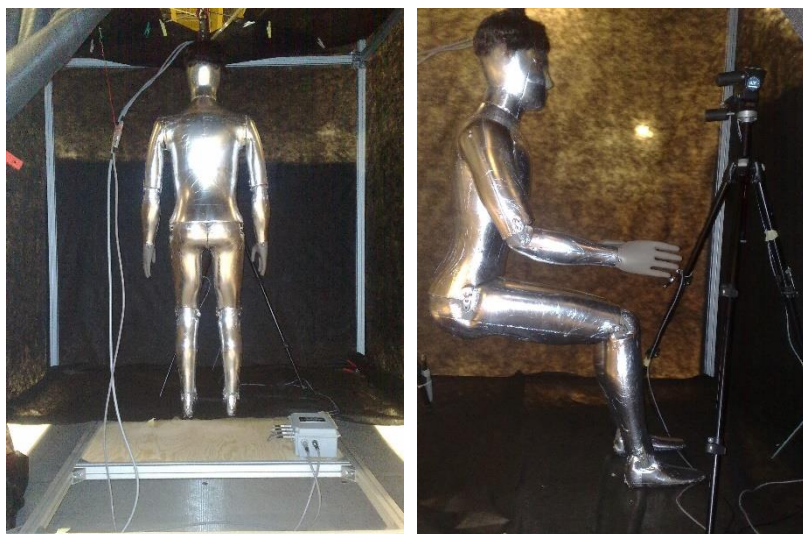
6.4.2 Součinitele přenosu tepla radiací a konvekcí z lidského těla

Stejně tak jako kalibrací získané koeficienty h_{cal} pro metodu diagramu komfortních zón jsou pro tepelné indexy a termofyziologické modely nezbytné koeficienty součinitelů přenosu tepla konvekcí h_c a radiací h_r . Součinitele byly v minulosti vícekrát měřeny, ale nikdy nebyl v publikaci přesněji uveden kompletní rozbor nejistot měření. V rámci své diplomové práce M. Fojtlín provedl opakované měření těchto součinitelů, za využití metod uvedených v Tabulka 10. Pro měření byl využit kalibrační box umístěný v klimakomoře VUT-FSI (viz Obr. 182 vlevo) a tepelný manekýn Newton.

Tabulka 10 - Metody využití při stanovení koeficientů přenosu tepla z tepelného manekýna

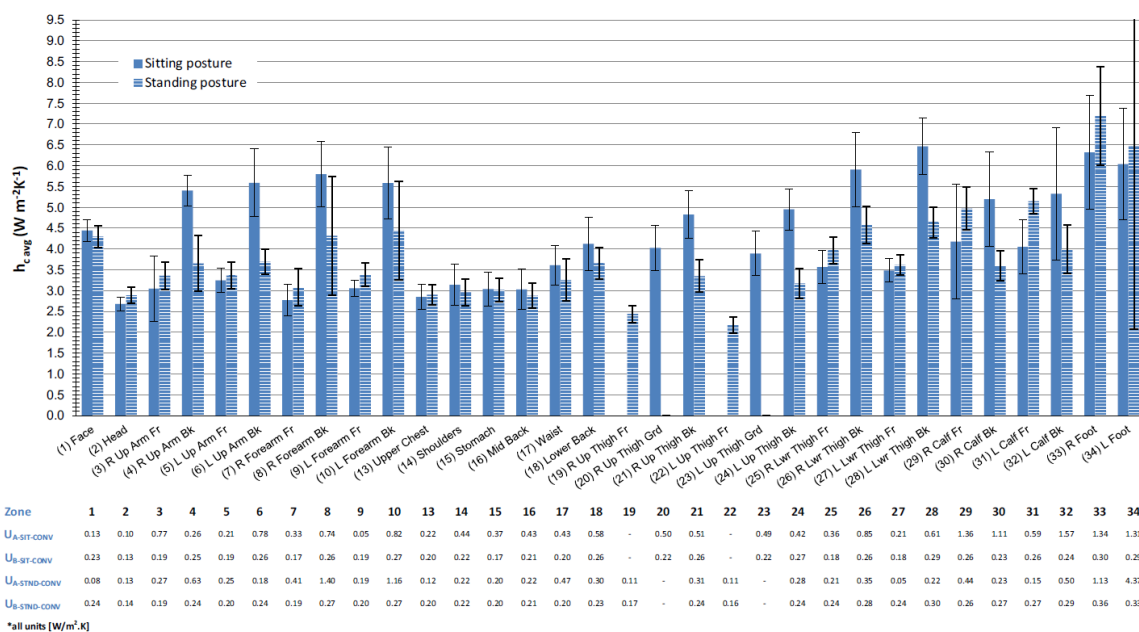
Metoda		Díličí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	<i>t</i> , <i>RH</i> , <i>w_a</i> , <i>t_{eq}</i>
Využití tepelného manekýna	ANO	Newton
Zapojení pokusných osob	NE	-
Modelování prostředí	NE	-

Pro oddělení tepelného toku radiací a konvekcí byl využit postup s potlačením přenosu tepla radiací, pomocí pokrytí povrchu manekýna fólií s nízkou emisivitou (viz Obr. 187).



Obr. 187 – Pokrytí manekýna fólií s nízkou emisivitou (Alobal) pro potlačení přenosu tepla radiací z povrchu manekýna. Alobal byl k povrchu manekýna přichycen pomocí tenké vrstvy lepidla na zubní protězy, což zajistilo dobrou přilnavost k povrchu a po měření nedestruktivní sejmutí fólie. Zdroj archiv autora.

Měření součinitelů přenosu tepla bylo provedeno pro polohu vsedě a vestoje. Výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 188. Podrobný popis měření a výsledků je uveden v diplomové práci FOJTLÍN, M. Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekcí z povrchu tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D., podrobný rozbor nejistot měření pak v článku Fojtlín, Fišer, Jícha 2016 [91].



Obr. 188 – Součinitele přenosu tepla konvekcí z jednotlivých segmentů manekýna pro polohu vestoje a vsedě. Chybové úsečky představují standardní nejistotu s 95% intervalem spolehlivosti. Převzato z [91].

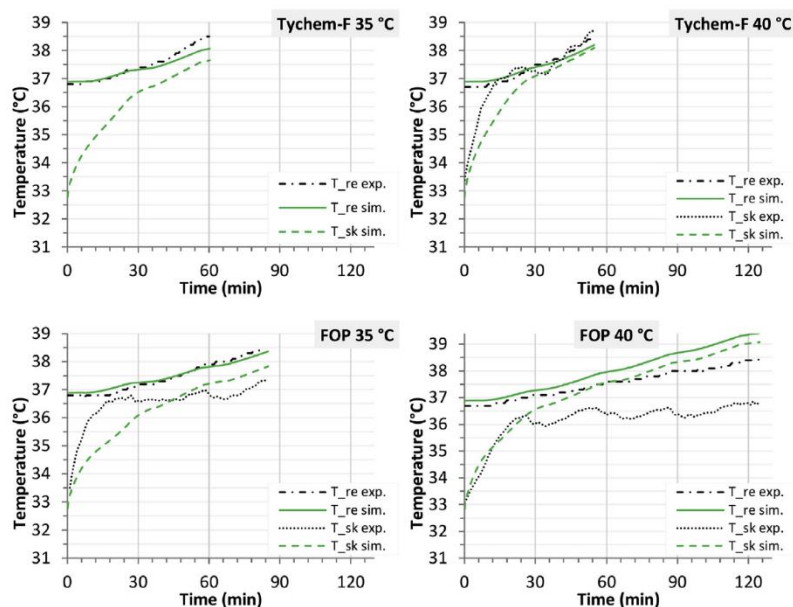
6.4.3 Pilotní ověření predikce FMTK modelu na ochranných oděvech

Pracoviště autora disponuje implementací Fialova modelu označovanou jako FMTK model (Fialův model tepelného komfortu) [88], 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. Jelikož má Laboratoř tepelného managementu navázanu spolupráci se SÚJCHBO (Státní Ústav pro Jadernou, Chemickou a Biologickou obranu), který provozuje termofyziologickou komoru v Příbrami, byl první testovací případ zaměřen na ověření predikce termofyziologické reakce lidského těla na zátěž ve speciálních ochranných oděvech pro zásahy v kontaminovaných prostředích. Použité metody jsou uvedeny v Tabulka 11.

Tabulka 11 - Metody využití při pilotní ověření predikce modelu FMTK

Metoda		Díličí metody a parametry
Měření prostředí sondami	ANO	t, RH, w_a, t_{re}
Zapojení pokusných osob	ANO	1 osoba
Modelování prostředí	ANO	Parametry okolí
Modelování termofyziologie	ANO	FMTK model

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_{ct} 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 klimakomoře. Ukázka výsledků simulaci je uvedena na Obr. 189.



Obr. 189 – Porovnání tělesné teploty T_{re} a průměrné teploty pokožky T_{sk} pro dva druhy ochranných oděvů a teploty okolí +35 a +40 °C. Převzato z [88].

Podrobné výsledky pilotní verifikační studie FMTK modelu jsou publikovány v článku Pokorný, Fišer, Fojtlín a kol. 2017 [88].

7 SHRUTÍ POZNATKŮ

Tepelný komfort (kapitola 2)

- Z faktů a informací uvedených v první kapitole vyplývá, že tepelný komfort je nejen výsledkem vyrovnané tepelné bilance mezi tělem a okolím (viz kap. 2.3), ale je také závislý na celkovém sensorickém vjemu tepelného stavu těla a jeho zpracování vyššími mozgovými funkcemi, které interagují s dalšími vjemy, pocity a náladami. Při hodnocení kvality tepelného stavu prostředí z hlediska tepelného komfortu nelze tedy opomíjet faktory z oblastí termofyziologie, zvláště pak fenomén alliestézie (viz kap. 2.1), či vyšší citlivosti těla na chladné stimuly (viz kap. 2.2).
- V oblasti psychologie a kulturních aspektů (viz kap. 2.4) vyplývá, že vyhodnocení tepelných vjemů vyššími mozgovými funkcemi je ovlivněno celou řadou aktuálních vlivů (emoce, nálada, kontrola nad prostředím), i dlouhodobého nastavení daného člověka z pohledu aktuálního zdraví, věku, jeho/jejích zvyklostí (preferenze, očekávání, návyky) a kultury, z které konkrétní osoba pochází (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 (viz kap. 2.6). Tento stav je důsledkem obrovské rozmanitosti povolání, činností a druhů zátěže, kterou mohou lidé vykonávat. Je tedy velmi obtížné definovat obecně platné kauzální závislosti mezi parametry prostředí a kvalitou práce. Jako vhodnější se jeví obrácený postup a to zaměřit se na podmínky a parametry 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, jejichž konstrukce a použití je blíže uvedeno v kapitole 2.5. Z nejnovějšího výzkumu provedeného v 26 zemích celého světa (s 21 jazyky) vyplývá, že metoda je kontextuálně závislá a je nezbytné pečlivé zhodnocení a zvážení všech faktorů, které mohou mít na hodnocení vliv (jazyk, klimatická oblast, roční období a sezónní aklimatizace, dlouhodobá aklimatizace). Zkušenosti z autorovy praxe tyto závěry podporují, viz příklad měření HVAC v Indii (kapitole 2.5) nebo měření prostředí v kabině vozidla pro letní a zimní podmínky (viz kapitola 6.3.2).
- 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. Elegantně to lze vyjádřit anglosaským "Use it, or lose it" (co není trénováno, zakrní). Nízké využití funkcí termoregulačních mechanismů vede k tvorbě nevyváženého poměru energetických zásob v těle a k podpoře rozvoje civilizačních chorob jako je nadváha a cukrovka II. typu (viz kap. 2.6).

Adaptační strategie a úpravy prostředí (kapitola 3)

- V oblasti adaptability je prvním stupněm adaptabilita pasivní vyplývající z genetické a funkční výbavy lidského těla, které definují rozsahy a limity základních adaptačních mechanismů v oblasti aklimatizace na teplo, chlad, hypoxii vyvolanou nízkým tlakem vzduchu a rychlé změny tlaku okolí. Tyto limity jsou pro drtivou většinu populace hraniční a zároveň definují, v jakém rozsahu parametrů prostředí může člověk dlouhodobě existovat (viz kapitola 3.1).
- Vytváření a užití oděvů patří do oblasti aktivní adaptability (viz. kap 3.2). Velký důraz je v popisu kladen na typické místní oděvy pro různá extrémní prostředí, neboť ty dle názoru autora nejlépe ilustrují významnost této inovace pro rozšíření člověka do všech klimatických pásem. Konstrukce a materiály těchto oděvů také mohou být inspirací pro možný rozvoj v oblasti ochranných oděvů pro speciální a nebezpečná prostředí. Je také rozebrán fenomén termoregulačního chování související s modifikací oděvu, který je základním způsobem, jak se přizpůsobit změnám vnitřního prostředí v průběhu dne a celého roku. Pokud je takové chování potlačováno (např. předepsaný dress code), je nutné striktnější řízení prostředí, což často vede k vyšší spotřebě HVAC systémů. V podkapitole jsou také popsány způsoby měření základních parametrů definujících přenos tepla a vlhkosti oděvem.
- Významnou kreativní adaptací člověka na nepříznivé prostředí byl vynález a rozvoj přístřeší/obydlí a systémů pro úpravu prostředí v nich (vytápění, větrání, chlazení - HVAC), jejichž popis je soustředěn v kapitole 3.3. Prostřednictvím systémů jsou modifikovány parametry vnitřního prostředí, které mají hlavní vliv na přenos tepla z lidského těla (viz. kap. 2.3). Je zmíněn vývoj těchto systémů a především cílových hodnot parametrů, které mají ve vnitřním prostředí udržovat. Vzhledem k pozorovanému vývoji těchto parametrů v rozvinutých zemích světa v posledních 50ti letech se zdá, že prostředí, které lidé vytvářejí, se nápadně podobá prostředí, v kterém se pravděpodobně vyvinuli předci současného moderního člověka. Lidé tedy ve svých obydlích pravděpodobně rekonstruují prostředí, které je pro ně „přirozené“ [148].
- V kapitole jsou také blíže popsány speciální ochranné pomůcky pro nepříznivá prostředí, které vytvářejí prostředí vhodné pro člověka pouze v bezprostřední blízkosti těla a kombinují technologii oděvů a HVAC systémů (viz. kap 3.3.3.). Autor je řadí do oblasti kreativní adaptability, neboť plně využívají konstrukční a kreativní možnosti současné techniky.
- Při vytváření kvalitního vnitřního prostředí s nízkou energetickou náročností je také potřeba zohlednit fakt, že je třeba hledat optimum a ne vždy "více komfortu s využitím méně energie, je lépe". Jak uvádí [19], [116] "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 svého diskomfortu".

Hodnocení tepelného stavu prostředí na základě měření (kapitola 4)

- Měření je základním postupem kvantifikace a v kapitole jsou popsány čtyři oblasti k získání dat o tepelných účincích okolního prostředí na tepelnou bilanci lidského těla a evaluaci tepelného komfortu. Jsou rozebrány metody založené jak na přístrojích (čidla, sondy, senzory, tepelní manekýni), tak na dotazování pokusných osob. Metodologicky je kapitola založena na popisu praktických příkladů a zkušeností autora s propojením do odborné literatury.
- V kapitole Měření parametrů tepelného stavu okolního prostředí (viz kap. 4.1), je popis zaměřen na praktické aspekty měření parametrů prostředí s ohledem na využití dat v hodnocení tepelného stavu prostředí. Kapitola se nezabývá podrobně popisem jednotlivých metod měření, ale praktickými aspekty v oblasti využití techniky tak, aby získaná data byla relevantní pro oblast hodnocení lidského tepelného komfortu (viz např. měření intenzity turbulence a fluktuací rychlosti proudění).
- Kapitola Měření pomocí aktivních sond a senzorů (viz kap. 4.2) 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 textově obsáhlé podkapitole Hodnocení na základě měření tepelnými manekýny (viz kap. 4.3) je velká část věnována popisu historického i současného vývoje tepelných manekýnů, protože v českojazyčné literatuře neexistuje žádný takto ucelený popis této speciální měřicí techniky. Jednotlivé linky popisu, je postupný rozvoj potřeb v oblasti termofyziologie a aplikace jejích poznatků na výzkum a vývoj speciálních oděvů a HVAC systémů. Je zde také akcentován hlavní důvod pro vznik tepelných manekýnů a to sice: získání exaktních dat o přenosu tepla z těla člověka v extrémních prostředích bez rizika či nebezpečí pro pokusné osoby.
- Kapitola Hodnocení na základě dotazování pokusných osob (viz kap. 4.4) obsahuje poznatky, znalosti a zkušenosti autora s prováděním experimentů s pokusnými osobami. Na začátku je popsán systém prof. Goldmana ohledně úrovně komplexnosti testů při zapojení pokusných osob a dále je uveden popis doporučené laboratorní praxe, tak jak ji aplikuje Laboratoř tepelného managementu, FSI, VUT v Brně. Za posledních deset let však oblast etiky výzkumu s pokusnými osobami zaznamenala velký vývoj a je vysoce pravděpodobné, že standardy se budou i nadále vyvíjet. Je také nutné poznamenat, že tato oblast je velmi vzdálená od běžných metod využívaných ve strojním inženýrství a tomu také odpovídala míra neznalosti autora v roce 2015, kdy byly realizovány první experimenty. Hned od začátku však byl aplikován přístup, že testovací protokol každého měření musí být nejprve odzkoušen na znalé osobě a teprve poté je možné experimentu vystavovat další pokusné osoby (viz např. Obr. 67 vlevo). Tato kapitola je zařazena v práci, aby byla základním vodítkem pro budoucí práce a nebylo potřeba opět zjišťovat vhodný postup metodou „pokus-omyl“.

Hodnocení tepelného stavu prostředí na základě modelování (kapitola 5)

- Kapitola Modelování okolního prostředí (viz kap. 5.1) představuje základní přehled přístupů k modelování vnitřního prostředí z pohledu účelu a komplexity simulačních postupů. Jedná se o základní přehled metod s bližším zaměřením na 1D bilanční metody demonstrované na příkladu modelu kabiny vozidla.
- Základní modely v oblasti modelování termofyziologie jsou Indexy tepelných účinků okolí na lidské tělo (viz kap. 5.2.1), kterými lze na základě parametrů vnějšího prostředí 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 (viz kap. 5.2.3) je doposud nejšířěji validovaným modelem tepelného komfortu, nicméně z výrazným omezením 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 výhodou je však snadná implementace do CFD simulací (viz kap. 5.2.2). Model adaptivního komfortu (viz kap. 5.2.4.) je založen na konceptu adaptace člověka na dynamické změny prostředí s využitím termoregulačního chování spojeného s oděvem, možností individuální kontroly prostředí a započtením pozitivního efektu aklimatizace na tepelný komfort v průběhu dne. Model je speciálně vyvinut pro budovy s přirozeným větráním a integruje všechny současné poznatky v oblasti tepelného komfortu. Samotná myšlenka adaptivního komfortu je však více než modelem spíše souhrnnou metodikou a konceptem pro návrh, provoz a užívání systémů pro kontrolu vnitřního prostředí v budovách provozovaných v místech s teplým až horkým klimatem.
- Sofistikované termofyziologické modely a modely komfortu (viz kap. 5.2.5) představují dnes nejvíce rozvinuté modely, které zahrnují simulaci lidské termofyziologie, termoregulačních systémů a simulaci jejich dopadů na vnímání tepelného pocitu a komfortu a to nejen ve statických, ale hlavně v dynamických podmínkách změny prostředí či zátěže organismu. V modelech jsou aplikovány poznatky termofyziologie získané v posledních cca sto letech a vývoj modelů prošel v posledních cca 20ti letech bouřlivým rozvojem. 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, které ovlivňují tepelný pocit a tepelný komfort v dynamickém prostředí 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 modelů termofyziologie a lokálního tepelného komfortu lze tyto modely v současné době doporučit pouze pro výzkumné účely, neboť jen složitost a komplexnost vstupů a okrajových podmínek je činí jen obtížně využitelnými v běžné vývojové praxi.

Příklady využití postupů v experimentální a technické praxi (kapitola 6)

- Kapitola je věnována názorným ukázkám využití metod popsaných v práci při experimentální a technické praxi.
- Ukázky jsou vybrány tak, aby názorně ilustrovaly využití metod při řešení problémů z oblasti Virtuálního navrhování (6.1), Vývojových experimentů a testování inovací (6.2), Hodnocení existujících technologií či prostředí (6.3) a Rozvoje metod či speciálních aplikací (6.4). Je také uvedena návaznost experimentů na publikační výstupy.
- Využití simulačních metod je vhodné především v případech, že testovaná technologie či systém ještě není vyroben či není běžně dostupný. Simulační postupy lze také doporučit tam, kde je testovaný systém potřeba podrobit celé řadě experimentů, které by v reálném prostředí byly obtížně realizovatelné, zdlouhavé a finančně velmi nákladné. Vždy je však potřeba zapojit alespoň základní validační metody a alespoň dílčí ověření výsledků simulací daty z reálného experimentu (viz kap. 6.1).
- Z uvedených příkladů lze vyvodit, že je vždy potřeba volit vhodný experimentální postup pro konkrétní řešený problém a mít vždy patřičně rozmyšlený návrh experimentu (viz kap. 4.4.1). 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 (viz kap. 6.2).
- 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 (viz kap. 6.3).
- 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 (viz kap. 6.3.1).
- Nedílnou součástí chodu laboratoře je opakované ověřování nejistot měření a další rozvoj měřicích metod (viz kap. 6.4). Bez této práce nelze udržet kvalitu experimentů na odpovídající úrovni ani zajistit další rozvoj laboratoře.

8 ZÁVĚR

Předkládaná habilitační práce obsahuje popis metod, které jsou využitelné pro výzkum, vývoj a testování HVAC systémů pro vnitřní prostředí jako jsou prostory budov či např. kabin vozidel. Shrnuje poznatky a postupy, které využil a rozvinul team Laboratoře tepelného managementu, FSI, VUT v Brně pod vedením autora k experimentům a řešení různých projektů ve výzkumné a konstrukční praxi. Cílem autora práce bylo shrnout současné poznatky v oboru hodnocení tepelného komfortu ve vnitřních prostředích a to nejen z pohledu čistě technicistních přístupů a metod, ale i z pohledu historického vývoje člověka, kulturních aspektů, psychologie, vývoje oděvu a termofyziologie. Celá práce je tedy pojatá jako syntéza z více oblastí s tím, že se v práci prolíná popis aktuálního stavu poznání, současný stav řešení, metody měření a doporučená praxe. U měřicích a simulačních metod nebylo vzhledem k šíři problematiky do detailu uváděno, jakým způsobem konkrétní metody fungují, ale spíše byl kladen důraz na důležité parametry a vlastnosti metod při jejich využití v oblasti hodnocení tepelného komfortu. Velmi detailně však byl popsán vývoj a účel specifických měřicích systémů pro měření ekvivalentní teploty a systémů tepelných manekýnů, neboť podobně ucelený text v české literatuře dosud chyběl.

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. 64). 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 sensorického 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 (viz kap. 5.2.5).
- 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 (teplota vzduchu (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 alliestézie 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 (viz kap. 2.4, 5.2.4). 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 (viz kap. 2.6).
- 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 [19], [116] "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 (viz kap. 4.3.3). 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 (viz kap. 2.4).

- Úkolem vysokých škol je pak předat budoucím projektantům/tekám 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.

9 LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ

- [1] M. Taleghani, M. Tenpierik, S. Kurvers, and A. Van Den Dobbelen, "A review into thermal comfort in buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.05.050.
- [2] K. Błazejczyk *et al.*, "An introduction to the Universal thermal climate index (UTCI)," *Geogr. Pol.*, vol. 86, no. 1, pp. 5–10, 2013, doi: 10.7163/GPol.2013.1.
- [3] P. Bröde, D. Fiala, B. Lemke, and T. Kjellstrom, "Estimated work ability in warm outdoor environments depends on the chosen heat stress assessment metric," *Int. J. Biometeorol.*, Apr. 2017, doi: 10.1007/s00484-017-1346-9.
- [4] H. Djamila, "Indoor thermal comfort predictions: Selected issues and trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.076.
- [5] M. N. Cramer and O. Jay, "Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress," *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, vol. 196. pp. 3–13, 2016, doi: 10.1016/j.autneu.2016.03.001.
- [6] C. Jeong and A. Di Rienzo, "Adaptations to local environments in modern human populations," *Current Opinion in Genetics and Development*, vol. 29. pp. 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, and X. Huang, "Driving performance in cold, warm, and thermoneutral environments," *Appl. Ergon.*, vol. 34, no. 6, pp. 597–602, 2003, doi: 10.1016/S0003-6870(03)00055-3.
- [9] S. Milosevic, "Drivers' fatigue studies," *Ergonomics*, vol. 40, no. 3, pp. 381–389, 1997, doi: 10.1080/001401397188215.
- [10] D. W. Hensley, A. E. Mark, J. R. Abella, G. M. Netscher, E. H. Wissler, and K. R. Diller, "50 Years of Computer Simulation of the Human Thermoregulatory System," *J. Biomech. Eng.*, vol. 135, no. 2, 2013, doi: 10.1115/1.4023383.
- [11] C. Buratti and P. Ricciardi, "Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms: Correlation between experimental data and mathematical models," *Build. Environ.*, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.001.
- [12] A. K. Mishra and M. Ramgopal, "A comparison of student performance between conditioned and naturally ventilated classrooms," *Build. Environ.*, vol. 84, pp. 181–188, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.008.
- [13] M. Zwolińska and A. Bogdan, "Impact of the medical clothing on the thermal stress of surgeons," *Appl. Ergon.*, vol. 43, no. 6, pp. 1096–1104, 2012, doi: 10.1016/j.apergo.2012.03.011.
- [14] A. Pourshaghaghyan and M. Omidvari, "Examination of thermal comfort in a hospital using PMV-PPD model," *Appl. Ergon.*, vol. 43, no. 6, pp. 1089–1095, 2012, doi: 10.1016/j.apergo.2012.03.010.
- [15] P. Ricciardi and C. Buratti, "Thermal comfort in the Frascini theatre (Pavia, Italy): Correlation between data from questionnaires, measurements, and mathematical model," *Energy Build.*, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.03.055.
- [16] F. Zhang *et al.*, "The effects of higher temperature setpoints during summer on office workers' cognitive load and thermal comfort," *Build. Environ.*, vol. 123, pp. 176–188, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.06.048.
- [17] J. Kim, R. de Dear, C. C?ndido, H. Zhang, and E. Arens, "Gender differences in office occupant perception of indoor environmental quality (IEQ)," *Build. Environ.*, vol. 70, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.08.022.
- [18] H. Sokolová and 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.
- [19] C. Croitoru, I. Nastase, F. Bode, A. Meslem, and A. Dogeanu, "Thermal comfort models for indoor spaces and vehicles - Current capabilities and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44. pp. 304–318, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.105.
- [20] Ashrae, *ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*. 2009.

- [21] M. Indraganti and D. Boussaa, "An adaptive relationship of thermal comfort for the Gulf Cooperation Council (GCC) Countries: The case of offices in Qatar," *Energy Build.*, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.087.
- [22] R. Escandón, R. Suárez, and 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.
- [23] B. Ozarisoy, "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.
- [24] A. S. Dili, M. A. Naseer, and T. Zacharia Varghese, "Passive control methods for a comfortable indoor environment: Comparative investigation of traditional and modern architecture of Kerala in summer," *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 653–664, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.11.006.
- [25] "Komfort," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., p. 1, 2021.
- [26] S. Freud, *Beyond the Pleasure Principle*. LONDON, VIENNA: INTL. PSYCHO-ANALYTICAL, 1922.
- [27] Milan Nakonečný, *Motivace chování*, 3., přepra. TRITON, 2015.
- [28] T. W. Marezki, "Transcultural Psychiatry by ARI KIEV, New York: The Free Press, and London: Collier-Macmillan Limited, 1972," *Transcult. Psychiatry*, vol. 9, no. 2, pp. 91–96, 1972, doi: 10.1177/136346157200900201.
- [29] A. H. Maslow, "Motivation and Personality (Third Edition)," in *Addison Wesley Longman, Inc.*, 1954.
- [30] T. Parkinson and R. De Dear, "Thermal pleasure in built environments: Physiology of alliesthesia," *Build. Res. Inf.*, 2015, doi: 10.1080/09613218.2015.989662.
- [31] "Kvalita," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–3, 2021.
- [32] ASHRAE Standard 55, "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI approved)," *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, vol. 2004. p. 30, 2013.
- [33] R. J. de Dear and G. S. Brager, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference," in *ASHRAE Transactions*, 1998.
- [34] F. Nicol and M. Humphreys, "Maximum temperatures in European office buildings to avoid heat discomfort," *Sol. Energy*, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.07.007.
- [35] Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamics An Engineering Approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [36] M. Schweiker *et al.*, "Challenging the assumptions for thermal sensation scales," *Build. Res. Inf.*, 2017, doi: 10.1080/09613218.2016.1183185.
- [37] T. Peffer, M. Pritoni, A. Meier, C. Aragon, and D. Perry, "How people use thermostats in homes: A review," *Build. Environ.*, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.06.002.
- [38] R. F. Goldman, "Heat Stress in Industrial Protective Encapsulating Garments," in *Protecting Personnel at Hazardous Waste Sites*, 2007, pp. 295–355.
- [39] C. L. Lim, C. Byrne, and J. K. Lee, "Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings," *Ann. Acad. Med. Singapore*, 2008.
- [40] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Principles of heat and mass transfer*. 2013.
- [41] J. Bullock, J. Boyle, and M. Wang, *Physiology*. Philadelphia: LippincottWilliams &Wilkins, 2001.
- [42] P. MATOUŠEK, "Moderní trendy v léčbě varixů dolních končetin," Masarykova univerzita, Lékařská fakulta, Brno, 2006.
- [43] 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.
- [44] C. Huizenga, Z. Hui, and E. Arens, "A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments," *Build. Environ.*, 2001, doi: 10.1016/S0360-1323(00)00061-5.
- [45] E. G. Hanna and P. W. Tait, "Limitations to thermoregulation and acclimatization challenge human adaptation to global warming," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, no. 7, 2015, doi: 10.3390/ijerph120708034.

- [46] K. Wilke, A. Martin, L. Terstegen, and S. S. Biel, "A short history of sweat gland biology," *International Journal of Cosmetic Science*, vol. 29, no. 3. pp. 169–179, 2007, doi: 10.1111/j.1467-2494.2007.00387.x.
- [47] A. Bouchama and J. P. Knochel, "H Eat S Troke," *N Engl J Med*, vol. 346, no. 25, pp. 1978–1988, 1978, doi: 10.1056/NEJMra011089.
- [48] Y. Epstein and W. O. Roberts, "The pathophysiology of heat stroke: an integrative view of the final common pathway," *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, vol. 21, no. 6. pp. 742–748, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01333.x.
- [49] L. R. Leon and B. G. Helwig, "Heat stroke: Role of the systemic inflammatory response," *J. Appl. Physiol.*, vol. 109, no. 6, pp. 1980–1988, 2010, doi: 10.1152/jappphysiol.00301.2010.
- [50] M. Luo *et al.*, "High-density thermal sensitivity maps of the human body," *Build. Environ.*, vol. 167, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106435.
- [51] A. A. Romanovsky, "Thermoregulation: Some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system," *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, vol. 292, no. 1. 2007, doi: 10.1152/ajpregu.00668.2006.
- [52] H. Zhang, "Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments," UNIVERSITY OF CALIFORNIA, 2003.
- [53] H. H., "Thermoreception and temperature regulation," *Gen. Pharmacol. Vasc. Syst.*, vol. 13, no. 2, p. 179, Jan. 1982, doi: 10.1016/0306-3623(82)90086-6.
- [54] N. Gerrett, Y. Ouzzahra, and 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, pp. 1285–1301.
- [55] D. Filingeri, H. Zhang, and E. A. Arens, "Thermosensory micromapping of warm and cold sensitivity across glabrous and hairy skin of male and female hands and feet," *J. Appl. Physiol.*, 2018, doi: 10.1152/jappphysiol.00158.2018.
- [56] 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.
- [57] N. Gerrett, Y. Ouzzahra, B. Redortier, T. Voelcker, and G. Havenith, "Female thermal sensitivity to hot and cold during rest and exercise," *Physiol. Behav.*, vol. 152, pp. 11–19, 2015, doi: 10.1016/j.physbeh.2015.08.032.
- [58] Y. Ouzzahra, G. Havenith, and B. Redortier, "Regional distribution of thermal sensitivity to cold at rest and during mild exercise in males," *J. Therm. Biol.*, vol. 37, no. 7, pp. 517–523, 2012, doi: 10.1016/j.jtherbio.2012.06.003.
- [59] Y. Ouzzahra, "Regional thermal sensitivity to cold at rest and during exercise," Loughborough University, 2012.
- [60] M. Hernández, C. L. Fox, and C. García-Moro, "Fueguian cranial morphology: The adaptation to a cold, harsh environment," *Am. J. Phys. Anthropol.*, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1096-8644(199705)103:1<103::AID-AJPA7>3.0.CO;2-X.
- [61] E. P. Visser and G. J. Dias, "A case for reduced skin sensation in high latitude prehistoric Polynesians," *Ann. Hum. Biol.*, 1999, doi: 10.1080/030144699282831.
- [62] J. L. M. Hensen, "Literature review on thermal comfort in transient conditions," *Build. Environ.*, 1990, doi: 10.1016/0360-1323(90)90004-B.
- [63] H. A. M. Daanen, "Finger cold-induced vasodilation: a review," *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 89, no. 5, pp. 411–426, Jun. 2003, doi: 10.1007/s00421-003-0818-2.
- [64] D. Gelb, "Hypothermia," in *Encyclopedia of the Neurological Sciences*, 2014.
- [65] B. DE, "Physiologic Considerations in Detection of Hypoxemia during Vasoconstriction: Radial Artery Compared to Various Pulse Oximeter Sensor Sites," *J. Lung, Pulm. Respir. Res.*, 2017, doi: 10.15406/jlpr.2017.04.00137.
- [66] G. Havenith, A. Fogarty, R. Bartlett, C. J. Smith, and V. Ventenat, "Male and female upper body sweat distribution during running measured with technical absorbents," in *European Journal of Applied Physiology*, 2008, vol. 104, no. 2, pp. 245–255, doi: 10.1007/s00421-007-0636-z.

- [67] R. Relf, A. Willmott, M. S. Flint, L. Beale, and N. Maxwell, "Reliability of a wearable sweat rate monitor and routine sweat analysis techniques under heat stress in females," *J. Therm. Biol.*, vol. 79, pp. 209–217, 2019, doi: 10.1016/j.jtherbio.2018.12.019.
- [68] D. Gagnon and C. G. Crandall, "Sweating as a heat loss thermoeffector," in *Handbook of Clinical Neurology*, vol. 156, 2018, pp. 211–232.
- [69] M. Guan, S. Annaheim, J. Li, M. Camenzind, A. Psikuta, and R. M. Rossi, "Apparent evaporative cooling efficiency in clothing with continuous perspiration: A sweating manikin study," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 137, pp. 446–455, 2019, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.017.
- [70] A. D. Flouris *et al.*, "Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis," *Lancet Planet. Heal.*, vol. 2, no. 12, pp. e521–e531, 2018, doi: 10.1016/S2542-5196(18)30237-7.
- [71] K. Owen, "Excessive Sweating: Are Patients Suffering Unnecessarily?," *J. Nurse Pract.*, vol. 12, no. 1, pp. 35–40, 2016, doi: 10.1016/j.nurpra.2015.09.015.
- [72] W. van Marken Lichtenbelt, M. Hanssen, H. Pallubinsky, B. Kingma, and L. Schellen, "Healthy excursions outside the thermal comfort zone," *Build. Res. Inf.*, vol. 45, no. 7, pp. 819–827, 2017, doi: 10.1080/09613218.2017.1307647.
- [73] W. Van Marken Lichtenbelt, "Brown adipose tissue and the regulation of nonshivering thermogenesis," *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, vol. 15, no. 6, pp. 547–552, 2012, doi: 10.1097/MCO.0b013e3283599184.
- [74] S. Gesta, Y. H. Tseng, and C. R. Kahn, "Developmental Origin of Fat: Tracking Obesity to Its Source," *Cell*, 2007, doi: 10.1016/j.cell.2007.10.004.
- [75] M. J. Vosselman, G. H. E. J. Vijgen, B. R. M. Kingma, B. Brans, and W. D. Van Marken Lichtenbelt, "Frequent extreme cold exposure and brown fat and cold-induced thermogenesis: A study in a monozygotic twin," *PLoS One*, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0101653.
- [76] B. CANNON and J. NEDERGAARD, "Brown Adipose Tissue: Function and Physiological Significance," *Physiol. Rev.*, 2004, doi: 10.1152/physrev.00015.2003.
- [77] M. E. Lidell, "Brown Adipose Tissue in Human Infants," in *Handbook of Experimental Pharmacology*, 2018, pp. 107–123.
- [78] K. Parsons, "Human Thermal Comfort," in *Human Thermal Comfort*, 2019.
- [79] J. T. English, S. K. Patel, and M. J. Flanagan, "Association of Pheochromocytomas with Brown Fat Tumors," *Radiology*, 2014, doi: 10.1148/107.2.279.
- [80] A. A. J. J. Van Der Lans *et al.*, "Cold acclimation recruits human brown fat and increases nonshivering thermogenesis," *J. Clin. Invest.*, 2013, doi: 10.1172/JCI68993.
- [81] W. van Marken Lichtenbelt, "Human brown fat and obesity: Methodological aspects," *Frontiers in Endocrinology*, vol. 2, no. OCT. 2011, doi: 10.3389/fendo.2011.00052.
- [82] K. Lundgren-Kownacki, N. Martínez, B. Johansson, A. Psikuta, S. Annaheim, and K. Kuklane, "Human responses in heat – comparison of the Predicted Heat Strain and the Fiala multi-node model for a case of intermittent work," *J. Therm. Biol.*, vol. 70, pp. 45–52, 2017, doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.05.006.
- [83] M. E. Symonds, G. Farhat, P. Aldiss, M. Pope, and H. Budge, "Brown adipose tissue and glucose homeostasis – the link between climate change and the global rise in obesity and diabetes," *Adipocyte*, 2018, doi: 10.1080/21623945.2018.1551689.
- [84] B. R. Kingma, A. J. Frijns, L. Schellen, and W. D. van Marken Lichtenbelt, "Beyond the classic thermoneutral zone," *Temperature*, vol. 1, no. 2, pp. 142–149, 2014, doi: 10.4161/temp.29702.
- [85] F. Haman and D. P. Blondin, "Shivering thermogenesis in humans: Origin, contribution and metabolic requirement," *Temperature*, vol. 4, no. 3, pp. 217–226, Jul. 2017, doi: 10.1080/23328940.2017.1328999.
- [86] S. F. Morrison, "Central neural control of thermoregulation and brown adipose tissue," *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 2016, doi: 10.1016/j.autneu.2016.02.010.
- [87] K. Nakamura, "Central circuitries for body temperature regulation and fever," *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.*, 2011, doi: 10.1152/ajpregu.00109.2011.
- [88] J. Pokorný *et al.*, "Verification of Fiala-based human thermophysiological model and its application to

- protective clothing under high metabolic rates,” *Build. Environ.*, vol. 126, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.017.
- [89] M. Fojtlín, A. Psikuta, J. Fišer, R. Toma, S. Annaheim, and M. Jícha, “Local clothing properties for thermophysiological modelling: Comparison of methods and body positions,” *Build. Environ.*, vol. 155, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.026.
- [90] Y. Cengel and A. Ghajar, “Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications + EES DVD for Heat and Mass Transfer,” in *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*, 2010.
- [91] M. Fojtlín, J. Fišer, and M. Jícha, “Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 77, 2016, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.015.
- [92] Y. Yu, J. Liu, K. Chauhan, R. de Dear, and J. Niu, “Experimental study on convective heat transfer coefficients for the human body exposed to turbulent wind conditions,” *Build. Environ.*, vol. 169, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106533.
- [93] Y. Zhu, M. Luo, Q. Ouyang, L. Huang, and B. Cao, “Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments: A review,” *Build. Environ.*, vol. 91, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.03.032.
- [94] I. Nastase, C. Croitoru, and C. Lungu, “A Questioning of the Thermal Sensation Vote Index Based on Questionnaire Survey for Real Working Environments,” in *Energy Procedia*, 2016, vol. 85, pp. 366–374, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.263.
- [95] L. Schellen, M. G. L. C. Loomans, B. R. M. Kingma, M. H. de Wit, A. J. H. Frijns, and W. D. van Marken Lichtenbelt, “The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: Coupling with the indoor environment and thermal sensation,” *Build. Environ.*, vol. 59, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.07.010.
- [96] V. Ramachandran, A. Loya, K. P. Shah, S. Goyal, E. A. Hansoti, and A. C. Caruso, “Myers-Briggs type indicator in medical education: A narrative review and analysis,” *Heal. Prof. Educ.*, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.hpe.2019.03.002.
- [97] M. Nakonečný, *Základy psychologie*. Praha: Academia, 1998.
- [98] P. Hartl and H. Hartlová, *Psychologický slovník*. Praha: Portál, 2000.
- [99] “Nálada,” *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [100] M. Kim, S. C. Chong, C. Chun, and 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.
- [101] H. Wang and L. Liu, “Experimental investigation about effect of emotion state on people’s thermal comfort,” *Energy Build.*, vol. 211, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109789.
- [102] R. De Dear, “Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: Alliesthesia,” *Build. Res. Inf.*, vol. 39, no. 2, 2011, doi: 10.1080/09613218.2011.552269.
- [103] M. André, R. De Vecchi, and R. Lamberts, “User-centered environmental control: a review of current findings on personal conditioning systems and personal comfort models,” *Energy and Buildings*, vol. 222, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110011.
- [104] K. B. Velt and H. A. M. Daanen, “Thermal sensation and thermal comfort in changing environments,” *J. Build. Eng.*, 2017, doi: 10.1016/j.job.2017.02.004.
- [105] B. N. Balmain, S. Sabapathy, M. Louis, and N. R. Morris, “Aging and Thermoregulatory Control: The Clinical Implications of Exercising under Heat Stress in Older Individuals,” *Biomed Res. Int.*, vol. 2018, pp. 1–12, Aug. 2018, doi: 10.1155/2018/8306154.
- [106] H. A. M. Daanen and J. A. Herweijer, “Effectiveness of an indoor preparation program to increase thermal resilience in elderly for heat waves,” *Build. Environ.*, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.04.010.
- [107] A. Mendes *et al.*, “Indoor Air Quality and Thermal Comfort—Results of a Pilot Study in Elderly Care Centers in Portugal,” *J. Toxicol. Environ. Heal. Part A*, vol. 76, no. 4–5, pp. 333–344, Feb. 2013, doi: 10.1080/15287394.2013.757213.
- [108] P. Vogelaere and C. Pereira, “Thermoregulation and aging,” *Rev. Port. Cardiol.*, vol. 24, no. 5, pp. 747–61, May 2005.

- [109] S. P. Corgnati, M. Filippi, and S. Viazzo, "Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort," *Build. Environ.*, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.10.027.
- [110] "Majetnický efekt," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [111] M. Luo *et al.*, "The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and implication," *Build. Environ.*, vol. 95, 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.07.015.
- [112] Y. Zhu, Q. Ouyang, B. Cao, X. Zhou, and J. Yu, "Dynamic thermal environment and thermal comfort," *Indoor Air*, vol. 26, no. 1, pp. 125–137, Feb. 2016, doi: 10.1111/ina.12233.
- [113] F. Zhang *et al.*, "The effects of higher temperature setpoints during summer on office workers' cognitive load and thermal comfort," *Build. Environ.*, vol. 123, pp. 176–188, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.06.048.
- [114] M. Frontczak and 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.
- [115] M. Tarantini, G. Pernigotto, and A. Gasparella, "A Co-Citation Analysis on Thermal Comfort and Productivity Aspects in Production and Office Buildings," *Buildings*, vol. 7, no. 4, p. 36, 2017, doi: 10.3390/buildings7020036.
- [116] J. F. Nicol and 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.
- [117] 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.
- [118] X. Zhou, Q. Ouyang, Y. Zhu, C. Feng, and 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.
- [119] Y. Kurazumi, E. Kondo, K. Fukagawa, Y. Yamato, K. Tobita, and T. Tsuchikawa, "Effects of Outdoor Thermal Environment upon the Human Responses," *Engineering*, vol. 11, no. 08, 2019, doi: 10.4236/eng.2019.118034.
- [120] E. L. Krü and P. H. T. Zannin, "Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms," *Build. Environ.*, 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.01.030.
- [121] M. K. Singh, R. Ooka, H. B. Rijal, S. Kumar, A. Kumar, and S. Mahapatra, "Progress in thermal comfort studies in classrooms over last 50 years and way forward," *Energy and Buildings*. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.01.051.
- [122] A. De Raeve, P. Van Ransbeeck, J. Cools, B. Vandersmissen, S. Vasile, and M. Vermeulen, "Towards Virtual Engineering of Clothing Comfort." Tampere University of Technology, Tampere, 2014.
- [123] J. Wang, Z. Wang, R. de Dear, M. Luo, A. Ghahramani, and B. Lin, "The uncertainty of subjective thermal comfort measurement," *Energy Build.*, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.09.041.
- [124] "Quantification (science)," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [125] "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, p. 20, 2007.
- [126] "ČSN ISO 10551 Ergonomie tepelného prostředí - Stanovení vlivů tepelného prostředí použitím subjektivních posuzovacích stupnic." Český normalizační institut, Praha, p. 24, 1997.
- [127] M. Schweiker *et al.*, "Evaluating assumptions of scales for subjective assessment of thermal environments – Do laypersons perceive them the way, we researchers believe?," *Energy Build.*, vol. 211, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109761.
- [128] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.018.
- [129] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.015.
- [130] A. C. Roussac, J. Steinfeld, and R. De Dear, "Revisiting summer setpoint strategies for conventional air

- conditioned office buildings," *Strategies*, pp. 1–8, 2011.
- [131] H. Zhang *et al.*, "Using footwarmers in offices for thermal comfort and energy savings," *Energy Build.*, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.086.
- [132] H. Zhu, H. Wang, Z. Liu, D. Li, G. Kou, and C. Li, "Experimental study on the human thermal comfort based on the heart rate variability (HRV) analysis under different environments," *Sci. Total Environ.*, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.208.
- [133] P. Antoniadou and 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.
- [134] L. Lan, P. Wargocki, D. P. Wyon, and Z. Lian, "Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance," *Indoor Air*, vol. 21, no. 5, 2011, doi: 10.1111/j.1600-0668.2011.00714.x.
- [135] P. Roelofsen, "The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement," *Journal of Facilities Management*, vol. 1, no. 3. 2002, doi: 10.1108/14725960310807944.
- [136] R. Kosonen and F. Tan, "Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index," *Energy Build.*, vol. 36, no. 10 SPEC. ISS., 2004, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.06.021.
- [137] K. L. Jensen, J. Toftum, and P. Friis-Hansen, "A Bayesian Network approach to the evaluation of building design and its consequences for employee performance and operational costs," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 3, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.04.008.
- [138] L. Lan, P. Wargocki, and Z. Lian, "Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort," in *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, no. 5, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.001.
- [139] L. G. Berglund, R. R. Gonzales, and A. P. Gagge, "Predicted human performance decrement from thermal discomfort and ET*," in *Proceedings of the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 1990, pp. 215–220.
- [140] O. Seppänen, W. J. Fisk, and D. Faulkner, "Control of temperature for health and productivity in offices," in *ASHRAE Transactions*, 2005, vol. 111 PART 2.
- [141] D. Clements-Croome and L. Baizhan, "Productivity and Indoor Environment," *Proc. Heal. Build.*, vol. 1, 2000.
- [142] P. Abdul and G. Awan, "Impact of working environment on employee 's productivity : A case study of Banks and Insurance Companies in Pakistan," *Eur. J. Bus. Manag.*, vol. 7, no. 1, 2015.
- [143] V. M. L. W., "Role of brown adipose tissue in human energetics and obesity-a link with the indoor climate," *Obes. Rev.*, vol. 15, pp. 18–19, 2014, doi: 10.1111/obr.12147.
- [144] J. C. Hansen, A. P. Gilman, and J. Ø. Odland, "Is thermogenesis a significant causal factor in preventing the 'globesity' epidemic?," *Med. Hypotheses*, vol. 75, no. 2, pp. 250–256, 2010, doi: 10.1016/j.mehy.2010.02.033.
- [145] "Adaptace," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [146] N. H. Kutílek M., Landgrafová R., *Homo adaptabilis*. Dokořán, 2013.
- [147] I. Gilligan, "The prehistoric development of clothing: Archaeological implications of a thermal model," *J. Archaeol. Method Theory*, vol. 17, no. 1, 2010, doi: 10.1007/s10816-009-9076-x.
- [148] M. G. Just, L. M. Nichols, and R. R. Dunn, "Human indoor climate preferences approximate specific geographies," *R. Soc. Open Sci.*, vol. 6, no. 3, p. 180695, Mar. 2019, doi: 10.1098/rsos.180695.
- [149] K. Schmidt, "Göbekli Tepe, Southeastern Turkey. A Preliminary Report on the 1995-1999 Excavations.," *Paléorient*, 2008, doi: 10.3406/paleo.2000.4697.
- [150] T. Carter, S. Grant, M. Kartal, A. Coşkun, and V. Özkaya, "Networks and Neolithisation: Sourcing obsidian from Körtik Tepe (SE Anatolia)," *J. Archaeol. Sci.*, 2013, doi: 10.1016/j.jas.2012.08.003.
- [151] J. S. Milledge, "The silver hut expedition, 1960-1961," *High Alt. Med. Biol.*, vol. 11, no. 2, 2010, doi: 10.1089/ham.2009.1087.
- [152] T. Furusawa *et al.*, "The Q223R polymorphism in LEPR is associated with obesity in Pacific Islanders," *Hum. Genet.*, vol. 127, no. 3, 2010, doi: 10.1007/s00439-009-0768-9.

- [153] R. L. Minster *et al.*, "A thrifty variant in CREBRF strongly influences body mass index in Samoans," *Nat. Genet.*, vol. 48, no. 9, 2016, doi: 10.1038/ng.3620.
- [154] H. Reddon, Y. Patel, M. Turcotte, M. Pigeyre, and D. Meyre, "Revisiting the evolutionary origins of obesity: lazy versus peppy-thrifty genotype hypothesis," *Obes. Rev.*, vol. 19, no. 11, 2018, doi: 10.1111/obr.12742.
- [155] B. A. Baldwin, "Man and animals in hot environments," *Appl. Anim. Ethol.*, vol. 2, no. 3, 1976, doi: 10.1016/0304-3762(76)90062-6.
- [156] L. S. Curran, J. Zhuang, S. F. Sun, and L. G. Moore, "Ventilation and hypoxic ventilatory responsiveness in Chinese-Tibetan residents at 3,658 m," *J. Appl. Physiol.*, vol. 83, no. 6, 1997, doi: 10.1152/jappl.1997.83.6.2098.
- [157] E. T. Gilbert-Kawai, J. S. Milledge, M. P. W. Grocott, and D. S. Martin, "King of the mountains: Tibetan and sherpa physiological adaptations for life at high altitude," *Physiology*, vol. 29, no. 6, 2014, doi: 10.1152/physiol.00018.2014.
- [158] ASHRAE, *2019 ASHRAE Handbook - HVAC Applications, SI EDITION*. 2019.
- [159] V. Tripathy and R. Gupta, "Growth among Tibetans at high and low altitudes in India," *Am. J. Hum. Biol.*, vol. 19, no. 6, 2007, doi: 10.1002/ajhb.20638.
- [160] S. C. Wood, T. Norboo, M. Lilly, K. Yoneda, and M. Eldridge, "Cardiopulmonary function in high altitude residents of Ladakh," *High Alt. Med. Biol.*, vol. 4, no. 4, 2003, doi: 10.1089/152702903322616191.
- [161] "Barotruma," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [162] F. Wattel, "A history of hyperbaric medicine," in *Handbook on Hyperbaric Medicine*, vol. 9781402044489, 2006.
- [163] "Steel mill," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [164] D. Kodžoman, "The psychology of clothing," *Text. leather Rev.*, vol. 2, no. 2, 2019, doi: 10.31881/tlr.2019.22.
- [165] C. Morgan and R. de Dear, "Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate," *Clim. Res.*, vol. 24, no. 3, 2003, doi: 10.3354/cr024267.
- [166] R. De Dear and G. S. Brager, "The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 45, no. 2, 2001, doi: 10.1007/s004840100093.
- [167] "Inuit clothing," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [168] R. W. Hill *et al.*, "Thermal imaging and physiological analysis of cold-climate caribou-skin clothing," *Arctic*, vol. 73, no. 1, 2020, doi: 10.14430/arctic69909.
- [169] "Alacalufe," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–3, 2021.
- [170] "Inuit," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc.
- [171] "Desert climate," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [172] L. Hes, K. Bal, and M. Boguslawska-Baczek, "Why black clothes can provide better thermal comfort in hot climate than white clothes," in *Fiber Society Spring 2014 Technical Conference: Fibers for Progress*, 2014.
- [173] A. Shkolnik, C. R. Taylor, V. Finch, and A. Borut, "Why do Bedouins wear black robes in hot deserts? [9]," *Nature*, vol. 283, no. 5745, 1980, doi: 10.1038/283373a0.
- [174] "Bedouin," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [175] "Tuareg people," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–6, 2021.
- [176] "Inca Empire," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–15, 2021.
- [177] "Quechua people," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [178] "Mapuche," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–10, 2021.
- [179] "Aztec clothing," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [180] "African Pygmies," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–6, 2021.
- [181] "Arawak," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [182] "Indigenous people of New Guinea," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–3, 2021.
- [183] T. A. Moreira, A. R. A. Colmanetti, and C. B. Tibiriçá, "Heat transfer coefficient: a review of measurement

- techniques," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, no. 6. 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1763-2.
- [184] A. Psikuta, F. Sherif, E. Mert, S. Annaheim, and S. Mandal, "Clothing Air Gaps in Various Postures for Firefighters at Work," in *9th European Conference on Protective Clothing*, 2021, pp. 172–173, doi: 10.13140/RG.2.2.18954.39368.
- [185] "Firefighter," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–11, 2021.
- [186] "Pandemie covidu-19 v Česku," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–10, 2021.
- [187] "Cleanroom," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–6, 2021.
- [188] "Radiation protection," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., p. 6, 2021.
- [189] "Radiation protective textiles for earth and beyond," 2021. [Online]. Available: <https://advancedtextilesource.com/>.
- [190] "Cosmic ray," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [191] "Lead vs Non Lead Radiation Protection Apparel," 2021. [Online]. Available: <https://blog.universalmedicalinc.com/lead-vs-nonlead-radiation-protection-apparel/>.
- [192] I. Holmér, "Thermal manikin history and applications," *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 92, no. 6, 2004, doi: 10.1007/s00421-004-1135-0.
- [193] Z. Lei, "Review of application of thermal manikin in evaluation on thermal and moisture comfort of clothing," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14. 2019, doi: 10.1177/1558925019841548.
- [194] A. P. Gagge, A. C. Burton, and H. C. Bazett, "A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment," *Science (80-)*, vol. 94, no. 2445, 1941, doi: 10.1126/science.94.2445.428.
- [195] J. Švecová, J. Strohmandl, J. Fišer, R. Toma, P. Hajna, and A. Havelka, "A comparison of methods for measuring thermal insulation of military clothing," *J. Ind. Text.*, 2019, doi: 10.1177/1528083719886559.
- [196] 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.
- [197] S. Veselá, A. Psikuta, and A. J. H. Frijns, "Local clothing thermal properties of typical office ensembles under realistic static and dynamic conditions," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 62, no. 12, 2018, doi: 10.1007/s00484-018-1625-0.
- [198] K. Kuklane, C. Gao, F. Wang, and I. Holmér, "Parallel and serial methods of calculating thermal insulation in European manikin standards," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 18, no. 2, 2012, doi: 10.1080/10803548.2012.11076926.
- [199] K. Kuklane, R. Toma, and 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*, vol. 17, no. 9, 2020, doi: 10.3390/ijerph17093074.
- [200] X. Xu *et al.*, "A digital tool for prevention and management of cold weather injuries—Cold Weather Ensemble Decision Aid (CoWEDA)," *Int. J. Biometeorol.*, 2021, doi: 10.1007/s00484-021-02113-0.
- [201] B. Koelblen, A. Psikuta, A. Bogdan, S. Annaheim, and 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.
- [202] F. Fung, C. Gao, L. Hes, and V. Bajzik, "Water vapor resistance measured on sweating thermal manikin and Permetest skin model in the vertical orientation," *Commun. Dev. Assem. Text. Prod.*, vol. 1, no. 1, 2020, doi: 10.25367/cdatp.2020.1.p65-73.
- [203] R. Toma, K. Kuklane, M. Fojtlín, J. Fišer, and 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.
- [204] K. Kuklane and R. Toma, "Validation of iso 9920 clothing item insulation summation method based on an ambulance personnel clothing system," *Ind. Health*, vol. 59, no. 1, 2021, doi: 10.2486/indhealth.2020-0208.
- [205] A. Psikuta, E. Mert, S. Annaheim, and R. M. Rossi, "Local air gap thickness and contact area models for realistic simulation of human thermo-physiological response," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 62, no. 7, 2018,

- doi: 10.1007/s00484-018-1515-5.
- [206] H. Akbari, G. Havenith, and A. Al-Sahhaf, "A database of static clothing thermal insulation and vapor permeability values of non-western ensembles for use in ASHRAE Standard 55, ISO 7730, and ISO 9920: Discussion," *ASHRAE Conference-Papers*, vol. 121. 2015.
- [207] "Emisivita," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [208] M. Fojtlín, J. Fišer, and M. Jícha, "Repeated determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 32 zones thermal manikin," *Extrem. Physiol. Med.*, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.1186/2046-7648-4-S1-A160.
- [209] "Homo floresiensis," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [210] "Cliff Palace," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–3, 2021.
- [211] "Wigwam," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [212] "Burj Khalifa," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [213] "House," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–15, 2021.
- [214] "Aircraft cabin," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–3, 2021.
- [215] "Škoda Octavia," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [216] "Fire," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–6, 2021.
- [217] J. A. J. Gowlett, "The discovery of fire by humans: A long and convoluted process," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 371, no. 1696. 2016, doi: 10.1098/rstb.2015.0164.
- [218] "Control of fire by early humans," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [219] R. Bean, B. Olesen, and K. Kim, "History of Radiant Heating and Cooling Systems (part 1)," *ASHRAE J.*, vol. January, no. January, 2010.
- [220] R. Bean, B. W. Olesen, and K. W. Kim, "Part 2 history of radiant heating & cooling systems," *ASHRAE J.*, vol. 52, no. 2, 2010.
- [221] "Kang bed-stove," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [222] "Ondol," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [223] "Hypocaust," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [224] "Stove," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [225] K. Dimitriou and P. Kassomenos, "A meteorological analysis of PM10 episodes at a high altitude city and a low altitude city in central Greece – The impact of wood burning heating devices," *Atmos. Res.*, vol. 214, 2018, doi: 10.1016/j.atmosres.2018.08.014.
- [226] C. Reche *et al.*, "Biomass burning contributions to urban aerosols in a coastal Mediterranean City," *Sci. Total Environ.*, vol. 427–428, 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.012.
- [227] M. A. A. Mohamed, "Traditional Ways of Dealing with Climate in Egypt," *Seventh Int. Conf. Sustain. Archit. Urban Dev. (SAUD 2010)*, no. January 2010, 2010.
- [228] "Evaporative cooler," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–5, 2021.
- [229] "Windcatcher," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–5, 2021.
- [230] "Frederic Tudor," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [231] "Oliver Evans," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [232] "Jacob Perkins," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–3, 2021.
- [233] "John B. Gorrie," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [234] "John Gorrie Ice Machine Museum," *atlasobscura.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.atlasobscura.com/places/john-gorrie-ice-machine-museum>.
- [235] "Willis H. Carrier," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [236] "W. H. Carrier - history," *williscarrier.com*. [Online]. Available: <http://www.williscarrier.com>.
- [237] F. DRKAL, "K vývoji klimatizace," *Větrání, vytápění, Instal.*, vol. 1, no. 2004, pp. 13–16, 2004.

- [238] E. L. Olsen and Q. Chen, "Energy consumption and comfort analysis for different low-energy cooling systems in a mild climate," *Energy Build.*, vol. 35, no. 6, 2003, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00164-0.
- [239] "World population," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–6, 2021.
- [240] "World energy consumption," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [241] "Thermometer," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–8, 2021.
- [242] J. Biddle, "Explaining the spread of residential air conditioning, 1955-1980," *Explor. Econ. Hist.*, vol. 45, no. 4, 2008, doi: 10.1016/j.eeh.2008.02.004.
- [243] A. K. Mishra, M. G. L. C. Loomans, and 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.
- [244] R. F. Goldman, "The four 'Fs' of clothing comfort," *Elsevier Ergon. B. Ser.*, vol. 3, no. C, 2005, doi: 10.1016/S1572-347X(05)80050-3.
- [245] I. Sahta, I. Baltina, J. Blums, and V. Jurkans, "The control of human thermal comfort by the smart clothing," *SHS Web Conf.*, vol. 10, 2014, doi: 10.1051/shsconf/20141000040.
- [246] Z. Wang and M. Luo, "The Effect of a Low-Energy Wearable Thermal Device on Human Comfort," *15th Conf. Int. Soc. Indoor Air Qual. Clim.*, 2017.
- [247] S. Mondal, "Phase change materials for smart textiles - An overview," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 11–12, 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.08.009.
- [248] 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.*, vol. 169, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106571.
- [249] P. O. Fanger, *Thermal Comfort - Analysis and Application in Environmental Engineering*. Copenhagen, 1970.
- [250] M. Fojtlín, J. Fišer, J. Pokorný, A. Povalač, T. Urbanec, and M. Jícha, "An innovative HVAC control system: Implementation and testing in a vehicular cabin," *J. Therm. Biol.*, vol. 70, 2017, doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.04.002.
- [251] "ČSN EN ISO 14505-2 - Ergonomie tepelného prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty." Český normalizační institut, Praha, p. 28, 2007.
- [252] H. O. Nilsson, "Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models," University of Gävle, 2004.
- [253] I. Simova, R. A. Angelova, D. Markov, R. Velichkova, and P. Stankov, "Thermal Manikins-General Features and Applications," in *Proceedings of the 2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications, EFEA 2021*, 2021, doi: 10.1109/EFEA49713.2021.9406231.
- [254] T. Dehne, P. Lange, A. Volkmann, D. Schmeling, M. Konstantinov, and J. Bosbach, "Vertical ventilation concepts for future passenger cars," *Build. Environ.*, vol. 129, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.024.
- [255] P. Lange, A. Westhoff, D. Schmeling, and T. Dehne, "Low-cost thermal manikin – A competitive instrument to simulate thermal loads and to determine thermal passenger comfort," in *12th International Manikin and Modelling Meeting*, 2018, pp. 27–28, doi: 10.5281/zenodo.1404483.
- [256] 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*, vol. 78, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.115.
- [257] F. Wang, "Measurements of clothing evaporative resistance using a sweating thermal manikin: An overview," *Industrial Health*, vol. 55, no. 6, 2017, doi: 10.2486/indhealth.2017-0052.
- [258] "Vzduch," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc.
- [259] N. R. Nair, P. W. McCarthy, A. I. Heusch, and R. Patz, "Testing the reliability of humidity sensors through prolonged measurements traceable to calibration standards," in *17th International Congress of Metrology, CIM 2015*, 2015, doi: 10.1051/metrology/20150015002.
- [260] G. Havenith *et al.*, "Evaporative cooling: Effective latent heat of evaporation in relation to evaporation distance from the skin," *J. Appl. Physiol.*, vol. 114, no. 6, 2013, doi: 10.1152/jappphysiol.01271.2012.
- [261] P. C. Stainback and K. A. Nagabushana, "Review of Hot-Wire Anemometry Techniques and the Range of

- their Applicability for Various Flows," *Electron. J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 167, 1993.
- [262] J. Westerweel, G. E. Elsinga, and R. J. Adrian, "Particle image velocimetry for complex and turbulent flows," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 45. 2013, doi: 10.1146/annurev-fluid-120710-101204.
- [263] M. Roth, "Review of atmospheric turbulence over cities," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 126, no. 564, 2000, doi: 10.1256/smsqj.56408.
- [264] Q. Ouyang, W. Dai, H. Li, and Y. Zhu, "Study on dynamic characteristics of natural and mechanical wind in built environment using spectral analysis," *Build. Environ.*, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.02.008.
- [265] A. K. Melikov, Z. Popiolek, M. C. G. Silva, I. Care, and T. Sefker, "Accuracy limitations for Low-Velocity measurements and draft assessment in rooms," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 6, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10391465.
- [266] F. Cheng, S. Zhang, S. Gao, X. Tian, C. Liao, and Y. Cheng, "Experimental investigation of airflow pattern and turbulence characteristics of stratum ventilation in heating mode," *Build. Environ.*, vol. 186, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107339.
- [267] E. Mayer, "New measurements of the convective heat transfer coefficients: influences of turbulence, mean air velocity and geometry of human body," in *Proceedings of ROOMVENT*, 1992, pp. 263–276.
- [268] J. Hua, Q. Ouyang, Y. Wang, H. Li, and Y. Zhu, "A dynamic air supply device used to produce simulated natural wind in an indoor environment," *Build. Environ.*, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.003.
- [269] H. Lehocká and Z. Jiráček, "Kulový teploměr a jeho vývoj z hlediska hodnocení tepelné pohody organismu," *Tzb Info*, 2005.
- [270] Bílek Tomáš, "Algoritmus výpočtu úhlových faktorů pro přenos tepla radiací," VUT v Brně, 2012.
- [271] L. Hill, O. Griffith, and M. Flack, "The measurement of the rate of heat loss at body temperature by convection, radiation and evaporation," *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 207, pp. 183–220, 1916.
- [272] J. Běťák, "Kulový teploměr a katateploměr," *Automa*, vol. 11, 2005.
- [273] A. F. Dufton, "The eupatheostat," *J. Sci. Instrum.*, vol. 6, no. 8, 1929, doi: 10.1088/0950-7671/6/8/303.
- [274] A. F. Dufton, "The Equivalent Temperature of a Room and its Measurement," *Build. Res. Tech. Pap.*, vol. 13, p. 9, 1932.
- [275] A. F. Dufton, "The Use of Kata-Thermometers for the Measurement of Equivalent Temperature," *J. Hyg. (Lond)*, vol. 33, no. 3, 1933, doi: 10.1017/S0022172400018647.
- [276] T. L. Madsen, B. W. Olesen, and N. K. Christensen, "COMPARISON BETWEEN OPERATIVE AND EQUIVALENT TEMPERATURE UNDER TYPICAL INDOOR CONDITIONS," in *ASHRAE Transactions*, 1984, vol. 90, no. pt 1B.
- [277] T. L. Madsen, B. Olesen, and K. Reid, "NEW METHODS FOR EVALUATION OF THE THERMAL ENVIRONMENT IN AUTOMOTIVE VEHICLES," in *ASHRAE Transactions*, 1986, vol. 92, no. pt 1B.
- [278] P.T. Teknik ApS, "Comfort Sensor - Simple comfort sensor with a downsized expression of the human shape," 2021. [Online]. Available: <https://pt-teknik.dk/products/comfort-sensor/>.
- [279] I. Holmér, "Evaluation of vehicle climate," *Elsevier Ergon. B. Ser.*, vol. 3, no. C, 2005, doi: 10.1016/S1572-347X(05)80046-1.
- [280] E. Mayer, "Presentation of a Dummy REpresenting Suit for Simulation of huMAN heatloss (DRESSMAN)," in *Third International Meeting on Thermal Manikin Testing 3IMM*, 1999, p. 114.
- [281] CABCLIConsortium, *Assessment of thermal climate in operator's cabs*. Uppsala: JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, 1999.
- [282] A. K. Melikov and H. Zhou, "COMPARISON OF METHODS FOR DETERMINING t_{eq} UNDER WELL-DEFINED CONDITIONS," in *Assessment of thermal climate in operator's cabs*, 1999, p. 94.
- [283] H. O. Nilsson, I. Holmér, M. Bohm, and O. Norén, "Definition and theoretical background of the equivalent temperature," in *Assessment of thermal climate in operator's cabs*, 1999, p. 94.
- [284] S. Tanabe, H. Zhang, E. A. Arens, T. L. Madsen, and F. S. Bauman, "Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature," in *ASHRAE Transactions*, 1994, vol. 100, no. 1.
- [285] V. Norrefeldt, "DRESSMAN 2.0," *Fraunhofer IBP Kozkirchen WEB*, 2020. [Online]. Available:

- <https://www.ibp.fraunhofer.de/en/business-units-and-products/product-developments/dressman.html>.
- [286] Comlogo, "Comfortis Messsystem - To measure the equivalent temperature - Installation and operating instructions." Comlogo GmbH, p. 26, 2020.
- [287] J. Fišer, A. Povalač, T. Urbanec, J. Pokorný, and M. Fojtlín, "Implementation of the equivalent temperature measurement system as a part of the vehicle Heating, ventilation and Air-conditioning unit," *Extrem. Physiol. Med.*, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.1186/2046-7648-4-S1-A159.
- [288] "Thermal manikin," *Wikipedia EN*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–4, 2021.
- [289] R. F. Goldman, "Thermal Manikins, Their Origins and Role," in *SIXTH INTERNATIONAL THERMAL MANIKIN AND MODELLING MEETING (6I3M)*, 2006, pp. 3–17.
- [290] R. F. Goldman, "Career perspective: Ralph F. Goldman-military ergonomics," *Extrem. Physiol. Med.*, vol. 2, no. 1, 2013, doi: 10.1186/2046-7648-2-35.
- [291] R. Nayak and R. Padhye, *Manikins for Textile Evaluation*. 2017.
- [292] T. Endrusick, L. Stroschein, and R. Gonzalez, "A brief history of thermal manikin research," 2021. [Online]. Available: <https://thermetrics.com/manikin-history/>.
- [293] H. E. Hanson and R. F. Goldman, "Cold injury in man: a review of its etiology and discussion of its prediction," *Military medicine*, vol. 134, no. 11. 1969, doi: 10.1093/milmed/134.11.1307.
- [294] T. Clarke, "Chauncy, the copper thermal manikin," *Mil. Med.*, vol. 180, no. 6, 2015, doi: 10.7205/MILMED-D-15-00004.
- [295] R. F. Goldman, "Clothing design for comfort and work performance in extreme thermal environments," *Trans. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 36, no. 6, 1974, doi: 10.1111/j.2164-0947.1974.tb01599.x.
- [296] B. W. Olesen, E. Sliwiska, T. L. Madsen, and P. O. Fanger, "EFFECT OF BODY POSTURE AND ACTIVITY ON THE THERMAL INSULATION OF CLOTHING: MEASUREMENTS BY A MOVABLE THERMAL MANIKIN.," in *ASHRAE Transactions*, 1982, vol. 88, no. pt 2.
- [297] *Performance of Protective Clothing: Issues and Priorities for the 21*. 2000.
- [298] K. Umbach, I. Mekjavic, E. Banister, and J. Morrison, "Physiological tests and evaluations models for the optimization of the protective clothing," *Environ. Ergon.*, pp. 139–161, 1988.
- [299] D. P. Wyon, C. Tennstedt, I. Lundgren, and S. Larsson, "A new method for the detailed assessment of human heat balance in vehicles-volvo's thermal manikin, VOLTMAN," in *SAE Technical Papers*, 1985, doi: 10.4271/850042.
- [300] D. P. Wyon, "THERMAL MANIKIN PREDICTION OF DISCOMFORT DUE TO DISPLACEMENT VENTILATIO," *ASHRAE Trans.*, vol. 96, 1990.
- [301] National Research Council, *Soldier protective clothing and equipment: Feasibility of chemical testing using a fully articulated robotic mannequin*. Washington, DC: The National Academies Press, 2008.
- [302] NTNW, "Uncle Wiggly lives on," *NeWs - Measurement technology NW newsletter*, 2003.
- [303] N. M. of H. and Medicine, "Uncle Wiggly - new thermal manikin in NMHM," 2015. [Online]. Available: https://www.medicalmuseum.mil/micrograph/index.cfm/posts/2019/army_thermal_test_manikin.
- [304] A. Psikuta, K. Kuklane, A. Bogdan, G. Havenith, S. Annaheim, and R. M. Rossi, "Opportunities and constraints of presently used thermal manikins for thermo-physiological simulation of the human body," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 60, no. 3, 2016, doi: 10.1007/s00484-015-1041-7.
- [305] "Coppélia - balet," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.
- [306] M. Haegeman, "Coppélia," *Dancing Times*, vol. 99, no. 1185. 2009.
- [307] L. Christensen, "The Coppelius textiles research mannequin with creator Dr. Ben Malstrom." NCSU Libraries, 1987.
- [308] T. L. Madsen, "Development of a breathing thermal manikin," in *Thermal Manikin Testing 3IMM*, 1999, pp. 73–77.
- [309] J. P. Rugh and D. Bharathan, "Predicting human thermal comfort in automobiles," in *SAE Technical Papers*, 2005, doi: 10.4271/2005-01-2008.
- [310] D. Fiala, "Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort," De Montfort University,

- Leicester, 1998.
- [311] V. CANDAS, P. Bröde, and G. Havenith, "Classical Approach to Heat and Vapour Resistance Calculations Cannot Explain Heat Transfer in Wet Clothing," in *SIXTH INTERNATIONAL THERMAL MANIKIN AND MODELLING MEETING (6I3M)*, 2006, pp. 235–247.
- [312] H. O. Nilsson, "Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 12, pp. 4000–4005, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.04.027.
- [313] J. Fišer, "Impact of variance of clothing thermal resistance on comfort zone diagram modification," in *Indoor Air 2014 - 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 2014.
- [314] J. Fišer, J. Pokorný, M. Fojtlín, R. Toma, and M. Jicha, "Equivalent temperature calculation: The issue of total thermal resistance for Face and Scalp parts measured by thermal manikin," in *12th International Manikin and Modelling Meeting*, 2018, doi: 10.5281/zenodo.1404462.
- [315] H. Brohus, "Measurement of indoor air quality by means of a breathing thermal manikin," in *Thermal Manikin Testing 3IMM*, 1999, pp. 83–87.
- [316] N. Mattle, "Use sweating articulated manikin SAM for thermophysiological assessment of complete garments," in *Thermal Manikin Testing 3IMM*, 1999, pp. 100–101.
- [317] M. G. M. Richards, A. Psikuta, and D. Fiala, "Current development of thermal sweating manikins at Empa," in *Thermal Manikins and Modelling*, 2006.
- [318] J. Rugh and J. Lustbader, "Application of a Sweating Manikin Controlled by a Human Physiological Model and Lessons Learned," *Present. 6th Int. Therm. Manikin Model. Meet. 16-18 Oct. 2006, Hong Kong, China*, 2006.
- [319] Thermetrics, "Thermetrics products," 2021. [Online]. Available: <https://thermetrics.com/products/>.
- [320] Thermetrics, "Our 25th Anniversary!," 2011. [Online]. Available: <https://thermetrics.com/our-25th-anniversary/>.
- [321] V. Doležalová, "Propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem člověka," *Vysoké učení technické v Brně*, 2019.
- [322] P. Nielsen, "The importance of a thermal manikin as source and obstacle in full-scale experiments," in *Thermal Manikin Testing 3IMM*, 1999, pp. 89–94.
- [323] "ČSN EN ISO 15831 Oděvy – Fyziologické účinky – Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny." *Český normalizační institut*, p. 16, 2004.
- [324] 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, pp. 8–11.
- [325] M. G. M. Richards and E. A. McCullough, "Revised interlaboratory study of sweating thermal manikins including results from the sweating agile thermal manikin," *J. ASTM Int.*, vol. 2, no. 4, 2005, doi: 10.1520/JAI12109.
- [326] E. A. McCullough, "The use of thermal manikins to evaluate clothing and environmental factors," *Elsevier Ergon. B. Ser.*, vol. 3, no. C, 2005, doi: 10.1016/S1572-347X(05)80064-3.
- [327] R. Burke, S. Rodriguez, and N. Lanci, "Thermetrics and Boston Dynamics team up to create the IPEMS robotic thermal manikin," 2010. [Online]. Available: <https://thermetrics.com/boston-dynamics-ipems-thermal-manikin-thermal-mannequin-thermal-measurement-thermal-testing/>.
- [328] Thermetrics, "ANDI Thermal Manikin," *Thermetrics.com web pages*, 2018. [Online]. Available: <https://thermetrics.com/products/manikin/andi/>.
- [329] K. C. Parsons, "Environmental ergonomics: A review of principles, methods and models," *Appl. Ergon.*, vol. 31, no. 6, 2000, doi: 10.1016/S0003-6870(00)00044-2.
- [330] K. C. Parsons, "The assessment of thermal comfort in vehicles using human subjects," in *Assessment of thermal climate in operator's cabs*, 1999, pp. 25–30.
- [331] B. Koelblen, A. Psikuta, A. Bogdan, S. Annaheim, and R. M. Rossi, "Thermal sensation models: a systematic comparison," *Indoor Air*, vol. 27, no. 3, 2017, doi: 10.1111/ina.12329.
- [332] S. Milgram, "Behavioral Study of obedience," *J. Abnorm. Soc. Psychol.*, vol. 67, no. 4, 1963, doi: 10.1037/h0040525.

- [333] J. M. Burger, "Replicating Milgram: Would People Still Obey Today?," *Am. Psychol.*, vol. 64, no. 1, 2009, doi: 10.1037/a0010932.
- [334] G. Havenith and D. Fiala, "Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress," *Compr. Physiol.*, vol. 6, no. 1, pp. 255–302, 2016, doi: 10.1002/cphy.c140051.
- [335] J. Slabotínský and K. Lunerová, *Fyziologická zátěž člověka při práci v osobních ochranných prostředcích v kontaminovaném prostředí*. Ostrava: Spektrum, 2017.
- [336] B. E. AINSWORTH *et al.*, "2011 Compendium of Physical Activities," *Med. Sci. Sport. Exerc.*, vol. 43, no. 8, pp. 1575–1581, Aug. 2011, doi: 10.1249/MSS.0b013e31821ece12.
- [337] P. Bröde and B. Kampmann, "Accuracy of metabolic rate estimates from heart rate under heat stress—an empirical validation study concerning ISO 8996," *Ind. Health*, vol. 57, no. 5, 2019, doi: 10.2486/indhealth.2018-0204.
- [338] I. O. for Standardization, "ISO 8996:2004 - Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate." International Organization for Standardization, Geneva, p. 24, 2004.
- [339] D. Kopecký, "Ověření predikce metabolismu na základě vykonávané činnosti," *Vysoké učení v Brně*, 2021.
- [340] M. Protsiv, C. Ley, J. Lankester, T. Hastie, and J. Parsonnet, "Decreasing human body temperature in the United States since the industrial revolution," *Elife*, vol. 9, 2020, doi: 10.7554/eLife.49555.
- [341] M. Adhi, R. Hasan, F. Noman, S. F. Mahmood, A. Naqvi, and A.-H. Rizvi, "Range for normal body temperature in the general population of Pakistan.," *J. Pak. Med. Assoc.*, vol. 58, no. 10, pp. 580–4, Oct. 2008.
- [342] E. K. Shakhov, A. A. Mel'nikov, and I. A. Dolgova, "Problems in the measurement of human body temperature," *Med. Tekh.*, no. 1, 2008, doi: 10.1109/51.687959.
- [343] I. Pušnik and A. Miklavec, "Dilemmas in measurement of human body temperature," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 5, 2009, doi: 10.1080/10739140903149061.
- [344] C. R. Monnard *et al.*, "Issues in continuous 24-h core body temperature monitoring in humans using an ingestible capsule telemetric sensor," *Front. Endocrinol. (Lausanne)*, vol. 8, no. JUN, 2017, doi: 10.3389/fendo.2017.00130.
- [345] H. Brinnet and M. Cabanac, "Tympanic temperature is a core temperature in humans," *J. Therm. Biol.*, vol. 14, no. 1, 1989, doi: 10.1016/0306-4565(89)90029-6.
- [346] W. K. Yeoh, J. K. W. Lee, H. Y. Lim, C. W. Gan, W. Liang, and K. K. Tan, "Re-visiting the tympanic membrane vicinity as core body temperature measurement site," *PLoS One*, vol. 12, no. 4, 2017, doi: 10.1371/journal.pone.0174120.
- [347] E. F. J. Ring, H. Mcevoy, A. Jung, J. Zuber, and G. Machin, "New standards for devices used for the measurement of human body temperature," *Journal of Medical Engineering and Technology*, vol. 34, no. 4. 2010, doi: 10.3109/03091901003663836.
- [348] M. Boisson *et al.*, "Intra-operative cutaneous temperature monitoring with zero-heat-flux technique (3M SpotOn) in comparison with oesophageal and arterial temperature," *Eur. J. Anaesthesiol.*, vol. 35, no. 11, pp. 825–830, Nov. 2018, doi: 10.1097/EJA.0000000000000822.
- [349] International Organization for Standardization, "ČSN EN ISO 9886 Ergonomie - Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření nebo plošné metody." Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, p. 24, 2004.
- [350] E. F. J. Ring, "Progress in the measurement of human body temperature," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 17, no. 4, pp. 19–24, 1998, doi: 10.1109/51.687959.
- [351] W. VANMARKENLICHTENBELT *et al.*, "Evaluation of wireless determination of skin temperature using iButtons," *Physiol. Behav.*, vol. 88, no. 4–5, pp. 489–497, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.physbeh.2006.04.026.
- [352] M. Charlton *et al.*, "The effect of constitutive pigmentation on the measured emissivity of human skin," *PLoS One*, vol. 15, no. 11 November, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0241843.
- [353] C. R. Simpson, M. Kohl, M. Essenpreis, and M. Cope, "Near-infrared optical properties of ex vivo human skin and subcutaneous tissues measured using the Monte Carlo inversion technique," *Phys. Med. Biol.*, vol. 43, no. 9, pp. 2465–2478, Sep. 1998, doi: 10.1088/0031-9155/43/9/003.
- [354] "Elektrokardiogram," *Wikipedia CZ*. Wikimedia Foundation, Inc., pp. 1–2, 2021.

- [355] R. Gajda, "Is continuous ECG recording on heart rate monitors the most expected function by endurance athletes, coaches, and doctors?," *Diagnostics*, vol. 10, no. 11, 2020, doi: 10.3390/diagnostics10110867.
- [356] N. Kizilova, "Review of emerging methods and techniques for arterial pressure and flow waves acquisition and analyses," *Int. J. Biosens. Bioelectron.*, vol. 4, no. 4, 2018, doi: 10.15406/ijbsbe.2018.04.00122.
- [357] C. Antzelevitch *et al.*, "The M cell: Its contribution to the ECG and to normal and abnormal electrical function of the heart," *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, vol. 10, no. 8. 1999, doi: 10.1111/j.1540-8167.1999.tb00287.x.
- [358] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *Introduction: Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, vol. 44, no. 2. 2006.
- [359] J. A. Sokolowski and C. M. Banks, *Handbook of Real-World Applications in Modeling and Simulation*. 2012.
- [360] B. P. Zeigler, A. Muzy, and E. Kofman, *Theory of Modeling and Simulation: Discrete Event & Iterative System Computational Foundations*. 2018.
- [361] J. Fišer, J. Pokorný, and M. Jícha, "Prediction of car cabin environment by means of 1D and 3D cabin model," in *EPJ Web of Conferences*, 2012, vol. 25, doi: 10.1051/epjconf/20122502004.
- [362] M. Wetter, "Co-simulation of building energy and control systems with the building controls virtual test bed," *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 4, no. 3, 2011, doi: 10.1080/19401493.2010.518631.
- [363] J. Fišer, J. Pokorný, M. Vantúch, and A. Kapjor, *Větrání a klimatizace - návody k laboratorním úlohám*, Interreg. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2020.
- [364] C. Kučera, "CFD simulace proudění vzduchu v kabině automobilu," Brno University of Technology, 2018.
- [365] M. Fojtlín, M. Planka, J. Fišer, J. Pokorný, and M. Jícha, "Airflow Measurement of the Car HVAC Unit Using Hot-wire Anemometry," in *EPJ Web of Conferences*, 2016, vol. 114, doi: 10.1051/epjconf/201611402023.
- [366] B. C. Ng, I. Z. M. Darus, H. Jamaluddin, and H. M. Kamar, "Application of adaptive neural predictive control for an automotive air conditioning system," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.044.
- [367] C. P. YAGLOU and D. MINARD, "Control of heat casualties at military training centers," *AMA. Arch. Ind. Health*, vol. 16, no. 4, 1957.
- [368] J. Malchaire *et al.*, "Development and validation of the predicted heat strain model," *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 45, no. 2, 2001, doi: 10.1016/S0003-4878(00)00030-2.
- [369] D. Fiala, K. J. Lomas, and M. Stohrer, "Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 45, no. 3, pp. 143–159, 2001, doi: 10.1007/s004840100099.
- [370] K. Katič, R. Li, and W. Zeiler, "Thermophysiological models and their applications: A review," *Building and Environment*, vol. 106. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.06.031.
- [371] K. Blazejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, and B. Tinz, "Comparison of UTCI to selected thermal indices," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0453-2.
- [372] A. P. Gagge, L. P. Herrington, and C. E. A. Winslow, "Thermal interchanges between the human body and its atmospheric environment," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 26, no. 1, 1937, doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a118343.
- [373] "ČSN EN ISO 7730:2005 - Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu." Český normalizační institut, Praha, p. 48, 2006.
- [374] "ČSN EN ISO 7243: Ergonomie tepelného prostředí - Stanovení tepelné zátěže pracovníka podle ukazatele WBGT (teploty mokrého a kulového teploměru)." Český normalizační institut, Praha, p. 32, 2018.
- [375] T. E. Bernard, V. Caravello, S. W. Schwartz, and C. D. Ashley, "WBGT clothing adjustment factors for four clothing ensembles and the effects of metabolic demands," *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 5, no. 1, 2008, doi: 10.1080/15459620701732355.
- [376] W. A. Lotens, "How well does WBGT predict heat strain – Estimates from a mathematical model." Report TNO Institute for Perception, IZF C-12, 1986.
- [377] B. Kopečková, "Multikriteriální nástroj pro analýzu a predikci tepelného stavu člověka," Vysoké učení

- technické v Brně, 2017.
- [378] A. M. West, J. TARRIER, S. Hodder, and G. Havenith, "Sweat distribution and perceived wetness across the human foot: the effect of shoes and exercise intensity," *Ergonomics*, vol. 62, no. 11, 2019, doi: 10.1080/00140139.2019.1657185.
- [379] N. Gerrett, K. Griggs, B. Redortier, T. Voelcker, N. Kondo, and G. Havenith, "Sweat from gland to skin surface: Production, transport, and skin absorption," *J. Appl. Physiol.*, vol. 125, no. 2, 2019, doi: 10.1152/jappphysiol.00872.2017.
- [380] N. A. Coull, A. M. West, S. G. Hodder, P. Wheeler, and G. Havenith, "Body mapping of regional sweat distribution in young and older males," *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 121, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s00421-020-04503-5.
- [381] "ČSN EN ISO 7933 Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného stresu pomocí výpočtu předpovídané tepelné zátěže." Český normalizační institut, Praha, p. 36, 2004.
- [382] D. FIALA *et al.*, "The Universal Thermal Climate Index UTCI Compared to Ergonomics Standards for Assessing the Thermal Environment," *Ind. Health*, vol. 51, no. 1, pp. 16–24, 2013, doi: 10.2486/indhealth.2012-0098.
- [383] P. Bröde *et al.*, "Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0454-1.
- [384] K. Błażejczyk *et al.*, "Principles of the new universal thermal climate index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale," *Misc. Geogr.*, vol. 14, 2010, doi: 10.2478/mgrsd-2010-0009.
- [385] D. Fiala, K. J. Lomas, and M. Stohrer, "A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system," *J. Appl. Physiol.*, vol. 87, no. 5, pp. 1957–1972, Nov. 1999, doi: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.
- [386] A. Psikuta *et al.*, "Validation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0450-5.
- [387] G. Havenith *et al.*, "The UTCI-clothing model," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0451-4.
- [388] D. Fiala, G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann, and G. Jendritzky, "UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, pp. 429–441, May 2012, doi: 10.1007/s00484-011-0424-7.
- [389] T. Kjellstrom, S. Gabrysch, B. Lemke, and K. Dear, "The 'Hothaps' programme for assessing climate change impacts on occupational health and productivity: an invitation to carry out field studies," *Glob. Health Action*, vol. 2, no. 1, p. 2082, Nov. 2009, doi: 10.3402/gha.v2i0.2082.
- [390] R. A. Angelova, "Working in Cold Environment: Clothing and Thermophysiological Comfort," in *Occupational Health*, 2017.
- [391] K. Błażejczyk, "UTCI—10 years of applications," *Int. J. Biometeorol.*, 2021, doi: 10.1007/s00484-021-02174-1.
- [392] O. Potchter, P. Cohen, T. P. Lin, and A. Matzarakis, "Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification," *Science of the Total Environment*, vol. 631–632, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.276.
- [393] D. Lai, D. Guo, Y. Hou, C. Lin, and Q. Chen, "Studies of outdoor thermal comfort in northern China," *Build. Environ.*, vol. 77, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.03.026.
- [394] M. Kuchcik, "Mortality and thermal environment (UTCI) in Poland—long-term, multi-city study," *Int. J. Biometeorol.*, 2020, doi: 10.1007/s00484-020-01995-w.
- [395] B. Kopeckova, J. Pokorný, K. Lunerova, J. Fiser, and M. Jicha, "Case study comparing fiala-based thermophysiological model and PHS index with experimental data to predict heat strain in normal and protective clothing," *J. Meas. Eng.*, vol. 9, no. 1, 2021, doi: 10.21595/jme.2021.21795.
- [396] J. Van Hoof, M. Mazej, and J. L. M. Hensen, "Thermal comfort: Research and practice," *Front. Biosci.*, vol. 15, no. 2, 2010, doi: 10.2741/3645.
- [397] K. Van Der Linden, A. C. Boerstra, A. K. Raue, and S. R. Kurvers, "Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response," *Energy Build.*, vol. 34, no. 7, 2002, doi:

- 10.1016/S0378-7788(01)00144-X.
- [398] J. Guenther and O. Sawodny, "Feature selection and Gaussian Process regression for personalized thermal comfort prediction," *Build. Environ.*, vol. 148, pp. 448–458, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.11.019.
- [399] S. Liu, L. Yin, S. Schiavon, W. K. Ho, and K. V. Ling, "Coordinate control of air movement for optimal thermal comfort," *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 24, no. 8, pp. 886–896, Sep. 2018, doi: 10.1080/23744731.2018.1452508.
- [400] M. A. Humphreys and J. Fergus Nicol, "The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments," in *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, no. 6, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00018-X.
- [401] G. S. Brager and R. J. De Dear, "Thermal adaptation in the built environment: A literature review," *Energy Build.*, vol. 27, no. 1, 1998, doi: 10.1016/S0378-7788(97)00053-4.
- [402] R. J. De Dear and G. S. Brager, "Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55," in *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, no. 6, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.
- [403] K. K. Kraning and R. R. Gonzalez, "A mechanistic computer simulation of human work in heat that accounts for physical and physiological effects of clothing, aerobic fitness, and progressive dehydration," *J. Therm. Biol.*, vol. 22, no. 4–5, 1997, doi: 10.1016/S0306-4565(97)00031-4.
- [404] B. Li, Y. Yang, R. Yao, H. Liu, and Y. Li, "A simplified thermoregulation model of the human body in warm conditions," *Appl. Ergon.*, vol. 59, 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2016.09.010.
- [405] E. H. Wissler, "Comparison of computed results obtained from two mathematical models: a simple 14-node model and a complex 250-node model.," *J. Physiol. (Paris)*, vol. 63, no. 3, 1971.
- [406] B. R. M. Kingma, M. J. Vosselman, A. J. H. Frijns, A. A. van Steenhoven, and W. D. van Marken Lichtenbelt, "Incorporating neurophysiological concepts in mathematical thermoregulation models," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 58, no. 1, 2014, doi: 10.1007/s00484-012-0628-5.
- [407] A. P. Gagge, "A two-node model of human temperature regulation in fortran," in *Bioastronautics Data Book*, J. J. Parker and W. VR, Eds. Washington DC: NASA SP-3006, 1971, pp. 247–262.
- [408] USAIREM, "SCENARIO - Human Thermoregulatory Response Model," *USAIREM WEB*, 2021. [Online]. Available: <https://www.usariem.army.mil/index.cfm/research/products/scenario>.
- [409] D. Fiala and G. Havenith, "Modelling Human Heat Transfer and Temperature Regulation," in *Studies in Mechanobiology, Tissue Engineering and Biomaterials*, vol. 19, 2016.
- [410] E. H. Wissler, "A mathematical model of the human thermal system," *Bull. Math. Biophys.*, vol. 26, no. 2, 1964, doi: 10.1007/BF02476835.
- [411] A. R. Lind, "Effect of individual variation on upper limit of prescriptive zone of climates.," *J. Appl. Physiol.*, vol. 28, no. 1, 1970, doi: 10.1152/jappl.1970.28.1.57.
- [412] H. C. Bazett and B. McGlone, "TEMPERATURE GRADIENTS IN THE TISSUES IN MAN," *Am. J. Physiol. Content*, vol. 82, no. 2, 1927, doi: 10.1152/ajplegacy.1927.82.2.415.
- [413] A. C. Burton, "The Application of the Theory of Heat Flow to the Study of Energy Metabolism," *J. Nutr.*, vol. 7, no. 5, 1934, doi: 10.1093/jn/7.5.497.
- [414] E. H. WISSLER, "Steady-state temperature distribution in man," *J. Appl. Physiol.*, vol. 16, 1961, doi: 10.1152/jappl.1961.16.4.734.
- [415] E. H. Wissler, "Pennes' 1948 paper revisited," *J. Appl. Physiol.*, vol. 85, no. 1, 1998, doi: 10.1152/jappl.1998.85.1.35.
- [416] R. J. Crosbie, J. D. Hardy, and E. Fessenden, "Electrical Analog Simulation of Temperature Regulation in Man," *Ire Trans. Biomed. Electron.*, vol. 8, no. 4, 1961, doi: 10.1109/TBMEL.1961.4322924.
- [417] STOLWIJK JAJ, "Mathematical model of physiological temperature regulation in man," *NASA Contract Reports*, 1971.
- [418] B. Givoni and R. F. Goldman, "Predicting rectal temperature response to work, environment, and clothing.," *J. Appl. Physiol.*, vol. 32, no. 6, pp. 812–822, Jun. 1972, doi: 10.1152/jappl.1972.32.6.812.
- [419] E. H. Wissler, "Mathematical simulation of human thermal behavior using whole body models," in *Heat Transfer in Medicine and Biology Vol. 1*, 1985.

- [420] N. Martínez *et al.*, "Validation of the thermophysiological model by Fiala for prediction of local skin temperatures," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 60, no. 12, pp. 1969–1982, Dec. 2016, doi: 10.1007/s00484-016-1184-1.
- [421] S. I. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki, and M. Konishi, "Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)," in *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, no. 6, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00014-2.
- [422] S. F. Morrison and K. Nakamura, "Central neural pathways for thermoregulation.," *Front. Biosci. (Landmark Ed.)*, 2011.
- [423] S. Takada, S. Matsumoto, and T. Matsushita, "Prediction of whole-body thermal sensation in the non-steady state based on skin temperature," *Build. Environ.*, vol. 68, 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.06.004.
- [424] J. Bienertová-Vašků, F. Zlámál, I. Nečesánek, D. Konečný, and A. Vasku, "Calculating Stress: From Entropy to a Thermodynamic Concept of Health and Disease," *PLoS One*, vol. 11, no. 1, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0146667.
- [425] F. Zlámál *et al.*, "Stress entropic load: New stress measurement method?," *PLoS One*, vol. 13, no. 10, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0205812.
- [426] N. A. S. Taylor, J. N. Caldwell, A. M. J. V. Den Heuvel, and M. J. Patterson, "To cool, but not too cool: That is the question-immersion cooling for hyperthermia," *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 40, no. 11, 2008, doi: 10.1249/MSS.0b013e31817eee9d.
- [427] K. L. Nyberg, K. R. Diller, and E. H. Wissler, "Automatic control of thermal neutrality for space suit applications using a liquid cooling garment," *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 71, no. 9 I, 2000.
- [428] E. H. Wissler, "Simulation of fluid-cooled or heated garments that allow man to function in hostile environments," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 41, no. 6, 1986, doi: 10.1016/0009-2509(86)85247-2.
- [429] E. H. Wissler, "Probability of survival during accidental immersion in cold water," *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 74, no. 1, 2003.
- [430] D. Fiala, K. J. Lomas, and M. Stohrer, "First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions," in *ASHRAE Transactions*, 2003, vol. 109 PART 1.
- [431] H. H. PENNES, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm," *J. Appl. Physiol.*, vol. 1, no. 2, 1948, doi: 10.1152/jappl.1948.1.2.93.
- [432] D. Fiala *et al.*, "Physiological modeling for technical, clinical and research applications," *Front. Biosci. - Sch.*, vol. 2 S, no. 3, 2010, doi: 10.2741/s112.
- [433] R. J. De Dear, E. Arens, Z. Hui, and M. Oguro, "Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 40, no. 3, 1997, doi: 10.1007/s004840050035.
- [434] N. Gao, J. Niu, and H. Zhang, "Coupling CFD and human body thermoregulation model for the assessment of personalized ventilation," *HVAC R Res.*, vol. 12, no. 3, 2006, doi: 10.1080/10789669.2006.10391191.
- [435] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.020.
- [436] Y. Zhao, H. Zhang, E. A. Arens, and Q. Zhao, "Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model," *Build. Environ.*, vol. 72, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.11.004.
- [437] M. Forman, J. Fišer, R. Bowman, and M. Jícha, "Numerical study of personalised ventilation inlets in an aircraft suite," in *12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011*, 2011, vol. 4.
- [438] F. Volavý, J. Fišer, and I. Nöske, "Prediction of air temperature in the aircraft cabin under different operational conditions," in *EPJ Web of Conferences*, 2013, vol. 45, doi: 10.1051/epjconf/20134501096.
- [439] M. Fojtlín, A. Psikuta, R. Toma, J. Fišer, and M. Jícha, "Determination of car seat contact area for personalised thermal sensation modelling," *PLoS One*, vol. 13, no. 12, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0208599.
- [440] IPAC, "Infrared Collared Lizard." [Online]. Available: http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/image_galleries/ir_zoo/lizard.html. [Accessed: 22-Mar-2019].

10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	$[m^2]$	plocha povrchu
A_{cl}	$[m^2]$	plocha povrchu oděvu
A_D	$[m^2]$	plocha povrch lidského těla dle DuBoisova vztahu
A_E	$[m^2]$	plocha povrchu v model – index E pro vnější povrch, index I pro vnitřní povrch
A_N, A_n	$[m^2]$	plocha N-tého/n-tého povrchu
B	$[-]$	koeficient pro výpočet operativní teploty
c	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
C	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z těla do okolního prostředí konvekcí
C_{cl}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z povrchu oděvu konvekcí
C_{res}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z těla dýcháním, část přenášená konvekcí
C_{sk}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z povrchu pokožky konvekcí
E_{cl}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tep. tok přenášený z povrchu oděvu do okol. prostředí evaporací
E_{res}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z těla dýcháním, část přenášená evaporací
E_{sk}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tep. tok přenášený z povrchu pokožky do okol. prostředí evaporací
f	$[Hz]$	frekvence
f_{HR}	$[min^{-1}]$	frekvence srdečního tepu
f_{cl}	$[-]$	součinitel zvětšení povrchu lidského těla oděvem / plošný faktor oděvu
F_{p-1}	$[-]$	úhlový faktor plochy pro výpočet přenosu tepla radiací
h_a	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu neoblečeného člověka/manekýna.
h_A	$[kJ \cdot kg_{sv}^{-1}]$	měrná entalpie vzduchu v modelu – index A pro vzduch v kabině, index V pro vzduch přiváděný ventilací
h_c	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí z povrchu oděvu
h_{cl}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí z povrchu oděvu, užití ve Fangerově modelu
h_{cal}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací získaný kalibrací v ekvivalentním prostředí. Využití při určení ekvivalentní teploty.
$h_{cal,whole}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu celého manekýna
$h_{cal,segment}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konv. a radiací z povrchu segmentu manekýna
$h_{cal,direct}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu plošného senzoru
$h_{cal,omni}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu všesměrového senzoru
$h_{et,cl}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}]$	součinitel přenosu tepla vypařováním z povrchu oděvu
$h_{et,sk}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}]$	součinitel přenosu tepla vypařováním z povrchu pokožky
h_{sk}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí z povrchu pokožky
h_o	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu člověka, využití při určení operativní teploty

h_r	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla radiací z povrchu
$h_{virtual}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu figuríny
l_a	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	tepelný odpor mezní vrstvy
l_{cal}	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	tepelný odpor získaný kalibrací v ekvivalentním prostředí
l_{cl}	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	základní/vlastní tepelný odpor oděvu
l_{cle}	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	efektivní tepelný odpor oděvu
l_{cond}	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	tepelný odpor kontaktu mezi lidským tělem a okolním povrchem
l_{ct}	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$	celkový tepelný odpor oděvu
K	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z těla do okolního prostředí kondukcí
l	$[m]$	výška osoby
L	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z těla do okolního prostředí
m	$[kg]$	hmotnost osoby, části, předmětu
\dot{m}_{H,H_2O}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnost vody dodávané osobami v modelu do vzduchu v kabině
M	$[W \cdot m^{-2}]$	měrná metabolická produkce lidského těla
p_a	$[Pa]$	parciální tlak vodní páry v okolním vzduchu
p_a''	$[Pa]$	parciální tlak syté vodní páry
p_{atm}	$[Pa]$	atmosférický tlak
p_{sk}	$[Pa]$	parciální tlak vodní páry pro parametry vzduchu v blízkosti pokožky
q_m	$[W \cdot m^{-3}]$	metabolická produkce, Fialův model
$q_{m,bas,0}$	$[W \cdot m^{-3}]$	bazální metabolická produkce, Fialův model
q_{res}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený dýcháním
q_{sk}	$[W \cdot m^{-2}]$	měrný tepelný tok přenášený z povrchu těla člověka
\dot{Q}	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tepelného toku
$\dot{Q}_{A/C}$	$[W]$	tepelný výkon klimatizační jednotky v modelu kabiny
$\dot{Q}_{c,E}$	$[W]$	tepelný tok konvekcí – index E na vnějším povrchu, index I na vnitřním povrchu, index H pro povrch člověka, V pro objem vzduchu v modelu
$\dot{Q}_{d,E}$	$[W]$	tepelný tok vedením přes stěny kabiny – index E na vnějším povrchu, index I na vnitřním povrchu v modelu
\dot{Q}_{HL}	$[W]$	celková tepelná zátěž v modelu kabiny
\dot{Q}_{PHL}	$[W]$	pasivní tepelná zátěž v modelu kabiny
$\dot{Q}_{r,E}$	$[W]$	tepelný tok radiací na povrchu – index E na vnějším povrchu, index I na vnitřním povrchu, index H pro povrch člověka v modelu
\dot{Q}_{RC}	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z povrchu
$\dot{Q}_{RC,n}$	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z n-tého povrchu
$\dot{Q}_{RC,whole}$	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z povrchu manekýna
$\dot{Q}_{RC,segment}$	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí ze segmentu manekýna
$\dot{Q}_{RC,direct}$	$[W \cdot m^{-2}]$	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z plošného senzoru

$\dot{Q}_{RC,omni}$	[W·m ⁻²]	hustota tep. toku přenášeného radiací a konvekcí z všesměrového senzoru
$\dot{Q}_{sr,E}$	[W]	tepelný tok absorbovanou solární radiací – index E na vnějším povrchu, index I na vnitřním povrchu v modelu
\dot{Q}_V	[W]	tepelný tok ventilací v modelu kabiny
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
R_{sk}	[W·m ⁻²]	měrný tep. tok přenášený z povrchu pokožky do okolního prostředí radiací
RST	[°C]	Resultant Surface Temperature – výsledná povrchová teplota
R_{cl}	[W·m ⁻²]	měrný tep. tok přenášený z povrchu oděvu do okolního prostředí radiací
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_{amb}	[°C]	teplota venkovního okolního vzduchu
t_E	[°C]	teplota exteriérového povrchu v modelu
t_{body}	[°C]	tělesná teplota, odpovídá rektální teplotě/„deep body temperature“
t_{cl}	[°C]	teplota povrchu oděvu
$t_{CST,PF}$	[°C]	výchozí povrchová teplota při regulaci na komfortní vyrovnávání
t_{eq}	[°C]	ekvivalentní teplota
$t_{eq,whole}$	[°C]	ekvivalentní teplota celého těla
$t_{eq,segment}$	[°C]	segmentová ekvivalentní teplota
$t_{eq,direct}$	[°C]	směrová ekvivalentní teplota
$t_{eq,omni}$	[°C]	všesměrová ekvivalentní teplota
$t_{eq,zone}$	[°C]	hranice zóny ekvivalentní teploty v diagramu komfortních zón
t_g	[°C]	teplota kulového teploměru
t_{nw}	[°C]	teplota přirozeně větraného mokrého teploměru
t_{so}	[°C]	standardní operativní teplota
t_{sk}	[°C]	povrchová teplota pokožky
t_{surf}	[°C]	povrchová teplota
$t_{surf,PF}$	[°C]	povrchová teplota při regulaci na komfortní vyrovnávání
$t_{surf,n}$	[°C]	povrchová teplota n-tého povrchu
t_{surfN}	[K]	povrchová teplota N-tého povrchu
$t_{surf,whole}$	[°C]	průměrná povrchová teplota celého manekýna
$t_{surf,segment}$	[°C]	průměrná povrchová teplota segmentu

$t_{surf,direct}$	[°C]	povrchová teplota plochého senzoru
$t_{surf,omni}$	[°C]	povrchová teplota všesměrového senzoru
\bar{t}_r	[°C]	střední radiační teplota okolí
t_o	[°C]	operativní teplota
T_r	[K]	střední radiační teplota okolí
T_{surfN}	[K]	povrchová teplota N-tého povrchu
T_u	[%]	intenzita turbulence
V	[m ³]	objem větraného prostoru
\dot{V}_p	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový tok přiváděného vzduchu
w_a	[m·s ⁻¹]	rychlost proudění vzduchu
$w_{a,i}$	[m·s ⁻¹]	flukuační rychlost proudění vzduchu, i-tý vzorek
w_{bl}	[m ³ ·s ⁻¹ ·m ⁻³]	průtok krve přes tkáň ve Fialově modelu
$\overline{w_a}$	[m·s ⁻¹]	střední rychlost proudění vzduchu
W	[W·m ⁻²]	měrný užitečný mechanický výkon lidského těla
x_A	[kg·kg ^{sv-1}]	měrná vlhkost vzduchu v modelu – index A pro vzduch v kabině, index V pro vzduch přiváděný ventilací

Řecká abeceda

β	[-]	sklon spektra turbulence při proudění vzduchu
Δ	[-]	rozdíl, např. Δt rozdíl teplot, Δp rozdíl tlaků atd.
δ	[-]	tloušťka vrstvy materiálu/konstrukce
ε_{cl}	[-]	emisivita povrchu oděvu
ε_{sk}	[-]	emisivita povrchu pokožky
λ	[m]	vlnová délka záření
μ	[-]	transmisivita vrstvy materiálu/konstrukce
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota
φ	[%]	relativní vlhkost vzduchu
τ	[s]	čas
ω	[-]	tvarový koeficient, Fialův model

Speciální jednotky, konstanty a zkratky

clo	jednotka tepelného odporu oděvu 1 clo = 0.155 m ² K/W
libra	imperiální jednotka váhy = 0.454 kg
met	metabolic equivalent of task – metabolický ekvivalent úkolu/činnosti 1 met = 58.1 W/m ²
námořní míle	imperiální délková jednotka = 1.825 km

stopa	imperiální délková jednotka = 30.48 cm
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational fluid dynamic – výpočtová mechanika tekutin
CCX	Counter-Current heat eXchange – protiproudý přenos tepla
CTA	Constant Temperature Anemometry – žárová anemometrie, princip udržování konstantní povrchové teploty
ČSN	Česká technická norma
DKZ	Diagram komfortních zón
ECS	Environmental control system – systém pro kontrolu prostředí v kabině letadla
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs-und Forschungsanstalt – Švýcarské federální laboratoře pro materiálový a technologický výzkum
EN	Evropská norma
fy.	zkrácený tvar slova „firmy“ = fy.
FMTK	Fialův model tepelného komfortu implementovaný na VUT v Brně, FSI, EU
FSI	Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
FTF	Flight test facility, IBP Holzkirchen, DE – https://www.ibp.fraunhofer.de/en.html
HEPA	High Efficiency Particulate Arrestance – „zachytávání mikročástic s vysokou účinností“, zkratkou se označují filtry s vysokou účinností filtrace
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning, systémy pro vytápění, větrání a klimatizaci
HZS ČR	Hasičský záchranný sbor České republiky
ISPACE	innovative Systems for Personalized Aircraft Cabin Environment – výzkumný projekt sedmého rámcového programu EU.
ISO	International Organization for Standardization
m. n. m	metrů nad mořskou hladinou (nadmořská výška)
MTV	Mean Thermal Vote - střední tepelný pocit
NFCI	“Non Freezing Cold Injuries” poškození tkání způsobené vlhkostí a teplotami těsně nad bodem mrazu
př. n. l.	„před naším letopočtem“ časový údaj v letech před rokem 1 křesťanského letopočtu
PCM	„Phase-Change Material“ – materiál s fázovou změnou
PHS	Predicted Heat Strain index
PMV	Predicted Mean Vote – Předpověď středního tepelného pocitu
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied – Předpověď procentuálního podílu nespokojených
SET*	Standard effective temperature index
USARIEM	United States Army Research Institute of Environmental Medicine
UTCI	Universal Thermal Climate Index
VUT	Vysoké učení technické v Brně
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature index