

VYUŽITÍ TERMOFYZIOLOGICKÉHO MODELU NA URČENÍ TEPELNÉ ZÁTĚŽE ČLOVĚKA V OCHRANNÝCH ODĚVECH

APPLICATION OF THERMOPHYSIOLOGICAL MODEL TO PREDICT THE HUMAN HEAT STRESS IN PROTECTIVE CLOTHING

Jan Pokorný^{a*}, Barbora Kopečková^a, Jan Fišer^a, Róbert Toma^a, Miroslav Jícha^a

^a Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika

*Korespondující autor. e-mail: pokorny.j@fme.vutbr.cz, tel.: +420 541 143 264

Abstrakt

Ochranné oděvy mají za cíl ochránit člověka před extrémními podmínkami, případně prodloužit dobu pobytu v takovýchto podmínkách (hasiči, protichemické jednotky, horníci apod.). Znalost vlastností ochranných oděvů je zásadní pro vydání doporučení, po jakou dobu je možné zdržovat se ve ztížených podmínkách, aniž by došlo k zdravotním problémům při akci. V tomto článku je prezentována aplikace termofyziologického modelu FMTK na ochranné oděvy. Cílem studie bylo provést analýzu vlivu různých oděvů na tepelnou zátěž člověka při vyšší fyzické zátěži (až 4,3 met). Simulace byly provedeny pro funkční spodní prádlo, filtrační ochranný převlek FOP M2000 a protichemický oblek Tychem-F. Zásadními vstupy do modelu jsou materiálové vlastnosti oděvu – tepelný odpor oděvu R_{cl} a odpor oděvu vůči vypařování R_{et} . Hodnoty pro jednotlivé oděvy byly buď přímo změřeny pomocí tepelného manekýna Newton nebo určeny na základě dostupných dat v literatuře. Výsledkem simulací bylo určit bezpečnou dobu zátěže, kdy rektální teplota nepřesáhne 38,5 °C. Výsledky byly porovnány se skutečnými daty získaných na dobrovolnících při zátěžových testech v klimatické komoře.

Klíčová slova: termofyziologický model, tepelný stres, ochranné oděvy

Abstract

The protective clothing is used to protect human against extreme conditions and to increase a safe time of exposure for e.g. firefighters, hazmat units, miners etc. The knowledge of protective clothing properties is essential for adjustment of the recommended time to avoid health risk during the mission. In this paper, the application of the FMTK Fiala-based thermophysiological model to the protective clothing. The aim of the study was to analyse effect of various clothing ensembles (an underwear, NBC suit, FOP M2000 and chemical protective suit Tychem-F) for high metabolic rates up to 4.3 met. The main inputs of the model are material properties of clothing as thermal resistance R_{cl} and evaporative resistance R_{et} . The values of material properties of clothing ensembles were either measured by thermal manikin Newton or were identified from literature. The main result of this study was to identify safe time of exposure, when the rectal temperature not exceed temperature 38.5 °C. These results were verified by the real measured data on volunteers in climatic chamber.

Key words: thermophysiological model, heat stress, protective clothing

1. ÚVOD

Tento článek se zabývá problematikou vyhodnocení tepelné zátěže člověka pomocí termofyziologického modelu a vychází již z dříve publikované studie [1], pro kterou poskytla experimentální data SÚJCHBO (Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany). Článek vznikl jako její volný překlad z angličtiny do češtiny, který je doplněný o kapitoly 1.1 a 5.1. Ty obsahují podrobnější úvod do problematiky proti-chemických ochranných oděvů a také aktualizované informace o současných aktivitách probíhajících na Odboru termomechaniky a techniky prostředí při FSI VUT v Brně týkající se této problematiky.

1.1 Ochranné oděvy

Ochranné oděvy mají za cíl chránit člověka před extrémními podmínkami, případně prodloužit dobu pobytu v takovýchto podmínkách. Příkladem mohou být ztížené pracovní podmínky pracovníků v polárních či pouštních oblastech, horníků, slévárníků apod. Dále pak také pracovní podmínky zásahových jednotek: vojenské, protichemické jednotky, hasičský záchranný sbor, kdy o zvoleném oděvu obvykle rozhoduje velitel zásahu. Speciální kategorií ochranných oděvů jsou biologické a proti-chemické obleky, které vyžadují odborné zacházení a způsob jejich použití lze dohledat např. v Řádu chemické služby Hasičského záchranného sboru České republiky [2]. „Protichemický ochranný oděv je kombinace sestavených součástí oděvu, oblékaná pro získání ochrany proti působení nebo kontaktu s chemikáliemi. Umožňuje použití přilby, dýchacího přístroje a komunikačního zařízení. Protichemický ochranný oděv se dělí dle ochranné funkce na typy:

- *typ 1 - plynotěsný protichemický ochranný oděv*
 - typ 1a – ...s přívodem dýchatelného vzduchu nezávislým na okolním ovzduší nošený uvnitř protichemického ochranného oděvu.*
 - *typ 1b – ...s přívodem dýchatelného vzduchu nošený na vnější straně protichemického ochranného oděvu*
 - *typ 1c – ...s dýchatelným vzduchem vytvářejícím přetlak, např. přívodem vzduchu potrubím nebo hadicí*
- *typ 2 - neplynotěsný protichemický ochranný oděv s dýchatelným vzduchem vytvářejícím přetlak uvnitř oděvu.*
- *typ 3 - kapalinotěsný oděv*
- *typ 4 - oděv těsný proti postřiku (ve formě spreje)*
- *typ 5 - prachotěsný oděv (proti aerosolům a suchých jemných prachů).*
- *typ 6 - oděv omezeně těsný proti postřiku*

...Stupně ochrany zasahujících hasičů v prostředí s výskytem nebezpečných látek jsou určeny druhem dýchací techniky a typem protichemického ochranného oděvu. ČSN stanovují parametry odolnosti protichemických ochranných oděvů, které jsou dány zejména plynotěsností, odolností proti pronikání (penetrace), odolností proti propustnosti (permeace), odolností proti oděru, ohybu a proděravění, tepelnou stabilitou, pevností v dalším trhání a soudržností vrstveného materiálu“ [2]. Vzhledem k výše uvedeným požadovaným vlastnostem, bývají tyto typy oděvů obvykle málo prodyšné či úplně neprodyšné vůči vodním parám, což limituje jejich použití při fyzické zátěži či teplých okolních podmínkách v důsledku omezené schopnosti člověka ochlazovat se pocením. Z tab. 1, převzaté z [2], vyplývá, že maximální doporučená doba pobytu

v proti-chemickém ochranném oděvu klesá s rostoucí teplotou okolního prostředí a také intenzitou vykonávané činnosti. „Pro snížení zátěže organismu může pobyt hasičů v protichemickém ochranném oděvu zahrnovat cyklus činnost – přestávka; po ukončeném pobytu a mezi opakovaným použitím protichemického ochranného oděvu je nutné umožnit hasičům dostatečný odpočinek bez tohoto oděvu v bezpečné vzdálenosti od nebezpečné zóny“ [2]. Nadměrná tepelná zátěž člověka způsobuje tepelný stres, který může vést k přehřátí organismu tzv. hypertermii, která je v extrémních případech životu ohrožující. Dle Fletcher [3] je přípustná expozice člověka daným podmínkám považována za bezpečnou, dokud vnitřní teplota nepřesáhne 38,5 °C. Opačné riziko představuje hypotermie čili podchlazení, kdy pokles vnitřní teploty pod 35 °C začíná být nebezpečný [4].

Tabulka 1: Maximální doporučené doby pobytu hasičů v protichemickém ochranném oděvu

Délka pobytu v protichemickém ochranném oděvu v závislosti na okolní teplotě				
Ochrana dýchacích cest (dýchací přístroj = DP)	Typ ochranného oděvu (dle ČSN)	Teplota okolí [°C]	Délka pobytu při nepřetržité práci	Délka pobytu při namáhavé práci
autonomní DP vzduchový s otevřeným okruhem	plynotěsný, rovnotlaký (1b, 2-6)	20	max. 50 min	po 20 min následuje 10 min přestávka
		30	max. 15 min	2x po 10 min s 5 min přestávkou
autonomní DP vzduchový s otevřeným okruhem	plynotěsný přetlakový (1a, 1c)	25	max. 35 min	2x po 20 min s 5 min přestávkou
		30	max. 15 min	2x po 10 min s 5 min přestávkou
autonomní kyslíkový DP s uzavřeným okruhem	plynotěsný, rovnotlaký (1b, 2-6)	35	max. 15 min	2x po 10 min s 10 min přestávkou; celková doba nesmí překročit 4 hodiny v rozmezí 24 hodin

Při jiných teplotách je nutno uvedené časové intervaly přiměřeně upravovat. Převzato z [2].

V dnešní době se do ochranných oděvů integrují nové technologie [5] umožňující vedoucímu zásahu či dispečinku monitorovat člověka během zásahu, čímž se zvyšuje aktivní bezpečnost hasičů. Přesto je stále nezbytné znát doporučenou přípustnou dobu tak, aby se předešlo rizikům plynoucím z nadměrné tepelné zátěže. Právě znalost vlastností ochranných oděvů včetně vypařovacího R_{et} a tepelného R_{cl} odporu oděvu, je zásadní pro vydání doporučení, po jakou dobu je možné zdržovat se ve ztížených podmínkách, aniž by došlo k zdravotním problémům. Problematikou tepelného stresu v ochranných oděvech se zabývá [6] a přehled způsobů jeho vyhodnocení přináší [7]. Pomocí monitorování tělesných parametrů, či sledování podmínek okolí lze tepelnou zátěž na člověka vyjádřit pomocí indexů tepelného stresu/komfortu: PHS (Predicted Heat Strain) - ISO 7933 [8], WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) ISO 7243 [9], a PMV/PPD (Predicted Mean Vote / Predicted Percentage of Dissatisfied) - ISO 7730 [10]. PHS a PMV indexy jsou založeny na celkové tepelné bilanci člověka a vyžadují relativně malé množství vstupních dat pro rychlé a relevantní výsledky.

1.2 Termofyziologické modely

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic

<http://hazmat-protect.sujchbo.cz>

ISBN 978-80-270-4852-6

Termofyziologické multisegmentové modely jsou schopny popsat tepelnou zátěž člověka komplexním způsobem zahrnující přenos tepla uvnitř lidského těla a také tepelnou výměnu s okolním prostředím. Výhodou těchto modelů je možnost vyhodnotit vliv dynamických, asymetrických podmínek, což indexy tepelného stresu/komfortu nedokáží, protože uvažují člověka jako jeden celek. Termofyziologické modely jsou schopny zahrnout vlivy:

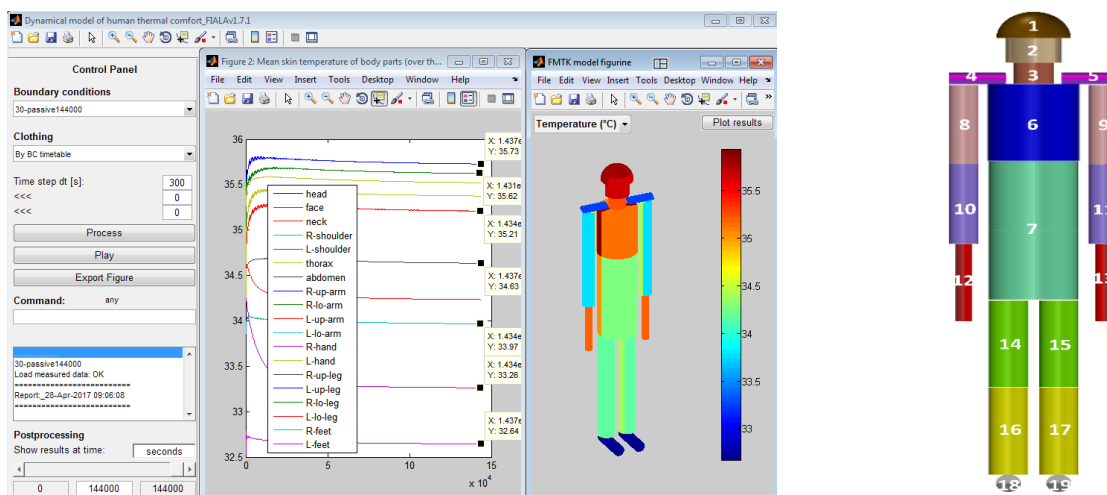
- (1) tělesné parametry: hmotnost, výška, podíl tuku v těle apod., vlastnosti kardiovaskulárního a termoregulačního systému
- (2) podmínky prostředí: teplota vzduchu, rychlost proudění vzduchu, relativní vlhkost a střední radiační teplota
- (3) osobní faktory: metabolická produkce tepla, vlastnosti oděvu – tepelná izolace a prodyšnost

První termofyziologické modely vznikly jako součást medického výzkumu pro vojenské účely v 60. letech 20. století, za účelem vyhodnotit a predikovat tepelnou zátěž během různých podmínek viz Wisslerův 225-uzlový model [11]). Později 25-uzlový model od Stolwijka [12] byl použit NASA pro monitorování výkonu a stavu astronautů programu Apollo. Hlavním přínosem tohoto modelu bylo začlenění matematického modelu popisující termoregulaci člověka. Ve vývoji multisegmentových modelů pokračoval Fiala [13] a Tanabe [14], kteří své modely používali navíc i k vyhodnocování tepelného komfortu. V dnešní době kromě původních kódů od Wisslera [11] a Fialy [13, 15], existují odvozené modely používané buď pro vědecké účely (ThermoSEM [16]) nebo jako součásti komerčních software (Theseus-FE [17], TAITherm [18]). Některé z těchto modelů umožňují individualizaci vstupních parametrů člověka. Přestože teorie k Fialovu modelu je dobře popsána a model byl nezávisle validován [19], stále platí že vlastní kód modelu není veřejně dostupný.

FMTK (Fyziologický model tepelného komfortu) je termofyziologický model vycházející z Fialova modelu [13] a jeho verifikace pro průměrného člověka je popsána ve studii [1]. Cílem této studie bylo provést analýzu vliv různých oděvů na tepelnou zátěž člověka při vyšší zátěži (až 4,3 met). Simulace byly provedeny pro spodní prádlo, pro filtrační ochranný převlek FOP M2000 a protichemický oblek Tychem-F. Výsledkem simulací bylo určit bezpečnou dobu zátěže, kdy rektální teplota nepřesáhne 38,5 °C. Výsledky byly porovnány s reálnými daty na dobrovolnících.

2. METODY

Pro získání výsledků studie [1] byl použit FMTK model, experimentální data získána na dobrovolnících a rovněž byly identifikovány materiálové vlastnosti testovaných oděvů i pomocí tepelného manekýna Newton [20].



Obrázek 1: Grafické uživatelské rozhraní FMTK s 19 segmentovým modelem. Převzato z [1].

2.1 Popis FMTK modelu

Současná verze FMTK 1.8.5 popisuje průměrného člověka tak, jak byl původně definován Fialou [13]. Model byl implementován do Matlabu jako 19-segmentový model: 1_Head, 2_Face, 3_Neck, 4,5_Shoulders, 6_Thorax, 7_Abdomen, 8-11_Arms, 12,13_Hands, 14-17_Legs, 18-19_Feet dohromady s 49 sektory. FMTK model nejvíce koresponduje s verzí Fialova modelu od firmy P+Z [16], mají stejný počet segmentů a sektorů. Každá vrstva FMTK modelu je rozdělena do 6 uzlů (model umožňuje změnit diskretizaci). Jádrem segmentu 1_Head (hlava) reprezentuje teplotu hypothalamu a jádro segmentu 7_Abdomen (břicho) reprezentuje rektální teplotu, která nejlépe vyjadřuje vnitřní tělesnou teplotu. Crank-Nicholsonovo implicitní diskretizační schéma a metoda konečných objemů byly použity pro iterační řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic reprezentující vedení tepla v živých tkáních. Kromě určení teploty jednotlivých tkání je součástí výpočtu také určení teploty krve, povrchové teploty oděvu, pokrytí pokožky potem a index DTS (dynamický tepelný pocit). Součástí FMTK je jednoduché grafické uživatelské rozhraní (obr. 1) s možností zadat okrajové podmínky a vybrat oděvní sestavu definovanou lokálně pro všech 49 sektorů, viz tab. 3.

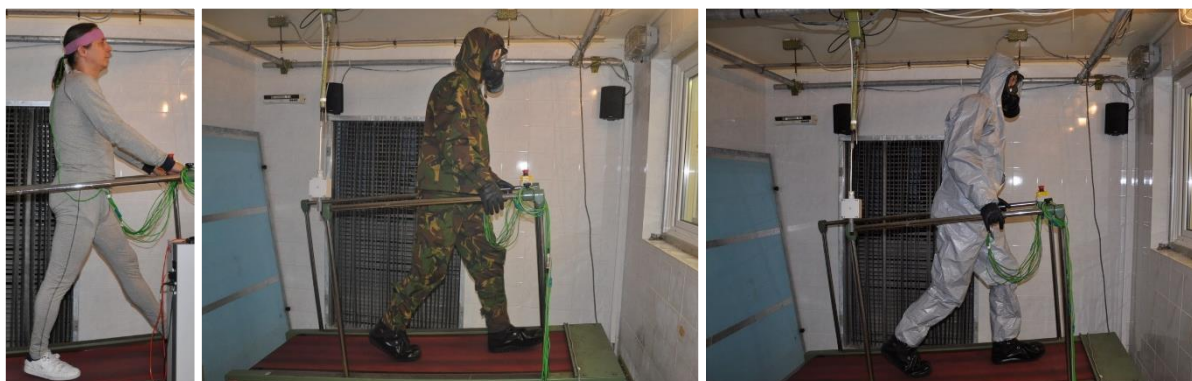
2.2 Popis experimentu

Experimentální data naměřili pracovníci SÚJCHBO v klimatické komoře v Příbrami. Celkem byly simulovány a změřeny tři typy oděvů (obr. 2): (1) funkční spodní prádlo Klimatex; (2) filtrační ochranný převlek FOP M-2000 (krátce FOP); (3) protichemický oblek Tychem-F. Dohromady bylo vyhodnoceno 9 případů (tab. 2). Relativní vlhkost vzduchu byla udržována (RH=20 %) kromě 5. případu FOP 35 °C (RH=50 %) a 8. případu Tychem-F 35 °C (RH=27 %). Rychlost proudění vzduchu byla způsobena převážně vlastním pohybem probanda na ergonometru a byla do 0,2 m/s kromě 8. případu Tychem-F 35 °C, kdy rychlost dosahovala hodnoty $v = 1.5$ m/s.

Tabulka 2: Studované případy s definovanou dobou testu t (min). Převzato z [1].

Případ/oděv	t [min]	$T_{a=T_r}$ [°C]	RH [%]	M [met]	M [W/m ²]
1-4 Klimatex	125, 95, 95, 65	25, 30, 35, 40	20,20,20,20	3.2	170-200
5-6 FOP	83, 125	35, 40	50, 20	3.7	213
7-9 Tychem-F	75, 60, 55	30, 35, 40	20,27,20	4.3	250

Kde T_a je teplota vzduchu, T_r střední radiační teplota, M je metabolická produkce tepla



Obrázek 2: Testované oděvní sestavy, zleva: funkční spodní radlo Klimatex, filtrační ochranný převlek FOP M-2000 a protichemický Tychem-F, oba s respirační maskou. Převzato z [1].

Experiment v klimatické komoře SÚJCHBO probíhal následovně:

- (1) Proband byl stabilizován po dobu 10 min při teplotě 23 °C. Během této doby byl vystrojen měřicí technikou pro měření teploty pokožky, rektální teploty, měřičem tepové frekvence a oblečen do vybraného oděvu (aktivita ve stoje cca. 1,5 met, oděv „Pouze šortky“).
- (2) Byl započat vlastní test na ergonometru, kdy protokol testu předepisoval 20 min zátěže, tj. chůze (sklon 10 %, aktivita 3,2-4,3 met), poté 5 min odpočinek (sezení 1 met).
- (3) Periody zátěže a odpočinku se střídaly až do té doby, dokud nebyl překročen limit rektální teploty 38.5 °C, či časový limit 125 min. Zároveň měl proband vždy možnost sám ukončit test na vlastní žádost z důvodu vyčerpání či neakceptovatelného diskomfortu.

Rektální teplota a povrchové teploty pokožky byly měřeny v souladu s normou ISO 9886 [21]. Lokální teploty pokožky byly měřeny pomocí ústředny ALMEMO 2590-4AS a kalibrovanými termočlánky a to v místech: Čelo, P lopatka, L hrudník, P paže, L paže, L ruka, P stehno, L lýtko. Rektální teplota byla měřena pomocí MEDIPOINT-System. Dalším sledovaným parametrem byla produkce potu určená gravimetrickou metodu na základě rozdílu hmotnosti probanda a jeho oděvu před a po testu. Metabolická produkce tepla byla určena pomocí spirometrického zařízení Oxycon Mobile měřící spotřebu kyslíku.

Experimenty v SÚJCHBO byly zaměřeny spíše na porovnání různých oděvů oblečených jedním probandem než na opakované testy stejného oděvu s různými probandy, proto nebylo možné identifikovat směrodatné odchylky měření vypovídající o vlivu individuálních fyziognomických parametrů. Jako přijatelná odchylka predikce rektální teploty byla považována hodnota 0,2 °C, pro střední teplotu pokožky 0,5 °C a pro lokální teplotu pokožky 1 °C. Odchylky byly vyhodnoceny pomocí střední absolutní chyby (MAD = mean absolute deviation) viz rovnice (1)

$$MAD = \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| / n \quad (1)$$

kde y_i je i -tá predikovaná hodnota a x_i the i -tá skutečně naměřená hodnota.

2.3 Vlastnosti oděvu

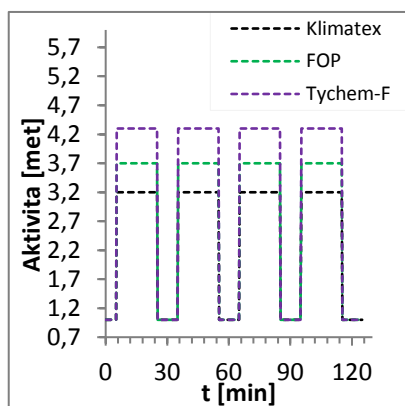
Zásadními vstupy do modelu jsou materiálové vlastnosti oděvu. U oděvu se jedná o lokální parametry odporu oděvu vůči vypařování R_{et} [m^2K/W] a tepelném odporu R_{cl} [m^2Pa/W] (viz tab. 3), dále roli hraje také faktor zvětšení plochy povrchu lidského těla oděvem, který lze odhadnout dle ISO 7730 [9]. Hodnoty pro jednotlivé materiály byly buď přímo změřeny pomocí tepelného manekýna Newton nebo určeny na základě dat dostupných v literatuře (reference jsou uvedeny v [1]).

Tabulka 3: Vlastnosti oděvů uvažovaných v simulacích. Převzato z [1].

Oděv Segment	Klimatex		FOP		Tychem-F		Pouze šortky	
	R_{cl} m^2K/W	R_{ecl} m^2Pa/W	R_{cl} m^2K/W	R_{ecl} m^2Pa/W	R_{cl} m^2K/W	R_{ecl} m^2Pa/W	R_{cl} m^2K/W	R_{ecl} m^2Pa/W
Head, Neck	0,000	0,0	0,051	9,1	0,051	103,0	0,000	0,0
Face	0,000	0,0	0,051	103,0	0,051	103,0	0,000	0,0
Shoulders	0,030	4,5	0,126	22,5	0,185	373,7	0,000	0,0
Abdomen Posterior	0,071	15,2	0,217	38,7	0,230	464,6	0,036	4,0
Anterior, Inferior	0,058	12,3	0,231	41,2	0,239	482,8		
Thorax Posterior	0,071	15,2	0,217	38,7	0,230	464,6		
Anterior, Inferior	0,058	12,3	0,231	41,2	0,239	482,8	0,000	0,0
Up, arm	0,050	7,6	0,209	37,3	0,177	357,6	0,000	0,0
Lo, arm	0,051	7,7	0,151	26,9	0,146	294,9	0,000	0,0
Hands	0,000	0,0	0,051	103,0	0,051	103,0	0,000	0,0
Up, leg	0,091	13,8	0,400	71,3	0,287	579,8	0,000	0,0
Lo, leg	0,039	5,9	0,123	21,9	0,129	260,6	0,000	0,0
Feet	0,097	14,7	0,103	208,0	0,109	220,2	0,000	0,0
Celkový odpor	0,058	8,8	0,168	51,9	0,165	334,7	0,006	0,9

Uvedené hodnoty jsou platné pro odpočinek (1 met). Během chůze bylo uvažováno pouze 71 % z těchto hodnot.

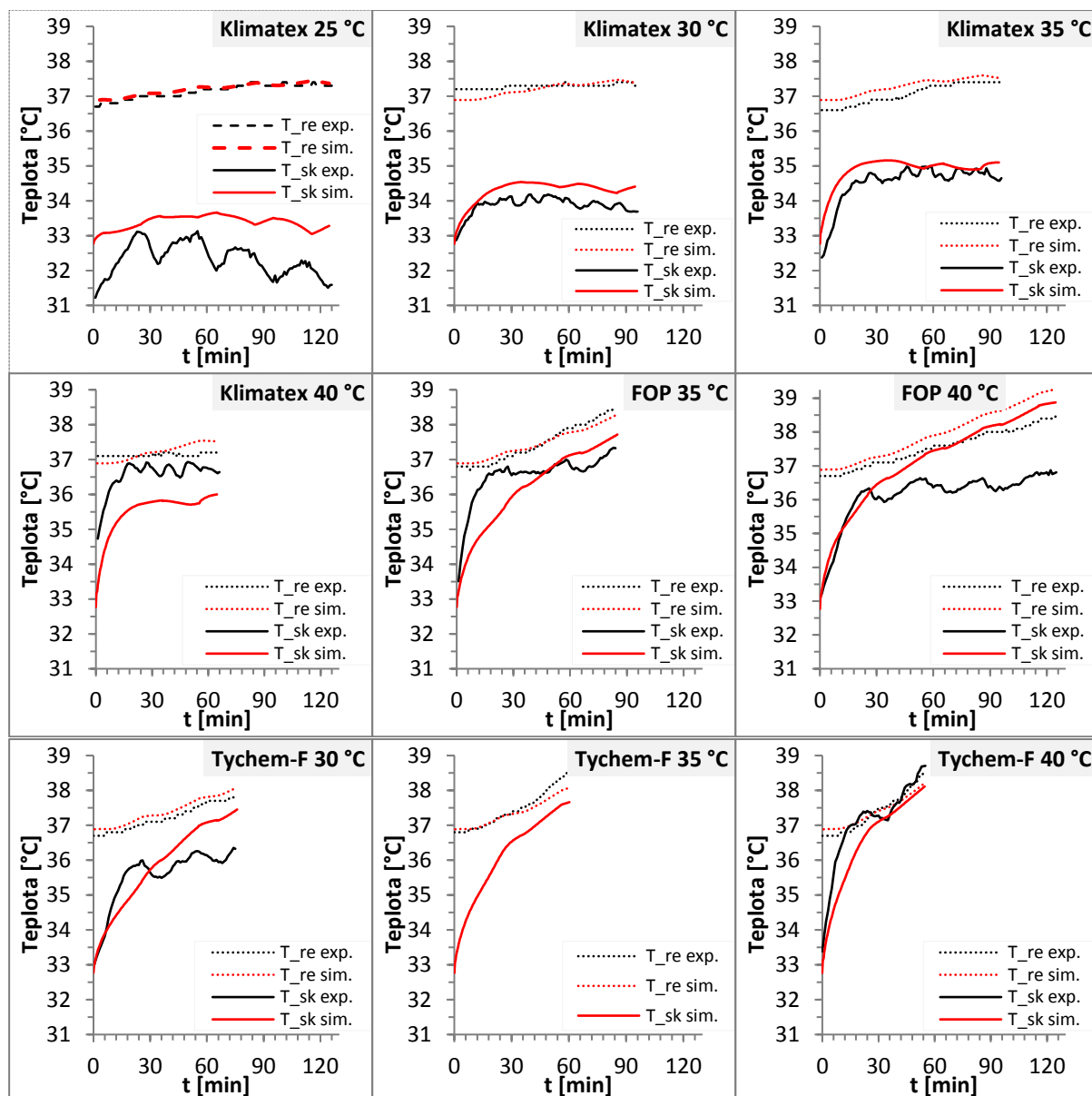
3. VÝSLEDKY



Cílem simulací (VUT) i měření (SÚJCHBO) bylo vytvořit databázi bezpečných času expozic pro danou metabolickou produkci tepla, různé podmínky okolí a různé oděvy. Rozsah teplot okolí byl uvažován od 25 °C do 40 °C. Sledovaným parametrem byla zejména rektální teplota a doba za jakou je dosažen bezpečnostní limit (38,5 °C). Obr. 3 ukazuje časový průběh vykonávané aktivity (20 min. chůze s následným 10 min. odpočinkem - 1 met). Přestože se jednalo o tutéž činnost, byly v zátěži změřeny různé hodnoty metabolické produkce tepla pro dané oděvy: Klimatex 3,2 met, FOP 3,7 met, a Tychem-F 4,3 met. Důvodem byla větší námaha pro udržení předepsané rychlosti chůze 4 km/h z důvodů hmotnosti oděvu, odporu, který klade při pohybu

a také vlivu respirační masky zvyšující námahu při dýchání. Na obr. 4 jsou uvedeny veškeré výsledky měření a simulace střední teploty pokožky a rektální teploty pro všechny oděvy.

Obrázek 3: Metabolická produkce tepla v průběhu testů. Převzato z [1].



Obrázek 4: Střední teplota pokožky a rektální teplota: simulace vs. experiment (funkční spodní prádlo Klimatex, ochranný oděv FOP a protichemický oděv Tychem-F). Pro Tychem-F 35 °C nebyly měřeny teploty pokožky. Data převzata z [1].

Ve výsledných grafech je vykreslen vlastní průběhy měření, již bez 10 min. stabilizace. Z výsledků je patrné že v případě funkčního prádla Klimatex i při 40 °C je člověk schopen svoji vnitřní teplotu a teplotu pokožky po danou dobu udržovat v bezpečných mezích. Naopak u ochranných oděvů FOP a Tychem-F je patrný jejich nárůst, což je vlivem nedostatečného odvodu tepla do okolí, kdy efektivita ochlazování pokožky pocením je výrazně limitována, a

lidské tělo už není samo schopno bránit přehřátí organismu. Tab. 4 shrnuje výsledky predikce FMTK a jeho MAD od měření. Maximální chyba při určení rektální teploty je na konci testu 1,1 °C pro případ FOP 40 °C, s MAD = 0,59 °C. Střední teplota pokožky se na konci testu se liší až o 2,3 °C v témže případě s MAD = 1,51 °C. Pokud se vezmou všechny uvažované příklady, tak průměrná chyba MAD pro rektální teplotu je 0,20 °C, pro střední teplotu pokožky 0,78 °C a pro lokální teploty pokožky je MAD 1,25 °C.

Tabulka 4: Střední absolutní chyba (MAD) rektální teploty T_{re} , střední teploty pokožky T_{skm} a lokálních teplot pokožky $T_{sk,loc}$ pro všechny případy a oděvy. Data převzata z [1].

MAD	Klimatex				FOP		Tychem-F			AVG
	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	35 °C	40 °C	30 °C	35 °C	40 °C	
T_{re} [°C]	0,07	0,13	0,22	0,15	0,13	0,59	0,17	0,14	0,14	0,20
T_{skm} [°C]	1,06	0,41	0,36	0,74	0,69	1,51	0,63	x	0,59	0,78
$T_{sk,loc}$ [°C]	1,94	0,86	0,72	1,58	0,55	2,00	1,32	x	0,55	1,25

4. DISKUZE

Ve většině testovaných případech FMTK model prokázal, že je schopen predikovat vnitřní teplotu velmi dobře. Funkční prádlo Klimatex nezpůsobuje nadbytečný tepelný stres i při teplotě okolí 40 °C, neboť po celou dobu testu nebyla překročena hodnota rektální teploty 38,5 °C. V případě experimentu s FOP a Tychem-F, byla většina testů ukončena tak, aby probandi nebyli vystaveni zdravotním rizikům

- FOP 35 °C – FMTK doporučuje ukončit zátěž o 7 minut později (po 90 min) oproti změřeným (83 min).
- FOP 40 °C – FMTK doporučuje skončit test o 42 minut dříve, po 83 min namísto 125 min, což je však na bezpečné straně. Podstatný vliv RH ilustruje případ FOP 30 °C, kdy RH byla 50 %. Přestože byla nižší teplota tak doba přípustné expozice byla kratší (ve vlhčím prostředí je omezena schopnost lidského těla odvádět teplo pocením)
- Tychem 30 °C – test byl ukončen dříve, protože proband se cítil vyčerpan. Jeho vnitřní teplota dosáhla 37,8 °C. V tu chvíli FMTK model predikoval 38,1 °C.
- Tychem 35 °C a Tychem 40 °C – FMTK podhodnocuje tepelný stres a doporučuje delší dobu bezpečné expozice 80 min a 65 min, což je oproti experimentálním datům 60 min a 55 min rozdíl 10-20 minut.

Experimentálně bylo dokázáno, že Tychem-F má obecně nejkratší dobu bezpečné expozice v teplém prostředí, což FMTK simulace potvrdily. Celkově byla ověřena vhodnost použití termofyziologických modelů pro vyhodnocení vlivu ochranných oděvů na tepelný stres člověka. Hlavní nevýhodou těchto modelů je však celková složitost určení vstupních dat:

- Vlastnosti oděvů
- Součinitel přestupu tepla v závislosti na vykonávané činnosti
- Určení metabolické produkce tepla a její distribuce mezi segmenty pro různé aktivity

Přestože jsme prokázali, že FMTK model je dobře implementován, víc pozornosti by mělo být věnováno podrobnějšímu modelu oděvu, protože nejvíce nepřesností pochází z odhadu lokálních parametrů oděvu, což je zejména problematické v polních testech, kdy identifikace

vlastnosti oděvu v reálném čase (např. vliv vzduchových mezer mezi vrstvami oděvu) a metabolické produkce tepla je obtížná.

Z praktického hlediska lze termofyziologické modely, FMTK nevyjímaje, doporučit převážně inženýrům, kteří mají za úkol zohlednit vliv daného technického opatření na tepelný stres člověka. Dále také tyto modely nachází aplikace v oděvním průmyslu, ergonomii prostředí v budovách, kabinách dopravních prostředků, při vyhodnocení tepelného stresu, či při odhadu bezpečné délky expozice v extrémních podmínkách (zásahy hasičů apod.).

5. ZÁVĚR

FMTK model byl aplikován pro vyhodnocení vlivu ochranných oděvů na tepelný stres člověka v teplých/horkých podmínkách, a to pro aktivitu až 4,3 met, kdy průměrné chyby pro všechny testované případy byly vyhodnoceny následovně:

- Shoda mezi měřenými a predikovanými rektálními teplotami je dobrá (MAD = 0,20 °C).
- Predikce střední teploty pokožky (MAD = 0,78 °C) a zejména lokální teploty pokožky (MAD = 1,25 °C) je méně přesná kvůli obtížné predikci množství efektivně odpařeného potu.
- Tepelné odpory oděvu byly měřeny pomocí tepelného manekýna, pro odhad vypařovacích odporů byla použita data z literatury.
- Ze studie také vyplývá, že hlavní možnost zpřesnění predikce FMTK modelu spočívá v konkretizaci hodnot vypařovacích odporů R_{et} a také v znalosti jejich lokální distribuce po jednotlivých částech lidského těla.
- Metabolickou produkci tepla je možné odhadnout na základě tepové frekvence, avšak spirometrické metody poskytují přesnější vstupní data do modelu.

5.1 Současný stav a výhled

V současné době probíhají testy individualizovaného FMTK modelu [22] tak, aby bylo možné rozlišit mezi jednotlivými osobami a zohlednit tak vliv hmotnosti, podílu tuku a trénovanosti na tepelný stres. Zároveň probíhají práce na rozšíření možnosti použití našeho tepelného manekýna Newtona pro přesné měření vypařovacích odporů [23], což by přispělo k výraznému zpřesnění definice vlastností oděvu a tím i výsledkům predikce FMTK. Výsledky tohoto výzkumu pomohou lépe popsat vlivy ochranných oděvů na tepelný stres člověka, přičemž bude možné zpřesnit predikci doby bezpečného pobytu v daném prostředí.

Poděkování

Výzkum byl podpořen projektem Netme Centre Plus (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“. Dále pak projektu Optimalizace systémů pro tvorbu vnitřního prostředí kabin dopravních prostředků (FSI-S-17-4444) Vysokého učení technického v Brně.

Použitá literatura

[1] POKORNÝ J.; FIŠER J.; FOJTLÍN M.; KOPEČKOVÁ B.; TOMA R. ; SLABOTÍNSKÝ J.; JÍCHA M.: Verification of Fiala-

© National Institute for NBC Protection, Kamenná, Czech Republic

<http://hazmat-protect.sujchbo.cz>

ISBN 978-80-270-4852-6

- based human thermophysiological model and its application to protective clothing under high metabolic rates. *Building and Environment*, 126, 13–26, 2017
- [2] Hasičský záchranný sbor. Generální ředitelství. Pracovní skupina pro koordinaci bezpečnostního výzkumu: Řád chemické služby Hasičského záchranného sboru ČR. Ministerstvo vnitra, 2017. ISBN 978-80-87544-49-5
- [3] FLETCHER O.M.; GUERRINA R.; ASHLEY C.D.; BERNARD T.E.: Heat Stress Evaluation of Two-layer Chemical Demilitarization Ensembles with a Full Face Negative Pressure Respirator. *Ind. Health*, 52(4), 304–312, 2014
- [4] PARSONS K.: *Human Thermal Environments*. London: Taylor&Francis Inc., 2003
- [5] VOCHOC: SmartPro Smart Protection. Dostupné z <http://www.goodpro.cz/download/smartpro-2017-en.pdf>
- [6] SLABOTINSKÝ J.; LUNEROVÁ K.: Fyziologická zátěž člověka při práci v osobních ochranných prostředcích v kontaminovaném prostředí. Sdružení požárního a bezpečnostního inž., 2017. ISBN 978-80-7385-192-7.
- [7] HAVENITH G.; FIALA D.: Thermal indices and thermophysiological modelling for heat stress. In *Compr. Physiol.* 6, 255-302, 2015
- [8] ČSN ISO 7933. Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného stresu pomocí výpočtu předpokládané tepelné zátěže. Český normalizační institut, 2005.
- [9] ČSN ISO 7243. Ergonomie tepelného prostředí - Stanovení tepelné zátěže pracovníka podle ukazatele WBGT (teploty mokrého a kulového teploměru. Český normalizační institut, 2018.
- [10] ČSN ISO 7730. Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu. Český norm. institut, 2006.
- [11] WISSLER E.H.: A mathematical model of the human thermal system. *Bulletin of Mathematical Biology*, 26 (2), 147-166, 1964
- [12] STOLWIJK J.A.J.: A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man. NASA Report NASA-CR-1855, 1971
- [13] FIALA D.: Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort. Ph.D. Thesis. De Montfort University, 1998
- [14] TANABE S.; KOBAYASHI K.; NAKANO J.; OZEKI Y.: Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy Build.* 34 637-646, 2002
- [15] FIALA D.; HAVENITH G.; BRODE P.; KAMPMANN B.; JENDRITZKY G.: UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. In *Int. J. Biometeorol.* 56, 429-441, 2012
- [16] SCHELLEN L.; LOOMANS M.; KINGMA B.; de WIT M.; FRIJNS A.; van MARKEN LICHTENBELT W.: The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation, *Build. Envi.* 59, 10-22, 2013
- [17] P+Z ENGINEERING. Theseus-FE 4.0 – Theory Manual. München, 2011
- [18] THERMOANALYTICS: TAItherm - Human Thermal Module, Thermoregulation Model. Dostupné z <http://www.thermoanalytics.com/products/human-thermal/thermoregulation>
- [19] PSIKUTA A.; FIALA D.; LASCHEWSKI G. et al., Validation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application. In *Int J Biometeorol* 56, 443-460, 2012
- [20] Energetické fórum: FSI VUT v Brně / Přístrojové vybavení / Tepelný manekýn Newton. Dostupné z <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelnymankyn-newton>
- [21] ČSN ISO 7730. Ergonomie - Hodnocení tepelné zátěže podle fyziologických měření. Český normalizační institut, 2004
- [22] KOPECKOVA B.; POKORNY J.; JICHA M.: Sensitivity study of fiala-based human thermophysiological model.

Hazmat Protect 2018 (v tisku)

[23] TOMA R.; KUKLANE K.; FIŠER J.; JICHA M.: clothing properties measurement using thermal manikins. Hazmat Protect 2018 (v tisku)