



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

KVALITA SPÁNKU V ZÁVISLOSTI NA PROSTŘEDÍ V MÍSTNOSTI

SLEEP QUALITY DEPENDING ON ROOM ENVIRONMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Veličková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Bc. Kateřina Veličková**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Kvalita spánku v závislosti na prostředí v místnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Průměrný dospělý člověk by měl spát cca 8 hodin denně pro dostatečný odpočinek a rekonvalescenci. Kvalita spánku však závisí na mnoha psychologických, zdravotních a dalších aspektech, ale také na tepelné kvalitě prostředí, v kterém člověk spí. Vhodná teplota, tepelný odpor přikrývky + postele, vlhkost prostředí a další mohou kvalitu spánku ovlivnit pozitivně i negativně.

Cíle diplomové práce:

Zaměřte se na určení tepelného odporu různých sestav pro spánek (oděv, přikrývka, polštář, matrace) prostřednictvím tepelného manekýna. Pomocí základních modelů tepelné bilance lidského těla určete jaké tepelné podmínky a sestavy jsou vhodné pro udržení vyrovnané bilance bez nutnosti zásahů aktivní termoregulace lidského těla.

Seznam doporučené literatury:

FANG, Guanyu; DENG, Shiming a LIU, Xuefeng. A numerical study on evaluating sleeping thermal comfort using a Chinese-Kang based space heating system. Online. Energy and Buildings. 2021, roč. 248. ISSN 03787788. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111174>. [cit. 2023-10-18].

JAY, Ollie; CAPON, Anthony; BERRY, Peter; BRODERICK, Carolyn; DE DEAR, Richard et al. Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. Online. The Lancet. 2021, roč. 398, č. 10301, s. 709-724. ISSN 01406736. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01209-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01209-5). [cit. 2023-10-18].

LIN, Zhongping a DENG, Shiming. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. Online. Building and Environment. 2008, roč. 43, č. 5, s. 905-916. ISSN 03601323. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.027>. [cit. 2023-10-18].

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo stanovit tepelný odpor vybraných sestav pro spánek (oděv, matrace, přikrývka, polštář) pomocí měření s tepelným manekýnem a následně stanovit vhodné teploty okolí, při kterých bude zachována vyrovnaná tepelná bilance mezi spící osobou a jejím okolím. Pro účely měření byly vybrány čtyři různé sestavy, které se lišily použitou přikrývkou (letní přikrývka, deka, potah a žádná přikrývka), rovněž byl vyšetřován vliv polohy tepelného manekýna na měřenou hodnotu. Bylo prokázáno, že vliv polohy na celkový tepelný odpor je zanedbatelný, přičemž měřené hodnoty byly mezi 1,12 clo (sestava bez přikrývky při poloze na boku) a 2,05 clo (sestava s letní přikrývkou při poloze na zádech). Následně byly pomocí modelu PMV stanoveny vhodné teploty okolí, které byly v rozmezí 24,4 °C a 28,6 °C. Dvouuzlový model se pro řešenou problematiku ukázal jako příliš málo citlivý, mapy tepelných toků vycházejících z modelu ekvivalentních teplot pak nebyly kalibrovány pro spánek, ale pro mírnou aktivitu v sedě, i tak přinášely zajímavé informace o vnímání tepelného komfortu na různých částech těla.

Summary

The aim of this diploma thesis was to determine the thermal resistance of selected sleep assemblies (clothing, mattress, blanket, pillow) using measurements with a thermal manikin and subsequently to determine the appropriate ambient temperatures at which a balanced thermal equilibrium between the sleeping person and their environment would be maintained. Four different assemblies were selected for measurement purposes, differing in the type of blanket used (summer blanket, quilt, cover, and no blanket). The influence of the thermal manikin's position on the measured value was also investigated. It was proven that the influence of position on the overall thermal resistance is negligible, with measured values ranging from 1.12 clo (assembly without a blanket in the side position) to 2.05 clo (assembly with a summer blanket in the back position). Subsequently, appropriate ambient temperatures were determined using the PMV model, which ranged from 24.4 °C to 28.6 °C. The two-node model proved to be insufficiently sensitive for the addressed issue, and the heat flux maps derived from the equivalent temperature model were not calibrated for sleep but for mild activity while seated. Nevertheless, they provided interesting information about the perception of thermal comfort in different parts of the body.

Klíčová slova

Tepelný odpor, spánek, tepelný manekýn, tepelná bilance, termoneutrální teplota prostředí.

Keywords

Thermal resistance, sleep, thermal manikin, thermal balance, thermoneutral ambient temperature.

VELIČKOVÁ, K. *Kvalita spánku v závislosti na prostředí místnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Bc. Jan Fišer, PhD.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Kvalita spánku v závislosti na prostředí v místnosti vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Bc. Jana Fišera, PhD. s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu zdrojů na konci práce.

Kateřina Veličková

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Bc. Janu Fišerovi, PhD. za odborné vedení této práce, cenné rady a podporu během jejího zpracování. Dále děkuji Ing. Barboře Řehák Kopečkové za zpracování dat pomocí dvouuzlového modelu a konzultace při volbě vhodných tepelných modelů lidského těla pro řešenou problematiku. V neposlední řadě patří poděkování i mé rodině a mému příteli, kteří mě po celou dobu magisterského studia velmi podporovali.

Kateřina Veličková

Obsah

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 12 |
| 2 | Cíle a omezení práce | 13 |
| 3 | Navržený postup řešení | 14 |
| 4 | Spánek a faktory ovlivňující jeho kvalitu | 15 |
| 4.1 | Význam spánku | 15 |
| 4.2 | Průběh spánku | 16 |
| 4.3 | Faktory ovlivňující kvalitu spánku | 17 |
| 4.3.1 | Vliv prostředí | 17 |
| 5 | Tepelné modely lidského těla | 20 |
| 5.1 | Rovnice tepelné bilance lidského těla | 20 |
| 5.2 | PMV a PPD | 24 |
| 5.3 | Dvouuzlový model | 26 |
| 5.4 | Princip ekvivalentních teplot | 27 |
| 6 | Způsoby stanovení tepelných odporů | 30 |
| 6.1 | Sčítání známých hodnot | 30 |
| 6.2 | Měření pomocí tepelného manekýna | 30 |
| 6.3 | Měření s dobrovolníky | 32 |
| 7 | Pracovní hypotézy a definice experimentů | 33 |
| 7.1 | Hypotéza o různých typech příkrývky | 33 |
| 7.2 | Hypotéza o vlivu polohy | 34 |
| 7.3 | Hypotéza o určení komfortní teploty okolí | 35 |
| 7.4 | Měřicí zařízení a vybavení pro experiment | 36 |
| 7.5 | Rozbor nejistot měření | 39 |
| 8 | Postup měření, zpracování dat a získané výsledky | 42 |
| 8.1 | Měření | 42 |
| 8.2 | Zpracování naměřených dat | 49 |
| 8.3 | Posouzení teplot okolí | 58 |
| 8.3.1 | Použití tepelné bilance a modelu PMV | 59 |
| 8.3.2 | Dvouuzlový model | 60 |
| 8.3.3 | Mapy tepelných toků | 62 |
| 9 | Vyhodnocení a diskuze | 69 |
| 10 | Závěr | 72 |
| 11 | Seznam použitých zdrojů | 74 |
| 12 | Seznam použitého značení a zkratk | 82 |
| 13 | Seznam příloh | 84 |

1 Úvod

Většina lidí tráví přibližně třetinu svého života spánkem. Jedná se o základní biologickou potřebu, jejíž naplnění je naprosto nezbytné pro lidské zdraví a duševní pohodu, jak uvádí [55]. Právě zvýšený zájem současné generace o fyzické i duševní zdraví dostává spánek mezi aktuální témata. Existuje celá řada prací popisujících význam dostatečného množství kvalitního spánku. Jaké faktory ale mohou ovlivnit spánek? Celá řada jich je na straně spící osoby, mimo jiné třeba životní styl a stravovací návyky. Jaký vliv na spánek má ale prostředí v ložnici? Může teplota v ložnici zásadně ovlivnit kvalitu spánku? A jak je možné stanovit „správnou“ teplotu v ložnici? I to jsou otázky, na které by měla tato práce pomoci odpovědět.

Globální klimatická změna je jev, který v současné době ovlivňuje život na celé planetě. Nejedná se o pouhé zvyšování teploty a růst koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře, ale i mnohem častěji se vyskytující extrémní výkyvy počasí, jako jsou povodně, přívaly sněhu, sucha i vlny veder, na což upozorňuje i [38]. Právě letní vlny veder mohou mít velmi závažný vliv na lidské zdraví, neboť během nich může snadno dojít k náhlým zdravotním komplikacím nebo eskalaci dlouhodobých zdravotních problémů vlivem přehřátí organismu, jak je popsáno v [34]. Vlny veder nemají vliv jen na oslabené jedince, případně děti a starší osoby, v práci [32] byla ukázána jasná souvislost mezi zvyšováním denních teplot a zhoršenou kvalitou spánku.

Právě na letní měsíce, kdy je zvýšení teplot nejcitelnější se bude zaměřovat tato práce. Jejím cílem je stanovit tepelný odpor vybraných sestav pro spánek (oděv, příkrývka, polštář a matrace), jejichž používání lze předpokládat v období zvýšených teplot. Neboť se nejedná o standartizované měření, bude součástí práce i stanovení metodiky měření a její ověření. Tyto poznatky by v budoucnu mohly sloužit při posuzování efektivity lokálních chladících a větracích postelových systémů.

Na základě naměřených hodnot budou pomocí základních modelů tepelné bilance určeny vhodné teploty okolí, při kterých bude dosaženo vyrovnané tepelné bilance mezi spící osobou a jejím okolím bez nutnosti zásahu aktivní termoregulace lidského těla. Dále bude posouzena vhodnost užitých modelů při řešení problematiky spánku a ukázány jejich potenciální slabé stránky.

2 Cíle a omezení práce

Cíle práce

- Stanovení metodiky měření tepelného odporu ložních sestav pomocí tepelného manekýna.
- Stanovení tepelných odporů sestav matrace, pokrývka, polštář a pyžamo pomocí tepelného manekýna při poloze na zádech a na boku.
- Vyšetření vlivu pokrývky a polohy spící osoby na tepelnou bilanci spící osoby.
- Stanovení teplot, při kterých bude dosaženo tepelné neutrality během spánku při dané konfiguraci lůžkovin, oblečení a polohy spící osoby.

Omezení práce

- Práce zkoumá pouze vybrané letní sestavy při dané poloze a míře zakrytí tepelného manekýna.
- Manekýn svou hmotností a její distribucí neodpovídá dospělé osobě. Zvláště u měkkých matrací či osob s vysokou hmotností může tato skutečnost výrazně ovlivnit výsledky.
- Polohy, do kterých lze nastavit tepelného manekýna aproximují polohy, ve kterých mohou spát lidé jen částečně. Zde se tedy jedná o zjednodušení dané konstrukcí a pohyblivostí manekýna.
- Zjištěné hodnoty tepelných odporů zahrnují pouze přenos tepla radiací, konvekcí a kondukcí bez zahrnutí vlivu přenosu tepla evaporací.

3 Navržený postup řešení

Rešerše

- Vliv kvality spánku na kvalitu života, faktory ovlivňující kvalitu spánku.
- Způsoby stanovení podmínek tepelné neutrality spící osoby.
- Způsoby měření tepelného odporu spací sestavy složené z matrace, polštáře, příkrývky a pyžama.

Měření

- Pilotní měření pro odladění metodiky měření a předběžné posouzení vlivu různých poloh ležícího manekýna na celkový tepelný odpor spací sestavy.
- Měření v klimakomoře s řízeným prostředím pro stanovení tepelného odporu spacích sestav s různými příkrývkami při polohách manekýna na boku a na zádech.
- Měření v klimakomoře s řízeným prostředím pro stanovení vlivu míry zakrytí příkrývkou na celkový tepelný odpor spací sestavy.
- Měření v klimakomoře s řízeným prostředím pro určení tepelného odporu přestupu tepla z nahého manekýna do okolního vzduchu.

Zpracování naměřených dat

- Zpracování dat z měření v MS Excel, stanovení tepelných odporů daných sestav včetně vyhodnocení statistické významnosti rozdílů.
- Grafické zpracování dat.
- Stanovení teplot prostředí, při které bude dosaženo tepelné neutrality při zadaných parametrech spací sestavy.
- Analýza tepelného komfortu jednotlivých částí těla při podmínkách vyhovujících tepelné neutralitě.

Vyhodnocení výsledků a závěr

4 Spánek a faktory ovlivňující jeho kvalitu

Spánek je základní lidskou potřebou, která naplňuje přibližně třetinu života každého člověka. Podle [42] je spánkem nazýván fyziologický stav vědomí, jehož hlavní funkcí je energetická úspora a regenerace, dále výstavba a přestavba systémů nervové soustavy. Všeobecně je spánek chápán jako snížený stav vědomí, který umožňuje zotavení těla a obnovení zásob energie.

4.1 Význam spánku

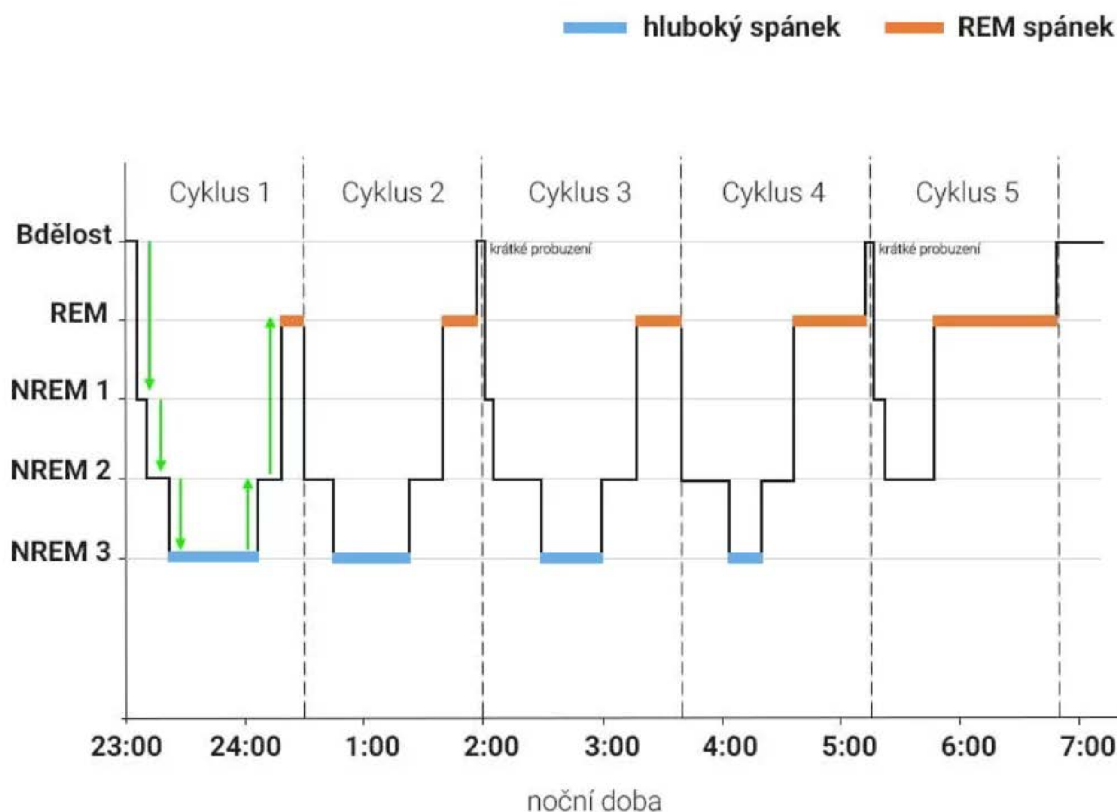
Jako většinu aktivit i spánek lze posuzovat kvalitativně a kvantitativně. Jako optimální délka spánku je v [49] považováno 7-9 hodin nepřerušovaného nočního odpočinku. Kvalitu spánku lze posuzovat pomocí mnoha parametrů, od subjektivních pocitů po probuzení a během dne, přes měřené veličiny jako je efektivita spánku (poměr času stráveného spánkem ku času strávenému v posteli), množství hlubokého nebo REM spánku. Jasná definice ale v této oblasti zatím chybí, na což je upozorněno v [31]. Obecně lze říct, že kvalitní spánek přináší dostatečnou fyzickou i duševní regeneraci a obnovu energie na zvládnutí dalšího dne.

Dostatek kvalitního spánku je významným předpokladem pro dobrou kvalitu života. Zvláště důležitý je tento předpoklad u dětí a dospívajících, na což je upozorněno v [41] i [45]. Důsledky nedostatečného odpočinku jsou dalekosáhlé, od rizika zvýšení krevního tlaku, přes vyšší sklony k nadváze a obezitě, snížení kognitivního výkonu, větší impulsivitu, emoční labilitu, nepozornost až po zpomalení vývoje dítěte ve všech směrech - fyzickém, mentálním, emocionálním i sociálním, jak je shrnuto v [41] i [45]. Snížování množství spánku mezi 10. a 15. rokem života je popsáno v práci [14]. Už u teenagerů se objevuje fenomén krátkého spánku před pracovními dny a delšího spánku před volnými dny, posun denních rytmů během pracovních dnů a víkendu může vést až k příznakům podobným pásmové nemoci. Tento fenomén bývá označován jako sociální jet lag a výrazně snižuje kvalitu spánku, ačkoli je zachováno jeho množství, jak bylo zjištěno v [7]. Podle článku [41] nedostatek spánku společně se sociálním tlakem a hormonálními změnami zvyšuje náchylnost k užívání omamných a stimulačních látek a zhoršuje psychickou pohodu, což vede k většímu množství sebevražedných myšlenek u spánkově deprivovaných adolescentů.

Problémy dospělých, kteří trpí nedostatkem spánku jsou zmíněny v [41], jedná se například o vyšší sklony k nadváze a obezitě, problémy s kardiovaskulárním systémem, snížení obranyschopnosti organismu i psychické odolnosti, horší kognitivní výkony a větší míru chyb z nepozornosti. Finanční náklady spojené s nedostatkem spánku jsou nastíněny v [50]. Jedná se nejen o výdaje způsobené zvýšením množství chyb z nepozornosti, ale rovněž o náklady na léčbu nemocí, jejichž riziko se se snižující délkou spánku zvětšuje. Ve stejném článku je rozebíráno i zvýšení množství dopravních nehod vlivem nevyspání, tento fenomén je popsán rovněž v [18]. Navzdory jasné shodě mezi odborníky, že dostatek spánku je zásadní pro lidské zdraví ve všech ohledech, trápí část populace napříč všemi věkovými kategoriemi jeho nedostatek, což bylo pozorováno v [27], [46] a [49].

4.2 Průběh spánku

Spánek probíhá ve 4 fázích. Fáze 1 označovaná též jako NREM1 trvá asi 1-5 minut, během této doby se výrazně snižuje svalová aktivita, zpomaluje se tep i dýchání, jak je uvedeno v [19]. Tento přechod z bdělého stavu do spánku lze je v [48] označen jako klimbání, během kterého lze jedince snadno probudit dotekem či zvukem.



Obrázek 4.1: Spánkové cykly během přibližně osmihodinového spánku [19].

Fáze 2, rovněž NREM2 nebo střední spánek je v [19] označena jako první skutečně měřitelná fáze spánku, neboť při ní dochází k poklesu bazální teploty, poklesu krevního tlaku, zastavení pohybů očí a výraznému snížení mozkové aktivity. V práci [48] je poukázáno na významný vliv této fáze při opravě a růstu tkání.

Fáze 3, hluboký spánek nazývaný rovněž NREM3, případně slow wave sleep, zkráceně SWS, je dle [19] nejstabilnější fáze spánku. Dále se snižuje teplota těla i činnost srdce. Zároveň se uvolňují hormony a dochází k obnově energie, jak je uvedeno v [48]. Dýchání a srdeční tep jsou pomalé a pravidelné. Mozkové vlny již přecházejí do aktivity delta, tyto vlny jsou hluboké a pomalé, odtud pochází výše zmíněné označení SWS.

Poslední fází spánku je fáze 4 - snění, tato část spánku je v [19] označena jako paradoxní, neboť se velmi podobá bdělosti. Během této fáze mají lidé ochablé kosterní svaly, s výjimkou dýchacích a svalů očí, ty naopak způsobují typické rychlé pohyby očí. Z anglického spojení rapid eye movement pak pochází označení REM fáze nebo též REM spánek. V [48] je uvedeno, že právě v této fázi se lidem nejčastěji zdají sny a dochází k ukládání informací do paměti a propojování souvislostí. REM spánek je tedy zásadní pro paměť, učení a kreativitu, na což je upozorněno v [19].

Jeden spánkový cyklus se skládá z postupného usínání, následně hlubokého spánku a na závěr REM spánku. S postupující dobou spánku se mění poměr mezi hlubokým spánkem a sněním, přičemž během prvních cyklů tvoří dominantní část právě regenerační hluboký spánek a REM spánek trvá jen několik málo minut. Během posledních spánkových cyklů dokonce nemusí k hlubokému spánku vůbec dojít a většinu spánkového cyklu zabere pouze REM spánek. Střídání jednotlivých fází spánku během spánkových cyklů je dobře patrné z obrázku 4.1. Délka jednoho spánkového cyklu je podle [19] přibližně 90 minut.

Stejně jako funkce lidského těla, jako například produkce hormonů ovlivňujících spánek, i teplota se mění v tzv. cirkadiálním rytmu, což bylo zkoumáno v [53] a [57]. Na samotný průběh teploty lidského těla během spánku byly zaměřeny práce [51], [53] a [61]. Bylo ukázáno, že okolo usnutí dosahuje tělesná teplota svého maxima, přičemž dochází k útlumu tělesných funkcí. Úzké provázání zvýšení teploty těla a usnutí dokazují i výsledky experimentů provedených v [23], [22], [51] a [61]. Z nich vychází, že pro rychlejší usnutí je lepší prostředí, které je vnímáno jako příjemně teplé. Změnami teplot v místnosti se zabývaly práce [22], [23] a [51]. Jejich autoři shodně došli k závěrům, že pro kvalitní spánek i úsporu energie potřebné na chlazení ložnice je vhodné usínat v prostředí mírně teplejším, než je prostředí tepelně neutrální. Následně v průběhu noci snížit teplotu na úroveň tepelné neutrality a před probuzením opět pozvolna nechat místnost ohřát na teplotu při usínání. V [51] je uvedeno upozornění, že změny v teplotě prostředí musí být prováděny plynule, jinak může dojít k přerušení spánkového cyklu, což je nežádoucí.

4.3 Faktory ovlivňující kvalitu spánku

Vlivů na kvalitu spánku je celá řada, od duševní pohody a fyzického zdraví, přes kvalitu a množství stravy, konzumaci alkoholu a kofeinu, množství denní pohybové aktivity, vystavení se přirozenému slunečnímu svitu, až po prostředí, ve kterém se spí, což je popsáno například v [3], [12] nebo [30]. Z pohledu techniky prostředí nelze ovlivnit chování jedince, a tedy bude dále rozebírán pouze vliv prostředí, neboť právě prostředí je možné kvantitativně popsat a v případě potřeby i upravovat.

4.3.1 Vliv prostředí

Právě prostředí spánku lze dobře popsat pomocí fyzikálních veličin, jako je hladina akustického tlaku, teplota, koncentrace oxidu uhličitého, rychlost proudění vzduchu a jeho vlhkost. Na tyto vlivy byly zaměřeny práce [3], [12], [16]. Z nich vyplývá, že nejrušivějším elementem je hluk, přičemž s přibývajícím věkem jsou lidé na hluk citlivější, což bylo potvrzeno v [44].

Specifická je situace u pacientů hospitalizovaných v nemocnici, které nejčastěji budí bolest. Hluk je pro ně až 4. nejčastějším narušitelem spánku, což vyplývá z [12]. Stejný článek uvádí, že nemocniční sestry se naopak budí nejčastěji právě kvůli hluku. Lze předpokládat, že pro zdravého jedince v domácím prostředí budou nízké hladiny hluku klíčové pro dostatek kvalitního spánku. Obyvatelé Spojených států žijící v oblastech, kde jsou hladiny akustické intenzity vyšší než na zbylých 90 % území USA, mají podle dat z [52] o 8 % větší pravděpodobnost nedostatečně dlouhého spánku. Vlivem různých hladin akustického tlaku na spánek se zabývá práce [44], z níž vychází, že hladina akustického tlaku

4.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU SPÁNKU

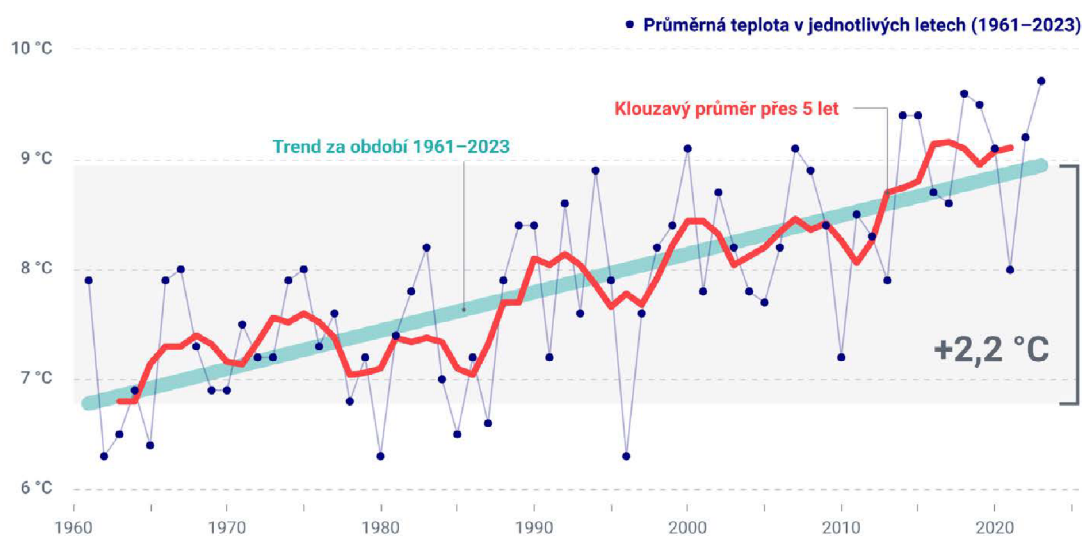
by neměla překročit 30 dB u ucha spícího člověka, neboť pak se zvyšuje pravděpodobnost probuzení, a tedy snížené kvality spánku či zkrácení doby jeho trvání.

Na zkoumání kvality vzduchu v místnosti a jejího vlivu na kvalitu spánku byly zaměřeny práce [3], [5] nebo [43]. Jejich autoři se shodují, že zvýšené koncentrace CO₂, PM_{2,5} a dalších polutantů mají negativní vliv na kvalitu spánku. V článku [21] je popsáno zhoršení kvality spánku při udržování koncentrace CO₂ na úrovni 1000 ppm ve srovnání s koncentrací 750 ppm. Dobře vyvětraná ložnice s minimem polutantů tedy výrazně přispívá k dobré kvalitě spánku. Zároveň hluk způsobený přívodem čerstvého vzduchu nesmí překročit výše uvedenou hranici 30 dB akustického tlaku u ucha spící osoby. Vliv snížené (pod 30 %) i zvýšené (nad 60 %) relativní vlhkosti byl posuzován v práci [13], oba extrémy v ní byly označeny jako nevyhovující. Při běžných hodnotách relativní vlhkosti, tj. mezi 45 a 60 %, nebyla v článku [3] nalezena statisticky významná závislost mezi relativní vlhkostí a kvalitou spánku. Z těchto poznatků vychází, že během spánku je vhodné udržovat v ložnici relativní vlhkost okolo 50 %, přičemž odchylka o 10 % od této hodnoty by neměla mít na kvalitu spánku žádný vliv.

PRŮMĚRNÁ ROČNÍ TEPLOTA V ČR



Teplota se od roku 1961 **zvýšila o 2,2 °C**.



VERZE 2024-01-04 LICENCE CC BY 4.0
více info na faktaoklimatu.cz/teplota-cr

zdroj dat: ČHMÚ

Obrázek 4.2: Růst průměrné teploty v České republice, převzato z [37].

V článku [28] je uvedeno, že nejčastější příčinou probuzení osob spících ve své ložnici je tepelná nepohoda, v zimě zima, v létě horko. Vliv zvýšené venkovní teploty na kvalitu spánku byl zkoumán v [2], výsledek je nepřekvapivý, zvýšení venkovní teploty vede ke zhoršení kvality spánku i zkrácení jeho trvání. Snížená kvalita spánku při narušení tepelné neutrality byla pozorována v práci [24]. Rovněž bylo ukázáno, že při spánku je nižší tepelná produkce těla, a tedy je dosaženo tepelné neutrality při vyšších teplotách

než během bdění za stejných podmínek¹. V závěrech z rešeršního článku [58] je uvedeno, že neexistuje přímý důkaz nebo fyziologická teorie, která by definitivně potvrdila, že tepelný komfort je kauzální příčinou dobré kvality spánku. Naproti tomu je v [29] ukázáno, že teplota pokožky se během spánku fyziologicky mění a narušení těchto změn nevhodným prostředím pro spánek vede k probuzení či snížení kvality spánku. V experimentální práci [56] bylo zjištěno, že při vyrovnané tepelné bilanci mezi tělem a okolím je kvalita spánku lepší, než v opačném případě. Dosahování tepelné neutrality během spánku je možné správnou kombinací příkrývek a okolních teplot, jak je popsáno v [24], [28] a [56]. Možnosti dosažení této rovnováhy mohou být se zvyšující se teplotou značně omezeny, neboť výrazně lépe se lze přizpůsobit chladu než horku, na čemž se shodují závěry z [20], [32] a [62]. S klimatickou změnou tak může být stále větší množství domácností odkázáno na chladicí zařízení, aby i při vyšších venkovních teplotách udrželi ve svém obydlí prostředí, ve kterém se lze „dobře vyspat“.

Globální změna klimatu je již důkladně popsáný jev, průměrná roční teplota v České republice se dle [37] mezi roky 1961 a 2023 zvýšila o 2,2 °C, jak je zobrazeno na obrázku 4.2. Tato skutečnost vede ke snižování množství i kvality spánku, což je shodný závěr [32] a [36]. V práci [36] je uvedeno, že větší pokles v kvalitě i množství spánku vlivem oteplování je znát v létě, neboť adaptace naráží na své limity. To potvrzuje i pozorování z [32], zároveň je v článku uvedeno, že s trvajícím obdobím zvýšených teplot se zvyšuje vnímaný diskomfort při stejných teplotách okolí. Otázkou je, do jaké míry toto ovlivňuje např. akumulace do budov a půdy a tedy pomalejší ochlazování vnitřních prostor během noci a celkově přijatá tepelná zátěž během 24 hodin.

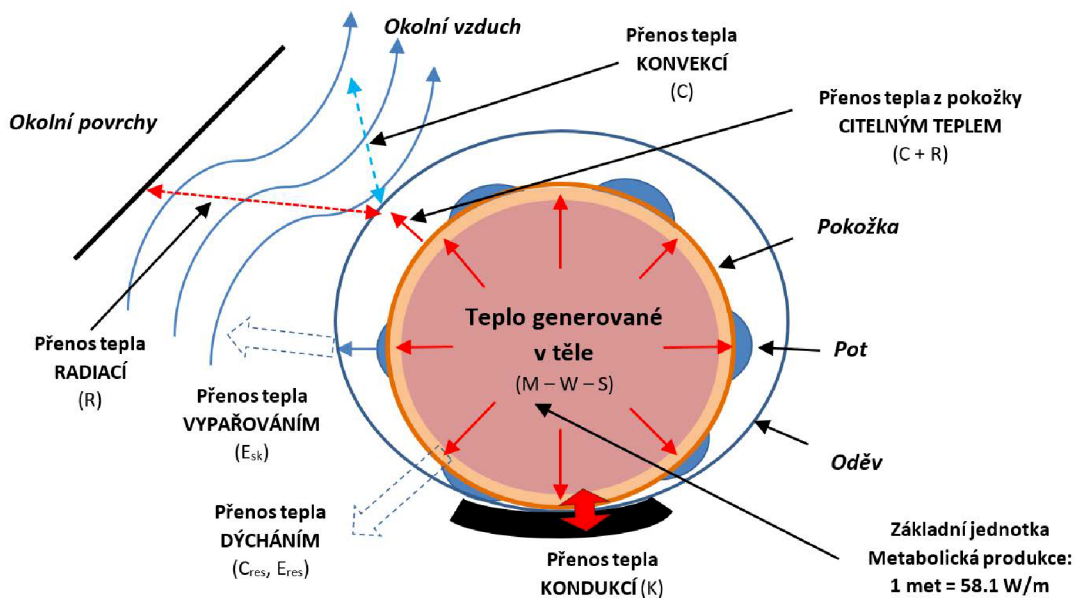
¹Stejná teplota okolí, rychlost proudění vzduchu, použitá matrace, příkrývky i pyžamo.

5 Tepelné modely lidského těla

V kapitole 4 bylo značné množství zmínek o tepelné neutralitě, což je stav při kterém lidské tělo v neměnném prostředí udržuje konstantní teplotu. Tento stav by dle [6] měl být člověkem vnímán jako neutrální a jedinec by neměl mít nutkání své prostředí nijak měnit, aby dosáhl větší teplotní pohody. V praxi do vnímání tepelné pohody vstupuje nejen teplota okolí a odpor oblečení, ale i fyzická aktivita, věk a pohlaví jedince, adaptace, zvyky a v neposlední řadě i zdravotní stav. Vliv různých faktorů na vnímání tepelné pohody zkoumali například [2], [36] a [61].

5.1 Rovnice tepelné bilance lidského těla

Nejjednodušším způsobem, jak posuzovat tepelnou bilanci člověka je rovnice tepelné bilance lidského těla (5.1), zveřejněná v [6]. Značení použité v práci bylo upraveno na základě [25] a doplněno.



Obrázek 5.1: Schéma tepelné výměny mezi člověkem a okolím, převzato z [8], upraveno.

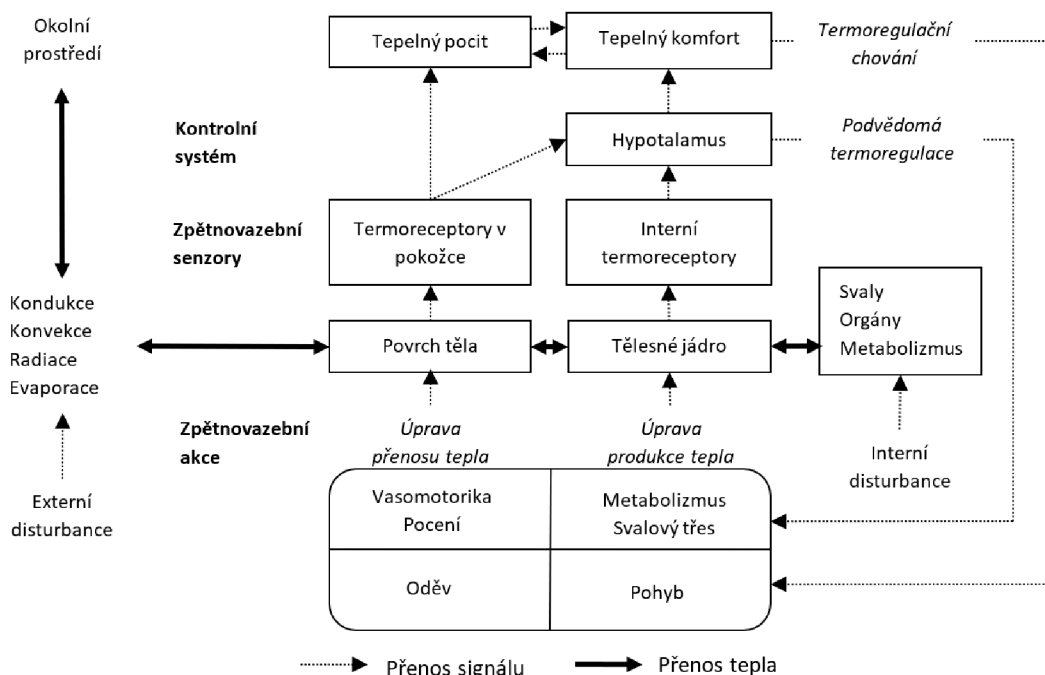
$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad (5.1)$$

Rozdíl $M - W$ [W/m^2] na levé straně označuje čistou produkci tepla. Jedná se o celkovou metabolickou produkci tepla lidským tělem M [W/m^2] zmenšenou o fyzickou práci vykonanou svaly W [W/m^2]. Takto produkované teplo může být uloženo v těle S [W/m^2], nebo předáno do okolí skrz pokožku q_{sk} [W/m^2] a pomocí dechu q_{res} [W/m^2]. Výměnu tepla s okolím lze dále rozdělit přestup tepla C [W/m^2], radiaci R [W/m^2] a ztrátu tepla suchým pocením E_{sk} [W/m^2]. Tepelný tok předaný dýcháním se skládá z latentního tepla potřebného k odparu vlhkosti E_{res} [W/m^2] a z tepla odvedeného z těla konvekcí v dýchacích cestách C_{res} [W/m^2].

Přebytečné teplo je nejprve ukládáno v kůži S_{sk} [W/m^2], později pak i uvnitř těla S_{cr} [W/m^2]. Trvá-li tento stav déle dochází ke zvýšení teploty těla, což může vést až k pře-

hřátí organismu čili hypertermii (teplota jádra těla nad 39 °C), která je často spojena s dehydratací, a v extrémních případech může způsobit i selhání srdce a celkový kolaps organismu. Naopak, je-li odvod tepla z těla vyšší než jeho produkce, dochází k podchlazení organismu (teplota jádra pod 35 °C), hypotermii. Příznaky jsou zhoršená pohyblivost, poruchy řeči, dále dochází k zvyšování viskozity krve a zpomalování metabolismu. Při dalším ochlazení těla může dojít k fibrilaci komor a zastavení srdce.

Rovnice (5.1) je nejjednodušším vyjádřením tepelné rovnováhy mezi tělem a okolím. Schéma probíhajících tepelných toků je naznačeno na obrázku 5.1. Fyziologie lidského těla a způsoby udržování vyrovnané tepelné bilance jsou ale mnohem komplikovanější, jak je dobře vidět na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Schéma termoregulačního systému lidského těla s vyznačením hlavních prvků systému a signálních cest ovlivňujících podvědomé mechanismy a vědomé termoregulační chování člověka, převzato z [8].

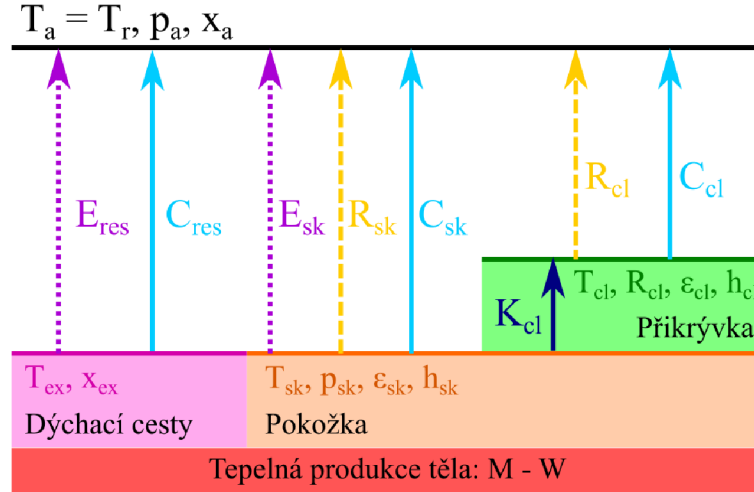
Všechny fenomény na pravé straně bilanční rovnice lze dále rozepsat. Přestup z pokožky do okolí lze popsat pomocí rovnice (5.2) vycházející z Newtonova ochlazovacího zákona. Jednoduchý vztah obsahuje pouze tři veličiny, součinitel přestupu tepla mezi pokožkou a okolím h_{sk} [W/(m²K)], teplota pokožky t_{sk} [°C] a teplota okolí t_a [°C].

$$C_{sk} = h_{sk}(t_{sk} - t_a) \quad (5.2)$$

Rovnici 5.3 pro měrný tepelný tok odváděný skrz oblečení K_{cl} [W/m²] lze sestavit na základě Fourierova zákona. Ve jmenovateli je rozdíl teploty pokožky t_{sk} [°C] a teploty vnějšího povrchu oděvu t_{cl} [°C], v čitateli pak vystupuje odpor oděvu proti vedení tepla R_{cl} [m²K/W].

$$K_{cl} = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R_{cl}} \quad (5.3)$$

5.1 ROVNICE TEPELNÉ BILANCE LIDSKÉHO TĚLA



Obrázek 5.3: Zjednodušené schéma tepelných toků z přikrytého lidského těla do okolí.

Přestup tepla z oblečení do okolí C_{cl} [W/m²] lze vypočítat podle vztahu 5.4 analogického k 5.2. Ve vztahu figuruje součinitel přestupu tepla mezi oblečením a okolím h_{cl} [W/(m²K)], teplota vnějšího povrchu oblečení t_{cl} [°C] a teplota okolí t_a [°C].

$$C_{cl} = h_{cl}(t_{cl} - t_a) \quad (5.4)$$

Měrný tepelný tok přenesený do okolí radiací R [W/m²] se skládá ze dvou částí, radiací od pokožky R_{sk} [W/m²] a radiací od oděvu R_{cl} [W/m²]. Obě složky lze vyjádřit pomocí Stefan-Boltzmannova zákona. Ve vztahu 5.5 pro měrný tepelný tok předávaný do okolí radiací z pokožky R_{sk} vystupuje kromě Stefan-Boltzmannovy konstanty σ [W/(m²K⁴)] ještě emisivita pokožky ε_{sk} [-], termodynamická teplota pokožky T_{sk} [K] a střední radiační teplota okolí T_r [K].

$$R_{sk} = \sigma \cdot \varepsilon_{sk} \cdot (T_{sk}^4 - T_r^4) \quad (5.5)$$

Ze zákona zachování energie pak musí platit rovnost mezi 5.3 a součtem 5.4 a 5.6, jak je zřejmé ze schématu na obrázku 5.3. Tepelný tok vedením na povrch příkrývky musí být do okolí pokračovat radiací a konvekcí.

Obdobně vypadá i vztah 5.6 pro výpočet měrného tepelného toku radiací z oblečení R_{cl} , ve kterém se vyskytuje Stefan-Boltzmannova konstanta σ [W/(m²K⁴)], emisivita oděvu ε_{cl} [-], termodynamická teplota vnějšího povrchu oděvu T_{cl} [K] a střední radiační teplota okolí T_r [K].

$$R_{cl} = \sigma \cdot \varepsilon_{cl} \cdot (T_{cl}^4 - T_r^4) \quad (5.6)$$

Teplu přenesené do okolí výparem z pokožky E_{sk} lze dle [6] počítat pomocí vztahu 5.7, kde $l_{23,34^\circ C}$ [J/kg] je měrné skupenské teplo vypařování vody při 34 °C, \dot{m}_{sk} značí měrné množství vypařované vody. Hnací silou suchého pocení je pak rozdíl mezi parciálním tlakem sytých vodních par v blízkosti pokožky p_s [Pa] a parciálním tlakem vodních par ve vzduchu p_a [Pa].

$$E_{sk} = l_{23,34^\circ C} \cdot \dot{m}_{sk} \cdot A_{sk} \cdot (p_s - p_a) \quad (5.7)$$

Předávání tepla okolí pomocí dechu popisuje [6]. Množství dechem předaného latentního tepla E_{res} se počítá podle 5.8, kde \dot{m}_{res} [kg/(sm²)] je plicní ventilace, tedy hmotnost vzduchu vyměněného v plicích za jednotku času vztaženého na m² plochy pokožky, x_{ex}

$[\text{kg}/\text{kg}_{\text{sv}}]$ je měrná vlhkost vydechovaného vzduchu, x_a $[\text{kg}/\text{kg}_{\text{sv}}]$ je měrná vlhkost okolního vzduchu a $l_{23,34^\circ\text{C}}$ $[\text{J}/\text{kg}]$ značí měrné skupenské teplo vypařování vody při 34°C .

$$E_{res} = \dot{m}_{res} \cdot (x_{ex} - x_a) \cdot l_{23,34^\circ\text{C}} \quad (5.8)$$

Z dýchacích cest může být teplo předáváno do okolí konvekcí. Měrný tepelný tok citelného tepla C_{res} $[\text{W}/\text{m}^2]$ lze dopočítat na základě rovnice 5.9, kde \dot{m}_{res} $[\text{kg}/(\text{sm}^2)]$ je plicní ventilace, c_p $[\text{J}/(\text{kgK})]$ je měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku, t_{ex} $[\text{°C}]$ je teplota vydechovaného vzduchu a t_a $[\text{°C}]$ je teplota okolního vzduchu.

$$C_{res} = \dot{m}_{res} \cdot c_p \cdot (t_{ex} - t_a) \quad (5.9)$$

Ačkoli na první pohled vypadá vše poměrně jednoduše, rovnice obsahují značné množství neznámých, které je pro úspěšný výpočet nutné zjistit, jak ostatně uvádí i [8]. Přehled potřebných veličin popisujících prostředí je uveden v tabulce 5.1, obdobně je v tabulce 5.2 seznam parametrů na straně jedince. Tabulka 5.3 pak shrnuje všechny veličiny potřebné pro popis všech způsobů přenosu tepla.

Tabulka 5.1: Přehled veličin popisujících prostředí

| Veličina | Ozn. | Jednotka | Způsob měření, výpočtu |
|---|-------|-----------------------------------|--|
| Teplota vzduchu | t_a | $^\circ\text{C}$ | měřena teploměrem |
| Střední radiační teplota okolí | t_r | $^\circ\text{C}$ | měřena kulovým teploměrem |
| Parciální tlak vodní páry v okolním vzduchu | p_a | Pa | na základě přímo měřených veličin RH a t_a |
| Měrná vlhkost vzduchu | x_a | $\text{kg}/\text{kg}_{\text{sv}}$ | na základě přímo měřených veličin RH a t_a |

Tabulka 5.2: Přehled veličin popisujících osobu

| Veličina | Ozn. | Jednotka | Způsob měření, výpočtu |
|---|----------|-----------------------------------|--|
| Teplota pokožky | t_{sk} | $^\circ\text{C}$ | lze měřit termokamerou, v praxi výpočet z M , R_{cl} , R_{et} a parametrů okolí |
| Povrchová teplota oděvu | t_{cl} | $^\circ\text{C}$ | lze měřit termokamerou, v praxi výpočet z t_{sk} , R_{cl} , R_{et} a parametrů okolí |
| Teplota vydechovaného vzduchu | t_{ex} | $^\circ\text{C}$ | lze měřit teploměrem, alternativně se používá i t_{sk} |
| Parciální tlak vodní páry v blízkosti pokožky | p_{sk} | Pa | na základě známých veličin RH a t_{sk} |
| Měrná vlhkost vydechovaného vzduchu | x_{ex} | $\text{kg}/\text{kg}_{\text{sv}}$ | na základě známých veličin RH_{ex} a t_{ex} |

Z výše zmíněného vychází, že navzdory jednoduchým matematickým vztahům popisujícím jednotlivé fenomény přenosu tepla je poměrně složité řešit tepelný komfort pomocí bilanční rovnice, neboť obsahuje řadu proměnných, které lze určit pouze měřením, případně je odhadnout na základě již naměřených hodnot.

Tabulka 5.3: Přehled parametrů popisujících přenosové fenomény

| Veličina | Ozn. | Jednotka | Způsob měření |
|--|--------------------|----------------------|---|
| Emisivita pokožky | ε_{sk} | bez jed. | tabelováno, lze měřit spektrometrem, či určit na základě měření s termokamerou |
| Emisivita oblečení | ε_{cl} | bez jed. | tabelováno, lze měřit spektrometrem, či určit na základě měření s termokamerou |
| Součinitel přenosu tepla konvekcí z pokožky | h_{sk} | W/(m ² K) | lze měřit přímo pomocí alfametru nebo speciálními postupy, jak je uvedeno v [8] |
| Součinitel přenosu tepla konvekcí z oblečení | h_{cl} | W/(m ² K) | lze měřit přímo pomocí alfametru nebo speciálními postupy, jak je uvedeno v [8] |
| Odpor proti vedení tepla z pokožky na povrch oděvu | R_{cl} | m ² K/W | lze určit měřením s tepelným manekýnem |

Pro posouzení přenosu tepla mezi pokožkou a okolím konvekcí a radiací lze dle [25] použít jednoduchý vztah (5.10)

$$C + R = \frac{(t_{sk} - t_a)}{R_{tot}}, \quad (5.10)$$

kde $C + R$ [W/m²] je měrný tepelný tok radiací a konvekcí a R_{tot} [m²K/W] je celkový odpor proti přenosu tepla z pokožky do okolí pomocí těchto dvou mechanismů. Použitím vztahu (5.10) namísto (5.2), (5.3), (5.4), (5.5) a (5.6), dojde ke snížení počtu neznámých popisujících přenos citelného tepla. Nespornou výhodou tohoto přístupu je možnost poměrně snadno změřit všechny veličiny vystupující ve vztahu (5.10). Celkový tepelný odpor R_{tot} lze získat z měření s tepelným manekýnem, což ostatně provedl vedle jiných i [26].

V práci [25] jsou uvedeny některé hodnoty a předpoklady, které lze použít v případě adaptace bilanční rovnice na spícího člověka. Základním předpokladem je nulová fyzická práce vykonávaná spícím jedincem, tedy $W = 0$ W. Dále je uvažováno s metabolickou produkcí tepla $M = 40$ W/m². Z práce [25] rovněž vychází, že pro zachování tepelné pohody při spánku by nemělo docházet k ukládání tepla v kůži, ani v tělesném jádře. Mělo by tedy vycházet $S_{cr} = S_{sk} = 0$ W.

Výhodou bilanční rovnice (5.1) je její jednoduchost, na druhou stranu neposkytuje žádnou informaci o tom, jak je případná nerovnováha vnímána, nebo jak se mění teplota pokožky, respektive tělesného jádra, v důsledku této nerovnováhy.

5.2 PMV a PPD

Jak již bylo zmíněno, bilanční rovnice je jednoduchým nástrojem pro určení tepelného toku mezi člověkem a okolím. Pro přiblížení vnímání tohoto stavu člověkem slouží predictive mean vote zkráceně PMV. Jedná se o model, který na základě svých měření sestavil Fanger a publikoval ho v [6]. Účastníci experimentu byli vystaveni různým tepelným zátěžím nebo ztrátám, načež hodnotili svůj tepelný vjem na škále od -3 do 3, resp. zima - chladno -

mírně chladno - neutrální - mírně teplo - teplo - horko. PMV je tedy číselné vyjádření průměrného tepelného vjemu člověka v daném prostředí.

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.28] \cdot L \quad (5.11)$$

Na první pohled vypadá vztah pro určení PMV (5.11) převzatý z [6] velmi jednoduše. Komplikovanějším se stává ve chvíli, kdy je třeba vyjádřit tepelnou zátěž L [W/m²] podle vztahu (5.12)

$$L = (M - W) - \left(3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_a] + 0,42[(M - W) - 58,15] + 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_{cl} (t_{cl} - t_a) + 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) + 1,4 \cdot 10^{-3} M (34 - t_a) \right), \quad (5.12)$$

kde teplota povrchu oděvu t_{cl} [°C] je dána implicitním vztahem (5.13)

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - R_{cl} \left(3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_{cl} (t_{cl} - t_a) \right), \quad (5.13)$$

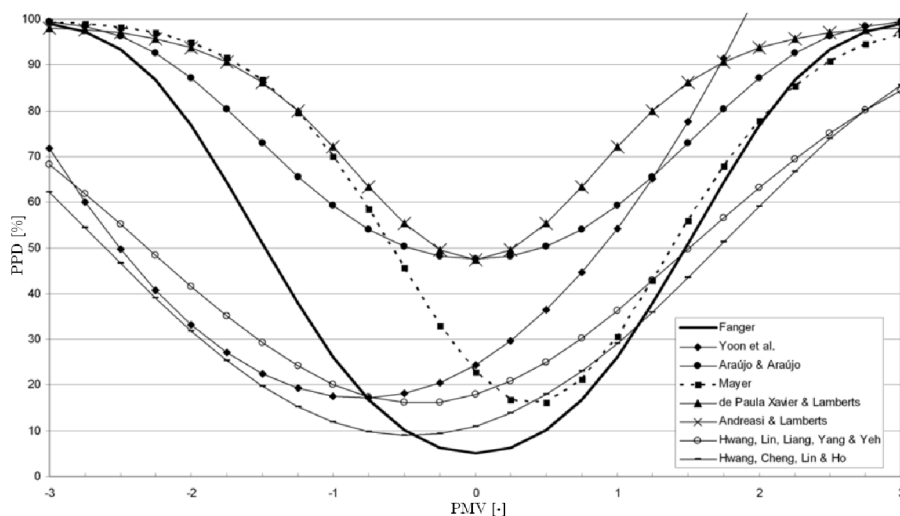
kde R_{cl} [m²K/W] je měrný tepelný odpor oděvu a f_{cl} [-] je součinitel zvětšení povrchu těla oděvem, který lze získat ze vztahu (5.14).

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290R_{cl}, & \text{pro } R_{cl} \leq 0,078 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}, 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,645R_{cl}, & \text{pro } R_{cl} > 0,078 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}, 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (5.14)$$

Součinitel přenosu tepla konvekcí z oděvu h_{cl} [W/(m²K)] je dopočítán ze vztahu (5.15)

$$h_{cl} = \max\{2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25}; 12,1\sqrt{w_a}\}, \quad (5.15)$$

kde w_a [m/s] je rychlost proudění vzduchu v neovlivněném proudu.



Obrázek 5.4: Původní model PPD a jeho modifikace v rámci dalšího výzkumu, převzato z [17], upraveno a přeloženo.

5.3 DVOUZLOVÝ MODEL

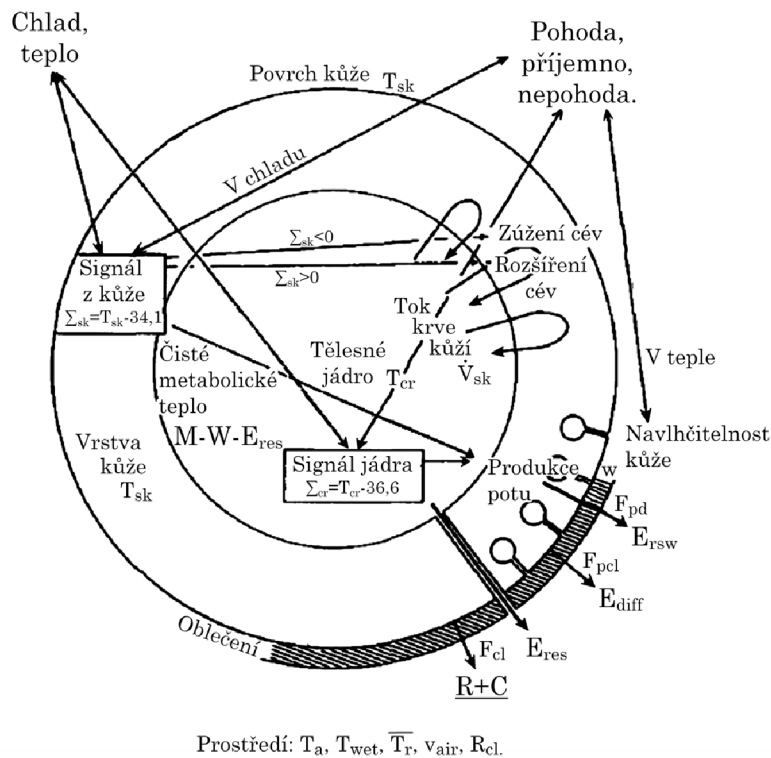
Neboť PMV vychází ze statistického zpracování velkého množství dat a jejich následné interpolace, je zřejmé, že ne všichni lidé budou spokojeni s daným tepelným prostředím, ačkoli PMV bude přibližně rovno nule. Toto je dáno individuálními zvyklostmi, adaptací a fyziologií jedince. Pro odhad procentuálního množství nespokojených slouží predictive percentage of dissatisfied, zkráceně PPD. Vztah pro výpočet PPD (5.16) byl představen v práci [6]. V rámci dalšího výzkumu byl však velmi modifikován, jak je zřejmé z grafu na obrázku 5.4.

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2) \quad (5.16)$$

Lze předpokládat, že oba modely budou s dostatečnou přesností použitelné i pro minimální tepelnou produkci během spánku, v oblasti této problematiky však není k dispozici potřebné množství dat na základě měření s dostatečně diverzifikovanou populací.

Oba ukazatele lze mimo [6] najít i v [1] a normě ISO ČSN EN 7730, pro svou jednoduchost jsou hojně využívány k hodnocení tepelné pohody na pracovištích. Jejich nevýhodou je zkrácování skutečného tepelného vjemu díky posuzování celého lidského těla jako jediného bodu. Zmíněné modely rovněž opomíjí vnitřní termoregulaci těla.

5.3 Dvouuzlový model



Obrázek 5.5: Schéma tepelných toků a termoregulace ve dvouuzlovém modelu, upraveno a přeloženo dle [1]

V předchozích částech kapitoly byly řešeny jednobodové modely pro posuzování tepelné bilance lidského těla. Zásadním nedostatkem těchto přístupů je zanedbání jakékoli fyziologické odezvy i při výrazném tepelném diskomfortu, na což je upozorněno v [40].

Naproti tomu dvouuzlový model, tak jak byl popsán v [1], uvažuje lidské tělo jako dva soustředné válce. Vnitřní válec představuje tělesné jádro a vnější pokožku, díky tomuto posunu je možné modelovat tepelné toky mezi tělesným jádrem a kůží a sledovat jejich teploty, jak je uvedeno v [40].

Model byl původně navrhnout jako statický, je však poměrně dobře upravitelný na časově závislý i s vývojem teploty okolí nebo metabolické aktivity, což bylo provedeno nejen v [54] a [60]. Část modelu popisující pasivní tepelnou zátěž vychází ze základních způsobů přenosu tepla, přičemž jejich popis pomocí vztahů je podobný jako u Fangerova modelu². Původním cílem modelu bylo testování tepelné zátěže jedince a predikování reakce těla na tuto zátěž, proto zahrnuje základní fyziologické procesy, kterými se tělo s touto skutečností může vypořádat. Jedná se o regulaci míry pocení a zužování nebo rozšiřování cév, což vede ke změně průtoku krve pokožkou. Vazby mezi oběma segmenty modelu a okolím jsou dobře znázorněny na obrázku 5.5, podrobný popis všech uvažovaných dějů včetně jejich matematické formulace lze dohledat v [1].

Ačkoli byl model původně sestaven pro posuzování vlivu tepelné zátěže na pracující osoby, v práci [60] byl adaptován pro řešení problematiky spící osoby. Teploty jádra i pokožky během noci získané pomocí upraveného modelu byly ve shodě s daty naměřenými na mladých dobrovolnících. Poslední fází úpravy modelu bylo určení vhodných podmínek pro spánek, zvláště pak maximální přípustné operativní teploty při dané vlhkosti a rychlosti proudění vzduchu, na základě stanovené izolace spací sestavy. Základem této adaptace byl přechod k časově závislé simulaci, dále nastavení časově proměnné teploty jádra a metabolické produkce během spánku. Upravený model není volně k dispozici a není tedy možné ho použít pro ověření výsledků získaných v rámci této práce.

V této práci bude používána časově závislá varianta dvouuzlového modelu umožňující výpočet teploty tělesného jádra na základě zadaných parametrů okolí. Konkrétní použitý program pro řešení této problematiky byl vyvinut na Odboru termomechaniky a techniky prostředí Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně a jako takový nebyl při zpracování dat k dispozici, neboť je chráněn autorským „know-how“. Nebylo tedy možné na něm provádět žádné úpravy. Bylo možné ho pouze využít k získání výsledků na základě vstupních dat.

5.4 Princip ekvivalentních teplot

Jedná se o přepočítání skutečného měrného tepelného toku radiací a konvekcí z těla na ekvivalentní teplotu okolí, při které by byl zachován stejný tepelný tok pro nahého člověka v bezvětrném prostředí. Tento princip lze aplikovat na celého člověka, případně je možné rozdělit tělo na jednotlivé segmenty a ty řešit jednotlivě, což může být v řadě aplikací velmi výhodné - např. při detekci lokálních diskomfortů jako je obtěžování průvanem. Pro výpočet ekvivalentní teploty se používá jednoduchý vztah (5.17) uvedený v normě ČSN EN ISO 14505-2 [63]

$$t_{eq} = t_s - \frac{\dot{Q}}{h_{cal}}, \quad (5.17)$$

kde t_{eq} [°C] je ekvivalentní teplota okolí pro uvažovanou část lidského těla, t_s [°C] je povrchová teplota těla na uvažované části, \dot{Q} [W/m²] je tepelný tok danou částí těla

²Uvedeny v části 5.1

5.4 PRINCIP EKVIVALENTNÍCH TEPLIT

při definovaných podmínkách a h_{cal} [W/(m²K)] je kombinovaný součinitel přenosu tepla radiací při kalibračních podmínkách. Ty jsou v normě [63] stanoveny následovně: teplota okolí shodná se střední radiační teplotou $t_a = \bar{t}_r = 24$ °C a rychlost proudění vzduchu $w_a = 0,05$ m/s.

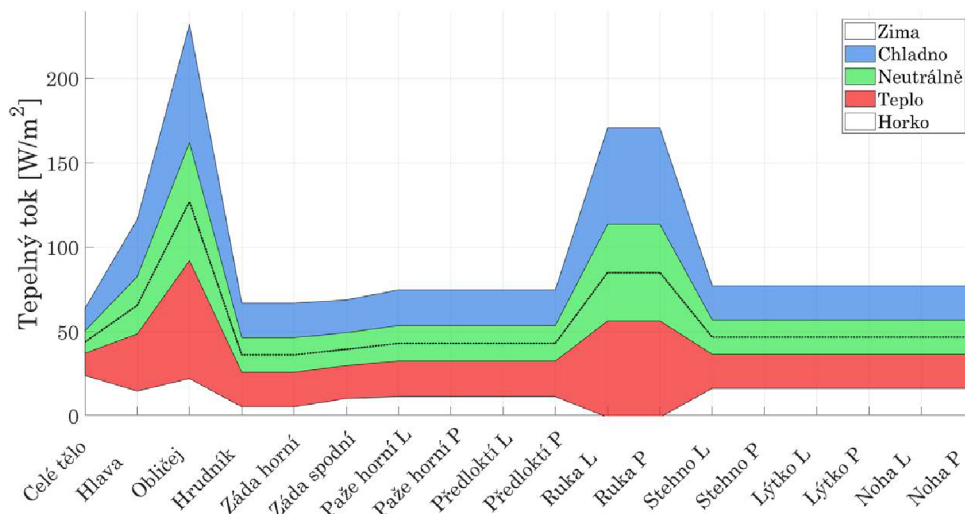
Tato metoda aplikovaná na jednotlivé části těla je používána při řešení tepelného komfortu v kabinách dopravních prostředků. Výhodou metody je možnost posuzovat tepelný vjem na různých částech těla a tedy lépe popisuje vjem jedince a lokální diskomfort - např. obtěžování průvanem na různých částech těla atp. Značně problematická je interpretace výsledků. Při měření pro mírnou námahu v sedě je možné využít diagramy sestavené na základě experimentů s dobrovolníky uvedené v normě [63], pro spící osobu však obdobné diagramy komfortu nejsou k dispozici.

V článku [29] je poukázáno na fakt, že rozdíl v povrchové teplotě zakrytého těla a čela by neměl překročit 4 °C. V [62] je uvedeno, že termoneutrální teplota prostředí postele v blízkosti trupu člověka je 30,5 °C, pro chodidla pak 31,7 °C. Na základě těchto informací lze předpokládat, že ekvivalentní teploty pro komfortní spánek by se měly pohybovat přibližně v rozmezí od 29 do 33 °C. Jedná se o pouhý předpoklad, neboť tento model není kalibrován pro řešení komfortu spících osob a v dostupné literatuře není zmínka o jeho použití k posuzování komfortu během spánku.

Možnostmi linearizace vztahu (5.17) se zabývala práce [33]. Výsledkem bylo stanovení potřebných koeficientů a a b pro jednotlivé části lidského těla potřebné do vztahu (5.18)

$$t_{eq,zone} = t_s - R_{tot}(a + b \cdot MTV_{zone}), \quad (5.18)$$

kde $t_{eq,zone}$ [°C] je ekvivalentní teplota pro daný segment, R_{tot} [m²K/W] je celkový odpor proti přenosu tepla radiací a konvekcí, a a b jsou koeficienty lineární regrese pro daný segment a MTV_{zone} [-] je střední tepelný vjem v rozsahu -3 až 3, kde -3 je zima a 3 horko. Na základě koeficientů a a b známých z práce [33] a naměřených hodnot h_{cal} , lze stanovit hraniční tepelné toky pro jednotlivé střední tepelné vjemy. Tyto hraniční tepelné toky lze využít při posuzování lokálních tepelných vjemů na základě skutečně měřených tepelných toků, případně lze sestavit diagram vnímání různých tepelných toků jednotlivými částmi těla, jako na obrázku 5.6. Není-li možné měřit přímo tepelné toky, lze stanovit tepelný tok při dané teplotě na základě vztahu (5.10).



Obrázek 5.6: Diagram vnímání tepelných toků na různých částech těla pro osobu ležící na zádech

Nezle opomenout, že koeficienty a a b v práci [33] byly stanoveny pro sedící osobu vykonávající klidnou činnost v sedě - typicky řízení automobilu, stejné koeficienty jsou zde ale využity pro spící osobu, tímto je vnesena nezanedbatelná nepřesnost. V [62] byla určena metabolická produkce tepla 40 W/m^2 , což je přibližně 70 % základní metabolické produkce 1 met uvažované pro klidnou činnost v sedě. Je zřejmé, že potřebný tepelný tok z těla do okolí během spánku pro zachování vyrovnané tepelné bilance během spánku bude nižší než během klidné činnosti v sedě. Z toho vychází, že při neměnných vlastnostech oděvu a povrchu pokožky, dojde pro spánek ke zvýšení komfortní termoneutralní ekvivalentní teploty okolí, což bylo pozorováno i během měření s dobrovolníky v práci [24]. I přes zmiňovaný nedostatek jsou diagramy komfortních tepelných toků jednoduchou a názornou metodou pro stanovování tepelného vjemu na jednotlivých částech lidského těla a budou dále v práci využívány.

6 Způsoby stanovení tepelných odporů

Z kapitoly 5 vychází, že pro řešení tepelné neutrality pomocí modelů je nezbytné znát tepelný odpor oděvu, resp. spací sestavy³. Pro běžné oděvy je metodika určování tepelně-izolačních vlastností popsána v normě ČSN EN ISO 9920 [65]. Ta definuje tři možné způsoby pro získání potřebných výsledků. První variantou je měření s tepelným manekýnem, druhou měření s dobrovolníky a poslední pak odečtení hodnot pro jednotlivé kusy oděvu z tabulek uvedených v příloze B normy [65] a jejich následné sečtení, případně nalezení rovnou vhodné sestavy odporů v příloze A ve stejné normě.

6.1 Sčítání známých hodnot

Na první pohled se jedná o ideální přístup, pomocí kterého lze během několika minut získat výsledky. Při snaze aplikovat tento postup na stanovení odporu spací sestavy se objevuje několik nedostatků. V první řadě norma [65] byla sestavena pro hodnocení tepelné izolace oděvů používaných na pracovištích a při činnostech v běžném životě, tedy neobsahuje izolační vlastnosti částí spací sestavy. V pracích [26] a [39] je popsáno, že tepelně-izolační schopnosti spacího oděvu, matrace, polštáře a příkrývky jsou do značné míry závislé na ploše pokožky, kterou zakrývají, resp. se kterou jsou v kontaktu. Z toho vyplývá, že příspěvek k celkové tepelné izolaci způsobený příkrývkou bude ovlivněn způsobem přikrytí jedince a jeho polohou, na což je ve spojitosti s automobilovými sedačkami upozorněno i v [65].

Navzdory výše zmíněnému bylo v [26] proměřeno několik druhů příkrývek, pyžam a matrací samostatně a následně v kombinacích. Výsledky ukázaly vysokou míru nepřesnosti při stanovování tepelného odporu spací sestavy pouhým sčítáním odporů jednotlivých komponent. Proto tento přístup nebude dále v práci využíván, ačkoli je v souladu s normou [65].

6.2 Měření pomocí tepelného manekýna

Druhým přístupem, jak zjistit požadované tepelně-izolační vlastnosti oděvů resp. spacích sestav, je dle ČSN EN ISO 9920 [65] měření s tepelným manekýnem v klimakomoře s řízeným prostředím. Tento přístup byl využit i v [26], [47] a [62]. Zmiňovaná norma předepisuje následující požadavky na měření:

- měří se požadovaný kus oblečení, nebo sestava oblečení na stojícím manekýnovi,
- rychlost proudění vzduchu menší než 0,15 m/s,
- povrchová teplota manekýna v rozmezí 32 až 34 °C,
- teplota vzduchu v okolí nejčastěji o 12 °C nižší než povrchová teplota manekýna,
- střední radiační teplota okolí se od teploty vzduchu liší nejvíce o 1 °C,

³Spací sestavou je myšlen komplet matrace s potahem, polštář a příkrývka včetně případného povlečení a pyžamo.

- relativní vzdušná vlhkost v rozmezí 30 a 70 %, ideálně 50 %,
- tepelný tok z každého měřeného segmentu by měl být vyšší než 20 W/m², lépe však/ 40 W/m².

První podmínka musí být při měření tepelné izolace spací sestavy porušena už z podstaty posuzované problematiky. Lze vyjít z normy pro měření tepelně-izolačních vlastností spacích pytlů ČSN EN ISO 23537-1 [64], které se testují pomocí tepelného manekýna ležícího ve spacím pytli na zádech na umělé zemi. Pro měření odporů spací sestavy je vhodné se co nejvíce přiblížit lidskému spánku, přičemž místo dobrovolníků je použit tepelný manekýn, jak bylo provedeno v [26] nebo [62]. Problém může nastat rovněž s posledním požadavkem, neboť z práce [26] je zřejmé, že konvenční matrace jsou významnými tepelnými izolanty. Segmenty tepelného manekýna, které jsou vahou tepelného manekýna vtlačeny do polštáře a matrace mohou mít tepelnou ztrátu nižší než 20 W/m², tyto segmenty však nelze z měření vyloučit, protože je nezbytné posuzovat celou spací sestavu jako celek, jak již bylo zmíněno dříve.

Měření probíhá v klimakomoře s tepelným manekýnem nastaveným na konstantní teplotu povrchu. Norma [65] i zdroje [62] a [26] se shodují, že tato teplota může být pro celý povrch manekýna rovna 34 °C. Teplota okolí pak dle výše zmíněných požadavků vychází na 22 °C a méně. Vzhledem k požadavkům na rozdíl střední radiální teploty a teploty vzduchu je vhodné volit teplotu vzduchu blízkou teplotě v klimakomoře bez aktivního řízení teploty a nechat klimakomoru stabilizovat po dostatečně dlouhou dobu před začátkem měření. Během samotného měření je v pravidelných intervalech ne delších než 20 minut zaznamenávána teplota povrchu manekýna, teplota okolí a tepelný tok potřebný k udržení požadované povrchové teploty. Výsledný celkový odpor proti přenosu tepla vedením, přestupem a zářením lze dopočítat dle vztahu (6.1) uvedeného v [65]

$$R_{\text{tot}} = \frac{t_s - t_a}{\dot{Q}}, \quad (6.1)$$

kde t_s [°C] je povrchová teplota tepelného manekýna a \dot{Q} [W/m²] je celkový tepelný tok z povrchu manekýna.

Vyhodnocení tepelného odporu probíhá pro jednotlivé segmenty tepelného manekýna nebo pro celého manekýna najednou. Pro stanovení izolační schopnosti samotné spací sestavy je nutné provést měření odporu proti přestupu tepla z nahé figuríny umístěné do patřičné polohy. Měření podle [65] probíhá za stejných podmínek jako při stanovování celkového tepelného odporu, pro výpočet tepelné izolace vzduchové vrstvy R_a [m²K/W] se použije vztah analogický k (6.1). Výsledná tepelná izolace spací sestavy je pak stanovena dle (6.2) vycházející z [65],

$$R_{\text{cl}} = R_{\text{tot}} - R_a. \quad (6.2)$$

Hodnotu R_{cl} používá dvouuzlový model popsany v části 5.3 i model PMV popsany v části 5.2.

Výhodou tohoto přístupu je dobrá přesnost výsledků pro konkrétní sestavy oblečení, příkrývek a matrací, nevýhodou pak vysoké nároky na přístrojové vybavení laboratoře a časová náročnost jednotlivých měření. Ze zmíněných důvodů bude tento přístup i přes svoje nedostatky využit dále v práci.

6.3 Měření s dobrovolníky

Poslední a nejnáročnější variantou posuzování tepelně-izolačních vlastností oblečení a spacích sestav je měření s dobrovolníky při činnosti, která je v měřené sestavě běžně vykonávána. Postup vychází z bilanční rovnice (5.1) uvedené v části 5.1 a je popsán v příloze E zmiňované normy ČSN ISO EN 9920 [65]. Měří se průměrná teplota pokožky \bar{t}_{sk} a teplota okolí t_a , obě [°C] a podle vztahu (6.3) převzatého z [65] je následně dopočítána celková tepelná izolace R_{tot} [m²K/W]:

$$R_{tot} = \frac{\bar{t}_{sk} - t_a}{M - W - E - E_{res} - C_{res} - S}. \quad (6.3)$$

Základním nedostatkem zmiňovaného přístupu je nutnost správného určení tepelných toků z těla pomocí jednotlivých režimů. Na komplikovanost určení všech potřebných konstant pro výpočet těchto tepelných toků upozorňuje [8]. Postup může být s výhodou použit, pokud dochází při posuzované aktivitě ke kompresím oděvu nebo je oděv vystaven vyšší míře vlhkosti, jak uvádí [65]. Vzhledem k náročnosti měření s dobrovolníky a možným komplikacím doprovázejícím tyto experimenty nebude tento postup v práci použit.

7 Pracovní hypotézy a definice experimentů

Z předchozích kapitol je jasné, že stanovení tepelného odporu ložní sestavy je klíčovým prvkem při stanovování tepelné rovnováhy spícího člověka. V experimentální části práce byly testovány následující pracovní hypotézy.

7.1 Hypotéza o různých typech přikrývky

Hypotéza 1: *Různými druhy přikrývek lze dosáhnout rozdílu v celkovém tepelném odporu spací sestavy.*



Obrázek 7.1: *Základní nastavení experimentu pro měření tepelných odporů různých spacích sestav.*

Řešené problematice se již věnoval článek [26], ve kterém měření probíhalo v souladu s normou [65]. Práce došla k závěrům, že zásadní roli pro tepelný odpor hraje tloušťka přikrývky a míra zakrytí člověka přikrývkou. Výsledky uvedené v následující kapitole byly získány stejným způsobem. Měření pomocí tepelného manekýna a klimatické komory s omezeným prouděním vzduchu již bylo důkladně popsáno v části 6.2. Pro účely práce budou posuzovány 4 sestavy lůžkovin a ložního prádla, jejichž základem je vždy konvenční matrace s bavlněným potahem umístěná na provizorním postelovém rámu, polštář s náplní z dutých vláken s bavlněným potahem a krátký set spacího bavlněného oblečení, jak je zobrazeno na obrázku 7.1. Jednotlivé sestavy se od sebe liší použitou přikrývkou, přičemž bude použita:

- letní přikrývka ze 100% polypropylenu v bavlněném potahu,
- deka z mikroplyše bez potahu,
- bavlněný potah,
- žádná přikrývka.

Přikrývky během samotného měření jsou zdokumentovány na obrázku 7.2, ze kterého je zřejmé, že při všech měření s různými přikrývkami byla zachována stejná míra zakrytí tepelného manekýna.

7.2 HYPOTÉZA O VLIVU POLOHY

Měření bude po stabilizaci probíhat po dobu 15 minut se zápisem hodnot po 20 sekundách. Vyhodnocen bude celkový tepelný odpor pro každý segment samostatně a následně bude stanoven celkový tepelný odpor sestavy dle vztahu (7.1)

$$R_{tot} = \frac{S(t_s - t_a)}{\sum_{i=1}^n Q_i S_i}, \quad (7.1)$$

kde S [m^2] je celková plocha uvažovaných segmentů tepelného manekýna, n [1] je počet uvažovaných segmentů, Q_i [W/m^2] je tepelný tok měřený na segmentu i a S_i [m^2] je plocha i -tého segmentu. Obdobně lze určit tepelný odpor pouze části měřené sestavy. Celý experiment bude třikrát zopakován.



Obrázek 7.2: Tepelný manekýn během testu různých příkrývek, zleva letní příkrývka, deka a bavlněný potah.

7.2 Hypotéza o vlivu polohy

Hypotéza 2: Poloha spícího člověka má významný vliv na celkový tepelný odpor spací sestavy.

Měření s tepelným manekýnem v [26] ukázalo významné izolační schopnosti konvenční matrace, zároveň všechna měření probíhala pouze s manekýnem v poloze na zádech. Článek [4] rozlišuje 3 základní polohy při spánku, na zádech, na břiše a na boku. Zároveň existuje řada modifikací jednotlivých poloh. Ze vztahu (7.1) a zmíněných poznatků je zřejmé, že dojde-li při změně polohy ke změně velikosti plochy v kontaktu s matrací, mělo by dojít ke změně celkového tepelného odporu, zvláště pokud jsou ostatní parametry zachovány.



Obrázek 7.3: Porovnávané polohy na levém boku a na zádech

Hypotéza bude testována porovnáním výsledků z první hypotézy a výsledků měření na levém boku za stejných podmínek, jako probíhalo měření na zádech. Polohy tepelného manekýna jsou zobrazeny na obrázku 7.3. Základem spací sestavy zůstává konvenční matrace

s bavlněným potahem umístěná na provizorním postelovém rámu, dále polštář s náplní z dutých vláken s bavlněným potahem a krátký set spacího bavlněného oblečení. Testovány budou i všechny 4 režimy přikrytí: letní přikrývkou v bavlněném potahu, dekou z mikroplyše, bavlněným potahem a bez přikrytí, míra zakrytí zachovávaná během všech měření je dobře patrná z obrázku 7.4. Výsledný odpor bude stanoven opět dle vztahu 7.1.



Obrázek 7.4: Tepelný manekýn během testu různých přikrývek v poloze na boku, zleva letní přikrývka, deka a bavlněný potah

Vzhledem k časové náročnosti stabilizace prostředí v klimakomoře budou hypotézy 7.1 a 7.2 testovány v rámci jednoho měření. Vliv pořadí měření bude vyšetřen v rámci pretestů, během kterých bude odladěna i doba stabilizace tepelného manekýna po změně přikrývky nebo polohy.

7.3 Hypotéza o určení komfortní teploty okolí

Hypotéza 3: *Lze určit takové střední radiační teploty a teploty okolí pro proměřované spací sestavy, při kterých bude dosaženo tepelného komfortu spícího člověka.*

V části 4.3.1 bylo na základě poznatků jiných autorů shledáno, že nutnou nikoli postačující podmínkou pro kvalitní spánek je tepelná neutralita neboli rovnána mezi produkcí tepla v těle a jeho přenosem do okolí. Kapitola 5 byla věnována popisu několika přístupů, jak modelovat tepelný vjem člověka a jak stanovit teplotu okolí, při které bude dosaženo tepelné rovnováhy v lidském těle.

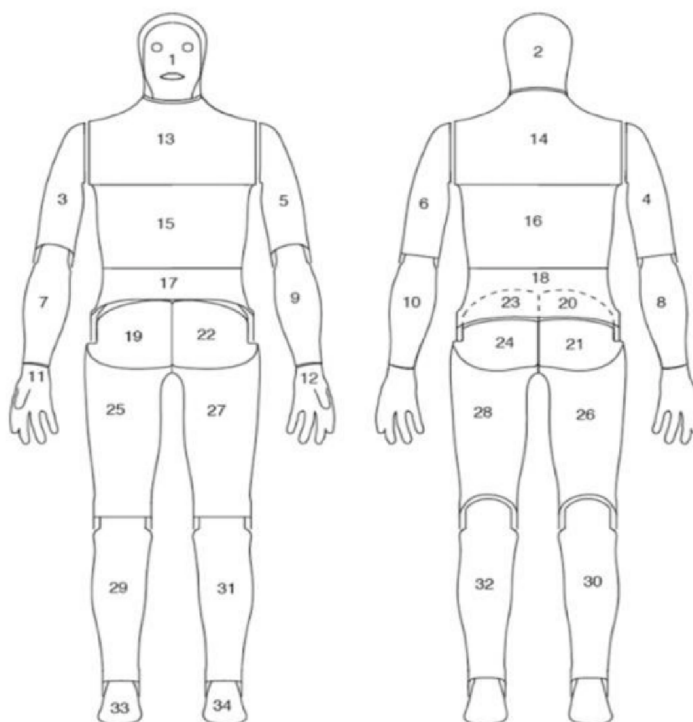
Na základě zjištěných izolačních vlastností jednotlivých sestav je možné z modelu PMV, respektive ze vztahu (5.1) získat teplotu okolí, při které bude vyrovnaná tepelná bilance mezi tělem a okolím, což je základní předpoklad pro zachování stabilní tělesné teploty. Takto získanou teplotu okolí považovanou za shodnou se střední radiační teplotou lze pak použít jako vstup do upraveného dvouuzlového modelu, který počítá vývoj teploty tělesného jádra v čase. Pro potřeby tohoto ověření bude zanedbána fluktuace tělesné teploty v průběhu spánku vlivem vnitřní termoregulace, naopak bude cílem udržet stabilní teplotu těla. Pro ověření fungování dvouuzlového modelu i při velmi nízkých tepelných produkcích těla, tedy během spánku, budou pro vybranou přikrývku dosazeny i teploty, při kterých by měla být tepelná rovnováha těla narušena. Výsledky by měly odpovídat očekávané skutečnosti, tedy zvýšení nebo snížení teploty tělesného jádra, jinak jsou data z tohoto modelu nepřínosná pro řešenou problematiku.

Při určování komfortní teploty pro spánek pomocí PMV je tělo zjednodušováno na jediný bod, určením tepelného vjemu různých částí těla pomocí diagramu tepelných toků představeného v části 5.4 je možné ověřit, zda je tento přístup vhodný. Pro komfortní spánek by se tepelný vjem měl pohybovat v oblastech neutrálně a mírně teplo.

7.4 Měřicí zařízení a vybavení pro experiment

V měření pro stanovení tepelného odporu ložních sestav byla použita dvě hlavní měřicí zařízení, tepelný manekýn Newton a klimatická komora. Bližší informace o nich jsou uvedeny níže. Dále během experimentu byla použita i termokamera, neboť díky ní lze rychle a jednoduše ověřovat nastavení experimentu a odhadovat výsledky.

Tepelný manekýn



Obrázek 7.5: Rozdělení tepelného manekýna Newton na jednotlivé zóny, převzato z [8].

Pro nepřímé měření tepelného odporu ložních sestav dle [65] byl použit tepelný manekýn Newton od společnosti Thermetrics, jehož zásadní součástí manekýna je řídicí software ThermDAC8, který umožňuje nastavení požadovaných parametrů, zajišťuje jejich regulaci a zaznamenává naměřená data. Tvarově manekýn reprezentuje průměrnou lidskou postavu. Pro snazší manipulaci a nastavení do požadovaných poloh je vybaven klouby v kotnících, kolenou, kyčlích, loktech a ramenou. Jeho základními technickými parametry dle [9] jsou:

- měření v rozsahu okolních teplot -20 °C až $+50\text{ °C}$,
- přesnost měření teploty $\pm 0,1\text{ °C}$,
- 2 čidla teploty vzduchu,
- čidlo relativní vlhkosti,
- čidlo měření rychlosti vzduchu,
- dýchací mechanismus,
- filtrační zařízení pro monitoring vdechovaných částic.

Tepelný manekýn je rozdělen na 34 nezávisle vyhřívaných a řízených segmentů. Všem částem lze předepsat buď konstantní teplotu, nebo konstantní měrný tepelný tok, přičemž pro každý segment může být nastavena individuální hodnota. Jednotlivé zóny manekýna jsou naznačeny na obrázku 7.5. V souladu s [65] bude při experimentech využíváno vyhřívání na konstantní teplotu 34 °C ve všech částech. Segmenty, které se díky poloze manekýna dostanou pod jiný segment budou z vyhodnocování měření vyloučeny.



Obrázek 7.6: Klimatická komora na FSI VUT, převzato z [15]

Klimatická komora

Klimatická komora je zařízení, které je využíváno k simulaci daných klimatických podmínek, což je nezbytné pro možnost měření tepelného odporu podle [65]. Komora na FSI VUT umožňuje dle [15] řídit teplotu vzduchu a jeho relativní vlhkost. Dále je možné simulovat záření slunce, což je pro posuzovanou problematiku bezpředmětné. Komora neumožňuje nastavení teploty stěn a umožňuje jen velmi omezeně regulaci rychlosti proudění vzduchu. Pro omezení proudění vzduchu během experimentů bude před ventilátorovou stěnu přidána textilní zástěna. Komora je široká 5 metrů, dlouhá 8,85 metru a vysoká 3,8 metru, umožňuje tedy testovat i relativně velké objekty, např. celé automobily, jak je zobrazeno na obrázku 7.6. Klimatická komora je často využívána v kombinaci s tepelným manekýnem k testování tepelného komfortu. Základní technické parametry klimatické komory na VUT v Brně dle [15] jsou:

- teplotní rozsah (se solární simulací): -10 °C až +50 °C,
- teplotní rozsah (bez solární simulace): -40 °C až +85 °C,
- rychlost teplotní změny (IEC 60068-35-5): ± 1 °C,
- vlhkostní rozsah (se solární simulací): 30 % – 60 % RH,
- vlhkostní rozsah (bez solární simulace): 30 % – 95 % RH,
- stabilita udržování vlhkosti: ± 5 %,

7.4 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ A VYBAVENÍ PRO EXPERIMENT

- rosný bod: 5 °C až 49 °C,
- solární simulace až 10 kW, při měrném tepelném toku 1000 W/m²,
- výměna vzduchu při vyvětrávání: 3000 m³/h,
- výměna vzduchu při provozu: 300 m³/h,
- vnitřní objem komory: 152 m³.

Provizorní lůžko a další vybavení

Kromě samotného měřicího vybavení bylo nezbytné sestavit provizorní postelový rám, na který by mohla být umístěna matrace. Jako vhodná výška roštu postele od země bylo zvoleno 30 cm. Pro jednoduchost byly jako stavební materiál zvoleny profily Alutec. Fotografie hotového lůžka je na obrázku 7.7.



Obrázek 7.7: Hotové provizorní lůžko umístěné v klimatické komoře



Obrázek 7.8: Provizorní lůžko s používanou matrací.

Další nutnou součástí pro experiment byla matrace a další lůžkoviny. Použitá matrace byla původně určena pro řidiče kamionů, měla tak nestandardní šířku 70 cm, což pro potřeby měření nebylo významné. Rovněž se jednalo o matraci, která byla vybavena vnitřní elektronikou, ta měla umožnit chlazení a případně vyhřívání matrace na základě měřených parametrů vnějšího prostředí. Během experimentu nebyla tato elektronika zapojena

a jednalo se tedy o vyšší matraci z konvenční polyurenatové pěny. Fotografie matrace umístěné na provizorním lůžku je na obrázku 7.8.

Další požité lůžkoviny:

- bavlněný potah na matraci hladký, 90×200 cm,
- polštář 70×90 cm s výplní z polyesterových vláken,
- letní příkrývka ze 100% polyesteru 140×200 cm,
- mikroplyšová deka 140×200 cm ze 100% polyesteru,
- bavlněný potah na polštář,
- bavlněný potah na peřinu,
- krátké bavlněné pyžamo (triko a trenýrky).

7.5 Rozbor nejistot měření

Všechny měřené veličiny jsou zatíženy nepřesnostmi, které může být způsobena nejrůznějšími vlivy – od přesnosti použitých měřicích přístrojů, až po pečlivost osoby provádějící experiment. Vlivem toho mají výsledky stejného měření určitý rozptyl. Nejistotou měření se dle [11] rozumí takový rozsah hodnot, ve kterém se s danou spolehlivostí nachází skutečná hodnota měřené veličiny. Společně se zpracováním naměřených výsledků je nutné provést rozbor nejistot naměřených hodnot, aby bylo možné vyhodnotit spolehlivost a opakovatelnost měření. V knize [35] je uvedeno, že nejistota měření je složena ze dvou dílčích nejistot:

- nejistota typu A (u_{Ay}) zachycující opakovatelnost měření,
- nejistota typu B (u_{By}) vychází z nejistot vlastního měření.

Nejistota typu A

Nejistota typu A je dle [10] určována jako výběrová směrodatná odchylka měřené veličiny y podělená druhou odmocninou z počtu měření, jak je zřejmé ze vztahu (7.2)

$$u_{Ay} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (7.2)$$

kde u_{Ay} je nejistota typu A měřené veličiny y ⁴, n [-] je počet měření veličiny y , y_i je konkrétní naměřená hodnota a \bar{y} je aritmetický průměr měřené veličiny y ze všech měření. Uvedený vztah platí za předpokladu, že všechna měření veličiny y probíhala za stejných podmínek a naměřené hodnoty veličiny y mají normální rozložení distribuční funkce. Spolehlivost takto získané nejistoty dat s Gaussovým rozdělením přibližně 68,3 %, jak je uvedeno v [10]. Práce [11] upozorňuje na nutnost použití bezpečnostního faktoru v případě nízkého počtu měření ($n < 10$). Explicitně pak zmiňuje, že tento faktor je zásadní

⁴Jednotka měřené veličiny y je shodná s jednotkou jejího průměru \bar{y} i s jednotkou nejistoty, tato jednotka je dána měřenou veličinou a proto není uvedena.

7.5 ROZBOR NEJISTOT MĚŘENÍ

pro měření, která nebyla opakována více než čtyřikrát. Vzhledem k časové náročnosti experimentu budou realizována vždy 3 měření za stejných podmínek, je tedy nutné použít upravený vztah (7.3) uvedený v [11]

$$u_{Ay} = k_{uA} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (7.3)$$

kde k_{uA} [-] je koeficient bezpečnosti. Hodnoty tohoto koeficientu pro různé počty měření jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1: Hodnoty bezpečnostního koeficientu nejistoty typu A v závislosti na počtu měření

| n | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| k_{uA} | 7 | 2,3 | 1,7 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1 |

Nejistota typu B

Nejistota typu B v sobě zahrnuje nejistoty měřících přístrojů, v práci [11] je označena rovněž jako systematická nejistota, což je v rozporu s [10], kde je za systematickou nejistotu považována nepřesnost vnesená do vlastního měření. V případě měření s tepelným manekýnem v klimakomoře by touto nepřesností mohla být odlišná střední radiační teplota a teplota okolního vzduchu, ačkoli tyto hodnoty budou velmi blízké. Dle [10] lze nejistotu typu B nepřímo měřené veličiny $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ určit ze vztahu (7.4)

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial u_{x_i}} u_{x_i} \right)^2}, \quad (7.4)$$

kde u_{By} je nejistota typu B nepřímo měřené veličiny y , m je počet přímo měřených veličin nezbytných pro výpočet veličiny y , x_i je i -tá přímo měřená veličina a u_{x_i} je nejistota měření veličiny x_i . V práci budou posuzovány nejistoty měření tepelných odporů, které jsou dopočítávány ze tří měřených veličin dle vztahu (6.1) uvedeného v předchozí kapitole. Dosazením do (7.4) lze získat vztah (7.5)

$$u_{B_{R_{\text{tot}}}} = R_{\text{tot}} \sqrt{\frac{u_{t_{sk}}^2 + u_{t_a}^2}{t_{sk}^2 - t_a^2} + \frac{u_{\dot{Q}}^2}{\dot{Q}^2}}, \quad (7.5)$$

který bude používán pro určení nejistoty typu B nepřímo měřené tepelné izolace. Nejistoty jednotlivých měřených veličin se spolehlivostí 95 % jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2: Nejistoty měřených veličin při 95% spolehlivosti, hodnoty převzaty z [10]

| Veličina | Nejistota | Velikost nejistoty |
|-----------------|---------------|------------------------------|
| Tepelný tok | $u_{\dot{Q}}$ | $\pm 0,1\%$ z měřené hodnoty |
| Teplota pokožky | $u_{t_{sk}}$ | $\pm 0,1$ °C |
| Teplota okolí | u_{t_a} | $\pm 0,1$ °C |

Kombinovaná nejistota

V praxi je měření často zatíženo oběma nejistotami najednou, je tedy vhodné tyto nejistoty spojit do jediné kombinované nejistoty pomocí vztahu (7.6), jak uvádí [10].

$$u_{C_y} = \sqrt{u_{A_y}^2 + u_{B_y}^2}, \quad (7.6)$$

kde u_{C_y} je kombinovaná nejistota měřené veličiny y . Tato nejistota bývá dle [11] označována rovněž jako standardní nejistota. Ta představuje interval výskytu skutečné veličiny se spolehlivostí přibližně 68 %, přičemž se předpokládá normální rozdělení měřených veličin. Pro případy, kdy je nezbytné určit interval skutečné veličiny s větší spolehlivostí, je v [10] uveden vztah pro rozšířenou nejistotu (7.7)

$$U_y = k \cdot u_{C_y}, \quad (7.7)$$

kde U_y je rozšířená nejistota měřené veličiny y a k je koeficient rozšíření. Práce [11] uvádí, že běžně používány jsou hodnoty $k = 2$ pro stanovení intervalu se spolehlivostí 95 % nebo $k = 3$ pro spolehlivost 99,7 %. V této diplomové práci bude při výpočtu nejistot měření uvažována spolehlivost 95 %.

8 Postup měření, zpracování dat a získané výsledky

8.1 Měření

Pretest

Cíl měření: ověřit metodiku měření tepelného odporu spací sestavy, stanovit pořadí měření a určit dobu stabilizace.

Nastavení klimatické komory: klimatická komora vypnuta.

Nastavení tepelného manekýna: povrchová teplota všech segmentů 34 °C, dechový simulátor vypnutý, manekýn leží na zádech, případně na boku.

Nastavení ložní sestavy: matrace umístěná v kabinsimulátoru, bavlněný potah, letní přikrývka z dutých vláken v bavlněném povlečení, polštář z dutých vláken v bavlněném povlečení, letní pyžamo (triko s krátkým rukávem a šortky, oboje bavlněné), horní hrana přikrývky v úrovni loktů, jak je zachyceno na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1: Fotodokumentace z pretestu v kabinsimulátoru ukazující měřené případy s přikrývkou a bez přikrývky při poloze na zádech a na boku

Sledované veličiny: teplota v klimatické komoře, rychlost proudění vzduchu, povrchová teplota jednotlivých segmentů tepelného manekýna, měrný tepelný tok do jednotlivých segmentů potřebný k udržení požadované teploty tepelného manekýna.

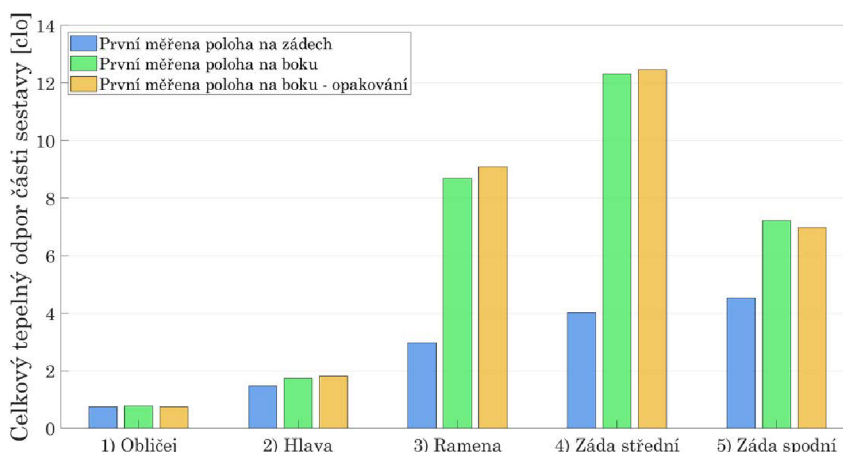
Průběh pretestu 1

1. Uložení tepelného manekýna na matraci do polohy na zádech, zapnutí tepelného manekýna, stabilizace po dobu 1 hodiny.

2. Měření prvního nastavení ložní sestavy po dobu 15 minut.
3. Přidání povlečené letní příkrývky, stabilizace po dobu 60 minut, následně měření po dobu 15 minut.
4. Odebrání příkrývky, změna polohy tepelného manekýna, manekýn leží na levém boku, levá paže skrčená pod tělem opora předloktím o matraci, pravá paže mírně pokrčena, aby dlaň ležela na stehně, obě nohy pokrčeny, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
5. Přidání povlečené letní příkrývky, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.
6. Ukončení měření, uložení všech hodnot, vypnutí tepelného manekýna.

Závěry získané na základě pretestu: Z prvního pretestu je zřejmé, že pro stabilizaci po přidání příkrývky stačí 30 minut, po změně polohy je vhodné nechat na stabilizaci více času. Pretest bude opakován se změnou pořadí měření. Nejprve bude měřen případ na boku s příkrývkou, následně na boku bez příkrývky, dále na zádech bez příkrývky a na závěr na zádech s příkrývkou.

Výsledky druhého kola pretestu se pro polohu na zádech liší pro segmenty zad a ramen, kde dochází k poklesu měřeného tepelného toku na třetinu. Třetí pretest zachová pořadí měření z druhého pretestu, pro ověření výsledků z druhého měření.

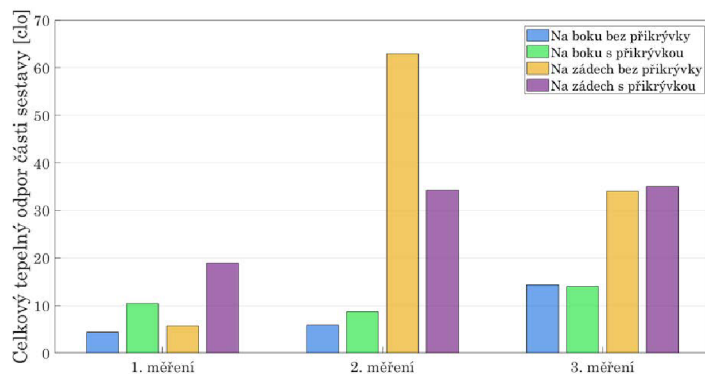


Obrázek 8.2: Vliv pořadí měření na celkový tepelný odpor vybraných segmentů.

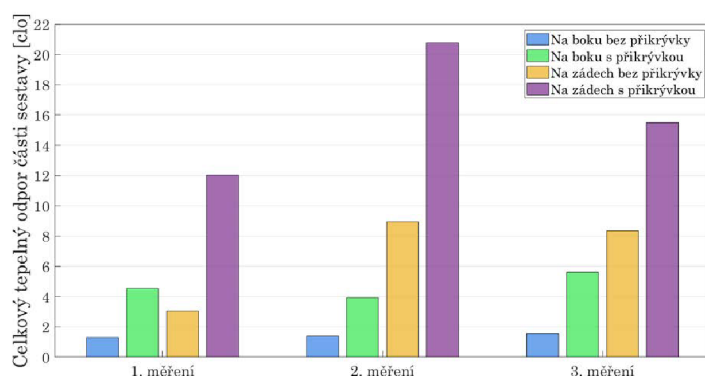
Během třetího pretestu byly naměřeny stejné hodnoty jako během druhého, rozdíl tedy nevznikl vlivem náhodné nejistoty. Lze předpokládat, že tento nesoulad do jisté míry vychází z téměř adiabatické podmínky, kterou vytváří polštář a matrace na inkriminovaných segmentech. Dále bylo shledáno, že je vhodnější začít měření při poloze na zádech, neboť manekýn mnohem lépe zvyšuje tepelný tok, ale nemá možnost se aktivně ochladit, což prodlužuje stabilizaci některých segmentů.

Nesoulad ve výsledcích pro polohu na zádech bez příkrývky vznikající na základě různého pořadí měření je zachycen v grafu na obrázku 8.2 a odpovídá výše zmiňovanému. Segmenty hlavy a obličeje mají možnost odvádět teplo do okolí a tak se jejich celkový tepelný odpor vlivem různého pořadí měření téměř nemění. Ramena i záda, která jsou v kontaktu s matrací vykazují velký nárůst lokálního celkového odporu, pokud je první měřena poloha na boku a až pak poloha na zádech.

8.1 MĚŘENÍ



Obrázek 8.3: Celkový tepelný odpor segmentu 20 (R Up Thigh Grd) při opakovaném měření různých sestav.



Obrázek 8.4: Celkový tepelný odpor segmentu 21 (R Up Thigh Bk) při opakovaném měření různých sestav.

Na základě vyhodnocení všech pretestů bylo usouzeno, že bude vhodné z výsledků experimentů vynechat segmenty R Up Thigh Grd, R Up Thigh Bk, L Up Thigh Grd, L Up Thigh Bk, které se během měření dostávají do polohy pod jiný segment. Při měření vykazují malý tepelný tok a velkou nestabilitu, jak je zřejmé z grafů 8.3 a 8.4. Plocha těchto segmentů činí asi 6,2 % celkové plochy manekýna a tedy se rozptyl hodnot neměřených na těchto segmentech projevuje i v nejistotě celkového tepelného odporu celé sestavy.

Experiment 1

Cíl měření: stanovit celkový tepelný odpor ložní sestavy bez příkrývky a s 3 různými příkrývkami, popsány v části 7.1, v polohách na boku a na zádech.

Nastavení klimatické komory: teplota vzduchu 22 °C, vlhkost neřízena, proudění vzduchu omezeno zástěnou.

Nastavení tepelného manekýna: povrchová teplota všech segmentů 34 °C, dechový simulátor vypnutý, manekýn leží na zádech, později i na boku.

Nastavení ložní sestavy: lůžko z profilů Alutec, matrace, bavlněný potah, letní příkrývka z dutých vláken v bavlněném povlečení, polštář z dutých vláken v bavlněném povlečení, letní pyžamo (triko s krátkým rukávem a šortky, oboje bavlněné), horní hrana



Obrázek 8.5: Uložení tepelného manekýna v klimatické komoře před začátkem experimentu

přikrývky v úrovni loktů, jak je znázorněno na obrázku 8.5. Dále bude použita mikroplyšová deka a bavlněný potah bez peřiny.

Sledované veličiny: teplota v klimatické komoře – měřena nad oběma čely lůžka ve výšce 1 m v ose matrace, rychlost proudění vzduchu – měřena nad hranou lůžka u nohou tepelného manekýna ve výšce 1 m⁵, povrchová teplota jednotlivých segmentů tepelného manekýna, měrný tepelný tok do jednotlivých segmentů potřebný k udržení požadované teploty tepelného manekýna.

Průběh experimentu

1. Zapnutí klimatické komory, uložení tepelného manekýna do polohy na zádech, přikrytí letní přikrývkou z dutého vlákna, stabilizace po dobu 1 hodiny.
2. Zapnutí tepelného manekýna, stabilizace po dobu 2 hodin.
3. Měření prvního nastavení ložní sestavy po dobu 15 minut.
4. Změna přikrývky, výměna povlečené přikrývky z dutých vláken za mikroplyšovou deku, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.
5. Změna přikrývky, výměna mikroplyšové deky za bavlněný potah na peřinu, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.
6. Odstranění přikrývky, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.
7. Změna polohy tepelného manekýna, manekýn leží na levém boku, levá paže skrčena pod tělem opora předloktím o matraci, pravá paže mírně pokrčena, aby dlaň ležela na stehně, obě nohy pokrčeny, výsledná poloha je dobře patrná z obrázku 8.6, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
8. Přikrytí manekýna bavlněným potahem, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.
9. Změna přikrývky, výměna bavlněného potahu za mikroplyšovou deku, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.

⁵Umístění teploměrů a anemostatu je poměrně dobře patrné z obrázku 8.5, případně i 8.6

8.1 MĚŘENÍ



Obrázek 8.6: Poloha tepelného manekýna při měření na boku

10. Změna příkrývky, výměna mikroplyšové deky za letní příkrývku z dutého vlákna v bavlněném povlečení, stabilizace po dobu 30 minut, následně měření po dobu 15 minut.
11. Ukončení měření, uložení všech hodnot, vypnutí klimatické komory i tepelného manekýna.

Celý experiment bude celkem třikrát opakován, aby bylo možné vyhodnotit kombinovanou nejistotu měření celkového tepelného odporu ložní sestavy a porovnat, zda lze různými příkrývkami a polohami při spánku dosáhnout různých tepelných odporů.

Experiment 2

Cíl měření: stanovit kombinovaný tepelný odpor přestupu tepla a záření z povrchu tepelného manekýna do okolí v polohách na boku a na zádech.

Nastavení klimatické komory: teplota vzduchu 22 °C, vlhkost neřízena, proudění vzduchu omezeno zástěnou.

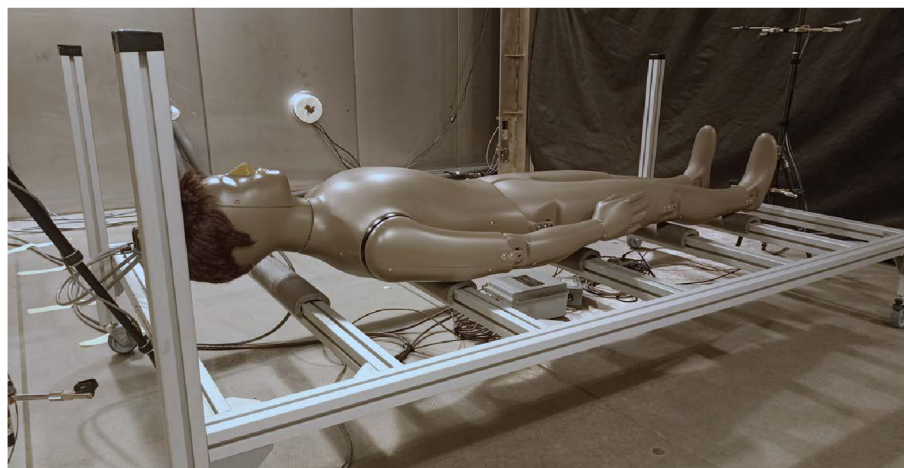
Nastavení tepelného manekýna: povrchová teplota všech segmentů 34 °C, dechový simulátor vypnutý, manekýn leží na zádech, později i na boku.

Nastavení ložní sestavy: lůžko z profilů Alutec, tepelná izolace Mirelon jako ochrana před poškozením manekýna o rošt postele – viz obrázek 8.7.

Sledované veličiny: teplota v klimatické komoře – měřena nad oběma čely lůžka ve výšce 1 m v ose matrace, rychlost proudění vzduchu – měřena nad hranou lůžka u nohou tepelného manekýna ve výšce 1 m, povrchová teplota jednotlivých segmentů tepelného manekýna, měrný tepelný tok do jednotlivých segmentů potřebný k udržení požadované teploty tepelného manekýna.

Průběh experimentu

1. Uložení tepelného manekýna na záda na rošt postele, zapnutí klimatické komory, stabilizace po dobu 1,5 hodiny.
2. Zapnutí tepelného manekýna, stabilizace po dobu 1,5 hodin.



Obrázek 8.7: Měření tepelného odporu mezní vrstvy při poloze na zádech



Obrázek 8.8: Měření tepelného odporu mezní vrstvy při poloze na boku

3. Měření v poloze na zádech po dobu 15 minut.
4. Změna polohy tepelného manekýna, manekýn leží na levém boku, levá paže skrčená pod tělem opora předloktím o rošt postele, pravá paže mírně pokrčena, obě nohy pokrčeny – viz obrázek 8.8, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
5. Ukončení měření, uložení všech hodnot, vypnutí klimatické komory i tepelného manekýna.

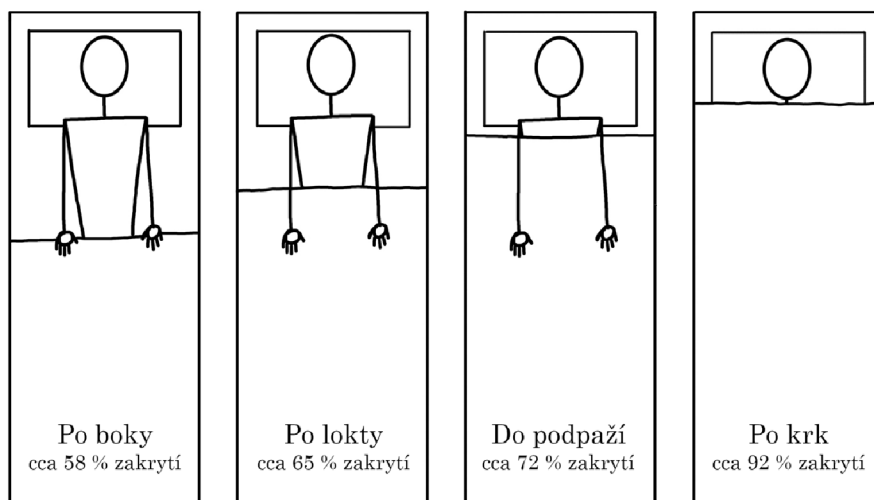
Pro korektní vyhodnocení by bylo vhodné opakovat měření několikrát. Vzhledem k vytíženosti klimatické komory a časové náročnosti měření bylo shledáno, že postačí jedno opakování, ačkoli nejistotu naměřených hodnot nelze určit. Na základě zkušenosti z předchozích provedených experimentů je možné předpokládat, že naměřená hodnota je dostatečně přesná pro použití v uvažované aplikaci.

Experiment 3

Cíl měření: stanovit celkový tepelný odpor pro různé míry zakrytí tepelného manekýna letní příkrývkou v polohách na boku a na zádech a ověřit, že míra zakrytí má vliv na cel-

8.1 MĚŘENÍ

kovou izolační schopnost spací sestavy. Skica porovnávaných zakrytí při poloze na zádech včetně odhadnuté celkové míry zakrytí těla je na obrázku 8.9.



Obrázek 8.9: Porovnávané míry zakrytí při poloze na zádech, míra zakrytí odhadnuta na základě obrázků z [26]

Nastavení klimatické komory: teplota vzduchu 22 °C, vlhkost neřízena, proudění vzduchu omezeno zástěnou.

Nastavení tepelného manekýna: povrchová teplota všech segmentů 34 °C, dechový simulátor vypnutý, manekýn leží na zádech, později i na boku.



Obrázek 8.10: Měřené míry zakrytí letní příkrývkou při poloze na zádech

Nastavení ložní sestavy: lůžko z profilů Alutec, matrace, letní příkrývka z dutých vláken v bavlněném povlečení, polštář z dutých vláken v bavlněném povlečení, letní pyžamo (triko s krátkým rukávem a šortky, oboje bavlněné), horní hrana příkrývky pod bradou, jak je zřejmé z fotografie na obrázku 8.10.

Sledované veličiny: teplota v klimatické komoře – měřena nad oběma čely lůžka ve výšce 1 m v ose matrace, rychlost proudění vzduchu – měřena nad hranou lůžka u nohou tepelného manekýna ve výšce 1 m, povrchová teplota jednotlivých segmentů tepelného manekýna, měrný tepelný tok do jednotlivých segmentů potřebný k udržení požadované teploty tepelného manekýna.

Průběh experimentu

1. Zapnutí klimatické komory, uložení tepelného manekýna do polohy na zádech, přikrytí letní příkrývkou po krk, stabilizace po dobu 1 hodiny.
2. Zapnutí tepelného manekýna, stabilizace po dobu 2 hodin.



Obrázek 8.11: Měřené míry zakrytí letní přikrývkou při poloze na boku

3. Měření s přikrývkou po krk po dobu 15 minut.
4. Posunutí horní hrany přikrývky do podpaží, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
5. Posunutí horní hrany přikrývky na boky, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
6. Změna polohy tepelného manekýna, manekýn leží na levém boku, levá paže skrčená pod tělem opora předloktím o rošt postele, pravá paže mírně pokrčena, obě nohy pokrčeny, horní hrana přikrývky na krku. Viz obrázek 8.11, stabilizace po dobu 90 minut, následně měření po dobu 15 minut.
7. Posunutí horní hrany přikrývky do pravého podpaží, levé předloktí zůstává zakryto, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
8. Posunutí horní hrany přikrývky na boky, stabilizace po dobu 45 minut, následně měření po dobu 15 minut.
9. Ukončení měření, uložení všech hodnot, vypnutí klimatické komory i tepelného manekýna.

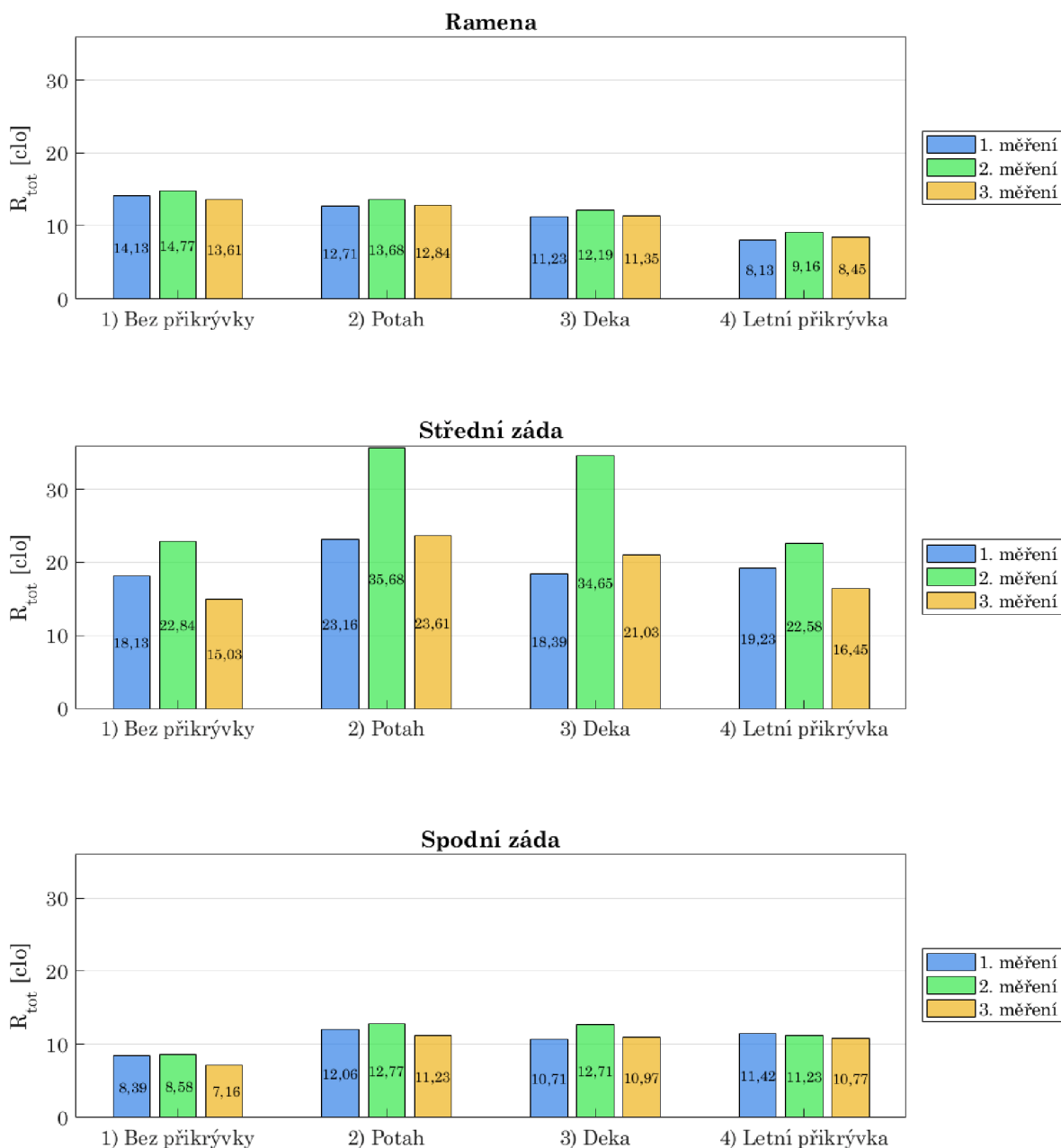
Měření různých možností zakrytí ležícího manekýna letní přikrývkou bylo provedeno pouze jednou. Není tedy možné stanovit rozšířenou nejistotu měření, neboť jsou třeba minimálně dvě opakování, lépe tři nebo čtyři. Provedené měření má sloužit k získání představy o vlivu nastavení samotné přikrývky na celkový tepelný odpor spací sestavy a přiblížit možnosti regulace tepelného komfortu během spánku právě úpravou míry zakrytí.

8.2 Zpracování naměřených dat

V rámci experimentu 1 byly získány 3 sady dat pro každou spací sestavu měřenou v obou polohách. Konkrétně se jednalo o tepelný tok z každého segmentu, povrchovou teplotu každého segmentu, dále teplotu okolí ve dvou bodech a rychlost proudění vzduchu. Z první třech zmiňovaných byl podle vztahu (6.1) dopočítán tepelný odpor každého segmentu.

Při poloze na zádech byly pro segmenty ramen a obě části zad (zóny 14, 16 a 18 na obrázku 7.5) naměřené odpory pro všechny sestavy v rámci jednoho měření výrazně rozdílné, ačkoli pro tyto segmenty byly očekávány podobné hodnoty vzhledem k téměř konstantní okrajové podmínce. Vliv přikrývky a jejího přesného položení lze pro tyto segmenty považovat za zanedbatelný, neboť dochází k naprosto minimálnímu kontaktu a to jen na segmentech zad. Významný vliv na tepelný odpor měřený pomocí těchto segmentů je kontakt s polštářem a matrací, který se neměnil během celého měření jedné

8.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT



Obrázek 8.12: Porovnání celkových tepelných odporů při poloze na zádech naměřených na segmentech v kontaktu s matrací a polštářem

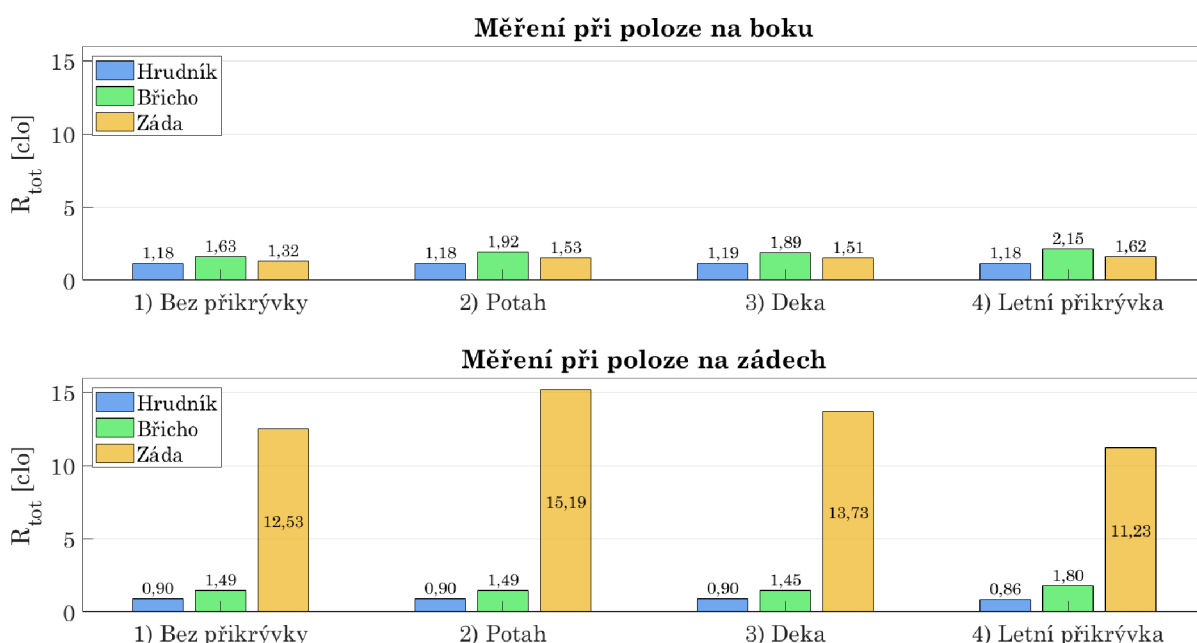
sady sestav, a přesto se hodnoty pro jednotlivá měření poměrně výrazně mění, hlavně v oblasti středních zad, jak je zřejmé z obrázku 8.12.

Nejistota měření by mohla vycházet z postupného stlačování matrace a polštáře pod manekýnem. Ten byl však do polohy pro první měření nastaven vždy den předem a tedy je poměr časového intervalu mezi dvěma měřeními a celkovou dobou strávenou ve stejné poloze na zádech malý. Navíc naměřené hodnoty nevykazovaly jasný trend s postupujícím časem měření. Pravděpodobněji tato nejistota vychází z téměř adiabatické okrajové podmínky a velmi malému výkonu potřebnému k udržení požadované teploty rozměrného segmentu. Měřené výkony pro zóny o ploše $0,079 \text{ m}^2$ (ramena), respektive $0,064 \text{ m}^2$ (střední záda) a $0,050 \text{ m}^2$ (spodní záda) se pohybovaly v desetínách wattu, rozdíl $0,5 \text{ W}$

mezi dvěma měřeními pak může způsobit až 100% nárůst výsledného tepelného odporu daného segmentu.

Měrný tepelný tok z problematických zón byl měřen v jednotkách W/m^2 , pro dostatečnou přesnost měření požaduje norma [65] tepelný tok minimálně $20 W/m^2$, lépe více než $40 W/m^2$. Měření na těchto segmentech se přiblížilo k hranici svých technických možností a jeho nejistota není možné jednoduše určit, lze ale předpokládat, že může být téměř shodná s měřenou hodnotou. Zóny ramen a zad není možné jednoduše odstranit z měření, neboť zachycují významnou okrajovou podmínku. Zároveň ukazují zásadní vliv matrace na lokální celkový tepelný odpor, to zachycuje i graf na obrázku 8.13.

Pro polohu na zádech jsou měřené hodnoty tepelného odporu na popisovaných segmentech téměř desetinásobné oproti poloze na boku. Při té pak data vesměs kopírují vývoj celkového tepelného odporu sestavy, ačkoli tepelná izolace zad při použití potahu vychází větší než při použití deky. To je pravděpodobně způsobeno lepším přilehnutím potahu k manekýnovi, a tedy horší možností cirkulace vzduchu mezi manekýnem a přikrývkou.

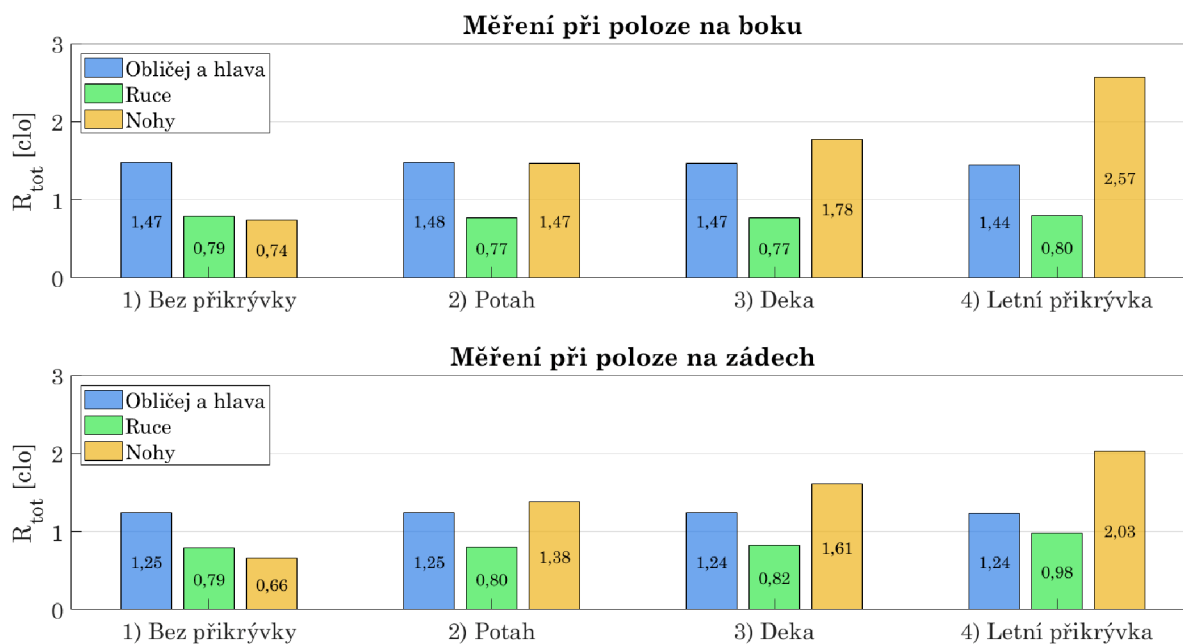


Obrázek 8.13: Porovnání celkového tepelného odporu různých spacích sestav měřeného na hrudníku, břiše a zádech při poloze na boku a na zádech

Z dat v grafu na obrázku 8.13 je dále zřejmá stabilní okrajová podmínka na hrudníku při obou polohách. Při poloze na zádech je celý hrudník, krytý pouze pyžamem, vystaven do okolí. Při poloze na boku je tepelná izolace měřená na hrudníku vyšší, neboť část hrudníku se dostává do kontaktu s matrací. Data popisující izolaci na břiše manekýna, tedy segmenty žaludek (15) a pas (17), ukazují při poloze na boku vzestupnou tendenci s přibývajícím přikrývkou. Je zřejmé, že tepelný odpor bavlněného potahu a deky jsou si velmi blízké a v oblasti břicha záleží na jejich nastavení. Zároveň je lze jen obtížně porovnávat, neboť jejich rozdíl je menší než předpokládaná nejistota měření.

Mnohem vyrovnanější hodnoty vycházejí pro oblast břicha při poloze na zádech, projevuje se zde pravděpodobně vrstvení obou částí pyžama a dále pouze malá plocha zakrývaná přikrývkou. Při použití letní přikrývky vychází hodnota tohoto lokálního tepelného odporu nejvyšší, ostatní hodnoty jsou v rámci rozšířených nejistot srovnatelné.

8.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT



Obrázek 8.14: Porovnání celkového tepelného odporu různých spacích sestav měřeného na obličej a hlavě, rukou a nohách při poloze na boku a na zádech

Další zajímavé porovnání lokálních tepelných odporů představuje obrázek 8.14, který zachycuje porovnání celkových odporů obličej a hlavy, rukou a nohou pro různé sestavy při poloze na boku i na zádech. Hodnoty pro ruce, resp. nohy byly získány pomocí vztahu 7.1 z hodnot pro levou a pravou ruku, případně nohu.

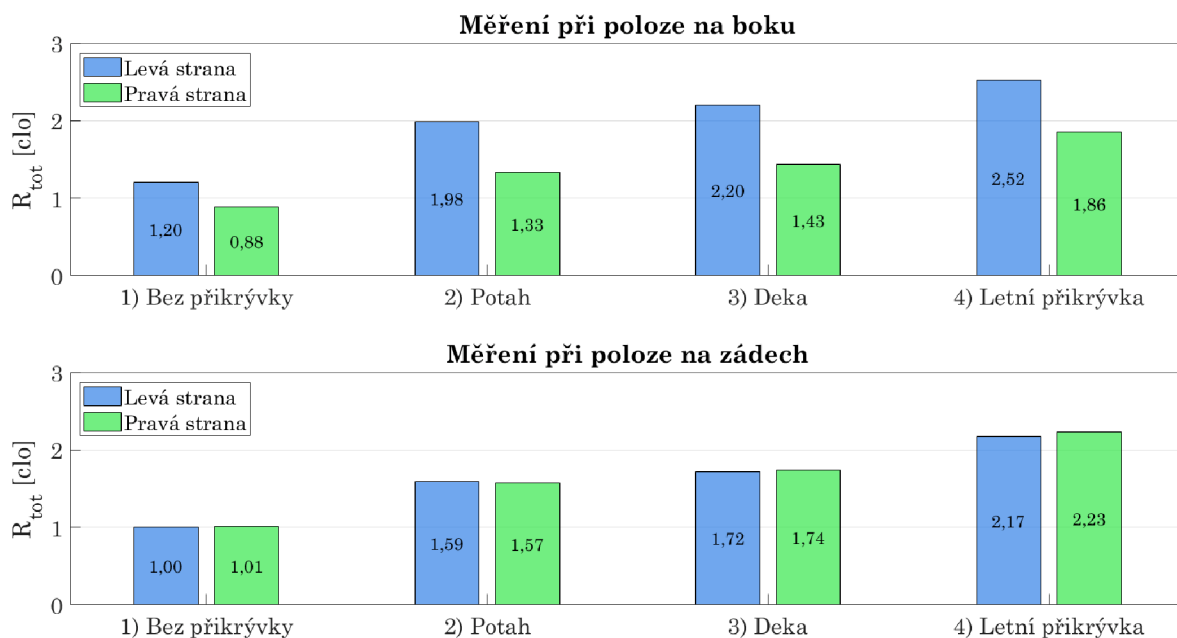
Obličej a hlava reprezentují pro obě polohy prakticky neměnnou okrajovou podmínku, což dokazují jen velmi malé rozdíly mezi naměřenými hodnotami. Pro polohu na boku vychází tepelná izolace této části větší než při poloze na zádech, protože část obličej je v kontaktu s polštářem a část hlavy vystavená do prostoru je kryta vlasy. Při poloze na zádech je celý obličej vystaven do prostoru, a tedy odvádí více tepla z těla.

Rovněž velmi vyrovnané hodnoty tentokrát i pro obě polohy byly naměřeny na rukou, pro měření bez příkrývky s potahem a dekou vychází hodnoty velmi blízké. Vzhledem k umístění rukou nad příkrývkou to dává smysl. Zvýšení tepelného odporu při poloze na zádech je patrné při přidání letní příkrývky, která díky své tloušťce a poddajnosti umožňuje lepší přizpůsobení se rukám, ačkoli jsou pouze položeny na příkrývce.

Nohy byly do obrázku 8.14 zvoleny jako ideální segment k porovnávání vlivu příkrývky, ačkoli v lehkém kontaktu s matrací. Ukazuje se, že při poloze na boku jsou nohy lépe izolovány, než při poloze na zádech. To nejspíš vychází z většího kontaktu nohy s matrací při poloze na boku a výhodnější pozici nohou vůči sobě. Zároveň je menší plocha v kontaktu přímo s příkrývkou. Při poloze na zádech jsou obě nohy v lehkém kontaktu s matrací, zároveň jsou obě přímo pod příkrývkou, a tedy je umožněn snazší přenos tepla do okolí. Zvyšování lokálního tepelného odporu pak odpovídá zvyšování celkového tepelného odporu, dokonce je zřetelný rozdíl mezi potahem a dekou.

Rozdíl mezi polohou na boku a na zádech a asymetrii, kterou poloha na boku vytváří, zachycuje graf celkových tepelných odporů levé a pravé strany těla pro všechny posuzované sestavy na obrázku 8.15. Segmenty zasahující do obou stran těla byly pro potřeby tohoto grafu z výpočtu celkového tepelného odporu vyloučeny, neboť by nepřinášely žádnou užitečnou informaci a naopak by zmenšovaly případný rozdíl mezi oběma stranami.

Předložené výsledky nejsou nikterak překvapivé, vystihují symetrii polohy na zádech a jasně ukazují vliv izolační schopnosti matrace při poloze na boku. Levá strana, na které manekýn při poloze na boku ležel, je výrazně lépe izolovaná, naproti tomu pravá strana, která je krytá pouze příkrývkou případně pyžamem, přenáší do okolí výrazně více tepla. Se zvyšující se celkovou izolační schopností příkrývky rostou i tepelné odpory pro obě strany, přičemž rozdíl mezi nimi se po přidání libovolné příkrývky ustálí okolo 0,7 clo.



Obrázek 8.15: Porovnání celkového tepelného odporu různých spacích sestav měřeného na levé a pravé straně těla při poloze na boku a na zádech

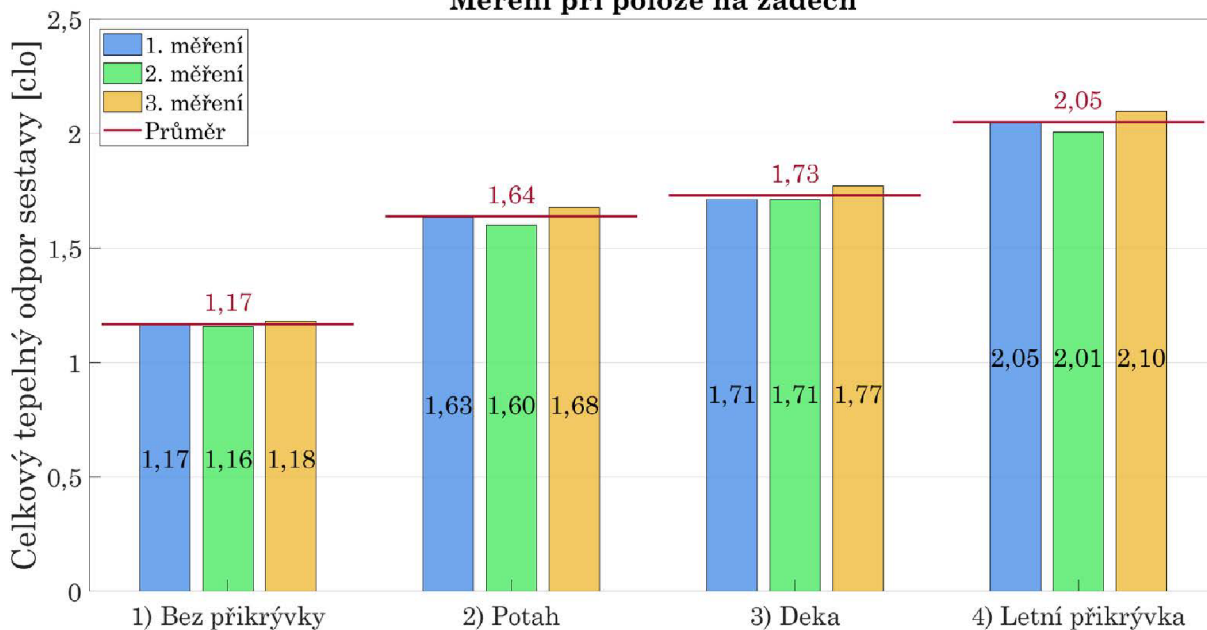
Za použití vztahu (7.1) byly následně určeny celkové tepelné odpory všech čtyř ložních sestav při polohách na boku a na zádech pro každé měření. Výsledky jsou zaneseny v grafech na obrázcích 8.16 a 8.17. Celkový výsledek byl získán jako průměr z třech měření. Dále byly zpracovány nejistoty měření každého případu způsobem uvedeným v části 7.5, všechny číselné hodnoty celkových tepelných odporů včetně jejich nejistot jsou sepsány v tabulkách 8.1 a 8.2. Pro snazší využití dat jsou všechny hodnoty v základní jednotce tepelného odporu $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ i v běžně používané jednotce clo.

Tabulka 8.1: Naměřené celkové tepelné odpory různých sestav při poloze na zádech a jejich nejistoty

| | Bez příkrývky | | Potah | | Deko | | Letní příkrývka | |
|------------------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|
| | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] |
| $R_{\text{tot}1}$ | 0,181 | 1,17 | 0,253 | 1,63 | 0,265 | 1,71 | 0,317 | 2,05 |
| $R_{\text{tot}2}$ | 0,179 | 1,16 | 0,248 | 1,60 | 0,265 | 1,71 | 0,311 | 2,01 |
| $R_{\text{tot}3}$ | 0,183 | 1,18 | 0,260 | 1,68 | 0,275 | 1,77 | 0,325 | 2,10 |
| \bar{R}_{tot} | 0,181 | 1,17 | 0,254 | 1,64 | 0,268 | 1,73 | 0,318 | 2,05 |
| u_{AR} | 0,002 | 0,02 | 0,008 | 0,05 | 0,007 | 0,05 | 0,009 | 0,06 |
| u_{BR} | 0,001 | 0,01 | 0,001 | 0,01 | 0,001 | 0,01 | 0,002 | 0,01 |
| U_R | 0,005 | 0,03 | 0,016 | 0,10 | 0,015 | 0,10 | 0,019 | 0,12 |

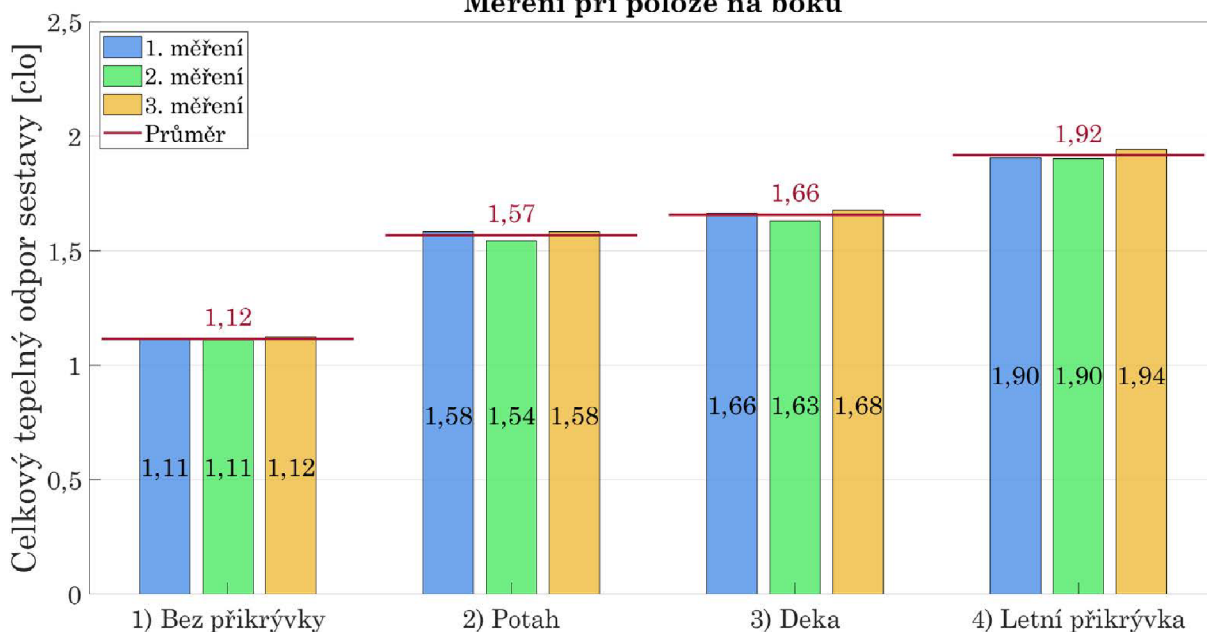
8.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Měření při poloze na zádech



Obrázek 8.16: Celkové odpory posuzovaných spacích sestav při poloze na zádech, výsledky jednotlivých měření a průměrné hodnoty

Měření při poloze na boku



Obrázek 8.17: Celkové odpory posuzovaných spacích sestav při poloze na boku, výsledky jednotlivých měření a průměrné hodnoty

Naměřené výsledky odpovídají očekávání, nejlépe izoluje spací sestava s letní příkrývkou, nejhůře pak sestava bez příkrývky. Právě mezi odporem měřeným pro sestavu bez příkrývky a s potahem je nejvyšší absolutní i relativní rozdíl pro polohu na boku i na zádech. To nejspíš vychází ze značného poklesu přenosu tepla na dolních končetinách, které jsou při měření bez příkrývky téměř naprosto odhaleny. Přenos tepla právě na dolních končetinách může být navíc umocněn i mírným prouděním vzduchu způsobeného přívodem vzduchu z klimaboxu za provizorní zástěnou. Celkový tepelný odpor

Tabulka 8.2: Naměřené celkové tepelné odpory různých sestav při poloze na boku a jejich nejistoty

| | Bez příkrývky | | Potah | | Deka | | Letní příkrývka | |
|------------------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|
| | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] |
| R_{tot1} | 0,173 | 1,11 | 0,245 | 1,58 | 0,258 | 1,66 | 0,295 | 1,90 |
| R_{tot2} | 0,172 | 1,11 | 0,239 | 1,54 | 0,253 | 1,63 | 0,295 | 1,90 |
| R_{tot3} | 0,174 | 1,12 | 0,245 | 1,58 | 0,260 | 1,68 | 0,301 | 1,94 |
| \bar{R}_{tot} | 0,173 | 1,11 | 0,243 | 1,58 | 0,257 | 1,66 | 0,297 | 1,92 |
| u_{AR} | 0,002 | 0,01 | 0,005 | 0,03 | 0,005 | 0,03 | 0,005 | 0,03 |
| u_{BR} | 0,001 | 0,01 | 0,001 | 0,01 | 0,001 | 0,01 | 0,002 | 0,01 |
| U_R | 0,004 | 0,02 | 0,010 | 0,06 | 0,010 | 0,06 | 0,010 | 0,07 |

sestavy s potahem je v rámci nejistoty měření pro obě polohy shodný se sestavou s dekou. Letní příkrývka vykazuje pro obě polohy mírně vyšší izolační schopnosti než deka.

Rozdíly pro polohu na boku a na zádech jsou ve všech případech v rámci rozšířené nejistoty měření a nelze je tedy považovat za průkazné. Na předchozích grafech (obrázky 8.13, 8.14 a 8.15) zachycujících lokální celkové tepelné odpory byly zřejmé výraznější rozdíly v tepelné izolaci na různých částech těla při polohách na boku a na zádech.

Výsledky provedených měření jsou mírně nižší oproti výsledkům získaných za obdobných podmínek v práci [26], ve které je pro polohu na zádech pouze v krátkém pyžamu uveden celkový tepelný odpor 1,38 clo. Příčiny vzniku rozdílu lze jen odhadovat, svou roli mohlo sehrát vyloučení některých segmentů z experimentu provedené na základě výsledků z pretestu, dále pak různý materiál pyžama a jeho délka, v neposlední řadě se mohla projevit i tuhost matrace. Experiment v práci [26] byl zároveň proveden s jiným typem tepelného manekýna a v článku není uvedena žádná hodnota nejistoty měření.

Porovnání ostatních sestav vychází obdobně, hodnoty z této práce jsou o desetiny nižší než hodnoty uváděné v [26]. Pro sestavy s příkrývkou může být tento rozdíl způsoben ještě různým způsobem příkrývání. Dále se projevuje rozdíl v materiálu, poddajnosti a hmotnosti jednotlivých příkrývek, ačkoli jsou nazývány podobně.

Měření provedené v této práci má navzdory nižšímu počtu opakování poměrně malou rozšířenou nejistotu měření pro 95% spolehlivost. Pro měření na boku se její hodnoty pohybují do 4 % měřené hodnoty, při měření na zádech do 6,5 %. Lze předpokládat, že tyto nejistoty vycházejí do značné míry z drobných rozdílů při příkrývání tepelného manekýna a různého rozložení vzduchových kapes pod příkrývkami. Při poloze na zádech je nejistota měření ovlivněna i adiabatickou podmínkou na významné ploše tepelného manekýna.

Tabulka 8.3: Naměřené tepelné odpory mezní vrstvy při poloze na boku a na zádech

| Poloha | R_a | R_a |
|-----------|---|-------|
| manekýna | $[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}]$ | [clo] |
| Na boku | 0,114 | 0,73 |
| Na zádech | 0,106 | 0,68 |

Pro potřeby určení tepelného odporu mezní vrstvy proběhlo jedno měření. Postup získání výsledků byl obdobný k výše popsanému. Celkový tepelný odpor mezní vrstvy

8.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

pro polohu na boku a na zádech byl určen pomocí vztahu (7.1). Získané výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.3. Pokud by bylo i v této úloze požadováno určení nejistot, bylo by vhodné měření několikrát opakovat. Na základě zkušenosti z předchozího měření lze konstatovat, že nejistota měření by měla být nižší než 5 %. Experiment respektuje minimální tepelný tok z jednotlivých segmentů a vliv přesného nastavení polohy je do jisté míry eliminován absencí matrace a příkrývek. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami pro polohu na boku a na zádech je 0,05 clo, což činí přibližně 7 % z nižší naměřené hodnoty. Zůstává otázkou do jaké míry je tento rozdíl způsoben právě změnou polohy nebo nejistotou měření.

Na základě výše popsaných měření bylo možné ze vztahu (6.2) určit tepelnou izolaci spacích sestav při polohách na boku a na zádech, která je používána ve dvouuzlovém modelu, popsaném v části 5.3 a v PMV při stanovování povrchové teploty oděvu. Právě dvouuzlový model bude v dalších částech práce využit pro ověření teploty tepelné neutrality spící osoby získané pomocí bilanční rovnice, respektive modelu PMV. Hodnoty tepelných izolací spacích sestav jsou uvedeny v tabulce 8.4.

Tabulka 8.4: Tepelné izolace jednotlivých spacích sestav při polohách na boku a na zádech

| Použitá příkrývka | Poloha na boku | | Poloha na zádech | |
|----------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|
| | R_{cl} [$\frac{m^2K}{W}$] | R_{cl} [clo] | R_{cl} [$\frac{m^2K}{W}$] | R_{cl} [clo] |
| Bez příkrývky | 0,060 | 0,39 | 0,076 | 0,49 |
| Potah | 0,130 | 0,84 | 0,148 | 0,96 |
| Deka | 0,144 | 0,93 | 0,163 | 1,05 |
| Příkrývka | 0,184 | 1,19 | 0,212 | 1,37 |

Poslední provedené měření mělo za cíl přiblížit možnosti úpravy tepelné izolace spací sestavy a vliv míry zakrytí na lokální celkové tepelné odpory. Výsledky měření pro vybrané části a jejich porovnání s hodnotami získanými v prvním měření⁶ jsou na obrázku 8.18. Vzhledem k pouze jedinému opakování měření nebyly určeny nejistoty tohoto měření. Lze ale předpokládat, že celkový tepelný odpor pro obličej a hlavu by měl být při stejné poloze téměř neměnný kromě případu s příkrývkou po krk. Při poloze na boku jsou však mezi hodnotami drobné rozdíly zvláště při porovnání sestav z prvního a posledního experimentu.⁷ Tento rozdíl může být způsoben mírně odlišným nastavením manekýna při poloze na boku a tím pádem větší kontaktní plochou obličeje s polštářem, a tedy vyšším lokálním odporem.

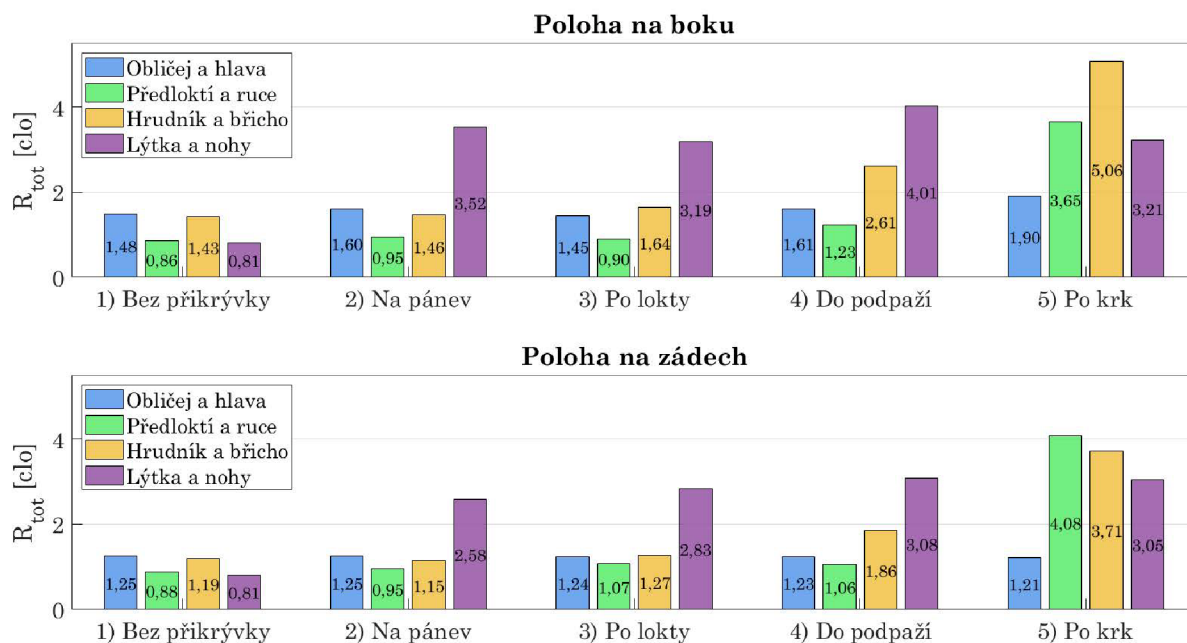
Druhou okrajovou podmínkou, která by měla být stabilní pro všechny případy kromě měření bez příkrývky, jsou lýtka a nohy. Naměřené hodnoty se mezi sebou poměrně liší, zvláště při poloze na boku. Nejistota měření z největší pravděpodobností vychází z horší opakovatelnosti konkrétního nastavení letní příkrývky v oblasti nohou. Příkrývka po položení na manekýna vzhledem ke své horší poddajnosti nekopírovala ideálně tvar těla, bylo tedy nutné pokaždé příkrývku ručně dorovnat. Právě toto srovnávání příkrývky mohlo vést k tvorbě různě velkých vzduchových kapes na různých místech pod příkrývkou a tím pádem značně ovlivnit výsledky lokálního tepelného odporu na řešené části.

⁶V rámci předchozího měření byly posuzovány sestavy s příkrývkou po lokty a sestava bez příkrývky.

⁷Sestavy s letní příkrývkou na pánev, do podpaží a po krk.

Dále byl pro srovnání vybrán lokální tepelný odpor na předloktích a rukách. Při variantách bez příkrývky, na pánev a po lokty jsou si všechny hodnoty poměrně blízké. Podobná hodnota byla určena i variantu s příkrývkou do podpaží při poloze na zádech. Mírný nárůst lokálního tepelného odporu je při posunutí příkrývky do podpaží během polohy na boku, neboť tím dochází k zakrytí levého předloktí. K přibližně trojnásobnému zvětšení tepelného odporu měřeného na předloktích a rukách dojde, pokud je příkrývka posunuta až na krk a obě paže jsou pod ní. To ukazuje značnou možnost přizpůsobit si lokální tepelný odpor změnou polohy paže vůči příkrývce.

Poslední vybraná část, tedy hrudník a břicho poměrně dobře mapuje posouvání příkrývky od pasu směrem ke krku a postupné zvyšování míry zakrytí této části těla. Je zajímavé, že při poloze na boku vychází lokální tepelný odpor vyšší, než při poloze na zádech, což nejspíš vychází ze snazšího přenosu tepla z vodorovné stěny než ze svislé.



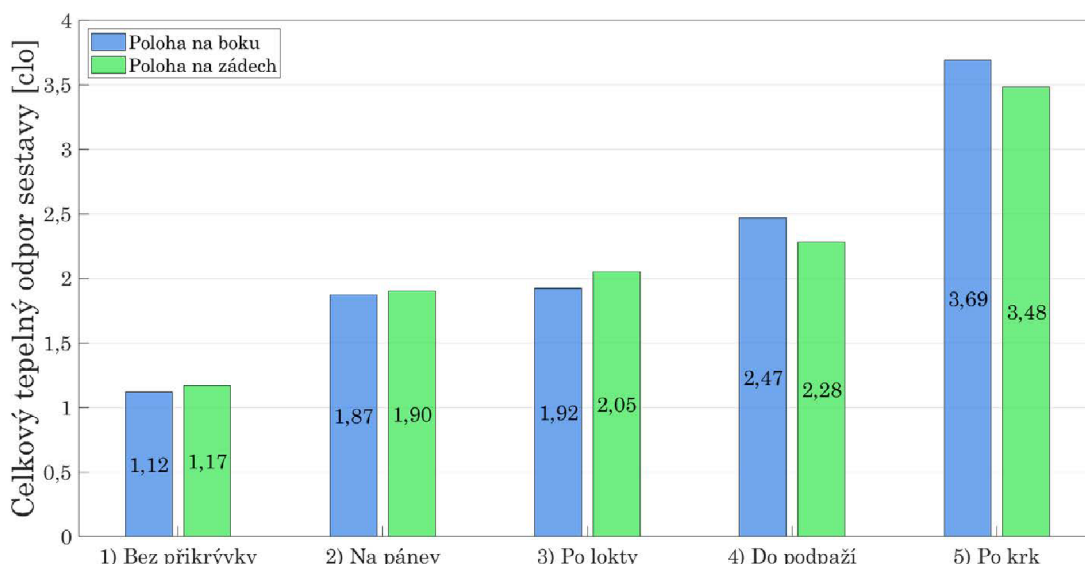
Obrázek 8.18: Porovnání celkového tepelného odporu na vybraných částech těla v závislosti na míře zakrytí letní příkrývkou

K porovnání celkových tepelných odporů spacích sestav při různé míře zakrytí letní příkrývkou slouží graf na obrázku 8.19. Ukázalo se, že rozdíly mezi polohami na boku a na zádech jsou s velkou pravděpodobností pro všechny varianty příliš malé vzhledem k předpokládané nejistotě měření.

Lze předpokládat, že přidání příkrývky i jen na pánev způsobí zvýšení celkového tepelného odporu sestavy oproti sestavě bez příkrývky. Pro polohu příkrývky na pánvi a po lokty vycházejí naměřené hodnoty velmi blízké, posunem příkrývky do podpaží se však celkový tepelný odpor sestavy zvyšuje a to zejména při poloze na boku, neboť dochází k přikrytí levého předloktí a zároveň se více projevuje náročnost přenosu tepla ze svislé plochy. Nepřekvapivě největší hodnota tepelné izolace spací sestavy vychází při přikrytí tepelného manekýna až po krk, jedná se téměř o trojnásobnou hodnotu vůči sestavě bez příkrývky. Naměřené hodnoty jsou pro větší přehlednost shrnuty v tabulce 8.5.

V dalších částech práce nebude s daty pro různou polohu letní příkrývky dále počítáno. Jednalo se pouze o pilotní měření s cílem ukázat vliv míry zakrytí. Z naměřených dat vychází, že pro přiblížení skutečným podmínkám během spánku by bylo vhodné mo-

8.3 POSOUZENÍ TEPLOT OKOLÍ



Obrázek 8.19: Porovnání celkového tepelného odporu spací sestavy s letní příkrývkou v závislosti na míře zakrytí a poloze během spánku

Tabulka 8.5: Celkové tepelné izolace spacích sestav s letní příkrývkou při polohách na boku a na zádech v závislosti na míře zakrytí

| Poloha příkrývky | Poloha na boku | | Poloha na zádech | |
|------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| | R_{tot} [$\frac{m^2K}{W}$] | R_{tot} [clo] | R_{tot} [$\frac{m^2K}{W}$] | R_{tot} [clo] |
| Bez příkrývky | 0,174 | 1,12 | 0,181 | 1,17 |
| Na pánev | 0,290 | 1,87 | 0,295 | 1,90 |
| Po lokty | 0,298 | 1,92 | 0,318 | 2,05 |
| Do podpaží | 0,383 | 2,47 | 0,353 | 2,28 |
| Po krk | 0,572 | 3,69 | 0,539 | 3,48 |

nitorovat spánek dobrovolníků v různých podmínkách a pozorovat, do jaké míry je možná regulace tepelné bilance mezi tělem a okolím pouze manipulací s příkrývkou a změnou polohy a od jaké hranice už tyto změny nestačí.

Celkově lze předpokládat, že přikrytím větší části těla lze v závislosti na typu příkrývky zvýšit celkový tepelný odpor sestavy. Vzhledem k řešené problematice spánku během letních teplot jsou důležitější spíše možnosti snižování celkového tepelného odporu. To je náročnější, při zakrytí s horní hranou příkrývky v úrovni pánve jsou měřené hodnoty odporu velmi podobné hodnotám měřeným při přikrytí po lokty během prvního experimentu. Odkrytím nohou by bylo možné tento odpor snížit. Je zřejmé, že jeho snížení pod hodnotu naměřenou se sestavou bez příkrývky je možné už pouze odstraněním pyžama případně snížením izolační schopnosti matrace.

8.3 Posouzení teplot okolí

Hodnoty tepelných odporů, jejichž získání bylo předmětem předcházející části práce, budou dále využity pro stanovení vhodných teplot pro zachování vyrovnané tepelné bilance během spánku.

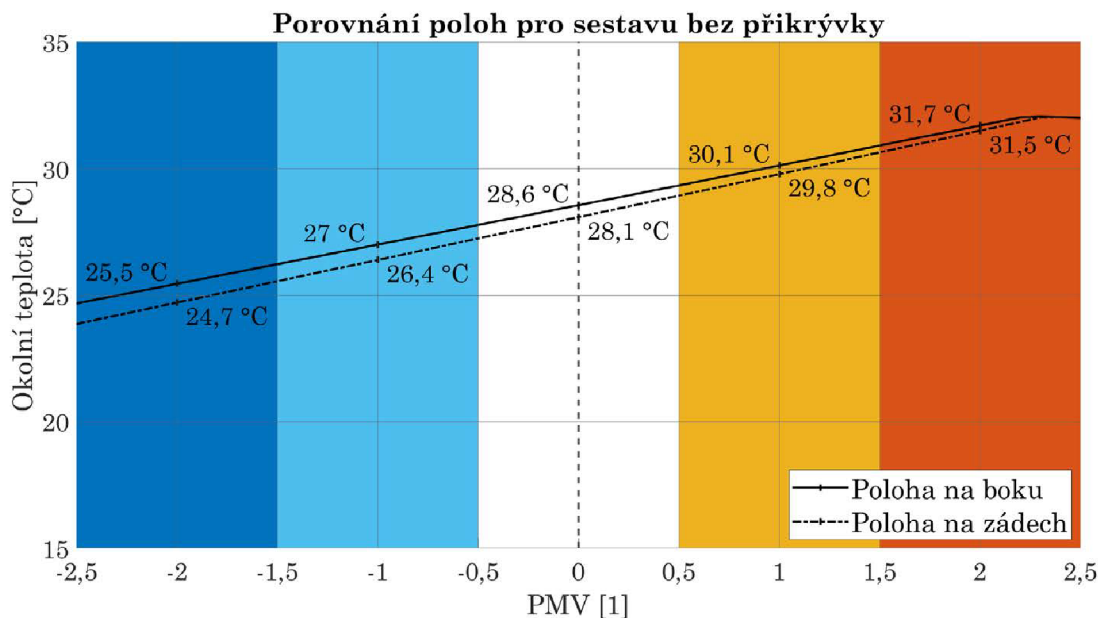
8.3.1 Použití tepelné bilance a modelu PMV

Bilanční rovnice byla důkladně popsána v části 5.1, stejně jako model PMV v části 5.2. Pro získání tepelně neutrálních teplot okolí bylo nutné model PMV převést do tvaru, který bude na základě známého tepelného odporu sestavy a požadovaného neutrálního tepelného vjemu iterativně dopočítávat neznámou teplotu okolí, soubor s programem v Matlabu je součástí příloh. Výsledky pro všechny posuzované spací sestavy pro polohu na boku i na zádech jsou shrnuty v tabulce 8.6.

Tabulka 8.6: Vhodné teploty okolí pro zachování vyrovnané tepelné bilance během spánku v jednotlivých spacích sestavách při polohách na boku a na zádech

| Použitá příkrývka | Poloha na boku t_a [°C] | Poloha na zádech t_a [°C] |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Bez příkrývky | 28,6 | 28,1 |
| Potah | 26,6 | 26,1 |
| Deka | 26,2 | 25,7 |
| Příkrývka | 25,1 | 24,4 |

Komfortní teplota pro spánek mužů pouze v pyžamu do půl těla byla v článku [51] stanovena na 29,5 °C, dále bylo při měření s dobrovolníky prokázáno, že při pomalém poklesu na 27,5 °C dochází ke zvýšení kvality spánku. Obě teploty jsou pak v práci [51] považovány za hranice intervalu relativně vyrovnané tepelné bilance. Teploty určené pomocí PMV modelu pro spánek pouze v lehkém pyžamu bez příkrývky 28,6 °C pro polohu na boku a 28,1 °C pro polohu na zádech se nacházejí uvnitř tohoto intervalu. Lze tedy předpokládat, že odpovídají realitě, ačkoli se použitá pyžama mírně liší.



Obrázek 8.20: Porovnání závislosti teploty okolí na požadovaném teplotním vjemu pro sestavu bez příkrývky při poloze na boku a na zádech

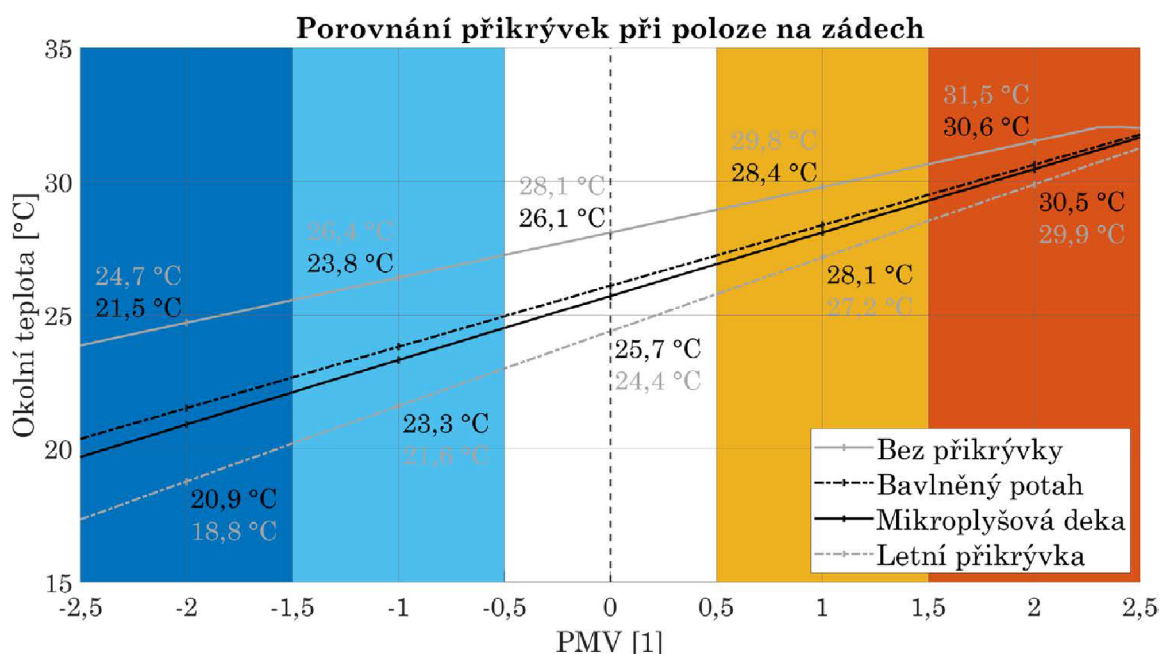
V práci [24] bylo pomocí měření s dobrovolníky zjištěno, že pro spánek v krátkém pyžamu na konvenční matraci s tenkou příkrývkou, odpovídající bavlněnému potahu posuzovanému v této práci, je komfortní teplota pro spánek blízká 26 °C, přičemž byla

8.3 POSOUZENÍ TEPLOT OKOLÍ

preferována spíše teplota mírně vyšší. Určené teploty okolí pro sestavu s bavlněným potahem odpovídá těmto výsledkům.

Upravený model PMV pro určení termoneutrání teploty okolí lze poměrně jednoduše rozšířit na výpočet teploty okolí v závislosti na požadovaném teplotním vjemu. Na obrázku 8.20 je graf teploty okolí v závislosti na požadované hodnotě PMV pro sestavu bez příkrývky, ze kterého je pro polohu na boku a na zádech patrný jen velmi malý rozdíl mezi teplotami okolí, při kterých je zachována vyrovnaná tepelná bilance mezi spící osobou a jejím okolím. Tento rozdíl je mírně vyšší pro menší PMV a s rostoucím PMV se snižuje, přičemž pro $PMV = 2,5$ již jsou teploty okolí pro obě polohy totožné.

Pro porovnání posuzovaných spacích sestav při poloze na zádech slouží obrázek 8.21. Z něj je patrný minimální rozdíl pro sestavu s dekou a potahem. Nepřekvapivě nejnižší teploty vycházejí pro sestavu s letní příkrývkou a nejvyšší pro sestavu bez příkrývky. Již několikrát byl zmíněn zanedbatelný rozdíl mezi polohou na boku a na zádech, pro polohu na boku by graf vypadal velmi podobně, pouze by byly všechny teploty mírně vyšší.



Obrázek 8.21: Porovnání závislosti teploty okolí na požadovaném teplotním vjemu pro různé sestavy při poloze na zádech

8.3.2 Dvouuzlový model

Tento model byl popsán v části 5.3, dále bude použit pro ověření výsledků z předchozí části. Bude posouzena i jeho citlivost a tedy i případná vhodnost pro řešení problematiky spánku.

V tabulce 8.7 jsou uvedeny konečné teploty tělesného jádra po osmihodinové simulaci spánku pro jednotlivé spací sestavy při obou polohách při neutrální teplotě okolí převzaté z tabulky 8.6. Tepelné odpory sestav bez tepelného odporu mezní vzduchové vrstvy použité v modelu byly převzaty z tabulky 8.4. Nelze opomenout, že se jedná o simulaci se stálou tepelnou produkcí a stálou teplotou okolí shodnou se střední radiační teplotou s předpokládanou vlhkostí vzduchu 50 %. Počáteční teplota tělesného jádra byla stanovena na 36,8 °C.

Tabulka 8.7: Výsledná teplota tělesného jádra na konci osmihodinového spánku získaná pomocí dvouuzlového modelu

| Použitá příkrývka | Poloha na boku | Poloha na zádech |
|----------------------|----------------|------------------|
| | t_{cr} [°C] | t_{cr} [°C] |
| Bez příkrývky | 36,81 | 36,81 |
| Potah | 36,82 | 36,82 |
| Deka | 36,82 | 36,82 |
| Příkrývka | 36,82 | 36,82 |

V tabulce 8.7 je zřejmé, že určené teploty okolí pro vyrovnanou tepelnou bilanci spícího člověka určené výše jsou v souladu s dvouuzlovým modelem, neboť nárůst teploty tělesného jádra je nejvýše o 0,02 °C. Otázkou zůstává, do jaké míry je model původně určený pro řešení intenzivních tepelných zátěží schopen věrně zachytit lidský spánek, při kterém je tepelná produkce v těle velmi nízká. Pro představu o citlivosti dvouuzlového modelu byly pro sestavu s potahem určeny pro polohu na boku i na zádech teploty okolí odpovídající PMV -2, -1, 1 a 2 a následně byla opět spuštěna osmihodinová simulace spánku pro tyto teploty. Přehled teplot okolí i získaných teplot tělesného jádra na konci osmihodinového spánku je uveden v tabulce 8.8.

Tabulka 8.8: Porovnání výsledných teplot tělesného jádra získaných pomocí dvouuzlového modelu při různých teplotách okolí po osmihodinovém spánku v sestavě s bavlněným potahem

| PMV [1] | Poloha na boku | | Poloha na zádech | |
|------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| | t_a [°C] | t_{cr} [°C] | t_a [°C] | t_{cr} [°C] |
| -2 | 22,3 | 36,65 | 21,5 | 36,65 |
| -1 | 21,7 | 36,72 | 23,8 | 36,72 |
| 0 | 26,6 | 36,82 | 26,1 | 36,82 |
| 1 | 28,7 | 36,83 | 28,4 | 36,83 |
| 2 | 30,8 | 36,85 | 30,6 | 36,85 |

Z hodnot uvedených v tabulce 8.8 lze vyvodit, že dvouuzlový model není příliš citlivý na zvýšení okolní teploty. Zvýšení teploty okolí a střední radiační teploty o více než 4 °C od teploty okolí při vyrovnané teplotní bilanci vyvolá zvýšení teploty jádra během spánku o 0,05 °C. Je možné, že tato necitlivost je způsobena zvýšenou produkcí potu při nevyrovnané tepelné bilanci, mokré pocení je však během spánku nežádoucím jevem. Změna teploty tělesného jádra je pro nízké teploty okolí patrnější. Při poklesu teploty okolí o více než 4 °C od určené neutrální teploty, klesne během spánku teplota jádra o 0,15 °C. Výsledná teplota se tak stále nachází v rozsahu přijatelných teplot tělesného jádra.

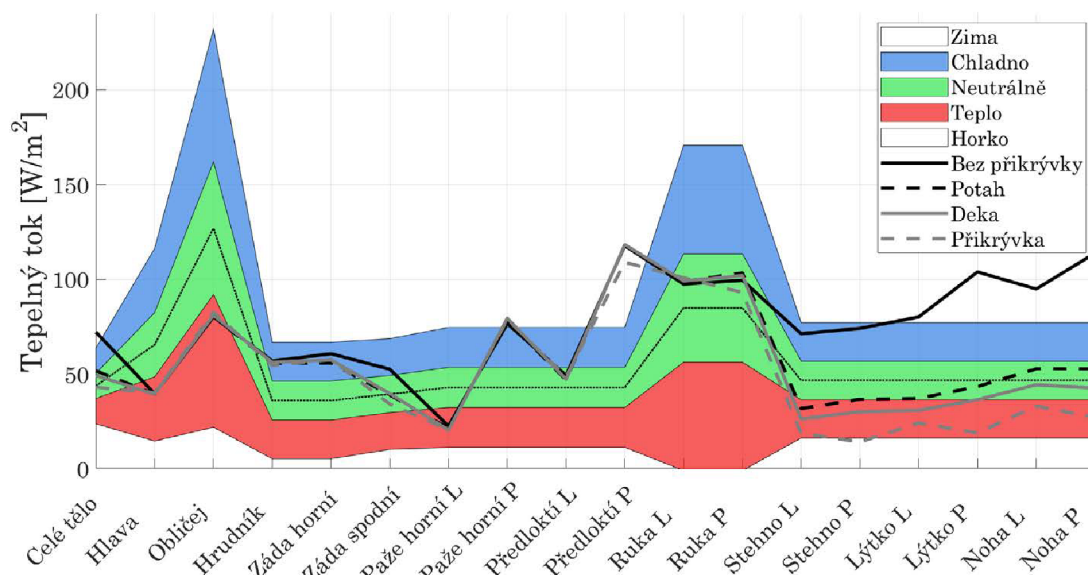
Pomocí dvouuzlového modelu by bylo poměrně obtížné stanovit vhodnou teplotu okolí pro vyrovnanou tepelnou bilanci během spánku. V první řadě se projevuje určitá necitlivost pro zvýšení teplot, ačkoli v článku [24] je popsáno výrazné zhoršení kvality spánku při zvýšení teploty z neutrálních 26 °C na 30 °C. Dále model sice umožňuje simulovat časový úsek, nepočítá však s přirozenou změnou teploty tělesného jádra během spánku. Fluktuace teploty tělesného jádra během spánku a možnosti jejího využití pro detekci

8.3 POSOUZENÍ TEPLOT OKOLÍ

spánkových fází byly zkoumány v práci [59]. Implementace této skutečnosti by byla značnou komplikací modelu a není předmětem této práce.

8.3.3 Mapy tepelných toků

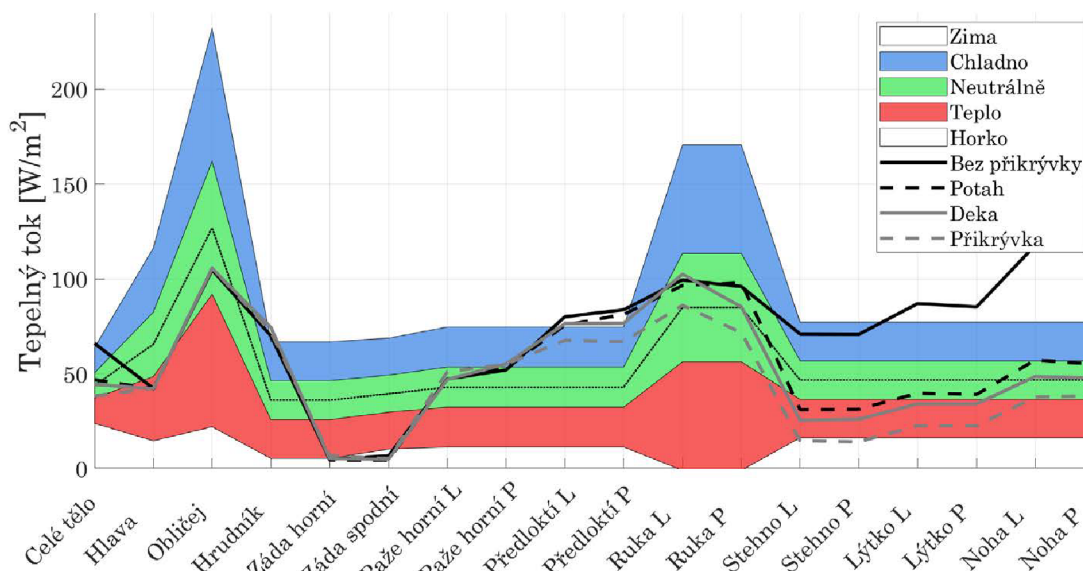
První uvažovaný model řešil tepelnou bilanci během spánku jako ustálený stav jediného bodu, dvouuzlový model přidal časovou osu. Pomocí něj byl popsán vývoj teploty tělesného jádra, stále ale bylo celé tělo shrnuto do jediného bodu. Toto zjednodušení může být velmi zavádějící, neboť vychází z průměrování hodnot pro jednotlivé segmenty těla, zároveň zase do určité míry reflektuje vnitřní přenos tepla tělem. Poslední způsob posouzení vhodné teploty okolí jsou mapy tepelných toků vycházející z metody ekvivalentních teplot.



Obrázek 8.22: Graf tepelných toků z jednotlivých částí a jejich předpokládané vnímání člověkem v poloze na boku s různými příkrývkami při 22 °C - naměřené hodnoty

Způsob získání základní mapy byl popsán v části 5.4. Pro ověření do ní byly nejprve zaneseny výsledky samotného měření při 22 °C, polohu na boku zachycuje obrázek 8.22. Z něj lze dobře posuzovat vliv příkrývky na jednotlivé části. Okrajové podmínky zůstávají pro měření s různými příkrývkami neměnné na hlavě, obličeji, hrudníku, celé levé paži a horní části pravé paže. Pravé předloktí a ruka byly sice během všech měření na boku nad příkrývkou, ale při měření s příkrývkou vykazují menší tepelné ztráty. To je s největší pravděpodobností způsobeno tloušťkou letní příkrývky umožňující mírné zaboření pravého předloktí a ruky do příkrývky, které způsobuje větší kontaktní plochu příkrývky s manekýnem a tedy lepší izolační vlastnosti. Na obou částech zad a obou dolních končetinách je již možné pozorovat jistý vliv příkrývek, přičemž je zřejmé, že přidání libovolné příkrývky výrazně snižuje tepelný tok z posuzované části. Rozdíly mezi jednotlivými příkrývkami pak již nejsou tak velké. Zvláště sestavy s dekou a potahem mají velmi podobné izolační schopnosti.

Na obrázku 8.23 je graf měrných tepelných toků z různých částí manekýna naměřených s různými příkrývkami při poloze na zádech při teplotě okolí 22 °C. Obdobně jako při poloze na boku i při poloze na zádech jsou části manekýna, jejichž tepelné ztráty nejsou závislé na posuzované příkrývce. Jedná se o hlavu, obličej, hrudník a horní část



Obrázek 8.23: Graf tepelných toků z jednotlivých částí a jejich předpokládané vnímání člověkem v poloze na zádech s různými příkrývkami při 22 °C - naměřené hodnoty.

paží, ačkoli tam je patrný drobný rozptyl hodnot a lehká asymetrie mezi levou a pravou stranou, i když by hodnoty měly být symetrické. Jedná se pravděpodobně o nejistotu měření způsobenou nepřesným nastavením příkrývky během měření. Samotné ruce se chovají podobně jako při měření na boku, opět je ale patrná asymetrie mezi levou a pravou stranou. Na oblasti zad je zřetelný silný vliv matrace, která se chová téměř jako adiabatická stěna. Měřený tepelný tok na těchto částech nabýval hodnot v řádu jednotek W/m^2 . Opět platí, že použití jakékoli příkrývky výrazně snižuje tepelný tok z těla, zvláště pak v oblasti dolních končetin. Stejně jako při měření na boku nejlépe izoluje letní příkrývka, dále deka a nakonec potah, což odpovídá předpokladu na základě zkušenosti s těmito příkrývkami.

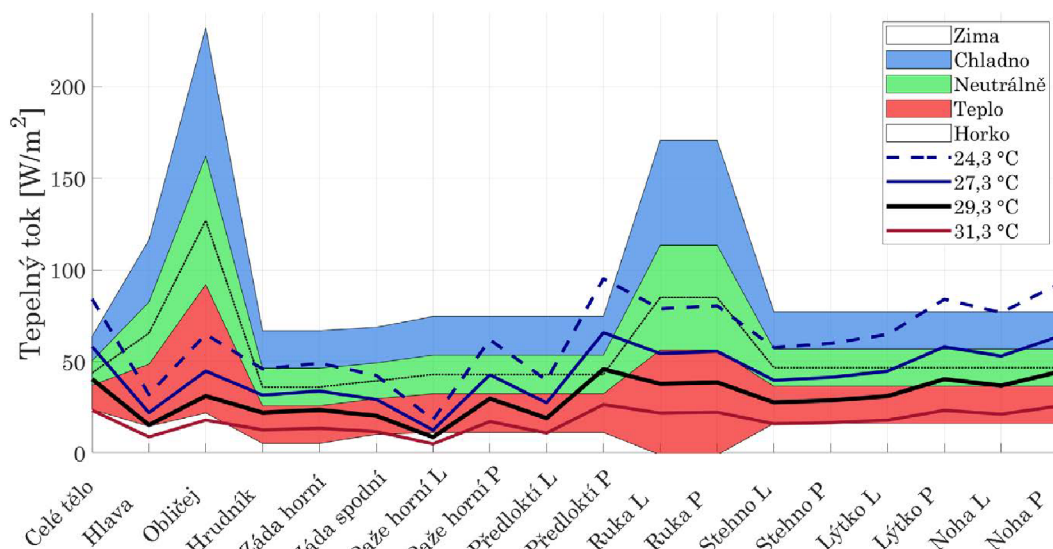
Pro jednotlivé případy měření byly rozpracovány mapy předpokládaných tepelných vjemů na posuzovaných částech těla při různých teplotách okolí na základě přepočtu podle vztahu (8.1)

$$\dot{Q}_n = \dot{Q}_m \frac{t_{sk} - t_{a,n}}{t_{sk} - t_{a,m}}, \quad (8.1)$$

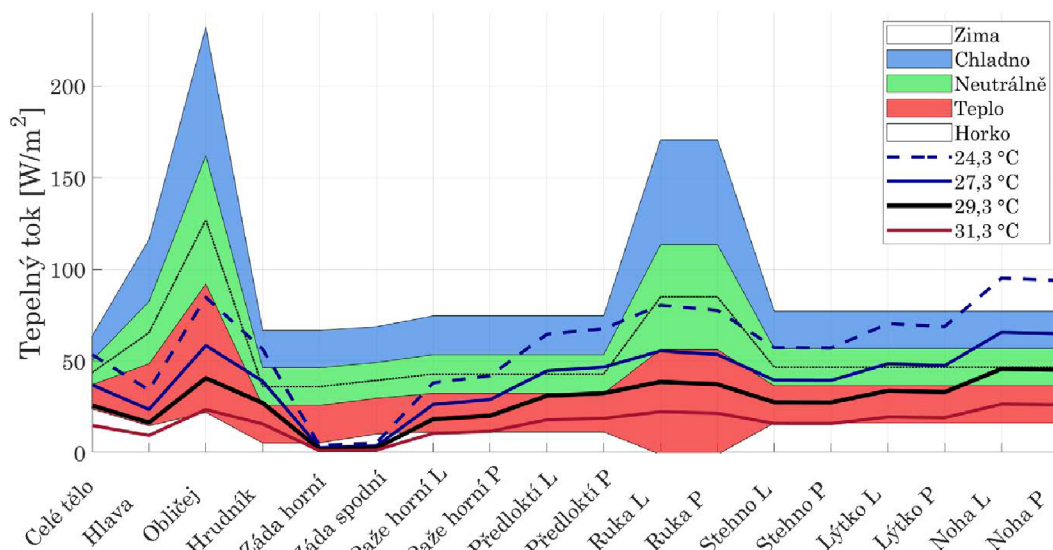
kde \dot{Q}_n [W/m^2] je přepočtený tepelný tok z části při uvažované teplotě okolí $t_{a,n}$ [$^{\circ}\text{C}$], \dot{Q}_m [W/m^2] je měřený tepelný tok při teplotě okolí $t_{a,m}$ [$^{\circ}\text{C}$] a t_{sk} [$^{\circ}\text{C}$] je teplota pokožky. Vztah je platný jen za předpokladu shodné střední radiační teploty a teploty okolí a konstantní hodnoty celkového tepelného odporu R_{tot} pro různé teploty. Zvláště druhý předpoklad může být problematický, neboť celkový tepelný odpor v sobě zahrnuje i radiační složku, jejíž velikost je úměrná rozdílu čtvrtých mocnin termodynamických teplot povrchu posuzovaného tělesa a střední radiační teploty jeho okolí. Pro malé rozdíly teplot okolí při měření a při přepočtu je možné takto uvažovat, ačkoli je do řešení vnesena nezanedbatelná nejistota.

Grafy na obrázcích 8.24 a 8.25 zachycují tepelné toky z jednotlivých částí těla při spánku v sestavě bez příkrývky při polohách na boku a na zádech pro různé teploty okolí. Zvýrazněné hodnoty reprezentují předpokládanou teplotu, při které bude dosaženo vyrovnané tepelné bilance a tedy ideálního stavu pro spánek. Pro snazší orientaci mezi grafy byla jako neutrální teplota zvolena průměrná hodnota teplot pro polohu na boku a na zádech. V grafu jsou dále znázorněny hodnoty pro teploty okolí o 2 a 5 °C nižší než uvažovaná

8.3 POSOUZENÍ TEPLOT OKOLÍ



Obrázek 8.24: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách okolí pro sestavu bez příkrývky při poloze na boku

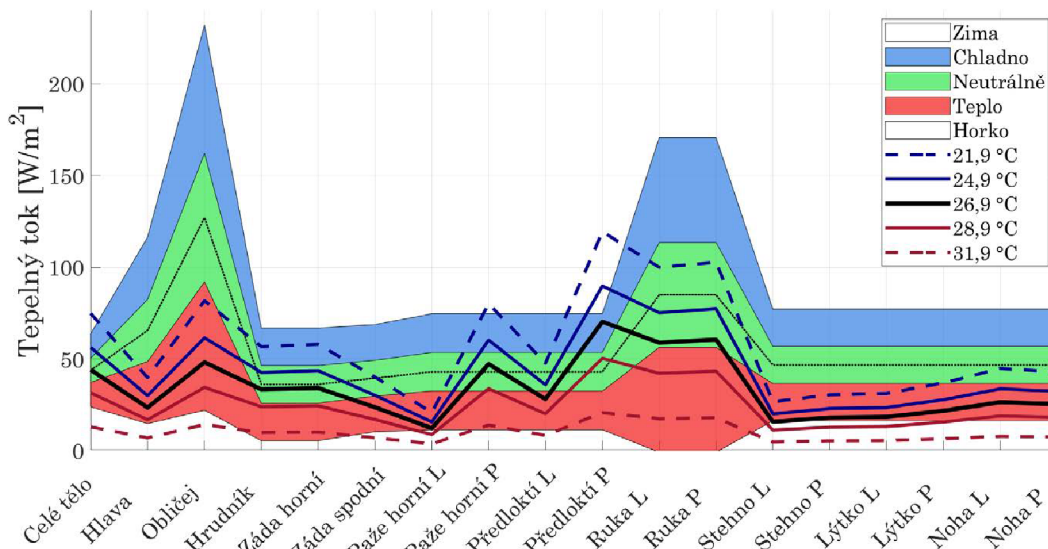


Obrázek 8.25: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu bez příkrývky při poloze na zádech

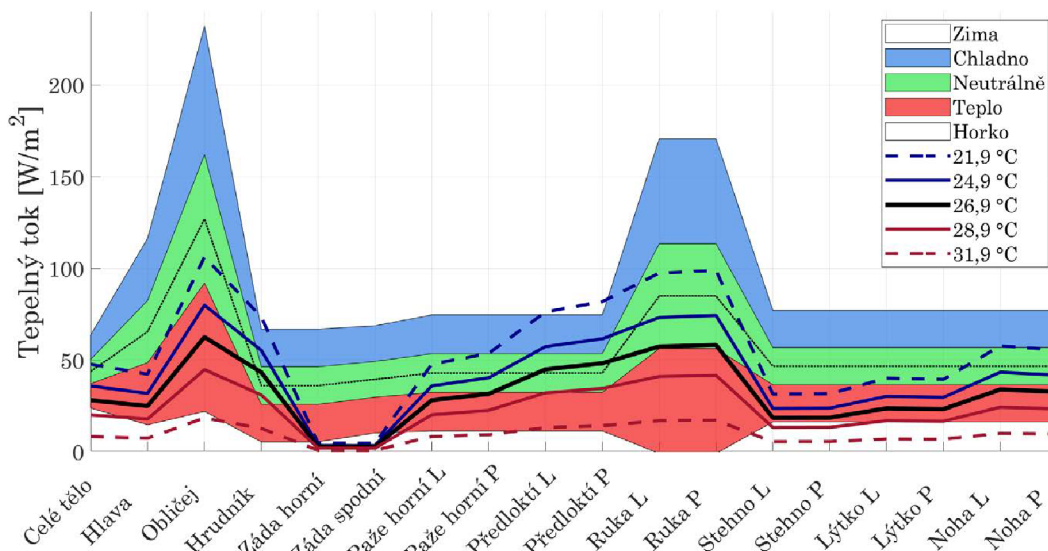
neutrální teplota okolí a o 2 °C vyšší než tato teplota. Teplotu okolí o 5 °C vyšší než neutrální nemá smysl v tomto případě uvažovat, neboť dojde k překročení teploty pokožky a tedy tepelný tok konvekcí a radiací by byl menší než nula. Teplo by přecházelo z okolí do těla a všechny hodnoty by se nacházely v části horko.

Na první pohled je patrné, že uvažovaná neutrální teplota způsobuje při poloze na zádech nižší celkový tepelný tok než jaký je stanoveny grafem pro tepelně neutrální vjem. Při poloze na boku není rozdíl tak zřejmý. Zásadní vliv na tento posun mají koeficienty používané pro sestavení základního grafu vnímání tepelných toků různými částmi těla. Tyto koeficienty byly stanoveny pro klidně sedícího člověka s metabolickou produkcí 1 met, tedy 58,2 W/m². Při spánku metabolická produkce klesá na 40 W/m² a tak je třeba z těla odvádět menší množství tepla pro zachování vyrovnané tepelné bilance. To je pozorováno i při experimentu v práci [24], kde dobrovolníci spali nejlépe v prostředí, které hodnotili

za bdělého stavu před spaním jako mírně teplé. Do jisté míry se projevuje i průměrování termoneutrálních teplot pro obě polohy, při poloze na zádech je tato teplota mírně nižší, a tedy je tepelný tok o málo vyšší, než jaký je zanesen v grafu. Pro polohu na boku to platí opačně, vynesené hodnoty tepelných toků pro uvažovanou neutrální teplotu jsou mírně vyšší než hodnoty pro skutečně vypočítanou neutrální teplotu při poloze na boku.



Obrázek 8.26: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu s bavlněným potahem při poloze na boku.



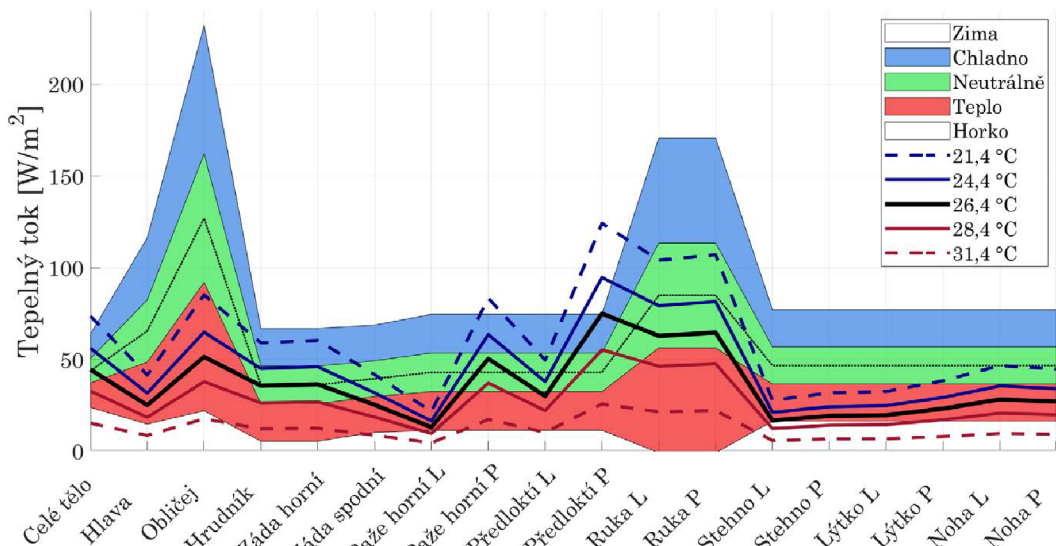
Obrázek 8.27: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu s bavlněným potahem při poloze na zádech.

Obdobné porovnání jako pro sestavu bez příkrývky lze provést i pro sestavu s potahem, tepelné toky z jednotlivých částí těla při spánku v této sestavě za různých teplot jsou pro polohu na boku vyneseny v grafu na obrázku 8.24 a pro polohu na zádech v obrázku 8.25. V obou grafech je opět patrný posun uvažovaného vyrovnaného stavu směrem k teplejším vjemům, jehož příčina byla popsána výše.

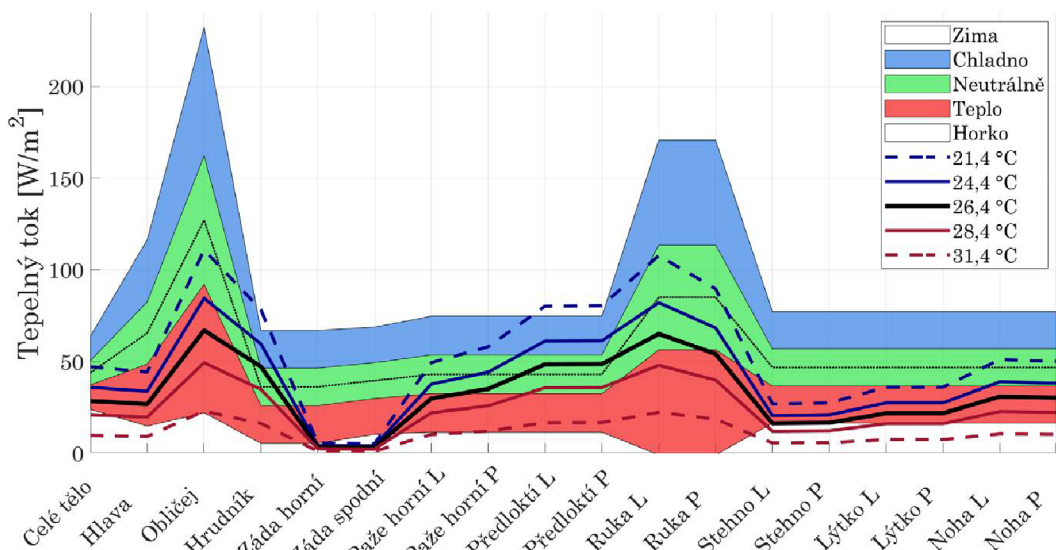
Za zmínku stojí rozdíl mezi oběma uvažovanými polohami. Při poloze na boku je oproti poloze na zádech více izolován obličej a levá horní končetina, zato je zajištěn lepší odvod

8.3 POSOUZENÍ TEPLOT OKOLÍ

tepla ze zad, které jsou při poloze na zádech v kontaktu s matrací a tedy s prakticky adiabatickou stěnou. Při poloze na boku by člověk na odhaleném pravém předloktí člověk při uvažované neutrální teplotě vnímal chlad, což by nejspíš vedlo k úpravě přikrytí. Obdobně by byl při poloze na zádech vnímán chlad na hrudníku, otázkou je, do jaké míry by tento vjem mohl být potlačen horkem v oblasti zad.



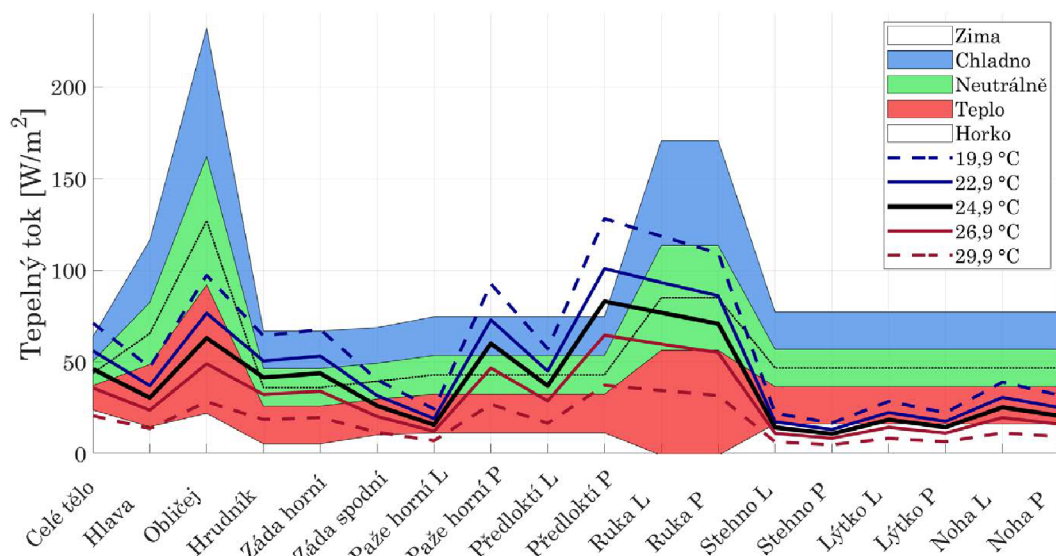
Obrázek 8.28: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu s mikroplyšovou dekou při poloze na boku.



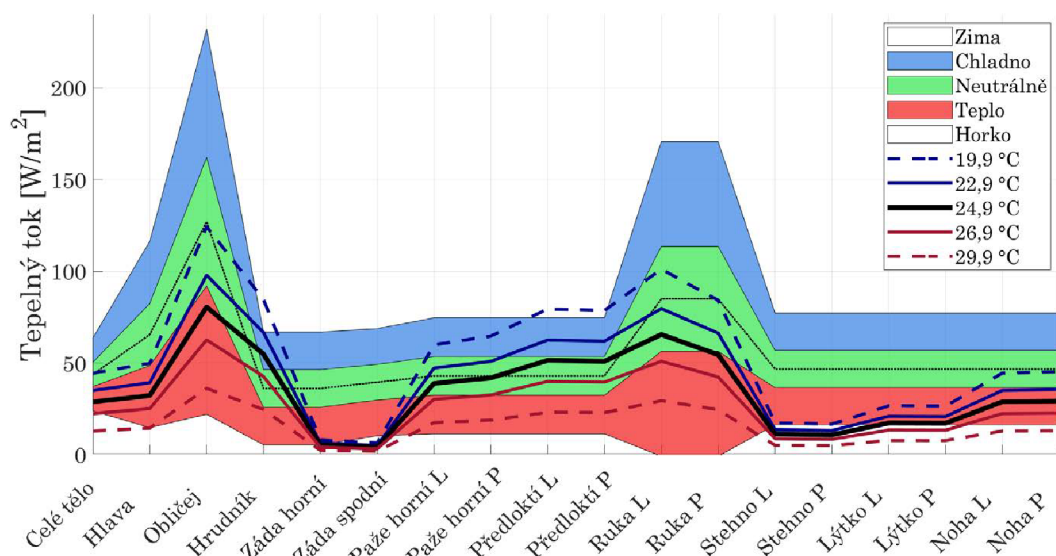
Obrázek 8.29: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu s mikroplyšovou dekou při poloze na zádech.

Deka z mikroplyše má jen o trochu vyšší izolační schopnosti než bavlněný potah, a tak jsou grafy tepelných toků pro jednotlivé části těla při poloze na boku a na zádech na obrázcích 8.28 a 8.29 velmi podobné grafům na obrázcích 8.24 a 8.25, které zachycují sestavu s bavlněným potahem. Se zvýšením celkové izolační schopnosti sestavy dochází ke snížení teploty okolí, při které je zachována tepelná rovnováha. To má pak za následek zvětšování rozdílu mezi vjemy na zakrytých a nezakrytých částech těla. Na nezakrytých částech těla (nejvýrazněji na pravém předloktí při poloze na boku) roste tepelná ztráta

a tedy je vnímán větší chlad. Zakryté části (hlavně dolní končetiny) jsou lépe izolovány, jejich tepelná ztráta klesá a je na nich vnímáno větší teplo. Zůstává otázkou, jak velký rozdíl mezi vjemy na jednotlivých částech těla je přijatelný a do jaké míry mohou být tyto rozdíly potlačeny přenosem tepla uvnitř těla a vlastní termoregulací.



Obrázek 8.30: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu s letní příkrývkou při poloze na boku.



Obrázek 8.31: Tepelné toky a jejich předpokládané vnímání při různých teplotách pro sestavu s letní příkrývkou při poloze na zádech.

Poslední posuzovaná sestava s letní příkrývkou vykazovala nejvyšší odpor proti přenosu tepla, z čehož vyplývá, že tepelná neutralita při spaní v této sestavě bude dosažena při nižších teplotách než v ostatních sestavách. Trendy popsané u grafů pro sestavu s dekou se tak v sestavě s letní příkrývkou ještě zvýraznily, jak je zřejmé z grafů na obrázcích 8.30 a 8.31 zachycujících tepelné toky z jednotlivých částí těla při spaní v sestavě s letní příkrývkou při polohách na boku a na zádech pro různé teploty okolí.

Obecně lze tvrdit, že pro dosažení komfortu na všech částech těla je vhodné s rostoucí izolační schopností příkrývky zvětšovat míru zakrytí, aby tepelné toky z jednotlivých částí

8.3 POSOUZENÍ TEPLOT OKOLÍ

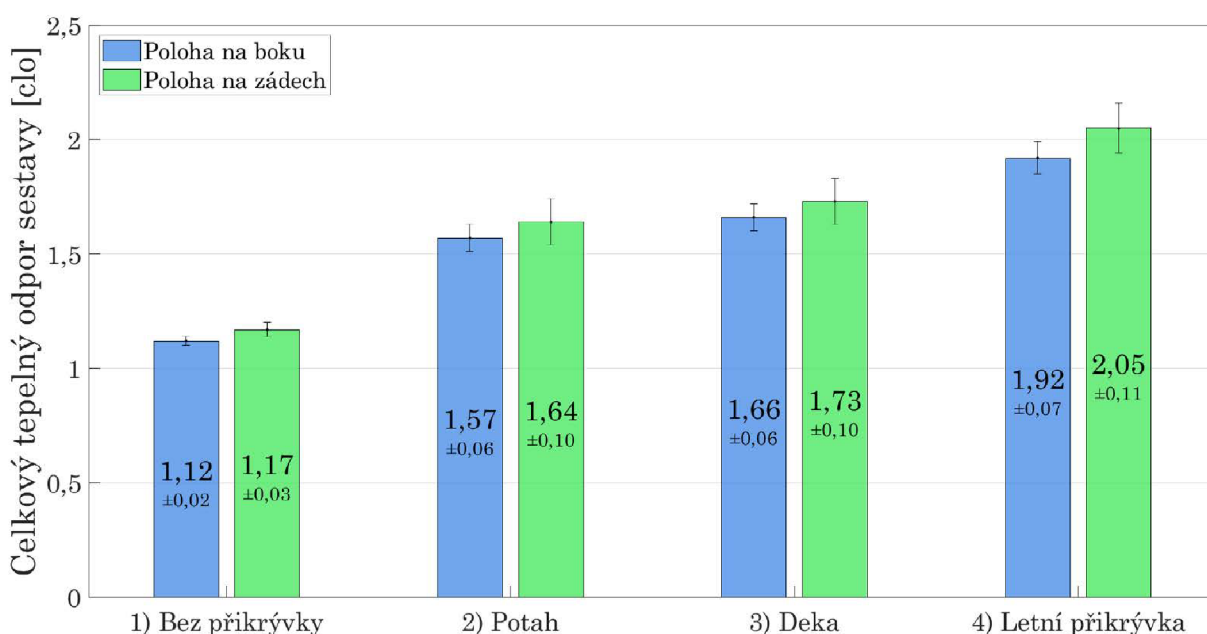
byly vyrovnanější a lépe odpovídaly základnímu diagramu. Toto opatření by mělo zajistit, aby nedocházelo k lokálnímu přehřívání na jedné části a k lokálnímu podchlazování na části jiné. I to má však svoje limity, konvenční matrace se chovají téměř jako adiabatické okrajové podmínky, a tedy způsobují při spaní v domácích podmínkách nerovnováhu tepelných toků především při spaní na zádech nebo na břiše. Pro získání rovnoměrnějších toků z těla při spánku by bylo tedy na místě zajistit odvod tepla skrz matraci.

9 Vyhodnocení a diskuze

Na základě provedených experimentů a výpočtů byla v předchozí kapitole získána celá řada výsledků, tato kapitola přináší jejich shrnutí a hlavně vyjádření k hypotézám předloženým v kapitole 7.

Shrnutí výsledků

Cílem provedených měření bylo stanovení celkových tepelných odporů vybraných spacích sestav při polohách na boku a na zádech a následně určit teplotu okolí, při které bude zachována vyrovnaná tepelná bilance mezi člověkem a okolím během spánku. Naměřené hodnoty tepelných odporů včetně intervalů 95% spolehlivosti jsou vyneseny v grafu na obrázku 9.1. Tyto hodnoty jsou rovněž uvedeny v tabulce 9.1 společně s neutrálními teplotami okolí stanovenými pomocí modelu PMV.



Obrázek 9.1: Porovnání celkových tepelných odporů různých spacích sestav při poloze na boku a na zádech vč. chybových úseček pro 95% spolehlivost

Tabulka 9.1: Tepelné izolace jednotlivých spacích sestav při polohách na boku a na zádech, jejich rozšířené nejistoty a stanovené termoneutrální teploty okolí

| Použitá příkrývka | Poloha na boku | | | Poloha na zádech | | |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------|------------------|---------------------|------------|
| | R_{tot} [clo] | $U_{R_{tot}}$ [clo] | t_a [°C] | R_{tot} [clo] | $U_{R_{tot}}$ [clo] | t_a [°C] |
| Bez příkrývky | 1,12 | 0,02 | 28,6 | 1,17 | 0,03 | 28,1 |
| Potah | 1,57 | 0,06 | 26,6 | 1,64 | 0,10 | 26,1 |
| Deky | 1,66 | 0,06 | 26,2 | 1,73 | 0,10 | 25,7 |
| Příkrývka | 1,92 | 0,07 | 25,1 | 2,05 | 0,11 | 24,4 |

Vyjádření k pracovním hypotézám

Hypotéza 1: *Různými druhy přikrývek lze dosáhnout rozdílu v celkovém tepelném odporu spací sestavy.*

Posuzované spací sestavy měly vždy společný základ:

- konvenční matraci na provizorním lůžku,
- polštář z dutých vláken v bavlněném potahu,
- krátké bavlněné pyžamo.

Pro získání 4 různých spacích sestav byly používány následující přikrývky:

- žádná přikrývka,
- bavlněný potah,
- mikroplyšová deka,
- letní přikrývka z polypropylenu v bavlněném potahu.

Všemi přikrývkami byl tepelný manekýn přikrýván stejným způsobem, horní hrana přikrývky se nacházela v úrovni loktů a obě předloktí byla volně položena na přikrývce.

Použitím jakékoli přikrývky došlo k nárůstu celkového tepelného odporu spací sestavy od hodnoty měřené pro sestavu bez přikrývky, jak je zřejmé z grafu na obrázku 9.1. Rozdíly mezi jednotlivými typy přikrývek již nejsou tak velké. Vzhledem k velikosti rozšířené nejistoty měření lze izolační schopnosti posuzované deky a potahu považovat za srovnatelné. Použitím letní přikrývky se celkový odpor sestavy zvýšil oproti případům, kdy byl použit potah nebo deka.

Na základě naměřených dat **není možné hypotézu zamítnout**, ačkoli bylo prokázáno, že záleží na typu posuzovaných přikrývek. Rozdíl mezi lehkým bavlněným potahem a zimní peřinou bude zřejmě výraznější než rozdíly pozorované mezi přikrývkami určenými pro spánek v obdobných podmínkách. Do rozdílů se bez pochyby promítne míra zakrytí jedince přikrývkou. V doplňkovém experimentu 3 bylo ukázáno, že zvětšení míry zakrytí zvyšuje vliv samotné přikrývky na celkový tepelný odpor. Lze předpokládat, že při zakrytí větší části těla by rozdíly mezi jednotlivými typy přikrývek byly výraznější, což by bylo v souladu s daty uvedenými v článku [26].

Hypotéza 2: *Poloha spícího člověka má významný vliv na celkový tepelný odpor spací sestavy.*

Za účelem porovnání vlivu polohy na celkový odpor spací sestavy byly vybrány poloha na levém boku a poloha na zádech, tepelný manekýn uložený do těchto poloh je na fotografiích na obrázku 7.3 v části 7.2.

Naměřená data uvedená v tabulce 9.1 a vynesena v grafu na obrázku 9.1 jasně ukazují, že pro žádný z posuzovaných případů není rozdíl celkového tepelného odporu sestavy při poloze na boku a na zádech větší než součet rozšířených nejistot měření. Není tedy možné určit, zda je rozdíl způsoben nejistotou měření nebo vlivem polohy, **hypotézu o vlivu polohy lze zamítnout**.

Při bližším rozboru lokálních tepelných odporů bylo prokázáno, že pro jednotlivé části má poloha zásadní vliv. Hlavní roli hraje kontakt s matrací, jejíž silné izolační schopnosti

způsobují téměř adiabatickou okrajovou podmínku na kontaktních plochách, podrobný popis lokálních rozdílů v celkových tepelných odporech při poloze na boku a na zádech byl předmětem zkoumání v části 8.2 předchozí kapitoly.

Hypotéza 3: *Lze určit takové střední radiační teploty a teploty okolí pro proměřované spací sestavy, při kterých bude dosaženo tepelného komfortu spícího člověka.*

Pomocí modelu PMV vycházejícího z bilanční rovnice byly určeny teploty okolí shodné se středními radiačními teplotami, při kterých by měla být během spánku v posuzované spací sestavě vyrovnána tepelná bilance mezi spící osobou a okolím. Model PMV tento výpočet umožňuje a výsledné teploty jsou v souladu s měřením s dobrovolníky v jiných pracích.

Ověření určené netruální teploty okolí proběhlo pomocí dvouuzlového modelu, který spočítal výslednou teplotu jádra lidského těla po osmihodinovém spánku ve stanovených podmínkách. Ukázalo se, že tento model je jen velmi málo citlivý a to zvláště na zvyšování teplot okolí. Pro teploty okolí, které byly pro danou sestavu v experimentu s dobrovolníky označeny jako nevyhovující, ukázal model zvýšení teploty jádra o pouhé 0,05 °C, což je hodnota, kterou by bylo velmi obtížné naměřit.

Dále byly stanovené termoneutrální teploty okolí ověřeny pomocí map tepelných toků, které mají na základě předpokládaného tepelného toku z jednotlivých částí těla určit tepelný vjem na těchto částech. Sestavené grafy poukázaly na zvětšující se rozdíl mezi tepelnými vjemy mezi zakrytými a nezakrytými částmi při zvyšující se hodnotě celkového tepelného odporu sestavy. Metoda se ukázala jako vhodná pro hledání relativních rozdílů mezi polohami na boku a na zádech a mezi jednotlivými částmi těla v rámci jednoho měření. Problematická je ale interpretace absolutních dat, základní graf byl sestaven pomocí koeficientů stanovených a ověřených pro osobu s metabolickou produkcí 1 met. Při spánku je metabolická produkce nižší a lze tedy předpokládat preferenci vjemů, které jsou již v oblasti teplo. O jak velký posun se ve skutečnosti jedná, je možné stanovit pouze pomocí experimentu s dobrovolníky, možnosti jeho provedení zůstávají vzhledem k povaze měřené činnosti otázkou pro další výzkum. Další nezodpovězenou otázkou je, jak velký rozdíl v tepelných tocích z jednotlivých částí je ještě přijatelný pro nerušený kvalitní spánek.

Hypotéza nemůže být na základě získaných dat zamítnuta. V problematice stanovování komfortních teplot během spánku zůstává mnoho neznámých, jejichž zkoumání může být náplní dalších prací.

10 Závěr

Cílem práce bylo stanovit metodiku měření tepelného odporu spací sestavy pomocí tepelného manekýna. Dále změřit celkový tepelný odpor pro spací sestavy s vybranými příkrývkami při poloze na boku a na zádech a vyšetřit vliv polohy tepelného manekýna a použité příkrývky na izolační schopnosti spací sestavy. Posledním cílem bylo stanovit vhodné teploty okolí, při kterých bude dosaženo vyrovnané tepelné bilance během spánku ve zvolené spací sestavě.

Metodika měření celkového tepelného odporu spací sestavy byla stanovena na základě normy ČSN EN ISO 9920. Měření pomocí tepelného manekýna nastaveného na konstantní povrchovou teplotu 34 °C probíhalo v klimatické komoře s teplotou okolí 22 °C přibližně shodnou se střední radiační teplotou. Rychlost proudění vzduchu byla nižší než 0,15 m/s, vlhkost nebyla řízena a její vliv na měření byl zanedbán. V rámci pretestu byl odhalen vliv pořadí měření, neboť použitý tepelný manekýn nedisponuje chlazením a tak při otočení z boku na záda došlo k výraznému zvýšení měřeného lokálního tepelného odporu na segmentu zad. V rámci měření pro získání dat byla udržována stejná posloupnost spacích sestav a poloh manekýna.

Následně byly naměřeny jednotlivé celkové odpory spacích sestav a jejich částí. Pro sestavu s potahem, kterou lze považovat za typickou pro tropické noci, byl určen celkový tepelný odpor $1,64 \pm 0,10$ clo při poloze na zádech, při poloze na boku pak $1,57 \pm 0,06$ clo. Hodnoty jsou si velmi blízké a lze tvrdit, že mezi polohou na boku a na zádech není výrazný rozdíl, což platí pro všechny měřené sestavy. Celkový tepelný odpor sestavy s mikroplyšovou dekou byl v rámci nejistoty měření srovnatelný s odporem sestavy s potahem. Mírně vyšší hodnoty $2,05 \pm 0,11$ clo pro polohu na zádech a $1,92 \pm 0,07$ clo pro polohu na boku byly naměřeny pro letní příkrývku, která se na první pohled jevila jako volba do chladnějšího prostředí oproti oběma dalším příkrývkám. Na základě provedeného pilotního experimentu lze předpokládat, že mezi naměřenými hodnotami by byly výraznější rozdíly, pokud by posuzované příkrývky zakrývaly větší část těla spící osoby. Zároveň by to vedlo ke zvýšení celkového tepelného odporu sestavy, což není žádoucí vzhledem k posuzování letních sestav.

Pro stanovení teplot okolí, při kterých bude dosaženo vyrovnané tepelné bilance mezi tělem a okolím, a tedy by tepelný vjem neměl nijak negativně ovlivňovat kvalitu spánku, byl použit model PMV. Jeho výsledky byly ve shodě s daty získanými pomocí měření s dobrovolníky v jiných pracích. Nejvyšší neutrální teplota 28,6 °C byla stanovena pro polohu na boku při spaní bez příkrývky, naopak nejnižší 24,4 °C byla určena pro polohu na zádech s letní příkrývkou. Ověření pomocí dvouuzlového modelu poskytlo slibné výsledky, ukázalo se však, že model je necitlivý na zvyšování teplot okolí, a tedy bez výrazných úprav není vhodný pro použití v řešené problematice.

Posouzení vhodnosti stanovených neutrálních teplot okolí pomocí map tepelných toků ukázalo, že ačkoli je celková tepelná bilance vyrovnaná, lokální vjemy mohou být již mimo hranici komfortu. To bude během skutečného spánku do jisté míry eliminováno změnami poloh a případně i míry zakrytí. Tyto změny způsobené člověkem jsou velmi komplexní a jejich implementace do jakéhokoli modelu by mohla být velkou výzvou pro další práce. Zároveň je třeba mít na paměti, že používané mapy tepelných toků byly kalibrovány pro vyšší metabolickou produkci. Přepočítání těchto map na stav spícího člověka je další problematika, kterou je možné se do budoucna zabývat. Celá věc však bude značně kom-

plikovaná, neboť kalibrace musí proběhnout pomocí měření s dobrovolníky, kteří ale nebudou schopni v průběhu experimentu reportovat tepelné vjemy na různých částech těla.

Bylo zjištěno, že ve zvolených spacích sestavách lze dosáhnout vyrovnané tepelné bilance, a tím pravděpodobně i komfortního spánku při teplotě okolí v rozsahu 24,4 - 28,6 °C shodné se střední radiační teplotou. Pokud by mělo být dosaženo vyrovnané tepelné bilance těla i při vyšších teplotách okolí, bylo by výhodné zaměřit se na možnost omezení vlivu prakticky adiabatické podmínky způsobené konvenční matrací. Nabízí se řešení pomocí provětrávaných matrací, které s sebou přinášejí řadu technických výzev, jež mohou být předmětem dalšího výzkumu. Dalším možným řešením je vývoj matrace s aktivním chlazením případně naprosto alternativní spací podložky či spacího systému ve stylu například hamak nebo houpacích sítí. Možností je celá řada, na dalších výzkumnících je zvolit co nejefektivnější a technologicky co možná nejjednodušší cestu, která zachová uživatelský komfort spánku i za stále zvyšujících se nočních teplot během letních měsíců.

11 Seznam použitých zdrojů

- [1] *2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition*. Atlanta: ASHRAE, 2001. ISBN 1-883413-88-5.
- [2] BANIASSADI, A., MANOR, B., YU, W., TRAVISON, T. a LIPSITZ, L. Nighttime ambient temperature and sleep in community-dwelling older adults. *Science of The Total Environment* [online]. 2023, sv. 899, s. 165623 [cit. 2024-04-18]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165623. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723042468>.
- [3] BASNER, M., SMITH, M. G., JONES, C. W., ECKER, A. J., HOWARD, K. et al. Associations of bedroom PM2.5, CO2, temperature, humidity, and noise with sleep: An observational actigraphy study. *Sleep Health* [online]. 2023, sv. 9, č. 3, s. 253–263 [cit. 2024-04-27]. DOI: 10.1016/j.sleh.2023.02.010. ISSN 2352-7218. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352721823000438>.
- [4] BREUSS, A., GNARRA, O., FUJS, M., SCHMIDT, M. a RIENER, R. Sleep position classification with a compact pressure textile sensor mattress using convolutional neural networks. *Biomedical Signal Processing and Control* [online]. 2024, sv. 90, s. 105775 [cit. 2024-05-10]. DOI: 10.1016/j.bspc.2023.105775. ISSN 1746-8094. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1746809423012089>.
- [5] FAN, X., LIAO, C., MATSUO, K., VERNIERS, K., LAVERGE, J. et al. A single-blind field intervention study of whether increased bedroom ventilation improves sleep quality. *Science of The Total Environment* [online]. 2023, sv. 884, s. 163805 [cit. 2024-04-05]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163805. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723024269>.
- [6] FANGER, P. *Thermal Comfort*. Danish Technical Press: Copenhagen, 1970. 244 s. ISBN 87 571 0341 0.
- [7] FERNANDES, G. L., SILVA VALLIM, J. R. da, D'ALMEIDA, V., TUFIK, S. a ANDERSEN, M. L. The effects of social jetlag and sleep variability on sleepiness in a population-based study: The mediating role of sleep debt. *Journal of Sleep Research* [online]. 2024, sv. 33, č. 2, s. e14043 [cit. 2024-05-15]. DOI: 10.1111/jsr.14043. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jsr.14043>.
- [8] FIŠER, J. *Metody hodnocení tepelného komfortu a jejich využití v experimentální a konstrukční praxi* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 223 s. ISBN 978-80-214-6047-8. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172595.
- [9] FIŠER, J. *Tepelný manekýn Newton* [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelny-mankyn-newton>.

- [10] FOJTLÍN, M., FIŠER, J. a JÍCHA, M. Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, sv. 77, s. 257–264 [cit. 2024–03–30]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.015. ISSN 0894-1777. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177716300917>.
- [11] GAWLASOVÁ Žaneta. *Vliv vlhkosti materiálu na tepelné vlastnosti rukavic* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2019 [cit. 2024-04-19]. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117306>.
- [12] GROSSMAN, M. N., ANDERSON, S. L., WORKU, A., MARSACK, W., DESAI, N. et al. Awakenings? Patient and Hospital Staff Perceptions of Nighttime Disruptions and Their Effect on Patient Sleep. *Journal of Clinical Sleep Medicine* [online]. 2017, sv. 13, č. 02, s. 301–306 [cit. 2024–04–13]. DOI: 10.5664/jcsm.6468. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5263086/>.
- [13] GUO, C., LAN, L., ZHANG, H., YAN, Y., KANG, M. et al. The impact of bedroom environment on sleep quality in winter and summer in the Qinghai-Tibetan plateau. *Building and Environment* [online]. 2023, sv. 244, s. 110785 [cit. 2024–03–21]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110785. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132323008120>.
- [14] GUSTAFSSON, M.-L., LAAKSONEN, C., SALANTERÄ, S., LÖYTTYNIEMI, E. a AROMAA, M. Changes in the amount of sleep and daytime sleepiness: A follow-up study of schoolchildren from ages 10 to 15 years. *International Journal of Nursing Practice* [online]. 2019, sv. 25, č. 1, s. e12689 [cit. 2024–04–13]. DOI: 10.1111/ijn.12689. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijn.12689>.
- [15] HEJČÍK, J. a FIŠER, J. *Klimatická komora* [online]. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.eu.fme.vutbr.cz/o-nas-laboratore-ottp-klimaticka-komora>.
- [16] HINNANT, B., BUCKHALT, J. A., BRIGHAM, E. F., GILLIS, B. T. a EL SHEIKH, M. Socioeconomic disparities, nighttime bedroom temperature, and children's sleep. *Journal of Applied Developmental Psychology* [online]. 2023, sv. 86, s. 101530. DOI: 10.1016/j.appdev.2023.101530. ISSN 0193-3973 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0193397323000199>.
- [17] HOOFF, J. L. M. H. Joost van. Thermal comfort: research and practice. *FBL* [online]. 2010, sv. 15, č. 2, s. 765–788 [cit. 2024–05–15]. DOI: 10.2741/3645. Dostupné z: <https://www.imrpress.com/journal/FBL/15/2/10.2741/3645>.
- [18] HORNE, J. a REYNER, L. Sleep-related vehicle accidents: some guides for road safety policies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* [online]. 2001, sv. 4, č. 1, s. 63–74 [cit. 2024–04–19]. DOI: 10.1016/S1369-8478(01)00014-6. ISSN 1369-8478. Fatigue and Transportation (II). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847801000146>.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [19] ISPANEK.CZ. *4 fáze spánku: víte, co se v nich děje?* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://ispanek.cz/faze-spanku/>.
- [20] JAY, O., CAPON, A., BERRY, P., BRODERICK, C., DE DEAR, R. et al. Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities. *The Lancet* [online]. 2021, sv. 398, č. 10301, s. 709–724 [cit. 2024-04-07]. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)01209-5. ISSN 0140-6736. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673621012095>.
- [21] KANG, M., YAN, Y., GUO, C., LIU, Y., FAN, X. et al. Ventilation causing an average CO2 concentration of 1,000 ppm negatively affects sleep: A field-lab study on healthy young people. *Building and Environment* [online]. 2024, sv. 249, s. 111118 [cit. 2024-03-21]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.111118. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132323011459>.
- [22] LAN, L., LIAN, Z. a LIN, Y. Comfortably cool bedroom environment during the initial phase of the sleeping period delays the onset of sleep in summer. *Building and Environment* [online]. 2016, sv. 103, s. 36–43 [cit. 2024-03-28]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.03.030. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316301135>.
- [23] LAN, L., LIAN, Z., QIAN, X. a DAI, C. The effects of programmed air temperature changes on sleep quality and energy saving in bedroom. *Energy and Buildings* [online]. Srpen 2016, sv. 129, s. 207–214 [cit. 2024-04-09]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.001. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881630679X>.
- [24] LAN, L., PAN, L., LIAN, Z., HUANG, H. a LIN, Y. Experimental study on thermal comfort of sleeping people at different air temperatures. *Building and Environment* [online]. 2014, sv. 73, s. 24–31 [cit. 2024-04-13]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.11.024. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003442>.
- [25] LIN, Z. a DENG, S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics — Developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment* [online]. 2008, sv. 43, č. 1, s. 70–81 [cit. 2024-03-15]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.11.026. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306004458>.
- [26] LIN, Z. a DENG, S. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics — Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. *Building and Environment* [online]. 2008, sv. 43, č. 5, s. 905–916 [cit. 2024-03-15]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2007.01.027. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132307000261>.
- [27] LIU, Y., WHEATON, A. G., CHAPMAN, D. P., CUNNINGHAM, T. J., LU, H. et al. Prevalence of Healthy Sleep Duration among Adults — United States, 2016. *MMWR and Morbidity and Mortality Weekly Reporte* [online]. Únor 2016, sv. 65,

- č. 6, s. 137–141 [cit. 2024–04–17]. DOI: 10.15585/mmwr.mm6506a1. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/65/wr/mm6506a1.htm>.
- [28] LIU, Y., SONG, C., WANG, Y., WANG, D. a LIU, J. Experimental study and evaluation of the thermal environment for sleeping. *Building and Environment* [online]. 2014, sv. 82, s. 546–555 [cit. 2024–04–10]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.09.024. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314003163>.
- [29] LIU, Y., SONG, C., ZHOU, X., LIU, J. a WANG, Y. Thermal requirements of the sleeping human body in bed warming conditions. *Energy and Buildings* [online]. 2016, sv. 130, s. 709–720 [cit. 2024–04–10]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.089. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816307988>.
- [30] MAITHANI, T., PRABHU, S. a PANT, S. Daytime-sleepiness, factors affecting sleep and sleep-quality among professional college students of South India - A correlative study. *Clinical Epidemiology and Global Health* [online]. 2024, sv. 26, s. 101534 [cit. 2024–04–16]. DOI: 10.1016/j.cegh.2024.101534. ISSN 2213-3984. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213398424000307>.
- [31] MCCARTER, S. J., HAGEN, P. T., ST. LOUIS, E. K., RIECK, T. M., HAIDER, C. R. et al. Physiological markers of sleep quality: A scoping review. *Sleep Medicine Reviews* [online]. 2022, sv. 64, s. 101657 [cit. 2024–04–30]. DOI: 10.1016/j.smr.2022.101657. ISSN 1087-0792. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1087079222000703>.
- [32] MINOR, K., BJERRE NIELSEN, A., JONASDOTTIR, S. S., LEHMANN, S. a OBRADOVICH, N. Rising temperatures erode human sleep globally. *One Earth* [online]. 2022, sv. 5, č. 5, s. 534–549 [cit. 2024–04–23]. DOI: 10.1016/j.oneear.2022.04.008. ISSN 2590-3322. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332222002093>.
- [33] NILSSON, H. O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. *Building and Environment* [online]. 2007, sv. 42, č. 12, s. 4000–4005 [cit. 2024–02–19]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.04.027. ISSN 0360-1323. Indoor Air 2005 Conference. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003702>.
- [34] NUNES, A. R. Resilience: conceptualisations and challenges for effective heatwave public health planning. *Public Health* [online]. 2024, sv. 230, s. 113–121 [cit. 2024–05–10]. DOI: 10.1016/j.puhe.2024.02.023. ISSN 0033-3506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003335062400088X>.
- [35] NĚMEČEK, P. *Nejistoty měření*. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [36] OBRADOVICH, N., MIGLIORINI, R., MEDNICK, S. C. a FOWLER, J. H. Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate. *Science Advances* [online]. 2017, sv. 3, č. 5, s. e1601555 [cit. 2024–04–23]. DOI: 10.1126/sciadv.1601555. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5446217/>.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [37] OTEVŘENÁ DATA O KLIMATU, z. ú.. *Průměrná roční teplota v ČR* [online]. [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/teplota-cr>.
- [38] OTEVŘENÁ DATA O KLIMATU, z. ú.. *Jaký vliv má klimatická změna na extrémní počasí* [online]. [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/vliv-klimatu-na-extremy>.
- [39] PAN, D., CHAN, M., DENG, S., XIA, L. a XU, X. Numerical studies on the microclimate around a sleeping person and the related thermal neutrality issues. *Ergonomics* [online]. Taylor Francis. 2011, sv. 54, č. 11, s. 1088 – 1100 [cit. 2024-04-15]. DOI: 10.1080/00140139.2011.611896. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00140139.2011.611896>.
- [40] PARSONS, K. C. *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. 2nd ed. London: Taylor & Francis Group, 2003. ISBN 0-415-23793-9.
- [41] PARUTHI, S., BROOKS, L., D'AMBROSIO, C., HALL, W., KOTAGAL, S. et al. Consensus Statement of the American Academy of Sleep Medicine on the Recommended Amount of Sleep for Healthy Children: Methodology and Discussion. *Journal of clinical sleep medicine : JCSM : official publication of the American Academy of Sleep Medicine* [online]. Zář 2016, sv. 12, č. 11, s. 1549–1561 [cit. 2024-04-03]. DOI: 10.5664/jcsm.6288. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27707447/>.
- [42] PSTRUŽINA, K. *Etudy o mozku a myšlení*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola ekonomická, 1994. ISBN 80-7079-280-9.
- [43] RAMOS, J., BELO, J., SILVA, D., DIOGO, C., ALMEIDA, S. M. et al. Influence of indoor air quality on sleep quality of university students in Lisbon. *Atmospheric Pollution Research* [online]. 2022, sv. 13, č. 2, s. 101301 [cit. 2024-03-09]. DOI: 10.1016/j.apr.2021.101301. ISSN 1309-1042. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104221003639>.
- [44] SANOK, S., BERGER, M., MÜLLER, U., SCHMID, M., WEIDENFELD, S. et al. Road traffic noise impacts sleep continuity in suburban residents: Exposure-response quantification of noise-induced awakenings from vehicle pass-bys at night. *Science of The Total Environment* [online]. 2022, sv. 817, s. 152594 [cit. 2024-03-11]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152594. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721076725>.
- [45] SHEEHAN, A. The Importance of Sleep for Normal Growth and Development. *Advances in Family Practice Nursing* [online]. 2023, sv. 5, č. 1, s. 193–205 [cit. 2024-03-29]. DOI: 10.1016/j.yfpn.2022.11.012. ISSN 2589-420X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589420X22000351>.
- [46] SIVERTSEN, B., PALLESEN, S., FRIBORG, O., NILSEN, K., BAKKE, . et al. Sleep patterns and insomnia in a large population-based study of middle-aged and older adults: The Tromsø study 2015-2016. *Journal of Sleep Research* [online]. Květen 2020, sv. 30, s. e13095 [cit. 2024-03-19]. DOI: 10.1111/jsr.13095. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32469116/>.

- [47] SNÁŠELOVÁ, T., BIVOLAROVA, M. a MELIKOV, A. Passive control of the bed micro-environment by using naturally ventilated mattress. *E3S Web of Conferences* [online]. Leden 2019, sv. 111, s. 02042 [cit. 2024-04-25]. DOI: 10.1051/e3sconf/201911102042. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/335138323_Passive_control_of_the_bed_micro-environment_by_using_naturally_ventilated_mattress.
- [48] STEFÁNKOVÁ, N. *Analýza kvality a délky spánku u studentů PF JU* [online]. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Pedagogická fakulta, 2021 [cit. 2024-04-21]. 75 s. Vedoucí diplomové práce doc. PaedDr. Vladislav Kukačka, Ph.D. Dostupné z: <https://theses.cz/id/n0jam7/>.
- [49] STEPTOE, A., PEACEY, V. a WARDLE, J. Sleep Duration and Health in Young Adults. *Archives of Internal Medicine* [online]. Zář 2006, sv. 166, č. 16, s. 1689–1692 [cit. 2024-04-19]. DOI: 10.1001/archinte.166.16.1689. ISSN 0003-9926. Dostupné z: <https://jamanetwork.com/journals/jamainternalmedicine/fullarticle/410837>.
- [50] THANAVIRATANANICH, S. The economic impact of sleep deprivation. In: KUSHIDA, C. A., ed. *Encyclopedia of Sleep and Circadian Rhythms (Second Edition)* [online]. Second Edition. Oxford: Academic Press, 2023, s. 458–465 [cit. 2024-03-19]. DOI: 10.1016/B978-0-12-822963-7.00069-4. ISBN 978-0-323-91094-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128229637000694>.
- [51] TOGO, F., AIZAWA, S., ARAI, J.-i., YOSHIKAWA, S., ISHIWATA, T. et al. Influence on Human Sleep Patterns of Lowering and Delaying the Minimum Core Body Temperature by Slow Changes in the Thermal Environment. *Sleep* [online]. Červen 2007, sv. 30, č. 6, s. 797–802 [cit. 2024-03-25]. DOI: 10.1093/sleep/30.6.797. ISSN 0161-8105. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1978351/>.
- [52] TONG, H., WARREN, J. L., KANG, J. a LI, M. Using multi-sourced big data to correlate sleep deprivation and road traffic noise: A US county-level ecological study. *Environmental Research* [online]. 2023, sv. 220, s. 115029 [cit. 2024-02-19]. DOI: 10.1016/j.envres.2022.115029. ISSN 0013-9351. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935122023568>.
- [53] VAN SOMEREN, E. J., KALSBECK, A., FLIERS, E., HOFMAN, M., SWAAB, D. et al. Mechanisms and functions of coupling between sleep and temperature rhythms. In: *Hypothalamic Integration of Energy Metabolism* [online]. Elsevier, 2006, sv. 153, s. 309–324 [cit. 2024-03-26]. Progress in Brain Research. DOI: 10.1016/S0079-6123(06)53018-3. ISSN 0079-6123. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079612306530183>.
- [54] VELLEI, M. Derivation and validation of a whole-body dynamic mean thermal sensation model. *Building and Environment* [online]. 2024, sv. 256, s. 111469 [cit. 2024-04-12]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111469. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324003111>.

- [55] WALKER, M. P. *Proč spíme: odhalte sílu spánku a snění*. 1. V Brně: Jan Melvil Publishing, 2018. ISBN 978-80-7555-050-7.
- [56] WANG, Z., ZHANG, N., CAO, B. a ZHU, Y. Thermal sensation and sleep quality in different combinations of indoor air temperature and bedding system conditions. *Building and Environment* [online]. 2023, sv. 243, s. 110729 [cit. 2024-05-03]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110729. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132323007564>.
- [57] WYATT, J. K., CECCO, A. R.-D., CZEISLER, C. A. a DIJK, D.-J. Circadian temperature and melatonin rhythms, sleep, and neurobehavioral function in humans living on a 20-h day. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* [online]. 1999, sv. 277, č. 4, s. R1152–R1163 [cit. 2024-02-27]. DOI: 10.1152/ajpregu.1999.277.4.R1152. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10516257/>.
- [58] XU, X. a LIAN, Z. Optimizing bedroom thermal environment: A review of human body temperature, sleeping thermal comfort and sleep quality. *Energy and Built Environment* [online]. 2024, sv. 5, č. 6, s. 829–839 [cit. 2024-04-17]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.06.010>. ISSN 2666-1233. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123323000570>.
- [59] XU, X. a LIAN, Z. A sleep staging model based on core body temperature rhythm. *Energy and Buildings* [online]. 2024, sv. 310, s. 114099 [cit. 2024-04-20]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114099. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824002159>.
- [60] YAN, S., XIONG, J., KIM, J. a DE DEAR, R. Adapting the two-node model to evaluate sleeping thermal environments. *Building and Environment* [online]. 2022, sv. 222, s. 109417 [cit. 2024-03-21]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109417. ISSN 0360-1323. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322006497>.
- [61] ZHANG, H. a SHEN, L. Effect of gender and body part differences on skin temperature and bed micro-environment during sleep in a moderate temperature environment. *Energy and Buildings* [online]. 2023, sv. 297, s. 113459 [cit. 2024-04-09]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113459. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823006898>.
- [62] ZHANG, N., CAO, B., WANG, Z. a ZHU, Y. Effects of bedding insulation and indoor temperature on bed microclimate and thermal comfort. *Energy and Buildings* [online]. 2020, sv. 223, s. 110097 [cit. 2024-04-26]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110097. ISSN 0378-7788. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819332360>.
- [63] ČSN EN ISO 14505-2. *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech – Část 2: Stanovení ekvivalentí teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 28 s. Třídící znak 83 3555.

- [64] ČSN EN ISO 23537-1. *Požadavky na spací pytle – Část 1: Tepelné, hmotnostní a rozměrové požadavky na spací pytle určené pro mezní teploty -20 °C a vyšší*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022. 40 s. Třídící znak 94 2855.
- [65] ČSN EN ISO 9920. *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelné izolace oděvu a odporu oděvu proti odpařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 100 s. Třídící znak 83 3553.

12 Seznam použitého značení a zkratek

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|---------|
| $^{\circ}\text{C}$ | stupeň Celsia | m | metr |
| J | joule | Pa | pascal |
| K | kelvin | s | sekunda |
| kg | kilogram | W | watt |
| a | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | koeficient lineární regrese pro výpočet t_{eq} | |
| b | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | koeficient lineární regrese pro výpočet t_{eq} | |
| C | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok z těla konvekcí | |
| C_{cl} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok konvekcí z oděvu/příkrývky | |
| C_{res} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok konvekcí v dýchacích cestách | |
| C_{sk} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok konvekcí z pokožky | |
| c_p | $[\text{J}/(\text{kg}/\text{K})]$ | měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku | |
| ε_{cl} | [-] | emisivita oděvu/příkrývky | |
| ε_{sk} | [-] | emisivita pokožky | |
| E_{res} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok latentního tepla potřebného k odparu vlhkosti v dýchacích cestách | |
| E_{sk} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok suchým pocením | |
| f_{cl} | [-] | součinitel zvětšení povrchu těla oděvem | |
| h_{cal} | $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ | kalibrační součinitel přestupu tepla mezi manekýnem a okolím | |
| h_{cl} | $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ | součinitel přestupu tepla mezi oděvem/příkrývkou a okolím | |
| h_{sk} | $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ | součinitel přestupu tepla mezi pokožkou a okolím | |
| K_{cl} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok vedením skrz oděv/příkrývku | |
| k_{uA} | [-] | bezpečnostní koeficient nejistoty typu A | |
| L | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | tepelná zátěž | |
| $l_{23,34^{\circ}\text{C}}$ | $[\text{J}/\text{kg}]$ | měrné skupenské teplo vypařování vody při 34°C | |
| M | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrná metabolická produkce tepla lidským tělem | |
| \dot{m}_{sk} | $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ | měrné množství vypařovaného potu | |
| \dot{m}_{res} | $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ | plicní ventilace | |
| n | [-] | počet měření | |
| p_a | [Pa] | parciální tlak vodních par ve vzduchu | |
| p_s | [Pa] | parciální tlak sytých vodních par v blízkosti pokožky | |
| \dot{Q} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měřený tepelný tok | |
| q_{res} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok odváděný pomocí dechu | |
| q_{sk} | $[\text{W}/\text{m}^2]$ | měrný tepelný tok odváděný pokožkou | |

12 SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A ZKRATEK

| | | |
|-------------|--------------------------------------|--|
| R | [W/m ²] | měrný tepelný tok z těla radiací |
| R_a | [m ² K/W] | odpor mezní vrstvy proti přestupu tepla a radiaci |
| R_{cl} | [W/m ²] | měrný tepelný tok z povrchu oděvu/příkrývky radiací |
| R_{cl} | [m ² K/W] | odpor oděvu proti vedení tepla |
| RH | [%] | relativní vlhkost vzduchu |
| R_{tot} | [m ² K/W] | celkový odpor proti přenosu tepla konvekcí a radiací |
| σ | [W/(m ² K ⁴)] | Stefan-Boltzmannova konstanta |
| S | [W/m ²] | měrný tepelný tok ukládaný v těle |
| S | [m ²] | povrch |
| S_{cr} | [W/m ²] | měrný tepelný tok ukládaný v tělesném jádru |
| S_{sk} | [W/m ²] | měrný tepelný tok ukládaný v pokožce |
| T_a | [K] | neovlivněná teplota okolí |
| t_a | [°C] | neovlivněná teplota okolí |
| t_{cr} | [°C] | teplota tělesného jádra |
| T_{cl} | [K] | povrchová teplota oděvu/příkrývky |
| t_{cl} | [°C] | povrchová teplota oděvu/příkrývky |
| t_{eq} | [°C] | ekvivalentní teplota okolí |
| t_{ex} | [°C] | teplota vydechovaného vzduchu |
| T_r | [K] | radiační teplota okolí |
| \bar{t}_r | [°C] | střední radiační teplota okolí |
| t_s | [°C] | povrchová teplota manekýna |
| T_{sk} | [K] | povrchová teplota pokožky |
| t_{sk} | [°C] | povrchová teplota pokožky |
| u_{Ay} | dle y | nejistota typu A měřené veličiny y |
| u_{By} | dle y | nejistota typu B měřené veličiny y |
| u_{Cy} | dle y | kombinovaná nejistota měřené veličiny y |
| U_y | dle y | rozšířená nejistota měřené veličiny y |
| W | [W/m ²] | měrný výkon vykonaný svaly |
| w_a | [m/s] | rychlost proudění vzduchu v neovlivněném proudě |
| x_a | [kg/ks _{sv}] | měrná vlhkost okolního vzduchu |
| x_{ex} | [kg/ks _{sv}] | měrná vlhkost vydechovaného vzduchu |

FSI Fakulta strojního inženýrství

MTV mean thermal vote

průměrný tepelný vjem

PMV predictive mean vote

předpokládaný průměrný tepelný vjem

PPD predictive percentage of dissatisfied

předpokládané procento nespokojených

REM rapid eye movement

rychlé pohyby očí, název fáze spánku

SWS slow-wave sleep

dlouhohlavný spánek, hluboký spánek

VUT Vysoké učení technické

13 Seznam příloh

- DP_Velickova_experiment1_01_vyhodnoceni.xlsx
- DP_Velickova_experiment1_02_vyhodnoceni.xlsx
- DP_Velickova_experiment1_03_vyhodnoceni.xlsx
- DP_Velickova_experiment2_01_vyhodnoceni.xlsx
- DP_Velickova_experiment3_01_vyhodnoceni.xlsx
- DP_Velickova_pretest_01_zpracovano.xlsx
- DP_Velickova_pretest_02_zpracovano.xlsx
- DP_Velickova_pretest_03_zpracovano.xlsx
- DP_Velickova_pretest_vyhodnoceni_final.xlsx
- DP_Velickova_vyhodnoceni_FINAL.xlsx
- ekvtoky.m
- PMV_matice.m