

K PROBLEMATICE TEPLOTNÍCH ÚROVNÍ, METODIKY MĚŘENÍ A HODNOCENÍ TEPELNĚ VHLKOSTNÍHO MIKROKLIMATU LETADLOVÝCH KABIN

Plk. MUDr. Jiří ŠTVERÁK, CSc.
Ústav leteckého zdravotnictví, Praha
(náčelník: plk. MUDr. Miroslav Haňka)

Udržení a zajištění vysoké úrovně profesionální dokonalosti a nenarušené výkonnosti posádky letadla během letu za současných nároků, které klade řízení letadla na pilota, je v neposlední řadě podmíněno optimální mikroklimatickou situací na pracovních místech členů posádky. U dopravních letadel je neméně důležité udržovat klimatický komfort pro ostatní účastníky letu — pro cestující.

Cílem sdělení je poukázat na některé hygienické zvláštnosti, se kterými je nutno počítat při posuzování mikroklimatu letadlové kabiny, navrhnout metodické přístupy při měření a posuzování mikroklimatu letadel a uvedení orientačních teplotních úrovní na základě vlastních i literárních zkušeností.

Obecně se za tepelný komfort pokládá případ, kdy ve vztahu člověka a prostředí biometeorologické faktory umožňují, aby se člověk cítil co nejlépe, při minimální produkci metabolického tepla a aktivitě termoregulačních mechanismů snížených na nejnižší možnou míru (8). Za letu je však ovlivňováno mikroklima letadlové kabiny a výsledná tepelná situace pilota (cestujících) řadou specificky působících faktorů, odlišných od běžných životních podmínek.

Při posuzování tepelně vlhkostního mikroklimatu v kabině letadla za letu přihlížíme zejména k těmto ukazatelům:

- a) metabolické produkci pilota (cestujících)
- b) typu kabiny a izolačním parametřům nošeného oděvu
- c) tepelným, vlhkostním a tlakovým parametřům v kabině letadla (teplotě vzduchu a stěn kabiny, sluneční radiaci, vlhkosti, proudění a tlaku vzduchu).

a) Metabolická produkce pilota (cestujících)

Metabolická tepelná produkce pilota za letu je udávána různými autory z různých aspektů a v různých vztazích. V tab. 1 jsou uvedeny hodnoty tepelné produkce za letové činnosti u některých členů posádky a cestujících. Pro možnost srovnání byly originální hodnoty z publikovaných údajů (1, 4, 5) přepočteny na „normálního“ pilota 175 cm vysokého a 75 kg těžkého a převedeny na W a $W m^{-2}$. Pro porovnání jsou připojeny dlouhodobé průměry získané u kosmonautů za letu (13).

Z uvedených hodnot je zřejmé, že běžná pilotní činnost z hlediska metabolických úrovní, někdy označovaných jako tepelná produkce, není ve srovnání s jinými profesemi právě

nejnáročnější. Přesto však nelze vyloučit vznik relativně vyšších hodnot tepelné produkce, zejména při psychicky a fyzicky náročných letech, které mohou posunout uvedené hodnoty na úroveň středně těžké a těžké svalové práce.

b) Typy letadlových kabín a tepelně izolační parametry oděvu nošeného za letu

Dosavadní úsilí leteckotechnických vývojových pracovníků vedlo k realizaci hermetické kabiny jako nejspolehlivějšího prostředku ochrany pilota před účinky výškového poklesu tlaku vzduchu a ostatních, z fyziologického hlediska limitujících vlivů okolního prostředí za letu.

U současných letadel byly vyvinuty v podstatě dva typy hermetizovaných kabín — kabiny ventilačního a regeneračního typu.

V kabině **ventilačního** typu jsou přiměřené tlakové podmínky zajišťovány nasáváním okolního vzduchu kompresorem, který kromě dodávky vzduchu pro činnost motoru zabezpečuje potřebný přetlak v letadlové kabině. Průchodem klimatizačním systémem získává vzduch tepelnou úpravu. Vzduch z kabiny vychází potom do okolní atmosféry. Možnosti současné techniky jsou dnes ještě z různých důvodů ohraničeny, takže u různých dopravních letadel se kabinová výška pohybuje od 1500 do 2600 m a v bojových letadlech se připouští kabinová výška přibližně kolem 7000 m.

Hermetické kabiny **regeneračního** typu se vyznačují tím, že mají uzavřený cyklus výměny vzduchu s regenerací a jsou prakticky využívány u kosmických lodí, operujících mimo atmosférický obal Země.

Kabina ventilačního typu s klimatizačním zařízením dovoluje, aby u dopravních letadel posádka i cestující používali běžného oděvu, převážně třívrstevného (košile, krátkých spodků, saka s podšívkou, kalhoty, ponožky, polobotky).

V kabinách vojenských letadel, určených k plnění bojových, průzkumných nebo výcvikových úkolů ve výškách 20 až 25 km se vyžaduje, aby posádka byla vybavena speciální výškovou výstrojí. Tato výstroj musí kromě ochrany před chladem v případě nutnosti opustit letadlo ve velkých výškách, splňovat ještě další požadavky, jako např. korigovat účinky přetížení, zabezpečovat funkci zařízení pro přetlakové dýchání a chránit hlavu před úcinky nárazu. V podstatě lze říci, že běžná pi-

Tabulka 1

Charakter práce	Energetický výdej				
	kcal kg ⁻¹ h ⁻¹	kcal m ⁻² h ⁻¹	kcal h ⁻¹	W	W m ⁻²
stíhač	4,02	160	302	350	185
pilot bomb. letounu	2,70	107	203	236	124
letovod	2,01	79	151	175	92
střelec radista	2,11	83	159	184	96
noční létání - pilot		60	114	133	70
let podle přístrojů		90	170	197	104
bojový let		120	228	264	139
sezení (cestující)		40—50	75—95	87—111	46—58
jednoduchá let. činnost		79	150	175	92
středně obtížná let. činnost		126	240	278	146
složitá let. činnost		184	350	405	214
dlouhodobý průměr: Nikolajev		43	85,2	99	55
Popovič		54	97,0	113	62,5
Těreškovová		46	83,5	97	53,5
Bykovskij		47	84,5	98	54,2
Gemini 4		55	101,0	117	64,5
Gemini 5		46	84,0	97	53,5
Gemini 7		51	92,5	107	59,2

lotní výstroj bojového pilota se dnes skládá ze spodního prádla (které vedle tepelné izolace přijímá pot), „anti-g“ oděvu (korekce přetížení) a svrchní kombinézy s podšívkou (letní a zimní varianty). To vše je doplněno rukavicemi, botami a utěsněnou přilbou. Z tepelné izolačního hlediska lze považovat výstroj vojenského pilota za 4 až 5vrstevnou.

Tepelná izolace oděvu se dnes obvykle uvádí buď počtem vrstev, které např. Jokl (6) kvantifikuje hodnotou $R_{t\text{wa}}$ (rozměr $W^{-1}m^2K$) v závislosti na rychlosti vzduchu, nebo západní autoři (např. 3, 10) vyjadřují tepelnou izolaci v jednotkách CLO (rozměr $0,18^\circ C \cdot m^2 \cdot h \cdot kcal^{-1}$). Podle Joklova diagramu (uvedeného v lit. 6) je možno pilotní výstroj vojenského pilota přibližně ohodnotit jako $R_{t\text{wa}}$ 0,30 (letní), 0,34 (zimní) při rychlosti vzduchu $0,5 m s^{-1}$ nebo podle CLO (1,5 letní a 1,75 zimní).

Jednou ze zvláštností v letecké činnosti je skutečnost, že činnost při řízení letadla je vykonávána výhradně vsedě. Podobně i cestující se zpravidla přepravují vsedě. To má za následek, že určitá část oděvu, resp. let. výstroje, včetně přilehlého kožního povrchu je

přitisknuta k sedadlu. Předpokládá se, že je narušena výměna tepla, předávaná zejména konvekcí a evaporací. Podle literatury (7) se velikost komprimovaného kožního povrchu udává jako 20%. Podle našich měření (11) činí uvedený úsek povrchu kůže přibližně 10 % z celkového povrchu těla.

c) Tepelné, vlhkostní a tlakové podmínky prostředí v kabině letadla

K tepelným ztrátám v organismu dochází v podstatě radiací, konvekcí, kondukcí a evaporací.

V literatuře se např. (9) uvádí, že vyzářením ztrácí lidský organismus asi 40 až 45 % vydávaného tepla. Ztráty jsou tím vyšší, čím je teplota okolí nižší. Konvekcí ztrácí tělo asi 30 % tepla. Množství tepla odvedeného z organismu je touto cestou ovlivňováno teplotou, velikostí povrchu těla, rychlostí proudění a tlakem okolního vzduchu. Ztráty působené vedením (dotek povrchu těla s tepelně vodivou podložkou) se obvykle neberou v úvahu. Cestou vypařování se z organismu vydává asi

22 % tepla. Na tomto způsobu výdeje tepla se podílí pocení, perspiratio insensibilis a ztráta tepla ohříváním vodních par ve vydechaném vzduchu.

Nahrazování tepelných ztrát, popřípadě ochlazování, je v kabinách současných letadel zabezpečováno palubním klimatizačním zařízením na bázi rozvodu tepelně upraveného vzduchu z kompresoru. Úprava teploty se při automatickém udržování tepelných podmínek řídí signály z čidel termostatů, umístěných v kabině posádky, a cestujících. Při ruční korekci teploty řídí činnost klimatizační jednotky obvykle pilot.

V průběhu letu, zejména ve výškách, dochází k přijímání radiace od slunce a k nepřetržitěmu vyzařování tepla z kabiny na straně od slunce odvrácené; proto jsou stěny kabiny obkládány izolačními vrstvami. Tepelně izolační materiál musí být nehořlavý a musí současně splňovat hlukově izolační funkci. Za současného stavu technických možností je závažnějším problémem (z hlediska fyziologie i z hlediska technického řešení) odstraňování nadbytečného tepla. Typické jsou obtíže při letech v malých výškách v oblastech s horkým klimatem.

Dalším faktorem, který by mohl ovlivňovat tepelný komfort, je rychlost vzduchu. Zvýšené proudění ovlivňuje posádky i cestující spíše v dopravních letadlech, kde nošený oděv se prakticky neliší od běžně užívaného oděvu na zemi. Pro posádky bojových letadel, oděné v poměrně značně izolující leteckou výstroj, není efekt zvýšené rychlosti vzduchu nejdůležitějším prvkem při narušování tepelného komfortu.

Velmi nízká nebo velmi vysoká vlhkost vzduchu, která se podílí na změnách tepelného komfortu na zemi, je u ventilačních hermetických kabin problémem v tom smyslu, že ve větších výškách (již asi od 1000 m) musíme počítat s nástupem suchosti vzduchu (relativní vlhkost $< 30\%$). V této souvislosti je třeba zdůraznit, že nízká relativní vlhkost vzduchu zapříčiňuje pocit chladu a k dosažení tepelné pohody je nutno teplotu vzduchu zvýšit (5).

Další specifickou zvláštností při hodnocení tepelně vlhkostního mikroklimatu a stanovení komfortu v kabinách letadel je poměrně značně snížený tlak vzduchu, zejména ve vojenských bojových letounech. Franger (5) teoreticky dokládá, že tepelná ztráta konvekci při nízkých tlacích bude sice v důsledku poklesu hustoty vzduchu o něco nižší, zato však se zvýší evaporativní tepelná ztráta, protože difúze par kůží je v nepřímé závislosti na tlaku vzduchu. K tomu je dále nutno připočítat i zvýšenou plicní ventilaci, nastupující při poklesu tlaku vzduchu a spojenou s vydechováním ohřátého alveolárního vzduchu, syčeného vodními parami při teplotě 37°C . Hranice, kdy bude nutno z tlakových důvodů zvyšovat teplotu prostředí, se objevuje při dosažení vý-

šek nad 3000 m v kabině letadla. Podle Webba (13) je nutno ve výšce 7000 m k dosažení tepelného komfortu zvýšit teplotu o více než 2°C .

V průběhu vývoje letadlové kabiny a zlepšování prostředí pracovního místa osádky se objevovaly snahy mikroklimatické podmínky pracovního místa členů posádky a cestujících hygienicky normovat, a to zejména ze dvou důvodů. Především to byla potřeba optimalizovat pracovní podmínky létajícího personálu a cestujících a za druhé snaha poskytnout technikům fyziologické a hygienické podklady k navrhování a vývoji palubní klimatizace.

V literatuře se objevují nejrůznější návrhy. Např. Webb (12) požaduje pro dopravní letadla vyrovnanou teplotu vzduchu a stěn kabiny $24,4 \pm 2,8^\circ\text{C}$ (pro letní období) a $21,1 \pm 1,7^\circ\text{C}$ (pro zimu). Sovětský požadavek (9) pokládá za optimální teplotu rozmezí 20 až 22°C , přípustnou 15°C a minimálně přípustnou 10°C . Jiný sovětský pramen (2) požaduje, aby optimální teplota varírovala od 18 do 22°C .

Z uvedených údajů je zřejmé, že požadavky na optimální mikroklima letadlové kabiny jsou zatím předkládány tak, aby se vyhovělo obvyklým „pozemským“ hygienickým normám a zkušenostem pilotů při letech, při současném zachování rezerv pro možnosti stávající letadlové klimatizační techniky.

Soudobá literatura poskytuje možnost upřesnění dané situace. Pro hodnocení a predikci komfortních podmínek v letadlových kabinách se nabízí využít moderních, dostatečně komplexních kritérií Fangera (5) a Jokla (6), která vycházejí jednak z kvantifikovaného pocitu komfortní teploty a jednak z ověřených vztahů mezi metabolickou úrovní při pracovní zátěži, tepelnou izolací nošeného oděvu a optimální výslednou teplotou. Vypočtené komfortní teploty, respektující skutečnou pracovní zátěž při činnosti pilota, vliv nošeného oděvu nebo letecké výstroje, vliv proudění vzduchu a teploty okolních stěn (vyžaduje používat výsledný kulový teploměr), je nutno zvýšit vzhledem ke sníženému tlaku vzduchu a nízké relativní vlhkosti přibližně o 2 až 4°C .

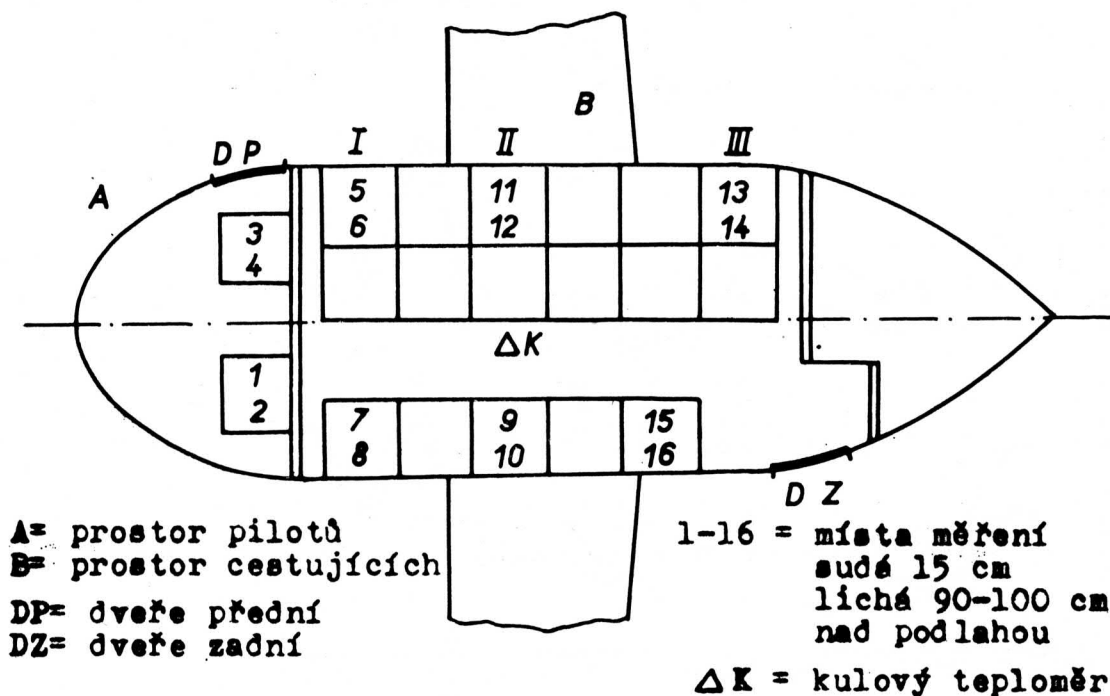
Metodika

V rámci této práce uvádíme podmínky a použité způsoby praktického měření mikroklimatických parametrů v letadlových kabinách při testování letounu L-410 v červnu 1976.

A. Ve třech 40minutových letech 10. 6. 76 v době od 8.55 do 11.10 byly na sériovém letounu L-410 měřeny tepelně vlhkostní parametry (teplota vzduchu T_a , teplota výsledná T_g , relativní vlhkost r , h a rychlost vzduchu v) v kabině pro cestující, při uzavřené přepážce pilotního prostoru. Místo měření I. na úrovni předních sedadel, II. na úrovni mezi druhou a třetí řadou sedadel a III. na úrovni

posledních sedadel (viz obr. 1) vždy ve výši hlavy a kotníků sedící osoby.

měr, termistorová čidla (1.—16.) s registrací na oscilograf K-21-21.



Obr. 1

Měřicí přístroje:

Výsledný kulový teploměr Vernon — Jokl, psychrometr Hygrophil, citlivý lopatkový anemometr — Rosenmüller (resp. C-metr Metra Blansko).

Lety:

Za prvního letu v 10. minutě po startu dosaženo H 2100 při uzavřených vzdušných sprchách a uzavřeném topení. Ve 30. minutě letu proveden sestup na H 1000. Za druhého letu (bez mezipřistání) výstup do H 2000 při otevřených vzdušných sprchách, bez topení. Při třetím letu opět výstup na H 2100 s topením. Teplota udržována na 26 °C, podle teploměru v kabině pilota. Při všech letech se venkovní teplota ve výšce 2000—2100 m pohybovala mezi +10 °C až +12 °C. Na palubě bylo 7 osob, z toho 2 piloti.

B. U tří 40minutových letů 19. 8. 1976 v odpoledních hodinách na sériově vyrobeném letounu L-410 (cestovní verze), na palubě celkem 8 až 10 osob včetně posádky. Byla měřena teplota v kabině posádky i v prostoru pro cestující na úrovni 1., 3. a 5. řady sedadel. Přepážka mezi kabinovými prostory otevřena. Umístění teplotních čidel je znázorněno na obr. 1. Sudá čísla označují umístění teplotního čidla ve výši kotníků (15 cm), lichá ve výši hlavy sedící osoby (90—100 cm od podlahy).

Měřicí přístroje:

Psychrometr, kulový teploměr, lihový teplo-

Lety:

1. let, H = 1000, sprchy uzavřeny, teplota v kabině udržována na 26 °C (T_{kab}), okolní teplota za letu 10,5 °C až 11 °C.

2. let, H = 1000, sprchy otevřeny, T_{kab} udržována na 26 °C, okolní teplota za letu 10,5 °C až 11 °C.

3. let, H = 4000, sprchy ob jednu otevřeny, $T_{kab} = 26$ °C, okolní teplota za letu —8 °C až —10 °C.

Výsledky

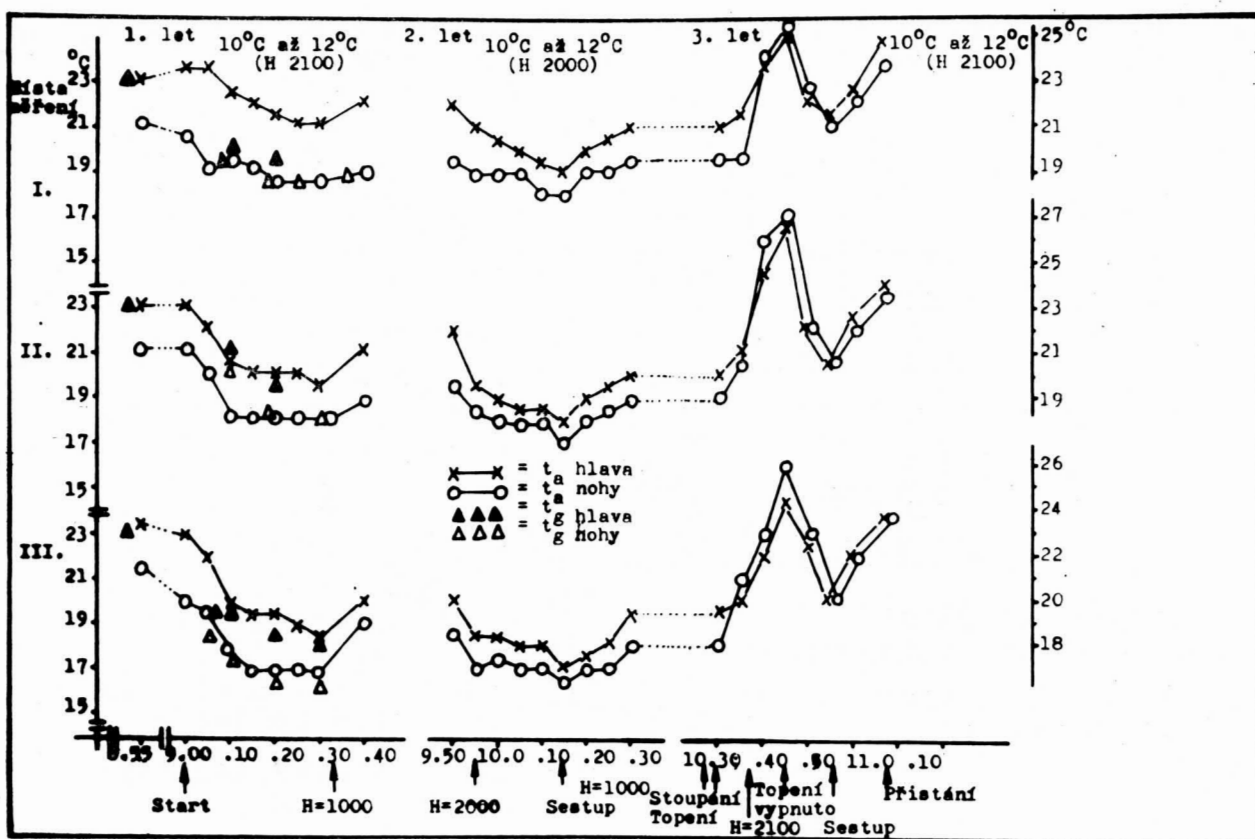
A. Na obr. 2 je znázorněn průběh změn teplot suchého vzduchu T_a a hodnot kulového teploměru T_g . Při zapnutém topení teplota u nohou vykazuje vyšší hodnoty než u hlavy (< 1 °C). Rozdíl teplot mezi úrovní hlavy a nohou při 2. letu (otevřeny sprchy) je menší než při 1. letu (zvýšená cirkulace vzduchu). Hodnoty kulového teploměru se prakticky ztotožňují s teplotami suchého vzduchu.

Tab. 2 znázorňuje hodnoty mikroklimatických parametrů v kabině posádky.

B. Na obrázcích 3, 4, 5 jsou uvedeny hodnoty naměřené psychrometrem, kulovým teploměrem, lihovým teploměrem a termistorovým čidlem oscilografu K-21.

Diskuse

Letadlová, hermetizovaná kabina ventilačního typu s klimatizačním zařízením představu-



Obr. 2

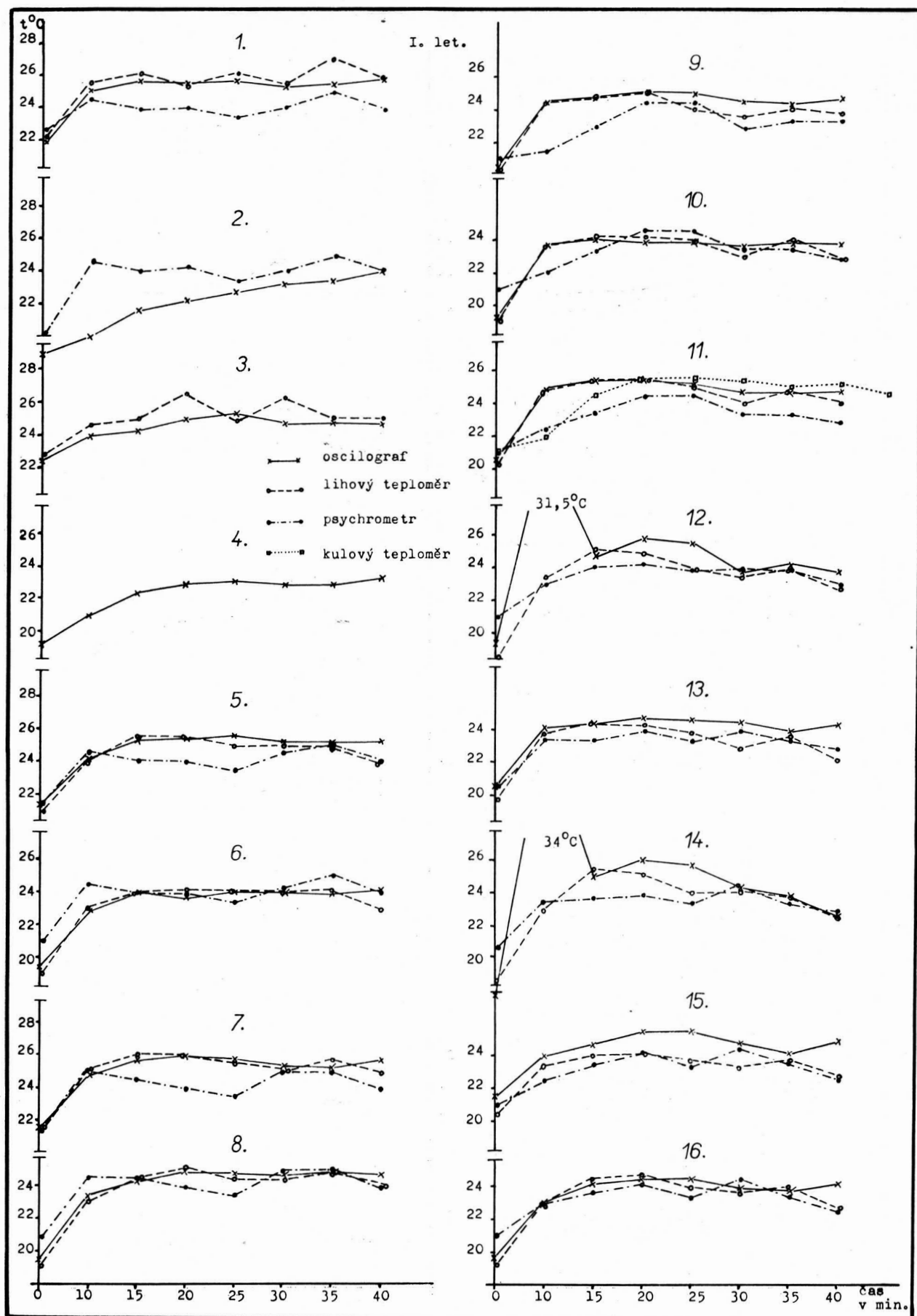
Tabulka 2

	1. let	2. let	3. let
Teploty v kabině pilotů při dosažení výše H = 2000	hlava: 22—23 nohy: 20—20	21,5—23,0 18,0—21,5	24,5—24,5 22,5—23,0
Relativní vlhkost H = 2000	< 20 %	< 20 %	< 20 %
Rychlost vzduchu v uličce mezi sedadly (kabina cestujících)	0,1 m s ⁻¹	0,0—0,3 m s ⁻¹	
Rychlost proudění od vzdušné sprchy (0,2 m od hlavy sedící osoby)		5,8—5,9 m s ⁻¹	

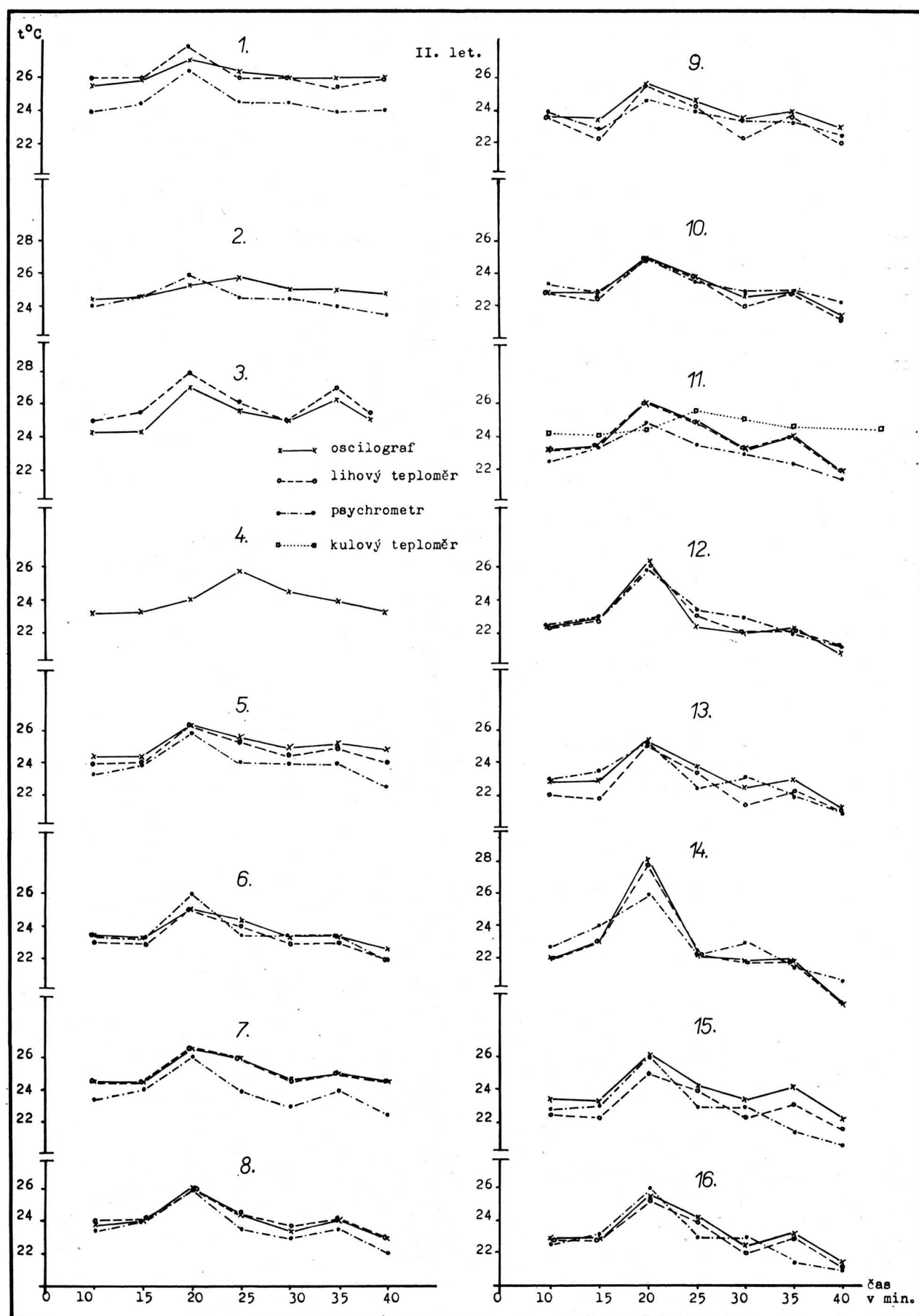
je pracovní místo pro posádku (cestující). Současná hygienická kritéria pro kabinové teploty jsou značně rozdílná a neposkytují zdůvodněnou argumentaci, proč se v požadavcích liší. Je navrhován racionální postup využít pro hodnocení a predikci tepelně komfortních podmínek moderních, dostatečně komplexních kritérií Fanger a Jokla, která jednak vycházejí z kvantifikovaného pocitu komfortu a jednak z ověřených vztahů mezi metabolickou úrovní při pracovní zátěži, tepelnou izolací nošeného oděvu a optimální výslednou teplotou. Vypočtené komfortní teploty, respektující skutečnou pracovní zátěž při činnosti pilota, vliv nošené letecké výstroje (oděvu), vliv proudění vzduchu a teploty okolních stěn, je

nutno zvýšit vzhledem ke sníženému tlaku a nízké relativní vlhkosti vzduchu přibližně o 2 až 4 °C.

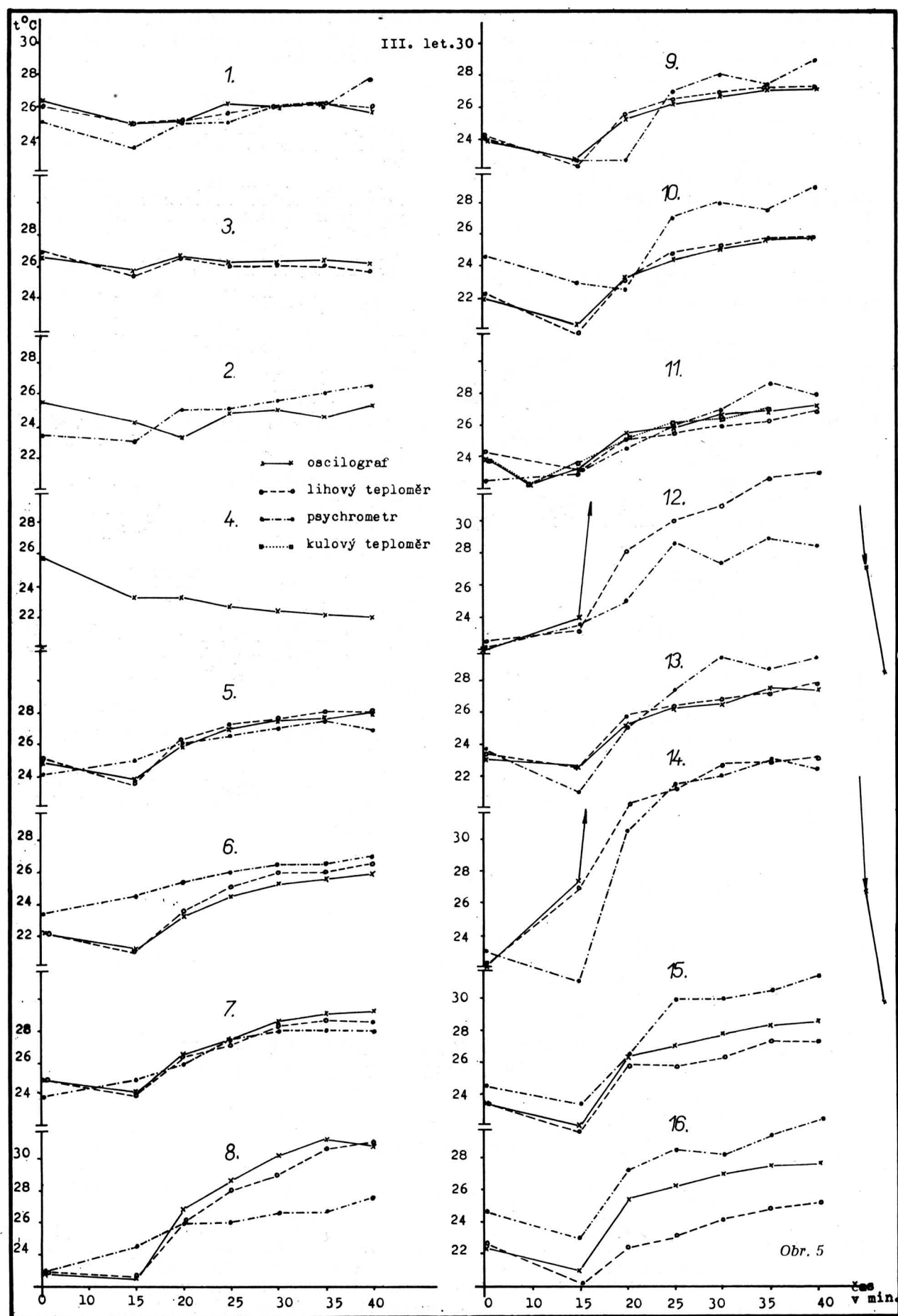
Z metodického hlediska existují v podstatě dva přístupy k ohodnocování tepelně vlhkostního mikroklimatu letadlových kabin. Sovětský způsob dává přednost použití většího počtu teplotních termistorových čidel (se záznamem na oscilografu) rozmístěných ve výši kotníků a hlavy u kabinových sedadel. Kromě toho se v literatuře uvádí použití kulového teploměru, který má delší dobu ustálení a oproti prvnímu způsobu je méně vhodný k použití pro okamžitou indikaci. Má však výhodu v tom, že současně integruje teploty vzduchu i okolních stěn. Termistorové čidlo reaguje



Obr. 3



Obr. 4



sice okamžitě, ale je náročné na volbu místa, neboť každý vedlejší vliv (závan horkého vzduchu z palubní klimatizace nebo působení sluneční radiace při náhodném nepředvídaném postavení letadla vůči slunečnímu záření) se projeví na oscilogramu rušivým artefaktem. Přitom záznam kulového teploměru (po jeho ustálení a při dobré tepelné izolaci stěn) indikuje okolní teplotu v dobrém souladu s ostatními použitými čidly.

Závěry a návrhy

Pro predikci komfortní teplotní úrovně se doporučuje použít moderní kritéria, vycházející z kvantifikovaného pocitu komfortu, ověřených vztahů mezi metabolickou úrovní při pracovní zátěži pilota, tepelnou izolací nošené letecké výstroje (oděvu), danou rychlostí proudění vzduchu a optimální výslednou teplotou se zvýšením o 2 až 4 °C, nutným ke korekci působení nízké relativní vlhkosti a sníženého tlaku vzduchu.

Do metodiky měření vedle záznamu indikace termistorových čidel na oscilogramu zavést použití hodnot výsledného kulového teploměru.

Souhrn

Autor vycházel ze současné dostupné literatury týkající se mikroklimatu leteckých kabin. Navrhuje využít známých (Jokl, Fanger) kritérií respektujících tepelnou produkci, vliv nošené výstroje (oděvu), rychlosti vzduchu, včetně subjektivního pocitu komfortu, korigovaných zvláštnostmi, které ovlivňují mikroklima letadlových kabin (snížený tlak vzduchu, nízká relativní vlhkost a uspořádání palubní klimatizace). Dále navrhuje úpravu metodiky

měření mikroklimatických podmínek a zdůvodňuje používání kulového teploměru a termistorových čidel s registrací na oscilografu.

Literatura

1. Alexejev, S. M. - Umanskij, S. P.: Vysotnye i kosmičeskije skafandry. Moskva, „Mašinostrojenije“ 1973. 279 str.
2. Antipenko, J. N. - Danilov, N. V. - Kuzněčov V. J.: Exploatacija sistem kondicionirovanija vozducha passažirskich samoljotov. Moskva, „Transport“ 1974. 175 str.
3. Burton, A. C. - Edholm, O. G.: „Man in a cold environment“, London 1965.
4. Gurvič, G. I.: Aviacionaja i kosmičeskaja medicina — učebnik. Leningrad 1971. 430 str.
5. Fanger, P. O.: Thermal comfort. New York, Mc Graw-Hill Book Company 1970. 244 str.
6. Jokl, M.: Mikroklima. Institut hygieny a epidemiologie, Praha 1972. 116 str.
7. Kerslake, Mck. D. - Nelms, J. D. - Billingham, J.: Thermal Stress in Aviation in: A Textbook of Aviation Physiology, kap. 20: 441—478, London, „Pergamon Press“ 1965.
8. Kolektiv autorů: Bioklimatologický slovník ČSBKs při ČSAV, Praha 1970, 265 str.
9. Lavnikov, A. A.: Osnovy aviacionnoj i kosmičeskoj mediciny. Moskva, „Voennoe izdatelstvo Ministerstva oborony SSSR“ 1975. 359 str.
10. Siple, P. A. - Passel, G. F.: Dry atmospheric cooling in Subfreezing Temperatures. Prac. Amer. Physiol. Soc., 1945, 89: 177—179.
11. Štverák, J.: Návrh hygienicky zdůvodněných teplotních úrovní a metodiky měření tepelně vlhkostních parametrů v přetlakových letadlových kabinách ventilačního typu. Publikace ÚLZ č. 243, Praha 1977. 63 str.
12. Webb, C. G. P.: Temperature Stress in: Aerospace Medicine: 324—344, edit. maj. gen. H. G. Armstrong USAF (RET). Baltimore 1961, 633 str.
13. Webb, P.: Teplovye svojstva sredy i temperaturnyj stress. in: Osnovy kosmičeskoj biologii i mediciny, svazek II, kap. 3: 105—138, Moskva, „Nauka“ 1975.