



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MODELOVÁNÍ PROSTŘEDÍ V KABINĚ MALÉHO DOPRAVNÍHO LETADLA

SIMULATION OF INDOOR ENVIRONMENT IN SMALL TRANSPORT AIRCRAFT CABIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ KNAPČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN FIŠER

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Knapčík

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Technika prostředí (2301T024)**

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:

Modelování prostředí v kabině malého dopravního letadla

v anglickém jazyce:

Simulation of indoor environment in a small transport aircraft cabin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést simulaci prostředí v kabině malého dopravního letadla. Simulace budou provedeny pomocí CFD (např. CCM+) nebo 1-D simulačních nástrojů (např. RadTherm 9.1 nebo Theseus-FE 3.0). Na základě získaných výsledků pak bude vyhodnocena kvalita prostředí (např. kvalita větrání, teplotní či rychlostní pole) v kabině. Teoretická část práce bude zaměřena na rozbor problematiky kvality prostředí v kabinách dopravních letadel.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce bude provést modelování prostředí v kabině malého dopravního letadla. Jako předloha pro vytvoření geometrie bude použita maketa kabiny malého dopravního letounu, která je k dispozici v laboratořích větrání OTTP. Simulace budou provedeny pomocí CFD (např. CCM+) nebo 1-D simulačních nástrojů (např. RadTherm 9.1 nebo Theseus-FE 3.0). Na základě získaných výsledků pak bude vyhodnoceny parametry prostředí (např. kvalita větrání, teplota, rychlost proudění vzduchu) v kabině. Teoretická část práce bude zaměřena na rozbor problematiky kvality prostředí v kabinách dopravních letadel.

Seznam odborné literatury:

SPACE D. R., WATERS K. L., WILLES D. L.: HVAC applications – Aircrafts, chapter 9, ASHRAE, Inc., Atlanta 1999, USA

DOUGLAS, C.: Cabin air comfort, FAST 19, Airbus 1996

HOCKING, M.B.: Passenger aircraft cabin air quality: trends, effects, social costs, proposal, Chemosphere, Vol. 41, Issue 4, PEGRAMON 2000

HUNT, E.H., SPACE, D.R: The Airplane Cabin Environment, International In-flight Service Management Organization Conference, Montreal, Canada, November 1994.

PIERCE, W.M., JANCZEWSKI, J.N., ROETHLISBERGER, B.: Air Quality on Commercial Aircraft, ASHRAE Journal, vol 41. no. 9, Atlanta 1999, USA

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Fišer

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 6.10.2010



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Anotácia

Diplomová práca je zameraná na modelovanie vetrania a vykurovania v kabíne malého dopravného lietadla EV-55. V prvej časti sú vysvetlené vplyvy tepelného prostredia na zdravie človeka a popísané požiadavky kladené na vnútorné prostredie lietadla. Ďalej je tu priblížená problematika dosiahnutia tepelnej pohody pre pasažierov a spôsob jej hodnotenia prostredníctvom PMV a PPD indexu. V druhej časti sa nachádza praktické spracovanie simulácie vnútorného prostredia kabíny. Prívod vzduchu a vykurovanie kabíny je simulované v simulačnom nástroji Theseus-FE 3.0. Z výsledkov simulácie sa vyhodnocuje dosiahnutý stav tepelnej pohody, na základe čoho sa volí vhodné zateplenie kabíny lietadla a teplota privádzaného vzduchu.

Kľúčové slová

Vykurovanie kabíny, tepelná pohoda pasažierov, vnútorné prostredie lietadla, vetranie kabíny, simulácia vetrania a vykurovania, PPD a PMV index

Annotation

The diploma thesis is focused on ventilation and simulation of heating in small transport aircraft EV-55 cabin. First part explains an impact of thermal environment on human health and describes restrictions and recommendations forced on inner aircraft environment. In the first part are also clarified conditions of comfortable environment and thermal comfort evaluation for passengers via PMV and PPD index. The second part contains results from simulation of aircraft cabin environment. Inlet ventilation airflow and cabin heating is simulated via simulation mean Theseus-FE 3.0. The simulation results are evaluated for thermal comfort degree and optimal cabin insulation with optimal temperature and volume flow rate of inlet air is specified.

Key words

Cabin environment, thermal comfort, aircraft heating and ventilation, simulation of heating and ventilation, PPD and PMV index

Bibliografická citácia

KNAPČÍK, L. *Modelování prostředí v kabině malého dopravního letadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 82 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Fišer.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému „Modelování prostředí v kabině malého dopravního letadla“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce

27. mája 2011

.....
Lukáš Knapčík

Pod'akovanie

Touto cestou by som chcel pod'akovať Ing. Janovi Fišerovi za cenné pripomienky, rady a ochotu pri vypracovaní diplomovej práce a celej mojej rodine za podporu počas štúdia.

Obsah

ÚVOD	13
1. Cieľ práce	15
2. Aplikovateľné simulačné nástroje	16
3. Pôsobenie mikroklímy na človeka	16
3.1. Lokálne pôsobenie chladu.....	16
3.2. Celkové pôsobenie chladu.....	16
3.3. Lokálne pôsobenie tepla.....	16
3.4. Celkové pôsobenie tepla	17
3.5. Rýchlosť prúdenia vzduchu	17
4. Medzinárodné štandardy a odporúčania pre prostredie v kabínach lietadiel	18
4.1. Ventilácia a filtrovanie vzduchu	18
4.2. Okolité teplota, vlhkosť a tlak.....	18
4.3. Stanovenie tepelnej záťaže.....	20
4.4. Ochladzovanie vzduchu v kabíne.....	20
4.5. Ohrev vzduchu v kabíne.....	20
4.6. Regulácia teploty.....	20
4.7. Časticové filtre	21
4.8. Vyrovnávanie tlaku	21
5. Ventiláčny systém lietadiel - ECS	22
5.1. ECS pre pretlakovú kabínu	22
5.2. ECS rovnotlakej kabíny lietadla EV-55.....	25
5.3. Vetranie kabíny	26
5.4. Systém chladenia.....	26
6. Okolité prostredie a tepelný komfort človeka	27
6.1. Stanovenie tepelného komfortu človeka	27
6.1.1. Predpoveď stredného tepelného pocitu (PMV).....	28
6.1.2. Predpoveď percentuálneho podielu nespokojných (PPD)	30
6.1.3. Obťažovanie prievanom (DR).....	31
7. Popis modelu a definovanie okrajových podmienok	32
7.1. Geometria vyšetrovanej kabíny.....	32
7.2. Rozdelenie a definovanie materiálov	33
7.3. Vetranie kabíny	35
7.4. Prívod vzduchu.....	37
7.5. Relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí pasažiera (pomocou CFD simulácie).....	38
8. Simulácia vykurovania kabíny	41
8.1. Umiestnenie lietadla v prostredí extrémnej zimy.....	43
8.1.1. Vyhodnotenie stavu prostredia v kabíne	43

8.1.2. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne pri nástupe pasažierov	46
8.1.3. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne počas letového režimu.....	52
8.2. Umiestnenie lietadla v prostredí s normálnymi podmienkami	55
8.2.1. Vyhodnotenie stavu prostredia v kabíne	56
8.2.2. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne počas nástupu pasažierov na palubu	58
8.2.3. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne počas letového režimu.....	60
9. Vyhodnotenie a voľba optimálneho zateplenia kabíny.....	62
10. Záver.....	67
Zoznam použitých zdrojov.....	69
Zoznam použitých symbolov	71
Prílohy.....	73
Príloha č.1- Tabuľka 7- <i>rozpis skladby materiálov</i>	73
Príloha č.2- Tabuľka 8- <i>typické energetické výdaje osôb pri rôznych aktivitách</i> [4]	75
SUMMARY	77

ÚVOD

Každoročný vzrast počtu prepravovaných osôb vedie k zvyšujúcim sa nárokom na pohodu a komfort počas letu, pričom prepravcovia sú povinný poskytnúť pasažierom a posádke bezpečné a zdravé prostredie. Systém dodávania vzduchu u súčasných prúdových lietadiel je navrhnutý tak, aby poskytoval bezpečné a komfortné pobytové prostredie v kabíne lietadla letiaceho vo výške, kde vlastnosti atmosféry nevyhovujú požiadavkám na pobyt človeka (nízka teplota, tlak, vlhkosť vzduchu, vysoká koncentrácia ozónu). [1]

Pri takýchto výškach (obrázok 2b) musí byť v kabíne vyrovnávaný tlak a zabezpečené potrebné úpravy vzduchu (zníženie koncentrácie ozónu pomocou katalytických ozónových konvertorov a odstránenie iných škodlivým použitím HEPA filtrov) na umožnenie normálneho dýchania pre pasažierov a posádku lietadla.

Výsledná mikroklima v kabíne lietadla závisí na mnohých fyzikálnych procesoch a ich vzájomnom ovplyvňovaní. Vzhľadom na relatívne malé rozmery kabíny a množstvo ľudí je pomerne zložitá navrhnuť systém na zabezpečenie pohody pre každého cestujúceho tak, aby mal zabezpečený dostatočný prívod čerstvého vzduchu bez škodlivín, a zároveň aby nedochádzalo k obťažovaniu prievanom (draught rating).

Požiadavky na dodávanie vzduchu do kabín zaisťujúce pohodu prostredia pre cestujúcich a posádku sa riadia podľa predpisov Európskeho leteckého úradu JAA- (European Joint Aviation Authorities). Tento úrad v súčinnosti ostatnými významnými úradmi pre civilné letectvo (hlavne americkej FAA) stanovuje požiadavky na kvalitu prostredia, ktoré sa menia podľa druhu lietadla, jeho využitia na vojenské alebo komerčné účely a podľa jeho veľkosti a počtu prepravovaných osôb. Práca sa pri návrhu vykurovania a vetrania bude opierať o nariadenia a odporúčenia noriem FAR 23.831 a FAR 25.831, kde sa špecifikujú jednotlivé požiadavky na vnútorné prostredie kabíny lietadla.

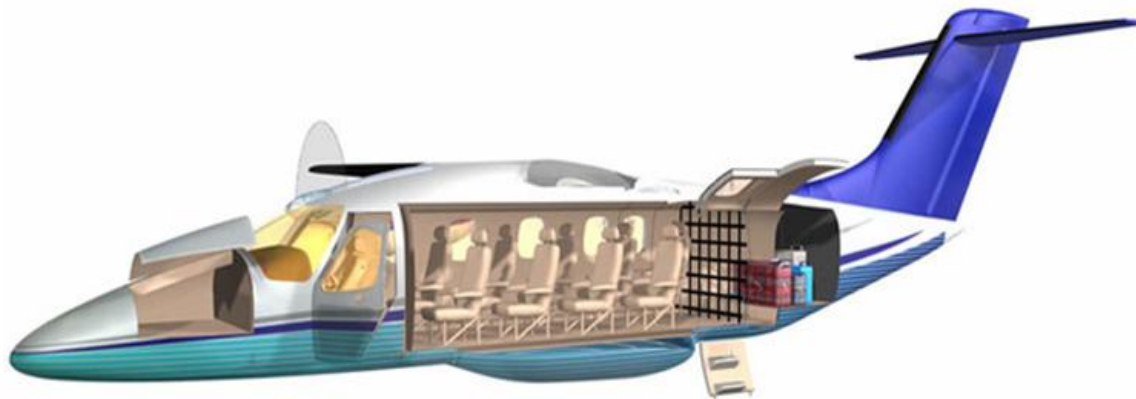
Pri návrhu a dimenzovaní vetrania a klimatizácie lietadiel je v súčasnej dobe výhodné využívať simulačné nástroje, ktoré umožňujú predikciu množstva privádzaného vzduchu, teplotu a mnohé ďalšie parametre ovplyvňujúce tepelný komfort v danom prostredí. Optimalizácia týchto zariadení zaisťí plnenie potrebnej funkcie pri optimálnych vstupných a prevádzkových nákladoch, ale aj optimalizácii energetickej náročnosti klimatizačného zariadenia, ktoré väčšinou čerpá energiu od motora lietadla, a preto by tento ober mal byť čo možno najmenší.

1. Cieľ práce

Predmetom práce je malé dopravné lietadlo EV-55 (obrázok 1), ktoré sa momentálne nachádza v štádiu prototypu a skúšania. Našou úlohou je navrhnúť parametre vykurovania kabíny prívodom teplého vzduchu tak, aby boli splnené medzinárodné štandardy a doporučená, ktoré hovoria, že lietadlo má byť pripravené na nastúpenie pasažierov do 30 minút od začatia procesu vykurovania. Tieto štandardy musia byť splnené za každých podmienok externého prostredia.

Hlavnou predpokladanou oblasťou prevádzkovania a používania lietadla EV-55 budú vnútrozemské podmienky (napr. centrálna Ázia, Južná Amerika a iné), ktoré sa vyznačujú predovšetkým nízkymi teplotami v zimnom období. Pri tomto návrhu sa budú uvažovať extrémne klimatické podmienky, to znamená extrémny chlad -30°C , ktorý odpovedá predpokladaným oblastiam prevádzky a normálne podmienky $+15^{\circ}\text{C}$, podľa medzinárodných štandardov (obrázok 2a). Predpokladá sa, že lietadlo je dlhšiu dobu odstavené na letisku, takže vnútorná teplota sa blíži okolitej teplote. Vykurovanie vnútorného prostredia kabíny bude realizované vháňaním predhriateho vzduchu na vhodnú teplotu cez výstupy umiestnené pod sedačkami pasažierov v bočných stenách. Výstup vzduchu z kabíny je realizovaný v zadnej časti lietadla.

Lietadlo EV-55 nebude lietať vo výškach, kde je potrebné vyrovnávať tlak pre pobyt pasažierov na palube a teda sa nebude uvažovať pretlaková kabína. Pre zaistenie vhodných podmienok v kabíne pred nastúpením pasažierov je daný maximálny čas 30 minút, za ktorý sa má dosiahnuť pobytová teplota na palube 21°C .



Obrázok 1
Lietadlo EV-55 [6]

Pri návrhu ohrevu a chladenia vnútorného prostredia je možné použiť rôzne simulačné nástroje pre získanie obrazu prúdenia a teplotného pola, ktoré budú smerodajné pri tejto štúdiu. V našom prípade môžeme zvažovať použitie CFD kódu STAR CCM+ a 1-D simulačný nástroj Theseus-FE.

2. Aplikovateľné simulačné nástroje

CFD (Computational Fluid Dynamics) predstavuje analýzu prúdenia, prenosu tepla a asociatívnych javov ako chemické reakcie pomocou počítačovej simulácie. Táto technika je veľmi výkonná a predstavuje široký rozsah použitia v priemyselných ale aj nepriemyselných aplikáciách. Všeobecným cieľom v rozvoji oblasti CFD je zaistiť možnosti porovnateľné k ostatným CAE (Computer Aided Engineering) nástrojom ako napríklad kód napäťovej analýzy. Hlavný dôvod prečo CFD ostávalo doteraz v pozadí je obrovská zložitosť základného správania, čím prevyšuje ekonomickosť a vyhovujúcu presnosť riešenia. Možnosť dostupnosti počítačovej techniky s dostatočne vysokým výkonom a predstavenie užívateľsky-prijateľného prostredia viedla k súčasnému zvýšeniu záujmu a CFD mohlo urobiť vstup do širšej priemyselnej komunity [7].

THESEUS-FE predstavuje implicitného riešiteľa na báze konečných prvkov (FE-Finite Element) pre ustálený alebo nestacionárny stav, ktorého je možno aplikovať na široký rozsah problematiky prenosu tepla. Užívateľ je schopný aplikovať rôzne typy okrajových podmienok ako: konvekcia, radiácia, kontakt, vnútorný/vonkajší zdroj tepla a podobne. Tento program bol vyvinutý pre použitie hlavne v automobilovom, transportnom a leteckom priemysle na analýzu interiéru kabíny vrátane štúdie komfortu pasažierov, je však aplikovateľný aj v iných oblastiach [8].

3. Pôsobenie mikroklímy na človeka

V organizme človeka je nutné udržiavať teplotu jadra v úzkom tepelnom rozmedzí. S tým súvisia nepriaznivé účinky pôsobenia tepla či chladu na organizmus. Bunka je poškodzovaná pri teplote nižšej než -1°C a vyššej než 45°C a teplotu nad 41°C znáša len krátkodobo. Pokiaľ teplota, ktorej je organizmus vystavený prekročí hranice, v ktorých pôsobia termoregulačné mechanizmy organizmu, dochádza k jeho poškodeniu a toto môže byť dočasné ale i trvalé [13].

3.1. Lokálne pôsobenie chladu

Ako následok lokálneho pôsobenia chladu sú omrzliny predovšetkým na nechránených a menej prekrvených častiach tela. Kombináciou pôsobenia nízkej teploty a vlhkosti vedie k ochrnutiu krvných kapilár v koži a podkoží, hromadeniu krvi a opuchom končatín. Pri prenose vibrácií na horné končatiny (ruky) sa významne uplatňuje pôsobenie chladu a vlhka (ochorenie ciev z vibrácií) [13].

3.2. Celkové pôsobenie chladu

Obmedzuje prietok krvi kožou, zvyšuje jej izolačnú schopnosť (hlavne na prstoch končatín). Krvný tlak a srdečná frekvencia stúpajú a zvyšuje sa spotreba kyslíku v tkanive. Po vyčerpaní termoregulačných možností pri dlhšom pôsobení nadmerného chladu dochádza k poklesu teploty telesného jadra, k oslabeniu dýchania a ku spomaleniu srdečnej frekvencie. Znížením aktivity nervovej sústavy dochádza k ospalosti a následne ku smrti zlyhávaním krvného obehu [13].

3.3. Lokálne pôsobenie tepla

Pri teplote nad 45°C nastáva poškodzovanie buniek. Pri lokálnom pôsobení nadmerného tepla dochádza k poškodeniu povrchového tkaniva kože, čo vedie k vzniku popálenín [13].

3.4. Celkové pôsobenie tepla

Vedie k rozšíreniu ciev v koži, k zvýšeniu prietoku krvi kožou a k vytváraniu potu najskôr na dolných končatinách, potom na hrudníku a nakoniec na hlave a pažiach. Existujú veľké individuálne rozdiely v množstve produkovaného potu, pri práci v horúcom prostredí dochádza ku strate tekutín potením okolo 6 litrov za smenu (znižovanie obsahu iónov sodíku a chlóru v organizme). Pri nadmernej vlhkosti prostredia sa pot horšie odparuje, steká po tele a prebytočné teplo sa z tela odstraňuje nedostatočne čo môže viesť v pomerne krátkej dobe k zlyhaniu obehu [13].

Stanovenie teploty okolitého prostredia, pri ktorej dochádza k patologickým zmenám organizmu prakticky nie je možné. Okrem pôsobenia klimatických faktorov ako teplota, vlhkosť, prúdenie a sálanie, existuje priama závislosť na type, veľkosti a trvaní pracovného výkonu. Taktiež individuálne rozdiely u jednotlivých osôb v závislosti na veku, zdravotnom stave, pohlaví a aklimatizácii sú nezanedbateľné [13].

Možné nepriaznivé vplyvy objektov s umelým ovzduším- klimatizovaných objektov (v prípade, že dôjde ku nevhodnému návrhu, dimenzovaniu, používaniu alebo prevádzke klimatizačných zariadení) sú:

- Miestny diskomfort z nevhodných mikroklimatických podmienok (technologické podmienky môžu byť značne odlišné od hygienického optima)
- Zmeny elektroiontovej mikroklimy oproti vonkajšiemu prostrediu, šíreniu kontaminovaného vzduchu vo vetranom priestore
- Stiesňujúci pocit uzavretého prostredia (nemožnosť vyvetrať otvoreným oknom)

3.5. Rýchlosť prúdenia vzduchu

Tepelná pohoda je ovplyvnená rovnako rýchlosťou prúdenia vzduchu. Človek vníma každé prúdenie vzduchu, to však môže byť zdrojom pocitu nepohody (diskomfortu). Vyššie rýchlosti prúdenia spravidla zlepšujú tepelnú pohodu pri vyšších teplotách, zároveň však ale môžu viesť ku zdravotným problémom. Pokiaľ sa povrch tela vplyvom prúdiaceho vzduchu nadmerne ochladzuje rýchlym odparovaním potu, dochádza k prechladnutiu organizmu. Koža sa tiež výrazne ochladzuje tým, ako „pulzovanie“ prúdiaceho vzduchu dráždi nervové kožné bunky citlivé na teplotu. Pociť chladu sa zväčšuje. Tenká medzná vrstva ohriateho vzduchu na povrchu tela nebráni prenikaniu víriacich častíc chladného vzduchu až na kožu, zvyšuje sa prestup tepla konvekciou a dochádza k ďalšiemu chladeniu [13].

Rýchlosti prúdenia vzduchu odporúčané pre pobytové prostredie sú celoročne v rozmedzí od 0,1-0,3 m/s v závislosti na druhu činnosti a použitom odevu. Veľmi nepriaznivo býva pociťovaný prúd chladného vzduchu (prievan) na ktorúkoľvek časť tela. K takej situácii dochádza nie len pri otvorenom okne či dverách, ale aj v klimatizovaných priestoroch (spodný prívod vzduchu podlahou spôsobuje pocit chladu od nôh, rovnaký účinok má prúd vzduchu v blízkosti oblasti hlavy alebo inej časti tela) [13].

4. Medzinárodné štandardy a odporúčania pre prostredie v kabínach lietadiel

Kontrolný systém pracovného (pobytového) prostredia ECS (Environmental control system) predstavuje systémové vybavenie spojené s ventiláciou, ohrevom, chladením, kontrolou vlhkosti/kontaminácie a vyrovnávaním tlaku v pobytových častiach paluby, nákladnom priestore a v paneloch s elektronikou [3].

4.1. Ventilácia a filtrovanie vzduchu

Vetrací systém kabíny lietadla môže použiť na vetranie kompresorový vzduch (odoberaný za kompresorom motora- bleed air) alebo zmes kompresorového a recirkulovaného vzduchu. Kompresorový vzduch (bleed air) poháňa obeh vzduchu, klimatizačné zariadenie a vyrovnáva tlak v kabíne lietadla [3].

Rovnaké množstvo filtrovaného a recirkulovaného vzduchu z kabíny sa môže použiť na zlepšenie distribúcie a cirkulácie. Použitie filtrovaného, recirkulovaného vzduchu znižuje stratu kompresoru odberom kompresorového vzduchu a zvyšuje vlhkosť vzduchu v kabíne. Väčšina systémov nemá filtráciu dodávaného kompresorového vzduchu, ale niekedy je možnosť ich vybaviť odstredivými čističmi vzduchu. Lietadlá ktoré lietajú vo výškach, kde je možný výskyt vysokej koncentrácie ozónu musia byť vybavené katalytickým ozónovým konvertorom [3].

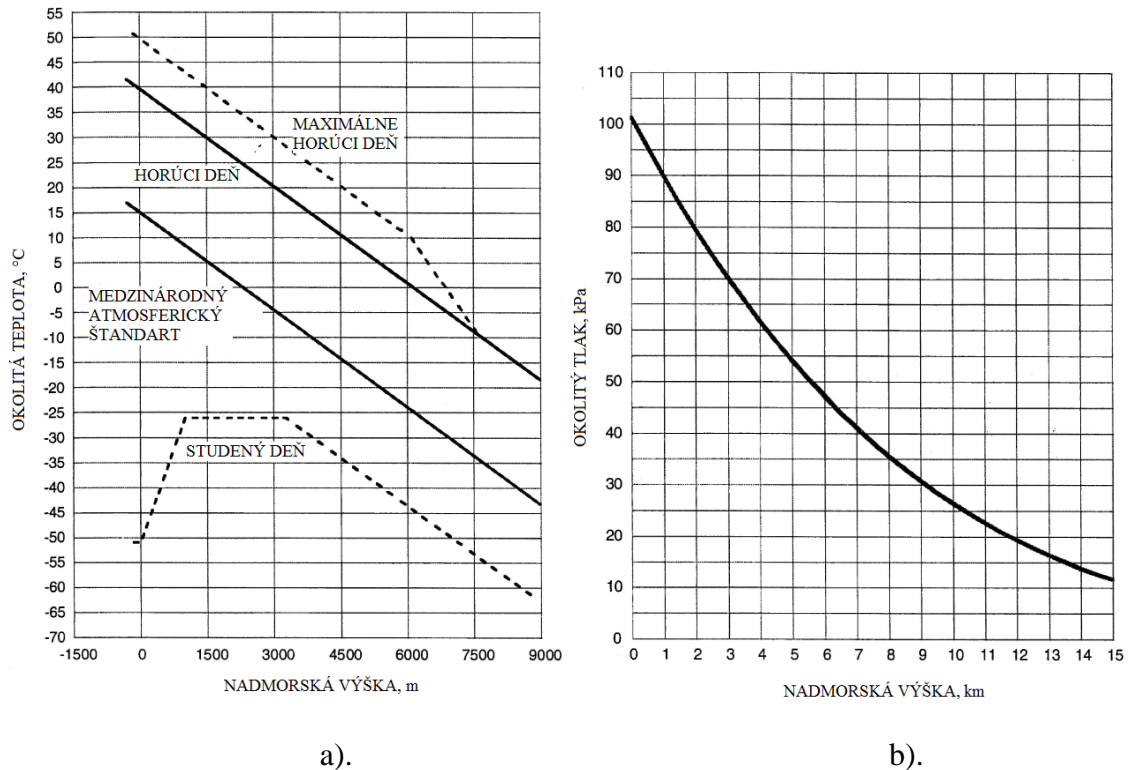
Predpis FAR 25.831 stanovuje nasledujúce pravidlá [3]:

- Všetky priestory pre pasažierov a posádku musia byť s dodávkou vzduchu
- Každý člen posádky musí mať dostatočné množstvo vzduchu na pohodlné a bezproblémové vykonávanie svojej práce (minimálne 4,7 L/s)
- Dodávaný vzduch do priestorov pre pasažierov a posádku nesmie obsahovať nebezpečnú koncentráciu plynov a pár:
 - CO limit je 1 diel na 20 000 dielov vzduchu
 - CO₂ limit je 3% z objemu vzduchu
- Odvod dymu z kokpitu musí byť jednoducho uskutočniteľný tak aby nedošlo k zníženiu tlaku vzduchu
- Ostatné časti paluby a priestory posádky musia mať možnosť kontrolovať teplotu a kvalitu dodávaného vzduchu nezávisle.
- Za normálnych prevádzkových podmienok a aj v prípade akejkoľvek poruchy, musí byť ventilačný systém navrhnutý tak, aby zabezpečil pre každého cestujúceho čerstvý vzduch o množstve minimálne 0,25kg za minútu

4.2. Okolité teplota, vlhkosť a tlak

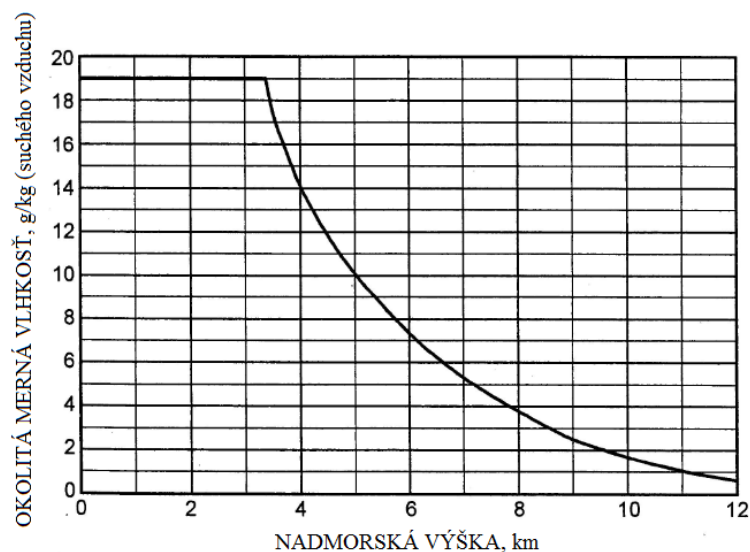
Obrázok 2a zobrazuje typický priebeh okolitej teploty pre horúce, štandardné a studené dni. Okolité teploty použité pri návrhu určitého lietadla môžu byť vyššie alebo nižšie než teploty zobrazené na obrázku 2a v závislosti na operatívnej oblasti daného lietadla. Zmena okolitého tlaku s výškou je zobrazená na obrázku 2b. Návrh obsahu okolitej vlhkosti v rôznych výškach doporučený pre komerčné lietadlá je zobrazený na obrázku 3, aj keď úroveň operatívnej vlhkosti môže výnimočne v určitých oblastiach prevyšovať 30g/kg suchého vzduchu [3].

Kontrolný systém pracovného (pobytového) prostredia ECS je navrhnutý na zabezpečenie komfortnej teploty v kabíne, dostatočnej ventilácie, dobrej distribúcie prúdu vzduchu pozdĺž kabíny a dostatočný prívod kompresorového vzduchu (bleed air) na zabezpečenie tlaku v kabíne a opätovné natlakovanie v prípade poklesu počas určitej poruchy. ECS obsahuje tiež odvlhčovanie dodávaného vzduchu do kabíny v prípade ochladzovacích procesov [3].



Obrázok 2

- a). závislosť okolitej teploty na nadmorskej výške [3]
 b). závislosť okolitého tlaku na nadmorskej výške [3]



Obrázok 3

závislosť okolitej mernej vlhkosti na nadmorskej výške [3]

4.3. Stanovenie tepelnej záťaže

Ustálený stav tepelného zaťaženia pre ochladzovanie a ohrievanie pre určité modely lietadiel sa stanovuje na základe štúdie prenosu tepla pozostávajúcu z niekoľkých častí a zahŕňa aj zaťaženie klimatizácie. Prenos tepla zahŕňa nasledujúce faktory [3]:

- Konvekcia medzi povrchovou hraničnou vrstvou a vonkajším povrchom lietadla
- Radiácia medzi vonkajším povrchom lietadla a externým prostredím
- Slnéčné žiarenie prechádzajúce cez transparentné časti/konštrukcie
- Kondukcia cez steny kabíny a konštrukciu lietadla
- Konvekcia medzi vnútorným povrchom kabíny a vzduchom v kabíne
- Konvekcia medzi vzduchom v kabíne a ľuďmi alebo vybavením
- Konvekcia a radiácia od vnútorných zdrojov tepla ako napríklad elektrické zariadenia

Analýza prenosu tepla by mala obsahovať všetky možné spôsoby prúdenia cez zložitú štruktúru lietadla. Koefficienty prenosu tepla vzduchového filmu sa menia s nadmorskou výškou a tiež by mali byť uvažované [3].

4.4. Ochladzovanie vzduchu v kabíne

Kalibračné kritérium pre klimatizáciu je zvyčajne na zemi za horúceho dňa s vysokou vlhkosťou vzduchu, keď je lietadlo plne naložené a dvere sú zavreté. Druhé stanovisko je ochladzovanie vyprázdneného a vyhriateho lietadla tesne pred nastúpením pasažierov. Ochladzovací čas je zvyčajne špecifikovaný, že musí byť nižší než 30 minút a teplota vzduchu v kabíne okolo 25 °C počas podmienok na zemi za horúceho dňa. Za letu by mal systém zaistiť teplotu vzduchu v kabíne 24°C pri plne naloženom lietadle [3].

4.5. Ohrev vzduchu v kabíne

Požiadavky na ohrev vychádzajú z čiastočne naloženého lietadla počas veľmi studeného dňa. Ohrev kabíny naplnenej studeným vzduchom sa takisto uvažuje v priebehu 30 minút a ohrev sa zvyčajne robí na špecifikovanú teplotu 21°C počas studeného dňa za podmienok na zemi. Počas letu by mal systém zabezpečiť teplotu vzduchu v kabíne na hodnote 24°C za podmienok naplnenia lietadla pasažiermi minimálne na 20%. Nákladné priestory musia mať teplotu nad 5°C a podlaha nákladového priestoru nesmie byť nižšia než 0°C, aby sa predišlo zamŕznaniu nákladu [3].

4.6. Regulácia teploty

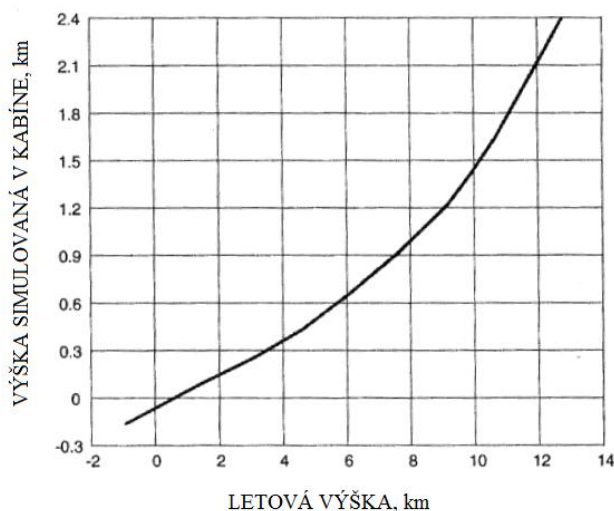
Komerčné lietadlá (nad 19 pasažierov) majú minimálne dve zóny (kokpit a kabína) a u prepravcov ako Airbus sa používa aj viac než sedem zón. Tieto zóny pre posádku a pasažierov majú možnosť kontrolovať a meniť teplotu jednotlivo v rozsahu od 18°C do 30°C. Niektoré systémy majú obmedzenia meniť nastavenia v zónach pre pasažierov samotnými pasažiermi. U vybraných zón je teplota ovládaná v rozsahu 1K a teplotná jednotnosť zón by sa mala pohybovať v rozsahu 2,5K. Rozdielne ovládanie teplôt môže byť aplikované pre nákladové priestory [3].

4.7. Časticové filtre

Používajú sa na filtrovanie recirkulovaného vzduchu z kabíny. Na tieto účely sa uprednostňujú vysoko účinné časticové filtre (HEPA). Možné vybavenie filtrácie sú filtre s aktívnym uhlím, ktoré však bývajú inštalované v sérii s časticovými filtrami. Záujem o filtre s aktívnym uhlím je nižší z dôvodu zákazu fajčenia na palube a taktiež z hľadiska ceny, častej údržby (výmeny) a požiadavkou na likvidáciu použitých filtrov [3].

4.8. Vyrovnávanie tlaku

Pretlakovanie kabíny zabezpečuje požadované pomerné tlaky kyslíku pre posádku a pasažierov počas letu vo vysokých výškach. Počas letu vo výškach nad 12 000 metrov musí byť kabína natlakovaná na tlak, ktorý odpovedá tlaku vo výške 2400 metrov, prípadne nižší v rámci zaistenia normálnych fyziologických funkcií bez nutnosti dodávania kyslíku formou dýchacích masiek. Maximálny tlakový rozdiel medzi kabínou a vonkajším prostredím je obmedzený konštrukčnými limitmi daného lietadla. Ovládanie tohto rozdielu tlaku zabezpečuje tlak v kabíne lietadla v závislosti na leteckej hladine lietadla. Štandardné výškové závislosti sú zobrazené na obrázku 4. Ovládací systém tlaku v kabíne musí tiež zabezpečiť maximálny rozsah zmeny tlaku. Doporučené limity sú 150m/min pre stúpanie a 90m/min pre klesanie lietadla [3].



Obrázok 4

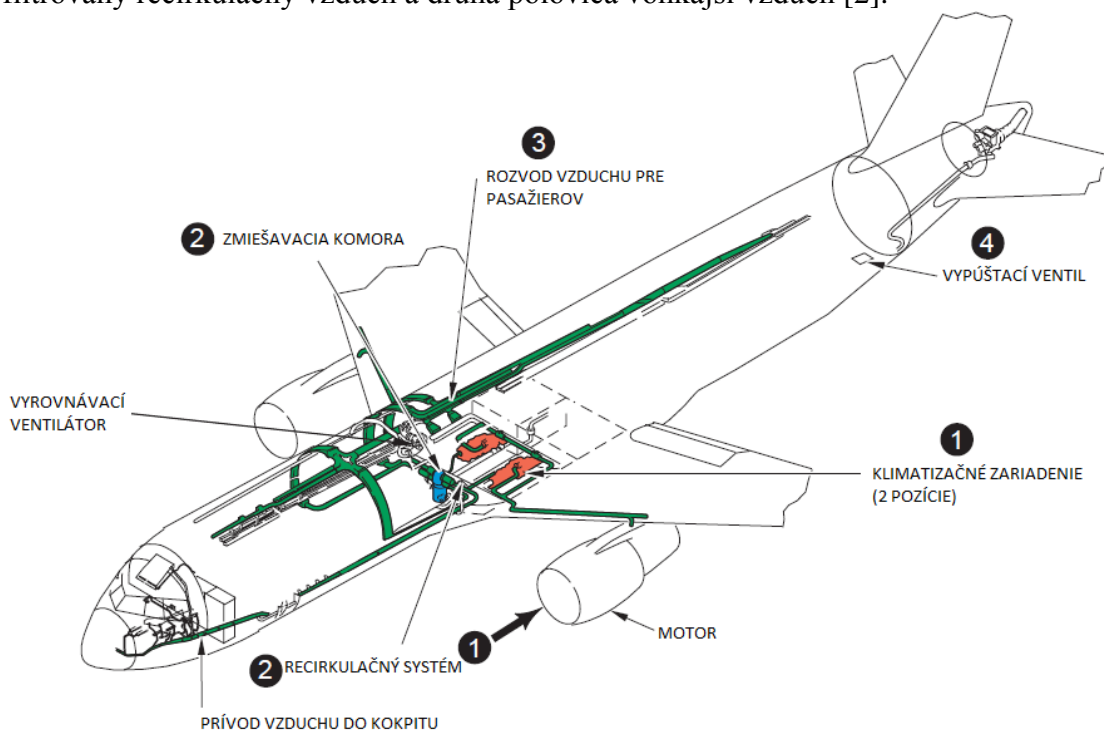
Závislosť okolitej mernej vlhkosti na nadmorskej výške [3]

5. Ventilačný systém lietadiel - ECS

V zásade rozlišujeme ventilačný systém podľa toho, či je lietadlo s pretlakovou alebo nepretlakovou kabínou, ktorých použitie závisí od letovej hladiny, v ktorej sa predpokladá prevádzkovanie daného lietadla. Podľa tohto dôležitého parametru sa ďalej navrhuje ventilačný systém, ktorý musí zaistiť dávku potrebného čerstvého vzduchu a teplotu odpovedajúcu komfortnému pobytu osôb na palube. Pri pretlakových kabínach je navyše potrebné zaistiť vyrovnávanie tlaku v kabíne, keďže tlak s nadmorskou výškou klesá (viď obrázok 2b.).

5.1.ECS pre pretlakovú kabínu

Vonkajší vzduch dodávaný do kabíny lietadla je zaistený kompresorom motora, následne chladený klimatizačným zariadením umiestneným pod centrálnou sekciou krídla a miešaný odpovedajúcim množstvom filtrovaného recirkulačného vzduchu. Tento princíp (obrázok 5) je typický pre novú generáciu lietadiel. Približne $0,25\text{m}^3/\text{min}$ vzduchu je dodávaného na jedného pasažiera ventilačným systémom do kabíny. Polovica z tohto množstva vzduchu je filtrovaný recirkulačný vzduch a druhá polovica vonkajší vzduch [2].



Obrázok 5
Ventilačný systém lietadla [2]

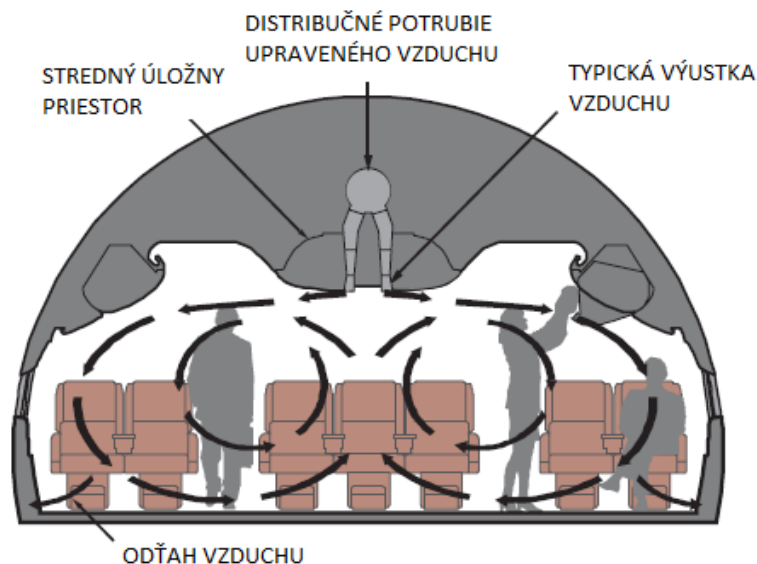
1. Vonkajší vzduch kontinuálne vstupuje do motora lietadla, kde je stlačený. Nasledovne prechádza cez klimatizačné (chladiace) zariadenie do zmiešavacej komory.
2. Vonkajší vzduch vstupujúci do zmiešavacej komory je v nej mixovaný s recirkulačným vzduchom, ktorý bol vyčistený s vysoko účinnými filtrami. Filtre sú podobné tým, používaným na kritických oddeleniach v nemocniciach.

3. Vzduch zo zmiešavacej komory je kontinuálne dodávaný do kabíny z výustiek umiestnenými nad hlavami pasažierov.
4. Odpovedajúce množstvo vstupujúceho vonkajšieho vzduchu je aj kontinuálne odvádzané z lietadla.

Odoberaný vzduch z kompresora motora na pneumatické účely v kabíne má prirodzene škodlivý efekt na výkon motora a preto sú vykonané opatrenia na jeho minimalizovanie. Rovnako ako charakteristiky motora sa značne menia počas letu (rolovania, stúpania, kľudného letu a zostupovania), teplota a tlak odoberaného vzduchu sa taktiež mení v širokom rozsahu. Teplota sa môže meniť od 65°C do 650°C a tlak od 100kPa do 4000kPa [2].

Dodávanie vzduchu do kabíny má za následok jeho kompletnú výmenu každé 2 až 3 minúty (20 až 30 výmen vzduchu za hodinu). Vysoká výmena vzduchu je nevyhnutná pre kontrolovanie tepelného gradientu, prechádzanie stagnujúcich studených oblastí, udržiavanie kvality vzduchu a odstraňovanie dymu a odérov v kabíne. Vysoký odťah vzduchu je taktiež nevyhnutný na zaistenie riadenia celkovej teploty kabíne a tlakovania kabíny [2]. Vzhľadom na veľké množstvo vzduchu vstupujúceho do relatívne malého objemu kabíny v porovnaní s budovou je požadovaná precízna kontrola obrazu prúdenia vzduchu na zabezpečenie komfortu bez obťažovania prievanom.

Vzduch vstupuje do kabíny z výustiek umiestnenými nad hlavami pasažierov pozdĺž celej kabíny ako je vidieť na obrázku 6. Tieto výustky sú navrhnuté na vytvorenie dôkladne kontrolovaného kruhového obrazu prúdenia .



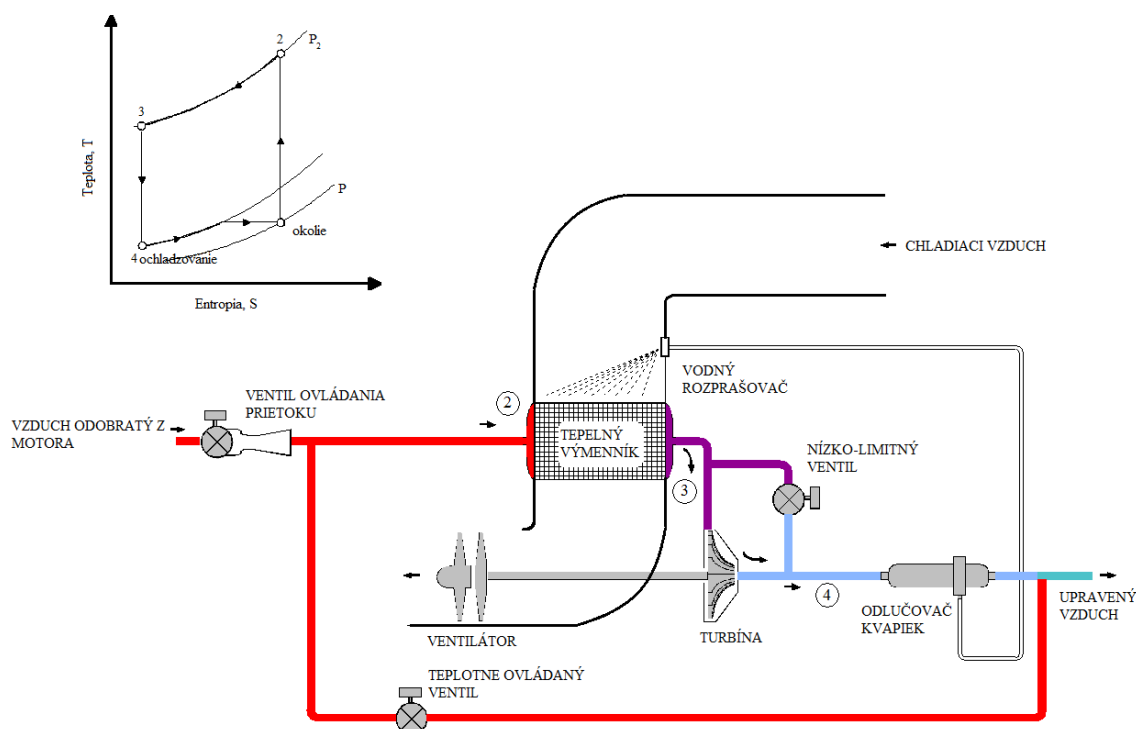
Obrázok 6
Typický hlavný obraz prúdenia v kabíne [2]

Vzduch je dodávaný a odťahovaný z kabíny na kontinuálnej báze. Odvádzaný vzduch opúšťa kabínu cez spätné vzduchové mriežky umiestnené v bočných stenách blízko podlahy pozdĺž celej kabíny na oboch stranách. Kontinuálny odťah vzduchu zabezpečuje tlakový rozdiel vytvorený v trubkovom zväzku pod podlahovou kabíny [2].

Ventilačný systém kabíny je navrhnutý a vyvážený tak, aby vzduch dodávaný v smere jedného radu sedadiel opúšťal kabínu na približne rovnakej úrovni daného radu, pre minimalizovanie prúdenia v smere dopredu a dozadu. Pri kontrolovaní dopredného a spätného prúdenia minimalizujeme rozširovanie kontaminantov vytváraných pasažiermi [2].

Najjednoduchší vzduchový obehový systém je turbo-ventilátorový systém zobrazený na obrázku 7. V tomto systéme, vysokotlaký vzduch je najskôr ochladený v tlakovom vzduchovo chladenom výmenníku. Nasledovne je privedený na turbínu, kde expanduje a ešte viac sa ochladí. Energia uvoľnená pri expanzii je použitá na pohon ventilátora, ktorý privádza chladiaci vzduch cez tlakový výmenník tepla. Na výstupe z turbíny potom tento vzduch prechádza cez nízkotlaký odlučovač kvapiek, kde sa odlúči voda, ktorá skondenzovala v privádzanom vzduchu. Táto voda je rozprašovaná späť na tlakový okruh vzduchu na využitie účinku odparovania z povrchu výmenníka [10].

Turbo-ventilátorový systém našiel použitie v lietadlách s vysokotlakovými stupňami motorov, podzvukových armádnych lietadiel, helikoptér a malých komerčných, regionálnych a obchodných lietadiel. Väčšie komerčné lietadlá používajú zložitejšie systémy [10].



Obrázok 7

Turbo-ventilátorový systém na úpravu vzduchu [10]

5.2.ECS rovnotlakej kabíny lietadla EV-55

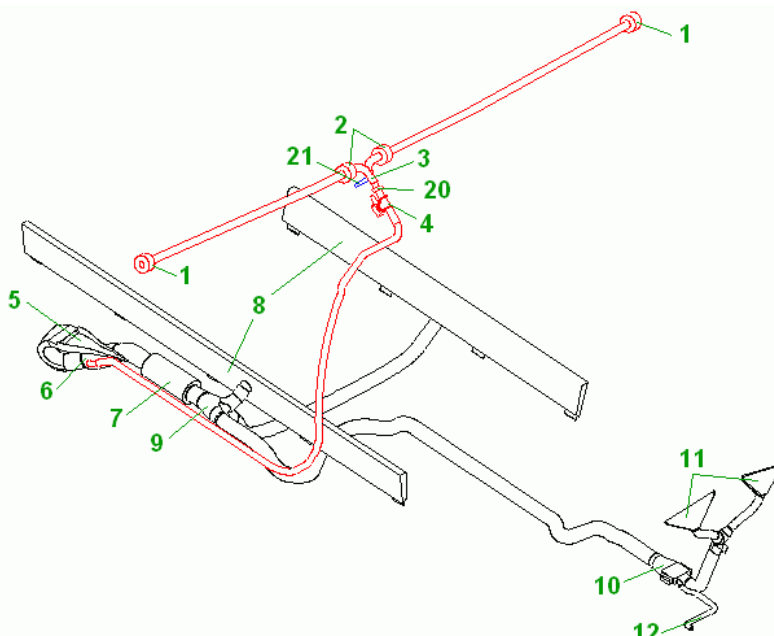
Horúci vzduch na vykurovanie je odoberaný z kompresorov obidvoch motorov. N výstupe z motora je umiestnený ventil (1). Horúci vzduch je vedený izolovaným potrubím do priestoru centroplánu krídla, kde sa ľavá a pravá vetva horúceho vzduchu spája v zlučovači (3). V pravej aj ľavej vetve sú tesne pred zlučovačom inštalované spätné ventily (2). Vzduch ďalej prechádza obmedzovačom prietoku (20), ktorý zaisťuje dostatočný pretlak do odberu vzduchu (21) pre systém pneumatického odladňovania. Za obmedzovačom prietoku prechádza horúci vzduch regulačným ventilom (4), ktorý riadi dodávané množstvo horúceho vzduchu z kompresorov motorov do zmiešavača (6). V zmiešavači je horúci vzduch zmiešaný s chladným, čerstvým vzduchom, ktorý je do zmiešavača privádzaný hlavným NACA vstupom (vyvinutý National Advisory Committee for Aeronautics v roku 1945 pre aplikácie letectva) vzduchu (5). (Pri státi na zemi zaisťuje potrebné množstvo vzduchu ventilátor umiestnený v obtoku). Zmiešaný vzduch ďalej prechádza cez tlmič hluku (7) do rozdeľovacej regulačnej klapky (9), ktorej nastavenie určuje pomer akým sa rozdelí privádzané množstvo vzduchu medzi priestor pilotnej kabíny a priestor kabíny pre cestujúcich. V priestore kabíny pre cestujúcich je vzduch rozvádzaný pomocou vzduchovodov (8) umiestnených v ľavej a pravej stene kabíny.

Do pilotného priestoru je teplý vzduch vedený flexibilným vzduchovodom.

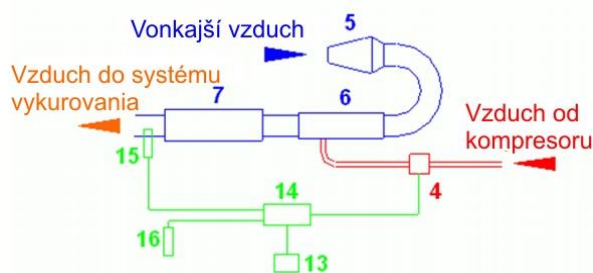
V strednom paneli pilotného priestoru je umiestnená klapka prerozdelenia nohy-okno (10), ktorej nastavenie určuje rozdelenie privádzaného vzduchu medzi výstky pri nohách pilotov a výstky pri spodnej hrane predných skiel (11). Zo vzduchovodu v blízkosti klapky

prerozdelenia nohy-okno vedie odbočka (12) pre vykurovanie priestoru

hydraulických agregátov v prednej časti trupu. Vzduch je odvádzaný jednou odvádzacou výstvou, umiestnenou v zadnej časti kabíny v batožinovom priestore. Regulácia teploty v kabíne je zaisťovaná pomocou automatickej riadiacej jednotky (14). Jednotka vyhodnocuje teplotu v kabíne, meranú pomocou tepelného čidla (16) a a teplotu zmiešaného vzduchu za tlmičom pomocou tepelného čidla (15), ktoré je umiestnené v jednej z vetví. Jednotka na základe informácií z teplotných čidiel a nastavenia teploty na ovládači (13) ovláda regulačný ventil (4) a reguluje prívod horúceho vzduchu do



Obrázok 8
Hlavné časti ECS [9]

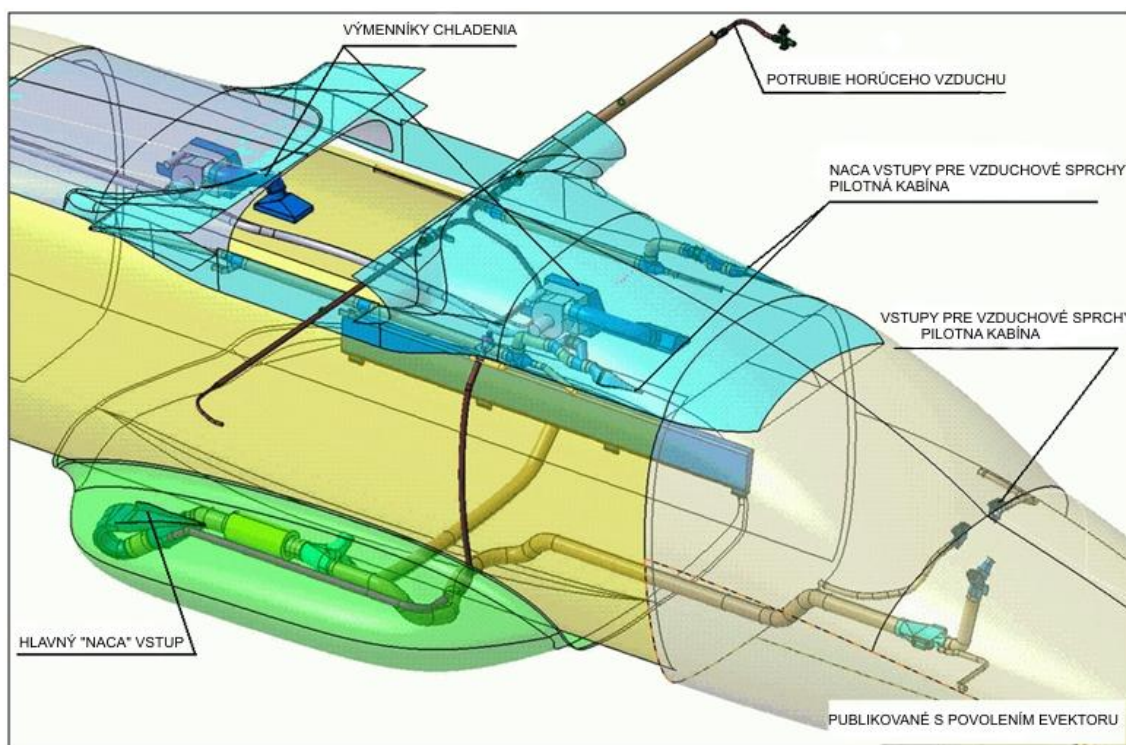


Obrázok 9- Regulácia teploty [9]

zmiešavača pre udržanie nastavenej teploty. Vzduch vstupujúci do kabíny nesmie mať vyššiu teplotu než 80°C [5].

5.3. Vetrание kabíny

V chladnom prostredí sa privádza také množstvo vzduchu o príslušnej teplote, ktoré zaistí nielen vetranie, ale aj teplovzdušné vykurovanie kabíny. V teplom prostredí je vetranie v kabíne zaistené rovnakým spôsobom, len s tým rozdielom, že množstvo čerstvého vzduchu je redukované na minimálne hygienické množstvo. Prívod teplého vzduchu z kompresoru je v týchto prípadoch vypnutý. K doplnkovému vetraniu sa využívajú individuálne vzduchové sprchy. Vzduch je k nim privádzaný ľavým a pravým vzduchovodom v stropnej časti kabíny, pričom teplota vzduchu nie je nijak upravovaná. Každý vzduchovod má vlastný NACA vstup vzduchu umiestnený v hornej prednej časti trupu (viď obrázok 10) a v každom vzduchovode je tiež inštalovaný obtok s ventilátorom, ktorý zaisťuje dodávku vzduchu pri státi na zemi. Individuálne vzduchové dýzy sú inštalované aj v pilotnej kabíne. K týmto sprchám je vzduch privádzaný pomocou vstupov vzduchu umiestnenými pred čelnými oknami [5].



Obrázok 10
Umiestnenie hlavných častí ECS [9]

5.4. Systém chladenia

V rámci voliteľného vybavenia kabíny bude možné vybaviť lietadlo výparníkovou chladiacou jednotkou. Tá sa skladá z kompresorovej jednotky umiestnenej v batožinovom priestore a dvoch výparníkových jednotiek umiestnených v stropnej časti kabíny (viď obrázok 10). Ventilátory jednotiek nasávajú vzduch z priestoru kabíny cez chladiace výmenníky a ochladzovaný ho vracajú späť do priestoru kabíny. Chladenie je cirkulačné, tzn. ochladzuje len vzduch z priestoru kabíny a neprivádza žiadny čerstvý vzduch [5].

6. Okolité prostredie a tepelný komfort človeka

Tepelný komfort predstavuje individuálnu podmienku, ktorá vyjadruje spokojnosť s tepelným prostredím. Vzhľadom na veľké rozdiely medzi fyziologickými a psychologickými vlastnosťami jednotlivých osôb, je veľmi náročné uspokojiť každého človeka v danom priestore. Podmienky na zaistenie komfortného prostredia nie sú rovnaké pre každého. Vzhľadom k tomuto faktoru boli získané rozsiahle údaje z laboratórneho a reálneho prostredia, ktoré poskytujú nevyhnutné štatistické údaje definujúce podmienky, ktoré špecifikujú percentuálny podiel ľudí spokojných s tepelným komfortom.

Existuje 6 hlavných faktorov, ktoré definujú tepelný komfort a mnoho ďalších vedľajších faktorov ovplyvňuje pohodu len za určitých podmienok. Hlavné faktory sú [12]:

- Metabolizmus
- Izolácia oblečenia
- Teplota vzduchu
- Radiačná teplota
- Rýchlosť vzduchu
- Vlhkosť

Tieto faktory sa v čase môžu meniť, zatiaľ čo popis tepelnej pohody prostredia je aplikovateľný len za ustáleného stavu. Z tohto dôvodu ľudia vstupujúci do prostredia, ktoré spĺňa podmienky tepelnej pohody nemusia okamžite vnímať tieto podmienky komfortne, ak sa pred vstupom nachádzali v prostredí s inými podmienkami. Efekt spojený s predchádzajúcim tepelným prostredím alebo aktivitou môže spôsobiť pocit diskomfortu po dobu približne jednej hodiny [12].

6.1. Stanovenie tepelného komfortu človeka

Tepelný pocit človeka závisí hlavne na tepelnej rovnováhe jeho tela ako celku. Túto rovnováhu ovplyvňuje jeho telesná činnosť a odev, a taktiež parametre prostredia ako sú teplota vzduchu, stredná radiačná teplota, rýchlosť prúdenia a vlhkosť vzduchu.

Ak sú tieto činitele odhadnuté alebo zmerané, je možné predpovedať tepelný pocit človeka výpočtom predpovede stredného tepelného pocitu (index PMV- Predicted Mean Vote).

Predpoveď percentuálneho podielu nespokojných (index PPD- Predicted Percentage of Dissatisfied) poskytuje informáciu o tepelnej nepohode (diskomfortu) alebo tepelnej nespokojnosti s tým, že predpovedá percentuálny podiel ľudí, ktorí budú v danom prostredí pociťovať pravdepodobne príliš veľké teplo alebo veľký chlad. PPD je možno odvodiť z PMV (viď rovnica 2)

6.1.1. Predpoveď stredného tepelného pocitu (PMV)

PMV ukazovateľ, ktorý predpovedá stredný tepelný pocit veľkej skupiny osôb v nasledujúcej sedemstupňovej stupnici pre posudzovanie tepelného pocitu [14]:

- + 3 – horúco
- + 2 – teplo
- + 1 – mierne teplo
- 0 – neutrálne
- 1 – mierne chladno
- 2 – chladno
- 3 – zima

Ukazovateľ PMV je možné stanoviť, keď sa odhadne aktivita (energetický výdaj) a odev (tepelný odpor) a zmerajú sa parametre prostredia: teplota vzduchu, stredná radiačná teplota, relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu a parciálny tlak vodnej pary [14].

Stanovenie PMV je založené na tepelnej rovnováhe ľudského tela. Človek je v tepelnej rovnováhe, pokiaľ vnútorná produkcia tepla v jeho tele je rovná strate tepla do prostredia [14].

V mierne teplom prostredí termoregulačný systém človeka automaticky mení teplotu kože a vylučovanie potu, aby udržal tepelnú rovnováhu. V ukazovateli PMV bola fyziologická odpoveď termoregulačného systému štatisticky vzťahovaná k výsledkom posúdenia vlastného tepelného pocitu na sledovaných subjektoch [14].

Výpočet PMV indexu je možné aplikovať len za predpokladu, že v pobytovom prostredí sú konštantné podmienky a ľudia v ňom majú konštantný energetický výdaj. Zákon zachovania energie potom vedie na rovnicu tepelnej rovnováhy (rovnica 1) [11].

$$H - E_{vd} - E_p - E_{dl} - L = R + C \quad (1)$$

kde:

H	- vnútorná produkcia tepla človeka	[W/m ²]
E _{vd}	- tepelná strata vplyvom difúzie vody z pokožky do okolia	[W/m ²]
E _p	- tepelná strata v dôsledku mokrého potenia	[W/m ²]
E _{dl}	- tepelná strata latentným teplom dýchaním	[W/m ²]
E _{dr}	- tepelná strata suchým dýchaním	[W/m ²]
R	- tepelná strata radiáciou z povrchu oblečeného človeka	[W/m ²]
C	- tepelná strata konvekciou z povrchu oblečeného človeka	[W/m ²]

Pokiaľ sa telo človeka nenachádza v tepelnej rovnováhe, tak môžeme rovnicu 1 prepísať do tvaru rovnice 2.

$$L = H - E_{vd} - E_p - E_{dl} - E_{dr} - R - C \quad (2)$$

kde L predstavuje tepelnú záťaž na človeka

Index PMV je potom podľa P.O. Fangeru vyjadrený rovnicou 3, kde M predstavuje metabolické teplo (energetický výdaj) na meter štvorcový povrchu ľudského tela [14].

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot L \quad (3)$$

Po dosadení rovnice 2 do rovnice 3 dostaneme:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot (H - E_{vd} - E_p - E_{dl} - E_{dr} - R - C) \quad (4)$$

Táto rovnica je následne rozvinutá dosadením funkčných fyzikálnych závislostí za jednotlivé tepelné straty z človeka do prostredia a podľa normy ČSN EN ISO 7730 [14] môžeme túto rovnicu následne písať v tvare

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (5)$$

kde

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (6)$$

$$h_{cl} = \begin{cases} 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \text{ pre } 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \text{ pre } 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (7)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \text{ pre } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \text{ pre } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (8)$$

kde

M	- energetický výdaj,	[W/m ²]
W	- užitočný mechanický výkon (vonkajšia práca),	[W/m ²]
I_{cl}	- tepelný odpor odevu,	[m ² K/W]
f_{cl}	- pomer povrchu oblečeného človeka k povrchu nahého človeka,	[-]
t_a	- teplota vzduchu,	[°C]
\bar{t}_r	- stredná radiačná teplota,	[°C]
v_{ar}	- relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu (voči ľudskému telu),	[m/s]
p_a	- parciálny tlak vodnej pary,	[Pa]
h_{cl}	- súčiniteľ prestupu tepla konvekciou,	[W/m ² K]
t_{cl}	- teplota povrchu odevu,	[°C]

Všetky premenné vystupujúce v týchto funkčných závislostiach sú merateľné okrem povrchovej teploty oblečenia a koeficientu prestupu tepla konvekciou, ktoré sú vzájomne

funkčne previazané. Pri výpočte sa musí počiatočná povrchová teplota oblečenia odhadnúť, spočíta sa koeficient prestupu tepla konvekciou, následne sa spočíta nová povrchová teplota. Výpočet pokračuje iteračne, pokiaľ obidve hodnoty nie sú stanovené s dostatočnou presnosťou (viď rovnica 6) [11], [14].

Norma ČSN EN ISO 7730 odporúča používať ukazovateľ PMV len pre hodnoty PMV v rozmedzí -2 až +2. Okrem toho by mali byť splnené aj rozsahy šiestich hlavných parametrov [14]:

$$\begin{aligned} M &= 46 \text{ W/m}^2 \text{ až } 232 \text{ W/m}^2 \text{ (0,8 met až 4 met)} \\ I_{cl} &= 0 \text{ m}^2\text{K/W až } 0,310 \text{ m}^2\text{K/W (0 clo až 2 clo)} \\ t_a &= 10 \text{ }^\circ\text{C až } 30 \text{ }^\circ\text{C} \\ \bar{t}_r &= 10 \text{ }^\circ\text{C až } 40 \text{ }^\circ\text{C} \\ v_{ar} &= 0 \text{ m/s až } 1 \text{ m/s} \\ p_a &= 0 \text{ Pa až } 2700 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Poznámka: V rámci rozsahu parciálneho tlaku vodnej pary sa odporúča, aby relatívna vlhkosť vzduchu bola udržiavaná v rozmedzí 30 % až 70 %. Jej vplyv je však malý pri miernych teplotách v blízkosti pohody a pri stanovení hodnoty PMV je obvykle možné ju zanedbať [14].

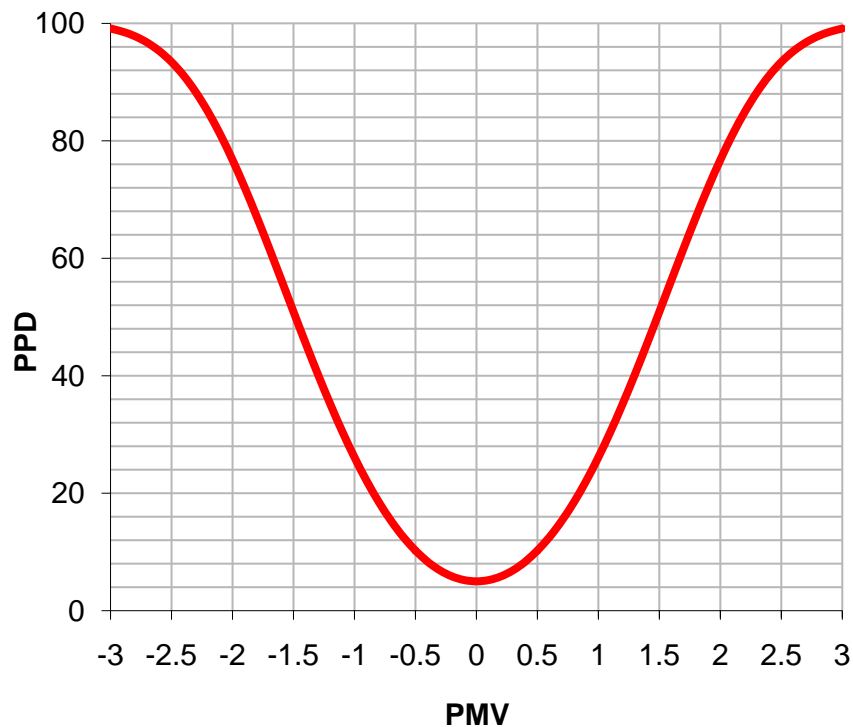
6.1.2. Predpoveď percentuálneho podielu nespokojných (PPD)

PMV index predpovedá strednú hodnotu posúdenia vlastného tepelného pocitu u veľkej skupiny ľudí vystavenej rovnakému prostrediu. Posúdenia tepelných pocitov jednotlivcov sú však rozptýlené okolo tejto strednej hodnoty a je užitočné predpovedať stredný počet ľudí, ktorí budú pravdepodobne považovať mikroklímu v ich okolí za príliš teplú alebo chladnú [14].

Ukazovateľ PPD je kvantitatívna predpoveď pomerného počtu ľudí, ktorý budú nespokojný s určitou mikroklímou v ich okolí a je možné ho určiť z hodnoty PMV podľa rovnice 9 alebo odčítaním z obrázku 11 [14].

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,033\ 53 \cdot PMV^4 + 0,217\ 9 \cdot PMV^2)} \quad (9)$$

PPD index teda predpovedá u veľkých skupín ľudí počet osôb nespokojných s tepelnými podmienkami prostredia. Zvyšok skupiny sa bude cítiť neutrálne alebo bude pociťovať mierny chlad prípadne mierne teplo.



Obrázok 11

Zobrazenie PPD ako funkcie PMV

6.1.3. Obťažovanie prievanom (DR)

Prievan je pohyb vzduchu, ktorý môže spôsobiť nežiaduce miestne ochladzovanie ľudského tela. Obťažovanie prievanom je možné vyjadriť percentuálnym podielom ľudí, u ktorých sa predpovedá pocit obťažovania prievanom. Stupeň obťažovania prievanom DR (draught rating) je možné spočítať s použitím rovnice 10 [14].

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v \cdot Tu + 3,14) \quad (10)$$

kde

- DR - stupeň obťažovania prievanom
- t_a - miestna teplota vzduchu
- v - miestna priemerná rýchlosť vzduchu
- Tu - miestna intenzita turbulencie (výpočet podľa rovnice 11)

$$Tu = \frac{\sqrt{tke \cdot \frac{2}{3}}}{v} \quad (11)$$

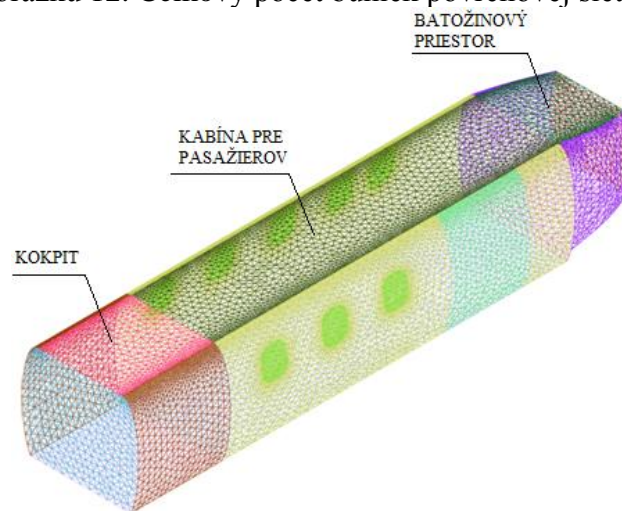
- tke - turbulentná kinetická energia

7. Popis modelu a definovanie okrajových podmienok

7.1. Geometria vyšetrovanej kabíny

Geometria kabíny lietadla EV-55 je vytvorená podľa makety, ktorá je umiestnená v laboratóriu odboru techniky prostredia (viď. obrázok 13- v ľavo). Maketa bola poskytnutá firmou Evector (výrobca tohto lietadla) pre výskumné účely v oblasti vetrania, vykurovania a zaistenia pohody prostredia pre pasažierov v kabíne. Na obrázku 13 (v pravo) je zobrazené vnútorné prostredie kabíny v štádiu bez zateplenia s rozvodom vzduchovodu. Zateplenie je následne umiestnené na vnútornú stranu stien kabíny a prekryté termo fóliou.

Na vytvorenie geometrie bol použitý 3D-Cad SolidWorks, z ktorého bola následne vyexportovaná geometria do programu STAR CCM+, ktorý je prvotne určený na simulácie metódou CFD. V tomto prípade bol tento program využitý len na vytvorenie výpočtovej siete, keďže program Theseus FE, v ktorom simulácia bude prebiehať, nemá nástroj na jej vytvorenie. Po vytvorení siete a jej nahraní do programu Theseus FE bude geometria vypadáť, ako je zobrazené na obrázku 12. Celkový počet buniek povrchovej siete je približne 23 000.



Obrázok 12
Vytvorená geometria kabíny

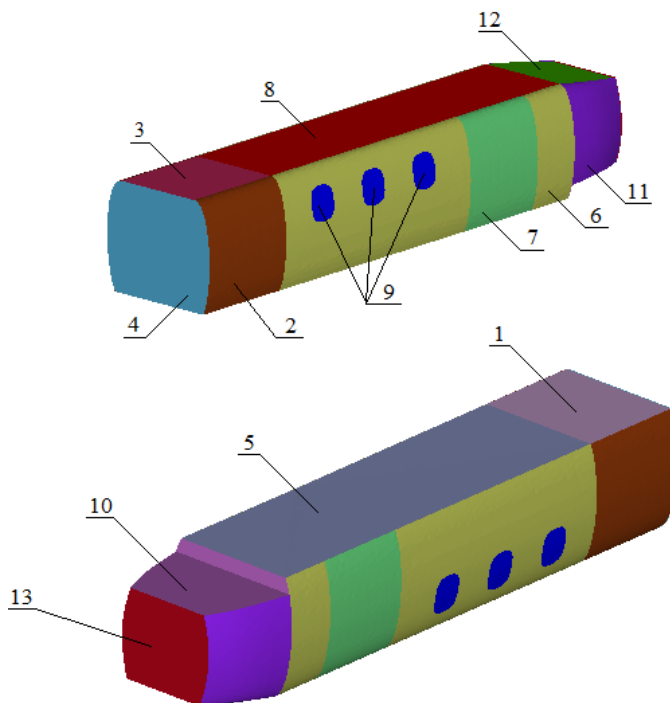


Obrázok 13
Maketa kabíny umiestnená v laboratóriu
(v pravo- vnútorné prostredie kabíny bez zateplenia)

7.2. Rozdelenie a definovanie materiálov

Pre zaistenie podmienok, v simulačnom prostredí zhodných s reálnym prostredím, je potrebné priradiť modelu také okrajové podmienky a skladbu materiálov, ktoré odpovedajú skutočnej makete umiestnenej v laboratóriu.

Model makety sa skladá z 13 častí (viď obrázok 14, tabuľka 1), ku ktorým je možné priradiť jednotlivo rôzne okrajové podmienky a materiály. Okrajové podmienky, ako napríklad okolitá teplota, koeficient prestupu tepla a vlastnosti povrchu môžu byť rozdielne pre pozitívnu a negatívnu stranu povrchu (v našom prípade vnútornú a vonkajšiu stranu makety). Konštrukcia makety je vytvorená z dreva a preglejky (vrstvené dosky) a na zateplenie sa bude uvažovať minerálna vlna, tepelne izolačná pena, hlukovo izolačná pena a pre laboratórne podmienky aj polystyrén.



Obrázok 14
Rozdelenie geometrie na jednotlivé časti

Tabuľka 1- Časti makety

číslo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Vzduchová zóna	KOKPIT				KABÍNA					KARGO			
názov	Kokpit podlaha	Kokpit bočná stena	Kokpit strecha	Kokpit predná stena	Kabína podlaha	Kabína bočná stena	Kabína dvere	Kabína strecha	Kabína okná	Kargo podlaha	Kargo bočná stena	Kargo strecha	Kargo zadná stena

Presný rozpis skladby materiálov v uvažovaných variantách zateplenia a odhlučnenia kabíny v simulácii je možné vidieť v prílohe (tabuľka 7). Varianta D predstavuje zateplenie kabíny, ktorá je v skutočnosti realizovaná na makete v laboratóriu. Ostatné tri varianty sú variácie zateplenia navrhnuté priamo firmou Evector, pričom vo variante A sa uvažuje minimálna tepelná a hluková izolácia, vo variante B stredná izolácia a varianta C predstavuje maximálne uvažovanú izoláciu, ktorá je aj najťažšia (viď tabuľka 2).

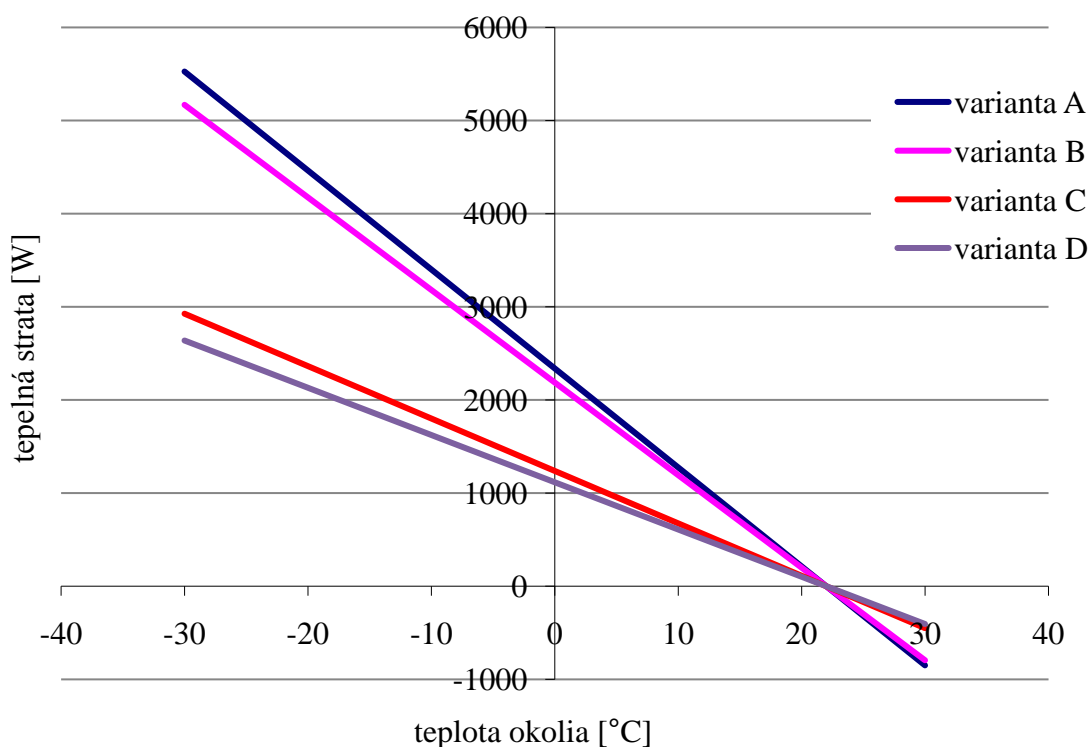
Vzhľadom na to, že sa jedná o malé dopravné lietadlo, hmotnosť jednotlivých častí hrá veľkú úlohu pri voľbe izolačných materiálov a ich dimenzií. V tabuľke 2 môžeme vidieť

fyzikálne vlastnosti jednotlivých použitých izolačných materiálov a aj celkovú hmotnosť zateplenia pre uvažované varianty.

Tabuľka 2- *vlastnosti uvažovaných izolačných materiálov* [9]

Izolačný materiál	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Hmotnosť izolácie [kg]			
			A	B	C	D
minerálna vlna	6,9	0,036	3,04	6,08	6,95	9,54
tepelne izolačná pena	16,9	0,050	3,99	3,99	14,68	-
hlukovo izolačná pena	104	0,050	19,29	19,29	14,18	-
polystyrén	20	0,015	-	-	-	4,68
suma	-	-	26,32	29,36	35,81	14,22

Pri voľbe zateplenia kabíny lietadla je teda nutný kompromis medzi množstvom použitého izolačného materiálu a výsledným tepelným tokom unikajúcim z kabíny. Na obrázku 15 je vidieť teoreticky spočítaná tepelná strata pre uvažované varianty zateplenia. Varianta *D* sa zdá byť najlepšia ako z hľadiska tepelných strát, tak aj hmotnosti celkovej izolácie. Pri tejto variante však nie je uvažovaná hluková izolácia, ktorá je z hľadiska pohody pasažierov počas letu nevyhnutná, a preto ju nie je možné aplikovať v praxi. Táto varianta môže byť použitá len v laboratóriu, kde nie je potrebné izolovať hluk. V prípade varianty *C*- maximálna izolácia sú tepelné straty pomerne malé, ale hmotnosť izolácie je približne 36kg čo je v porovnaní s variantou *A*- minimálna izolácia o 6kg viac. V ďalšej štúdii bude porovnanie jednotlivých variant s vplyvom na tepelnú pohodu dosiahnutú v kabíne.

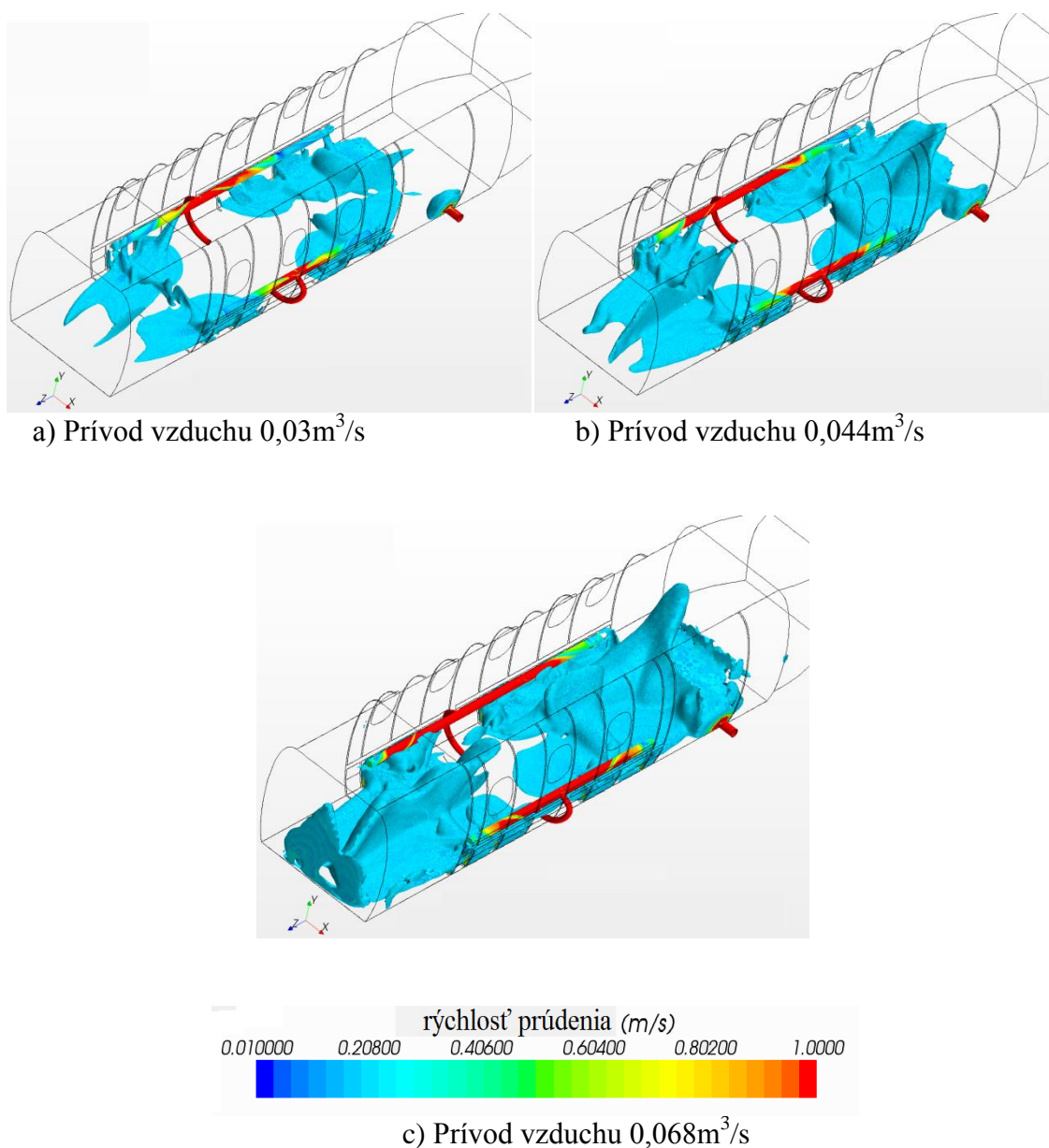


Obrázok 15

Tepelná strata v závislosti na vonkajšej teplote pre uvažované varianty izolácie

7.3. Vetrание kabíny

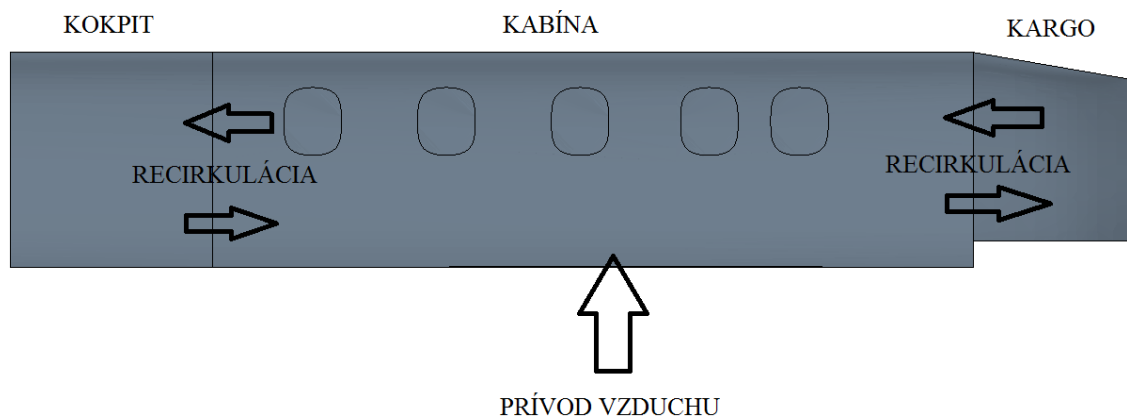
Na definovanie vetrania v kabíne je potrebné vytvoriť vzduchové zóny, odpovedajúce jednotlivým častiam makety lietadla. Pohyb vzduchu v modeli je zobrazený na obrázku 17, kde prívod čerstvého vzduchu je zaistený len do kabíny a ostatné časti (kokpit a kargo) sú vetrané prostredníctvom recirkulácie vzduchu. V tabuľke 4 je vidieť jednotlivé hodnoty objemu privádzaného a recirkulačného vzduchu medzi jednotlivými vzduchovými zónami. Hodnoty recirkulačného vzduchu sú stanovené na základe predchádzajúcich prác uskutočňovaných na modeli, kde z izoplôch na obrázku 16 sa dá približne určiť množstvo vzduchu zasahujúceho do jednotlivých oblastí v lietadle (kokpit, kargo a kabína).



Obrázok 16
Izoplochy šírenia vzduchu v kabíne [16].

Z jednotlivých uvažovaných variant objemového prítoku privádzaného do kabíny je zrejmé, že do kokpitu zasahuje približne 20% z privedeného vzduchu a do batožinového priestoru (kargo) uvažujeme 10%. Obráz šírenia vzduchu v zadnej časti kabíny je ovplyvnený výstokou pre odvod vzduchu z kabíny, ktorá spôsobuje odťah väčšiny vzduchu a ovplyvňuje ho aj schodovitý prechod ktorým je oddelená časť kargo od kabíny.

Vzduch privádzaný do kabíny musí zabezpečiť nie len prívod čerstvého vzduchu pre pasažierov (bez škodlivín a s dostatočným obsahom kyslíka) ale tiež musí zabezpečiť dosiahnutie požadovanej teploty pre splnenie tepelného komfortu pre pasažierov. V prvok kroku simulujeme stav lietadla bez pasažierov odstaveného na letisku po dlhšiu dobu (teplota vo vnútri lietadla je identická s teplotou externého prostredia). Do kabíny musíme privádzať také množstvo vzduchu o takej teplote, aby do 30 minút bola teplota v kabíne a kokpite na hodnote 21°C. Predmetom nášho záujmu bude kabína, keďže len tá odpovedá podmienkam reálneho lietadla z hľadiska prívodu vzduchu a rozmiestnenia výustiek. V makete sa neuvažuje prívod vzduchu do kokpitu ani do časti kargo na rozdiel od skutočného lietadla, kde sa prívod vzduchu do kokpitu uvažuje cez výustky pri spodnej hrane predných skiel a pri nohách pilotov (viď obrázok 8).



Obrázok 17
Schéma vetrania kabíny

Počiatkové podmienky v kabíne sa uvažujú rovnaké ako v okolitom prostredí, pričom sa uvažujú dve varianty vonkajšieho tepelného prostredia. Prostredie s extrémnou zimou -30°C a medzinárodne dané normálne podmienky 15°C (viď tabuľka 3). Množstvo vzduchu privádzaného do kabíny sa variuje podľa uvažovaných 11 variant objemového prítoku (viď tabuľka 4), kde minimálny objemový prítok je stanovený medzinárodným štandardom z minimálneho množstva čerstvého vzduchu potrebného pre 7 osôb.

Tabuľka 3- vzduchové zóny makety

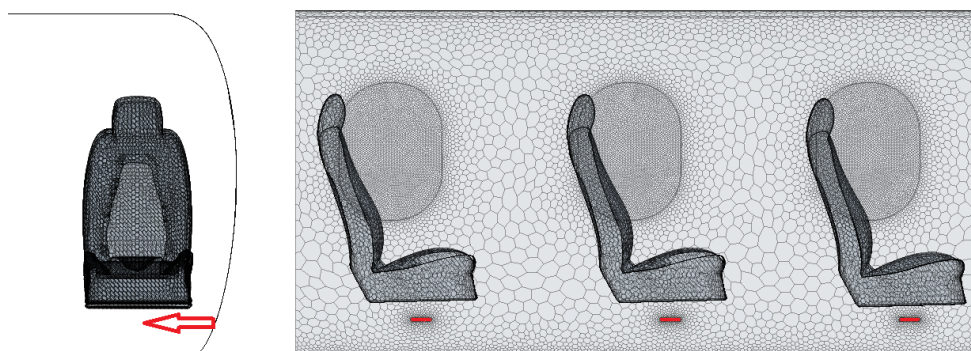
Vzduchová zóna	Objem [m ³]	Počiatkové podmienky prostredia			
		EXTRÉMNA ZIMA		NORMÁNE PODMIENKY	
		teplota [°C]	vlhkosť [%]	teplota [°C]	vlhkosť [%]
KOKPIT	2	-30	80	15	70
KABÍNA	9	-30	80	15	70
KARGO	2	-30	80	15	70

Tabuľka 4- použité varianty privádzaného a recirkulačného vzduchu

		VARIANTA OBJEMOVÉHO PRIETOKU										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RECIRKULÁCIA VZDUCHU	OBJEMOVÝ PRIETOK PRIVÁDZANÉHO VZDUCHU [m ³ /s]	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05	0.055	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
	KABINA-KOKPIT [m ³ /s]	0.007	0.0075	0.008	0.0085	0.009	0.0095	0.01	0.0115	0.013	0.015	0.017
	KOKPIT-KABINA [m ³ /s]	0.007	0.0075	0.008	0.0085	0.009	0.0095	0.01	0.0115	0.013	0.015	0.017
	KABINA-KARGO [m ³ /s]	0.003	0.0033	0.0036	0.0039	0.0042	0.0045	0.0048	0.0054	0.0062	0.007	0.0078
	KARGO-KABINA [m ³ /s]	0.003	0.0033	0.0036	0.0039	0.0042	0.0045	0.0048	0.0054	0.0062	0.007	0.0078

7.4.Prívod vzduchu

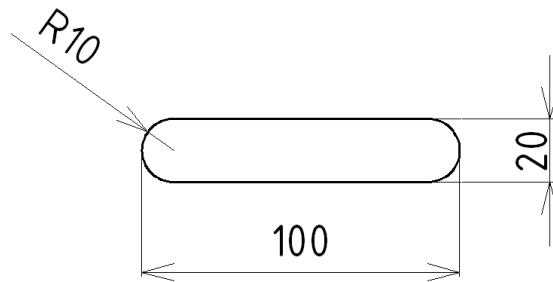
Vzduch privádzaný do kabíny vstupuje cez výstky umiestnenými v bočnej stene pod sedačkami (obrázok 18). Predpokladáme použitie deviatich sedačiek v kabíne, a teda deväť výstiek, cez ktoré vstupuje vzduch. Tvar a rozmery výstky sú na obrázku 19.



Obrázok 18
Prívod vzduchu do kabíny

Pri simulácii sledujeme strednú teplotu v kabíne tak aby do 30 minút dosiahla hodnotu 21 °C. Optimálna teplota vstupujúceho vzduchu do kabíny je taktiež predmetom šetrenia a preto

sa budú uvažovať viaceré varianty vstupnej teploty, pričom jej nárast nie je okamžitý, ale uvažuje sa nelineárny nábeh (viď obrázok 23).



Obrázok 19

Tvar a rozmery prívodných výustiek

Výtoková rýchlosť vzduchu jednotlivými výustkami, pri maximálnej uvažovanej dodávke vzduchu do kabíny a deviatich výustkách bude 5,5 m/s.

7.5. Relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí pasažiera (pomocou CFD simulácie)

Pre vyhodnotenie tepelnej pohody je potrebné poznať aj rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí pasažiera, ktorá má vplyv na prenos tepla z povrchu ľudského tela a tiež je veľmi dôležitá pre stanovenie obťažovania prievanom (viď kapitola 6.1.3).

Vzhľadom na to, že program Theseus-FE je 1-D simulačný nástroj, nie je možné vyhodnocovať vektorovú veličinu akou je rýchlosť prúdenia vzduchu. Preto je nutné aplikovať nástroj, ktorým je možno dosiahnuť tohto požadovaného parametru. Za vhodný nástroj bol zvolený program STAR CCM+, ktorý pracuje so CFD kódom a umožňuje vyhodnocovať aj rýchlostné pole prúdenia vzduchu.

Pre túto simuláciu je použitý výrez z uvažovanej geometrie (viď obrázok 20) doplnený manekýnmi a sedačkami, ktorý postačuje na vyhodnotenie rýchlosti prúdenia vzduchu v okolí pasažiera .



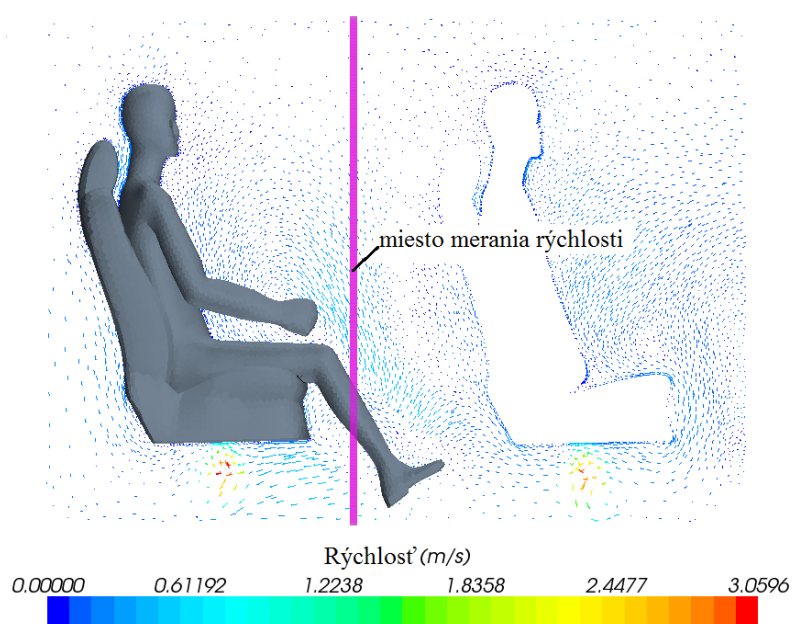
Obrázok 20

uvažovaná geometria pre CFD simuláciu s vygenerovanou výpočtovou sieťou

Pri tejto simulácii je našim hlavným cieľom zistiť len približné prúdenie vzduchu a preto neuvažujeme žiadne zateplenie kabíny do ktorej vháňame vzduch o rovnakej teplote ako je teplota okolitého vzduchu. Uvažované podmienky okolitého vzduchu sú teplota 20°C a tlak 98kPa.

Pre porovnanie prúdenia vzduchu v kabíne sú uvažované tri rôzne prietoky vzduchu do kabíny ($0,03\text{m}^3/\text{s}$, $0,060\text{m}^3/\text{s}$ a $0,09\text{m}^3/\text{s}$) cez prírodné výustky umiestnenými pod sedačkami.

Rýchlosť vzduchu v blízkosti pasažiera je vyhodnocovaná pred pasažierom po celej výške kabíny (vid' obrázok 21), kde je vytvorená meracia čiara.



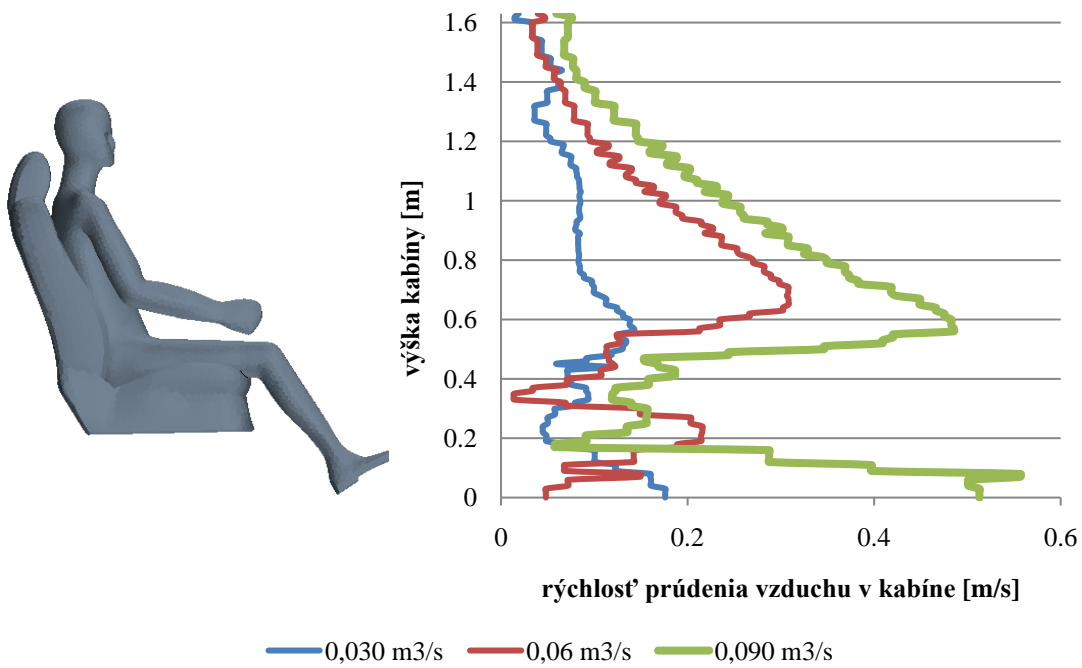
Obrázok 21

vektorové zobrazenie rýchlosti v rovine pozdĺž kabíny s vyznačeným miestom merania

Na obrázku 21 je vidieť vektorové rozloženie rýchlosti v rovine prechádzajúcej stredom pasažierov. Maximálna rýchlosť prúdenia je pod sedačkami, kde sa nachádzajú aj privádzacie výustky. Rozptyl privádzaného prúdu vzduchu nie je veľký a preto táto maximálna rýchlosť nebude pôsobiť priamo na pasažierov, pričom maximálny prietok vzduchu môže byť uvažovaný len na vyhriatie kabíny, kedy sa na palube nenachádzajú pasažieri. Na následné udržiavanie teploty postačí nižší prietok, ktorý bude riadený regulátorom.

Po ukončení všetkých troch prípadov simulácie (pre $0,03\text{m}^3/\text{s}$, $0,060\text{m}^3/\text{s}$ a $0,09\text{m}^3/\text{s}$) boli následne spracované a porovnané dáta rýchlostí prúdenia vzduchu v blízkosti pasažierov. Na obrázku 22 je priebeh rýchlosti pozdĺž meracej čiary (od podlahy až po strop). Maximálna rýchlosť sa nachádza zhruba v oblasti hrude, kde oblečený človek toto nepociťuje ako diskomfort. Citlivé časti tela na rýchlosť prúdenia vzduchu sú hlavne hlava a nohy. Hlava sa v tomto prípade sediaceho pasažiera nachádza vo výške približne 1,2 až 1,4 metra a nohy vo výške 0,1 až 0,5 metra, pričom rýchlosť prúdenia vzduchu v týchto oblastiach sa pohybuje priemerne okolo 0,15 až 0,2 m/s. Pre stanovenie tepelnej pohody a výpočet PMV a PPD indexu teda môžeme použiť strednú hodnotu rýchlosti prúdenia vzduchu v blízkosti

pasážierov o hodnote 0,2 m/s, ktorú budeme uvažovať ako referenčnú pre všetky varianty simulácie vyhrievania kabíny.



Obrázok 22
vykreslenie rýchlosti prúdenia vzduchu v mieste meracej čiary
(od podlahy až po strop)

8. Simulácia vykurovania kabíny

Pre zaistenie komfortného prostredia pre cestujúcich je podľa medzinárodných štandardov nevyhnutné dosiahnuť v kabíne teplotu vzduchu 21°C pred nastúpením pasažierov (FAR 25.831).

Vzhľadom na to, že uvažujeme vonkajšie prostredie pre extrémny chlad -30°C a normálne podmienky 15°C, potrebnú teplotu 21°C v kabíne bude potrebné zaistiť vykurovaním (privádzaním teplého vzduchu).

Čas simulácie je nastavený na 30 minút a sledujeme na akých hodnotách sa ustáli jednotlivé sledované veličiny pri variácii prietoku, teploty privádzaného vzduchu a zateplenia kabíny. Použitý simulačný nástroj Theseus-FE umožňuje priamo hodnotiť stav tepelnej pohody prostredníctvom PMV a PPD indexu za predpokladu zakomponovania tepelných manekýnov do geometrie. V našom prípade však uvažujeme geometriu bez osadených manekýnov, a preto je potrebné tieto indexy dopočítať podľa rovnice 5 a 9.

Na hodnotenie tepelnej pohody, a teda stanovenie PPD a PMV indexu je potrebné stanoviť nasledujúce parametre (viď kapitola 6):

M	- energetický výdaj,	[W/m ²]
W	- užitočný mechanický výkon (vonkajšia práca),	[W/m ²]
I _{cl}	- tepelný odpor odevu,	[m ² K/W]
f _{cl}	- pomer povrchu oblečeného človeka k povrchu nahého človeka,	[-]
t _a	- stredná teplota vzduchu,	[°C]
\bar{t}_r	- stredná radiačná teplota,	[°C]
v _{ar}	- relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu (voči ľudskému telu),	[m/s]
p _a	- parciálny tlak vodnej pary,	[Pa]
h _c	- súčiniteľ prestupu tepla konvekciou,	[W/m ² K]
t _{cl}	- teplota povrchu odevu,	[°C]

pričom program Theseus-FE, v ktorom je táto štúdia uskutočnená umožňuje v našom prípade sledovať len nasledujúce parametre:

- Stredná teplota vzduchu v kabíne
- Stredná radiačná (povrchová) teplota jednotlivých plôch (stien kabíny)
- Relatívna a merná vlhkosť

Teplotu povrchu odevu, súčiniteľ prestupu tepla, parciálny tlak vodnej pary [15] a celkovú strednú radiačnú teplotu je nutné dopočítať (viď rovnice 6, 7, 12, 13).

$$p_a = \frac{p}{\varphi \cdot \left(1 + \frac{0,622}{x}\right)} \quad (12)$$

Kde

p _a	- parciálny tlak vodnej pary,	[Pa]
p	- tlak okolitého vzduchu,	[Pa]
φ	- relatívna vlhkosť vzduchu,	[-]
x	- merná vlhkosť vzduchu,	[Pa]

Celková stredná radiačná teplota v kabíne sa stanoví ako priemerná hodnota povrchových teplôt vážená veľkosťou jednotlivých plôch (rovnica 13).

$$\bar{t}_R = \frac{t_1 \cdot S_1 + t_2 \cdot S_2 + t_3 \cdot S_3 + t_4 \cdot S_4 + t_5 \cdot S_5}{S} \quad (13)$$

Kde

t_1	- povrchová teplota okien,	[°C]
t_2	- povrchová teplota podlahy,	[°C]
t_3	- povrchová teplota bočných stien,	[°C]
t_4	- povrchová teplota strechy,	[°C]
t_5	- povrchová teplota dverí,	[°C]

S_1	= 1,46	- plocha okien,	[m ²]
S_2	= 7,8	- plocha podlahy,	[m ²]
S_3	= 10,6	- plocha bočných stien,	[m ²]
S_4	= 6,9	- plocha strechy,	[m ²]
S_5	= 0,837	- plocha dverí,	[m ²]
S	= 27,597	- suma jednotlivých plôch,	[m ²]

Zvyšné parametre sa uvažujú ako konštanty (tabuľka 5). Energetický výdaj M je stanovený na hodnotou 1,7met pre nástup pasažierov a 1met pre kľudné sedenie počas letu. Hodnoty energetických výdajov sú stanovené podľa typických energetických výdajov podľa príručky ASHRAE (viď príloha- tabuľka 8), ktoré sú závislé na činnosti človeka.

Odev pasažierov sa uvažuje s tepelným odporom I_{clo} , čo predstavuje, že budú mať oblečené spodné prádlo, košeľu, nohavice, sako, ponožky a topánky.

Jednotka tepelného odporu odevu $I_{clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ a pomer povrchu oblečeného človeka k povrchu nahého človeka f_{cl} sa stanoví výpočtom prostredníctvom rovnice 8. Mechanická práca človeka W sa uvažuje nulová.

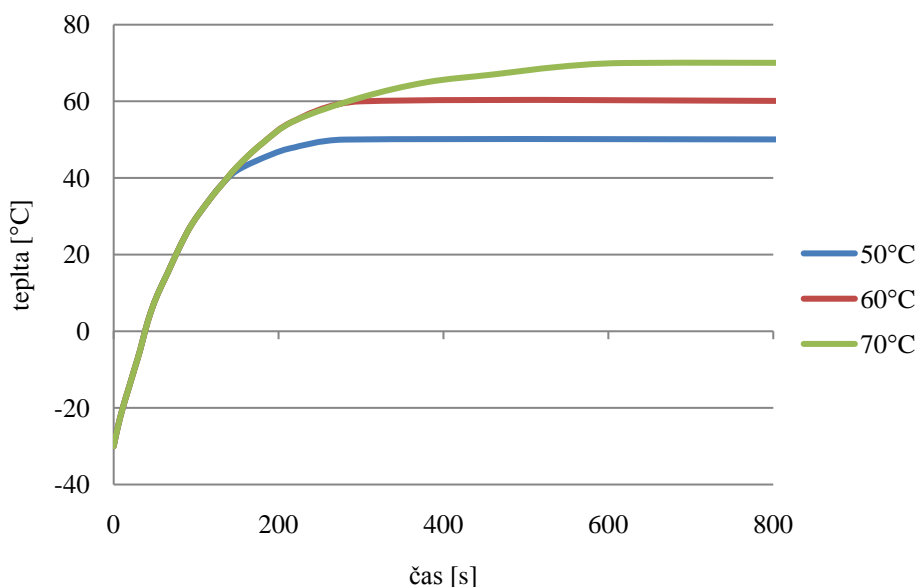
Tabuľka 5- hodnoty považované za konštantné počas hodnotenia stavu prostredia

Aktivita pasažierov	Odev	M	W	I_{cl}	f_{cl}	V_{ar}
	[clo]	[met]	[met]	[m ² K/W]	[-]	[m/s]
Nástup pasažierov	1	1,7	0	0,155	1,15	0,2
Letový stav (kľudné sedenie)	1	1	0	0,155	1,15	0,2

8.1. Umiestnenie lietadla v prostredí extrémnej zimy

Pri tejto variante externého prostredia sa uvažuje teplota -30°C a relatívna vlhkosť vzduchu 80% (viď tabuľka 3). Lietadlo je na letisku odstavené dlhšiu dobu, a teda vnútorné podmienky v kabíne sú rovnaké ako v okolitom prostredí. Do kabíny sa privádza teplý vzduch od kompresora motora (bleed air), ktorý je v určitom pomere zmiešavaný s vonkajším vzduchom a regulovaný na dosiahnutie požadovaného prietoku a teploty.

Teplota privádzaného vzduchu sa uvažuje jednotlivo 50°C , 60°C a 70°C pri prietokoch od $0,03\text{m}^3/\text{s}$ až po $0,1\text{m}^3/\text{s}$. Nábeh teploty vzduchu privádzaného do kabíny jednotlivými výstkami je postupný (nelineárny priebeh) a je vidieť na obrázku 23.



Obrázok 23

Nábehy teplôt privádzaného vzduchu

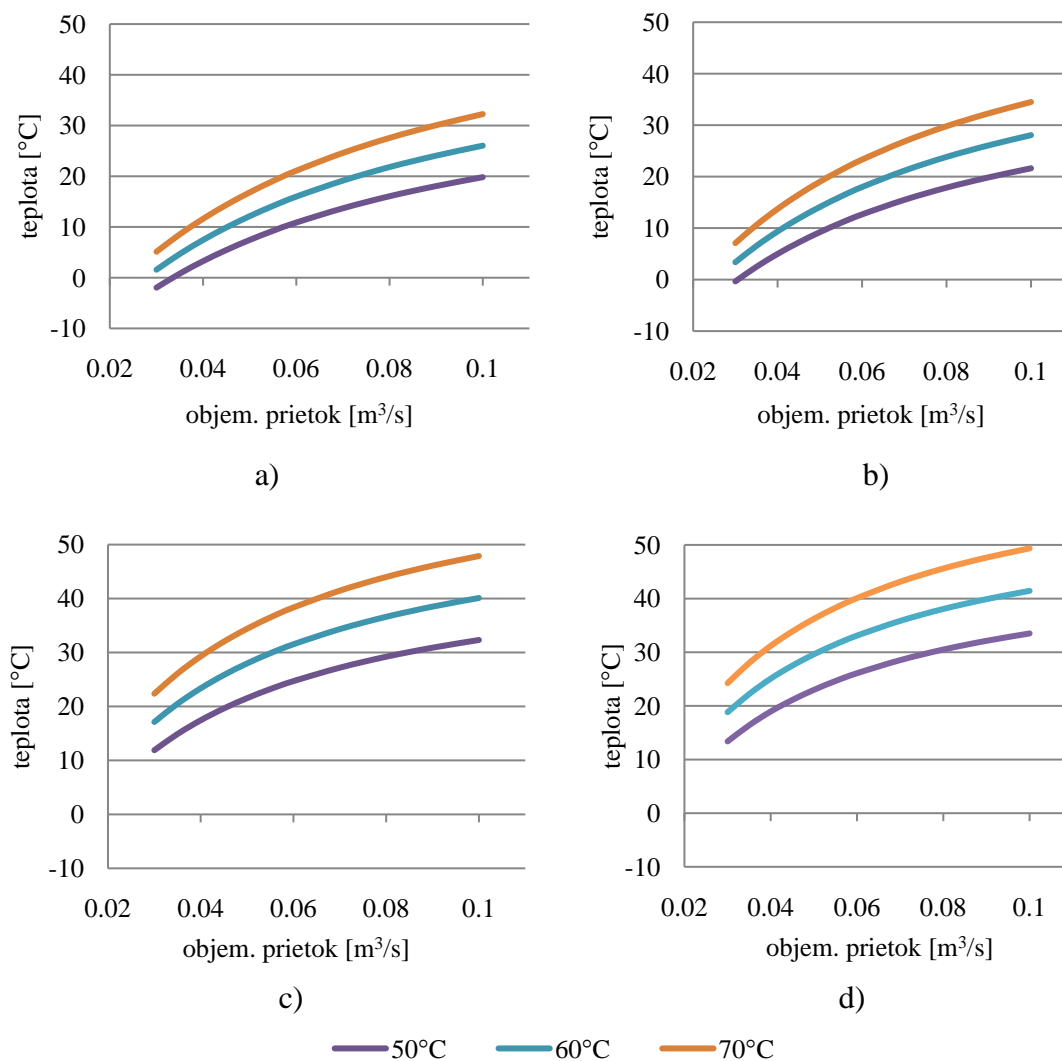
8.1.1. Vyhodnotenie stavu prostredia v kabíne

Po ustálení teploty vstupného vzduchu je do kabíny privádzaný vzduch o konštantnej teplote (viď obrázok 23) a po dosiahnutí rovnováhy tepelných strát s teplom dodaným do kabíny sa ustáli aj celková teplota v kabíne na určitej hodnote, ktorá závisí na množstve privádzaného vzduchu, teplote a druhu zateplenia (obrázok 24).

Laboratórne zateplenie *D*, ktoré je reálne aplikované na makete má veľmi dobré tepelne izolačné vlastnosti ako je možné vidieť na obrázku 24d. Teplota vzduchu v kabíne dosahuje vyšších teplôt než v ostatných variantách zateplenia za rovnakých podmienok privádzaného vzduchu. Nevýhoda tejto varianty je, že neobsahuje hlukovú izoláciu (viď tabuľka 2), a teda nemôže byť použitá v reálnom lietadle, kde by bol za prevádzky značný prenos hluku a vibrácií do kabíny.

Zateplenie *C* sa svojimi tepelne izolačnými vlastnosťami blíži laboratórnemu zatepleniu (obrázok 15), ale jeho hmotnosť je značne vyššia z dôvodu použitia hlukovej izolácie, ktorá má vyššiu hustotu (viď tabuľka 2).

Z obrázku 24 je tiež zrejmé, že pri všetkých variantách zateplenia sa v kabíne dosiahne požadovanej teploty vzduchu 21°C s výnimkou minimálneho zateplenia A, kde sa pri teplote privádzaného vzduchu 50°C vyhreje kabína len na 20°C pri maximálnom uvažovanom prietoku vzduchu do kabíny 0,1m³/s. Čas za ktorý sa dosiahne teploty 21°C pri jednotlivých zatepleniach a teplotách privádzaného vzduchu v závislosti na prietoku vzduchu je vidieť na obrázku 25.



Obrázok 24

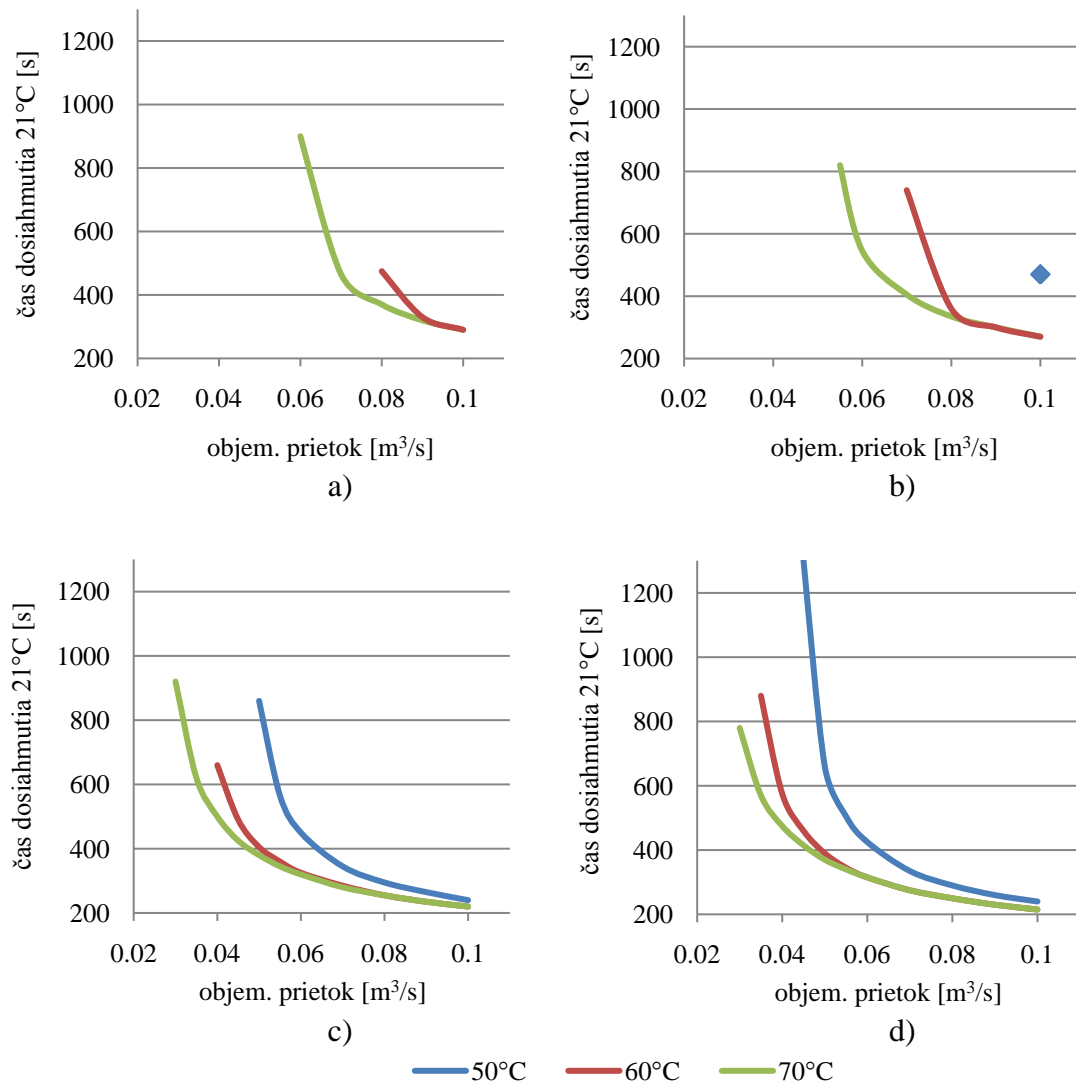
Maximálne teploty vzduchu dosiahnuté v kabíne pri prietokoch od 0,03 do 0,1 m³/s a jednotlivých teplotách privádzaného vzduchu (50°C, 60°C a 70°C).

- a) Zateplenie A- minimálne
- b) Zateplenie B- stredné
- c) Zateplenie C- maximálne
- d) Zateplenie D- laboratórne

Rôzne varianty zateplenia a teploty privádzaného vzduchu majú vplyv nie len na hodnotu dosiahnutej vnútornej teploty, ale takisto aj na rýchlosť vykúrenia kabíny, pričom pri použití minimálneho zateplenia nie je možné vykúriť vnútorné prostredie kabíny na požadovanú teplotu pri prívode vzduchu s teplotou 50°C. Na obrázku 25b je vidieť, že pri teplote privádzaného vzduchu 50°C sa požadovaných 21°C v kabíne dosiahne až pri maximálnom

prietoku $0,1\text{m}^3/\text{s}$ v čase 470sekúnd, pričom maximálna dosiahnutá teplota za 30 min sa tiež pohybuje tesne nad 21°C .

Z týchto závislostí vyplýva, že s kvalitnejším zateplením a vyššou teplotou privádzaného vzduchu sa čas potrebný na vykúrenie kabíny znižuje a napríklad u maximálneho zateplenia sme schopný pri maximálne uvažovanom prietoku privádzaného vzduchu vykúriť kabínu na 21°C do približne 250 sekúnd. Tento výsledok síce splňuje medzinárodne štandardy, ale je to zbytočne rýchle a energeticky náročné vyhrievanie pretože čím viac vzduchu sa naraz odoberá z kompresora motora, tým viac sa znižuje jeho výkon, ktorý je potrebný pri štarte. Preto sa budeme snažiť nájsť kompromis medzi objemovým prietokom privádzaného vzduchu, teplotou privádzaného vzduchu a variantou zateplenia kabíny.



Obrázok 25

Čas dosiahnutia strednej teploty vzduchu 21°C v kabíne pri prietokoch od $0,03$ do $0,1\text{m}^3/\text{s}$ a jednotlivých teplotách privádzaného vzduchu (50°C , 60°C a 70°C).

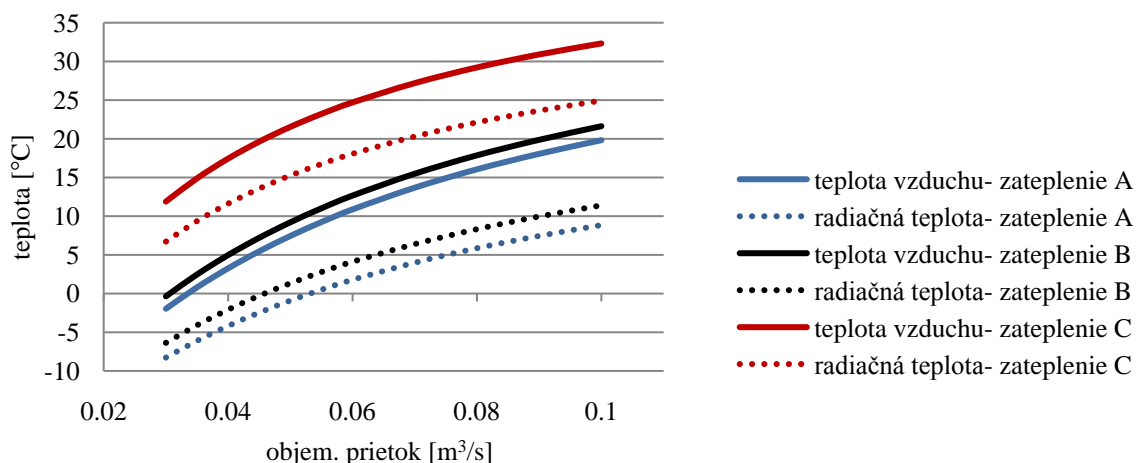
- a) Zateplenie A- minimálne
- b) Zateplenie B- stredné
- c) Zateplenie C- maximálne
- d) Zateplenie D- laboratórne

8.1.2. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne pri nástupe pasažierov

Nástup pasažierov odpovedá energetickému výdaju 1,7 met, pri ktorom dochádza k produkcii tepla približne 100W/m^2 z povrchu tela cestujúcich. Pre zaistenie tepelnej rovnováhy je podľa medzinárodných štandardov potrebné dosiahnuť teplotu vzduchu 21°C , pri ktorej by mal nastať tepelný komfort. Na vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne slúžia činitele PMV a PPD, ktoré popisujú tepelný komfort a stanovia percento nespokojných ľudí so stavom prostredia (viď kapitola 6). Použitý simulačný nástroj umožňuje priamo výpočet PMV a PPD indexu za podmienky zakomponovania manekýnov do sledovanej geometrie a ich definovanie. V našom prípade je ale použitá geometria bez manekýnov, čo znamená, že indexy PMV a PPD je nutné dopočítať pomocou potrebných parametrov ktoré sme schopní zo simulácie získať. Týmito parametrami sú:

- Stredná teplota vzduchu v kabíne
- Stredná radiačná (povrchová) teplota jednotlivých plôch (stien kabíny)
- Relatívna a merná vlhkosť

Jednotlivé parametre získané zo simulácie je potrebné ešte upraviť, prepočítať a následne ich použiť pre výpočet jednotlivých indexov tepelného komfortu (postup výpočtu je naznačený v kapitole 8).



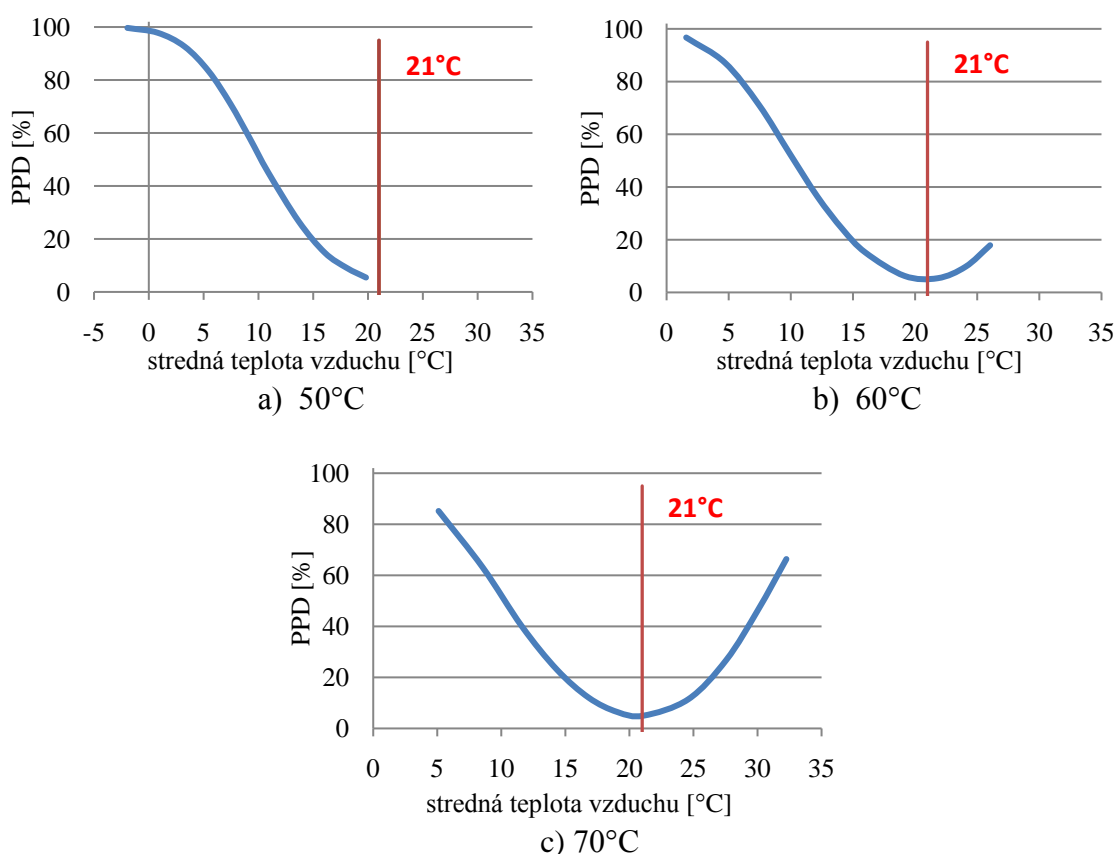
Obrázok 26

Povrchová (radiačná) teplota a teplota vzduchu v závislosti na prietoku privádzaného vzduchu pre rôzne varianty zateplenia a prietoku privádzaného vzduchu s teplotou 50°C

Hlavným parametrom, z ktorého sa v tomto prípade stanovenia tepelného stavu vychádza je stredná teplota vzduchu v kabíne, ktorá by pri nástupe mala podľa medzinárodných štandardov dosahovať hodnotu približne 21°C . Toto sme vo väčšine prípadov schopní dosiahnuť. Ďalším veľmi dôležitým parametrom ovplyvňujúcim tepelnú pohodu pasažierov je radiačná teplota, respektíve povrchová teplota okolitých stien, ktorá pri nízkej hodnote zvyšuje pocitový chlad a naopak pri vyššej hodnote zvyšuje pocitové teplo vplyvom radiačného pôsobenia na človeka. V našom prípade ohrievame v tejto variante simulácie vnútorné prostredie kabíny z počiatočných -30°C , pričom povrchová teplota stien v kabíne je vždy nižšia než teplota vzduchu a jej veľkosť závisí na variante použitej tepelnej izolácie, teplote a objemovom prietoku privádzaného vzduchu (viď obrázok 26), kde zateplenie A predstavuje minimálne, B stredné a C maximálne uvažované zateplenie kabíny.

Z relatívnej a mernej vlhkosti vzduchu zistenej pri simulácii sme schopní spočítať parciálny tlak vodnej pary p_a vo vzduchu podľa rovnice 12, pričom tlak okolitého prostredia uvažujeme $p=98kPa$. Parciálny tlak ovplyvňuje teplo prenesené do okolia vplyvom difúzie vlhkosti z povrchu pokožky a latentným teplom dýchaním. Na výpočet PMV indexu je ďalej potrebné poznať povrchovú teplotu oblečenia človeka t_{cl} a súčiniteľ prestupu tepla konvekciou h_{cl} , ktoré sa musia počítať iteratívne (pomocou riešiteľa v programe Microsoft Office Excel) z rovnice 6 a rovnice 7. Tepelný odpor odevu I_{cl} , energetický výdaj M a relatívnu rýchlosť prúdenia vzduchu v okolí človeka v_{ar} uvažujeme ako konštanty (viď tabuľka 5).

Percentuálny podiel nespokojných ľudí s dosiahnutými podmienkami v prostredí kabíny (PPD index) sa stanoví pomocou rovnice 9. Pre zaistenie komfortných podmienok by sa PPD index mal podľa príručky ASHRAE pohybovať v rozmedzí 5% až 20%. Minimálna hodnota 5% sa uvádza z dôvodu, že vždy sa nájde určité percento ľudí nespokojných s danými podmienkami a treba s tým pri vyhodnocovaní počítať, to znamená, že aj keď PMV index je rovný nule, tak PPD index je 5%.



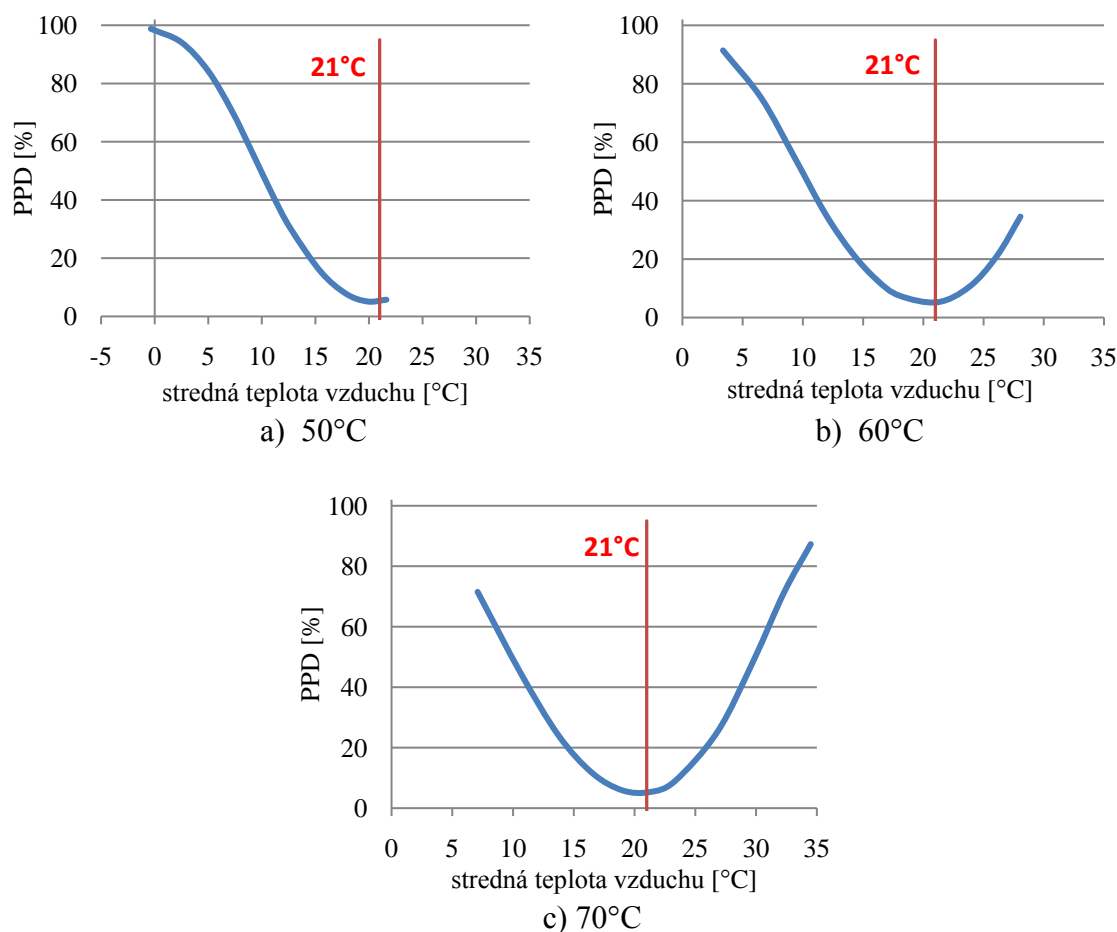
Obrázok 27

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri použitej variante zateplenia A- **minimálne**

- Teplota privádzaného vzduchu 50°C
- Teplota privádzaného vzduchu 60°C
- Teplota privádzaného vzduchu 70°C

Na obrázku 27, 28, 29 a 30 je uvedený priebeh PPD indexu v závislosti na teplote vzduchu dosiahnutej a ustálenej v kabíne za 30 minút, pričom sa uvažuje oblečenie pasažierov 1clo

a ich energetický výdaj na úrovni 1,7 met. Červenou farbou je vyznačená teplota 21°C, na ktorej by sa vzduch v kabíne mal približne udržiavať pri nástupe pasažierov. Z uvedených grafov je zrejmé, že tepelnej pohody sa dosahuje v relatívne širokom pásme teplôt.



Obrázok 28

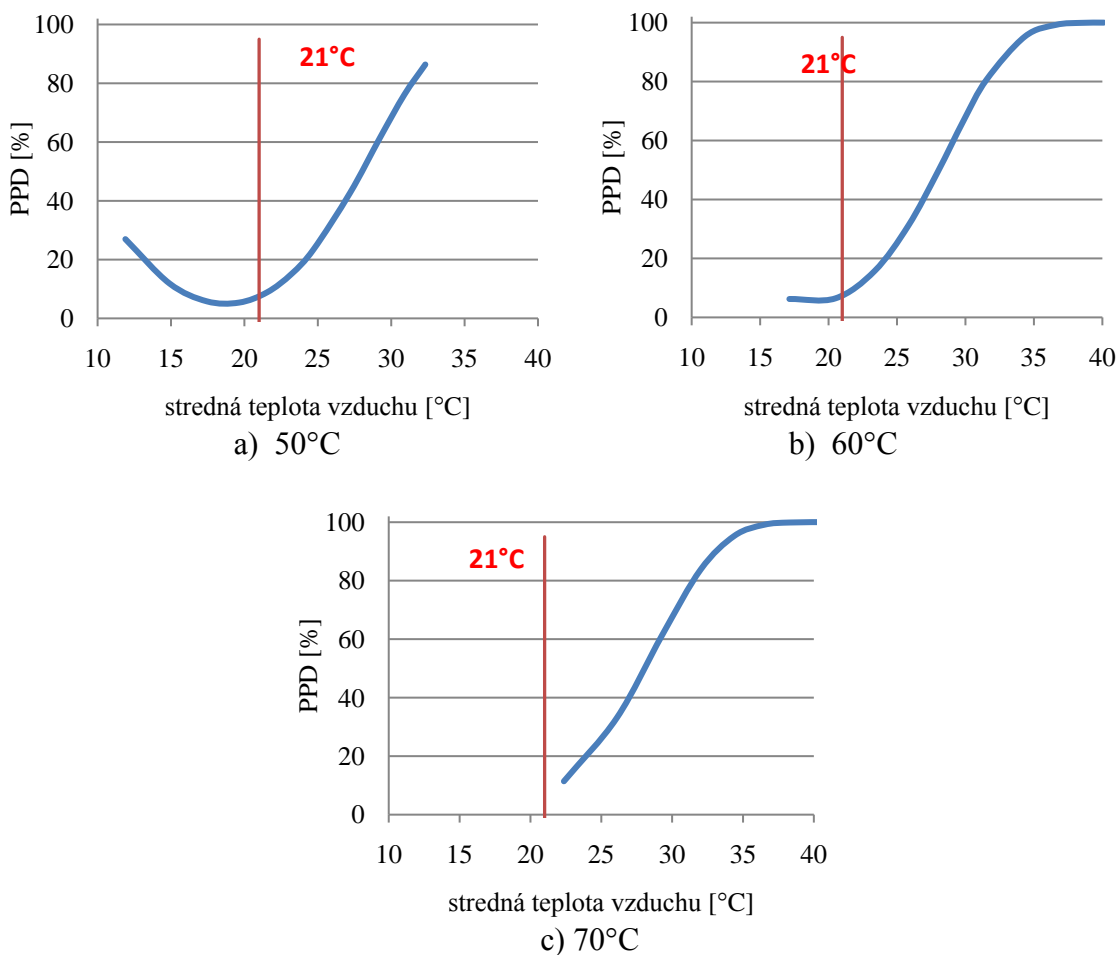
*Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri použitej variante zateplenia **B- stredné***

- a) Teplota privádzaného vzduchu 50°C
- b) Teplota privádzaného vzduchu 60°C
- c) Teplota privádzaného vzduchu 70°C

Pri zateplení *A- minimálne* a *B- stredné* sa dostaneme pod 20% hranicu nespokojných pasažierov v rozmedzí teplôt 16°C až 26°C, zatiaľ čo pri zateplení *C- maximálne* a *D- laboratórne*, ktoré majú výrazne lepšie izolačné vlastnosti v porovnaní so zateplením *A* a *B*, sa pod 20% hranicu nespokojných pasažierov dostaneme pri teplote vzduchu v kabíne v rozmedzí 13°C až 22°C. Tento rozdiel v rozsahu teplôt je spôsobený vyššou povrchovou teplotou okolitých stien v kabíne v dôsledku použitia lepšej tepelnej izolácie v prípade zateplenia. Jednotlivé dosahované teploty sú tiež závislé na prietoku privádzaného vzduchu do kabíny. Čím vyšší objemový prietok privádzaného teplého vzduchu, tým vyššia dosiahnutá teplota vnútorného vzduchu a povrchu vnútorných stien v kabíne (obrázok 26).

Z priebehov teploty v kabíne v závislosti na indexe tepelnej pohody je tiež zrejmé, že požadovaného tepelného stavu v kabíne za podmienok extrémnej zimy -30°C je možné dosiahnuť výberom kvalitnej izolácie o dostatočnej hrúbke, privádzaním vzduchu o vyššej

tepote alebo vyšším objemovým prietokom teplého vzduchu do kabíny. Tieto jednotlivé faktory je potrebné zvoliť s ohľadom na zaistenie čo najnižšej hmotnosti tepelnej izolácie a minimálneho odberu teplého vzduchu z kompresora motora, kde každý odber znižuje jeho výkon.



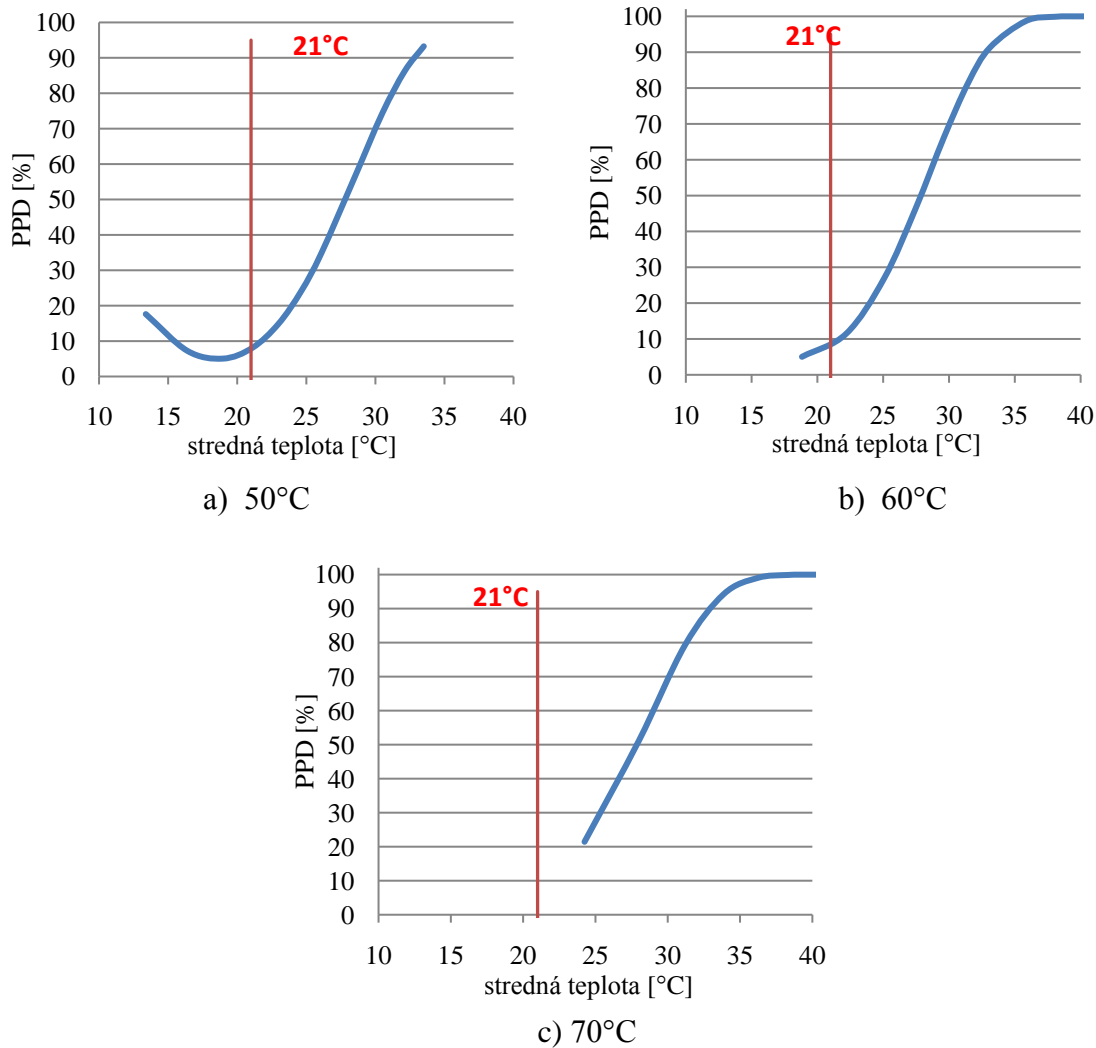
Obrázok 29

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri použitej variante zateplenia C- maximálne

- a) Teplota privádzaného vzduchu 50°C
- b) Teplota privádzaného vzduchu 60°C
- c) Teplota privádzaného vzduchu 70°C

Pri použití maximálnej izolácie postačí na dosiahnutie teploty 21°C aj nižšia teplota privádzaného vzduchu pri jeho nižšom objemovom prietoku (obrázok 29). Avšak pri použití teploty privádzaného vzduchu 70°C sa vnútorná teplota neustáli na 21°C ani pri najnižšom uvažovanom prietoku vzduchu do kabíny a je vždy vyššia, pričom podmienka tepelnej pohody ($PPD < 20\%$) je stále splnená. Pri minimálnom zateplení nie sme schopní prívodom vzduchu o teplote 50°C a maximálnom objemovom prietoku dosiahnuť požadovanú teplotu v kabíne z dôvodu nižších tepelne izolačných vlastností použitej izolácie, zatiaľ čo pri teplote privádzaného vzduchu 70°C dosahujeme teplotu 21°C v kabíne už pri prietoku približne $0,06\text{m}^3/\text{s}$ (obrázok 31, obrázok 27c).

Pri použití laboratórneho zateplenia (viď obrázok 30), ktoré je možné aplikovať len na výskumnú maketu umiestnenú v laboratóriu z dôvodu absencie hlukovej izolácie, sme schopní dosiahnuť požadovanú teplotu 21°C pri prívode vzduchu s teplotou 50°C a prítoku približne 0,45m³/s a taktiež vzduchu s teplotou 60°C a prítoku 0,35m³/s. Teplota 70°C na prívode je už moc vysoká vzhľadom na ustálenú teplotu 24°C dosiahnutú za 30 minút pri minimálnom prívode vzduchu (obrázok 30c).

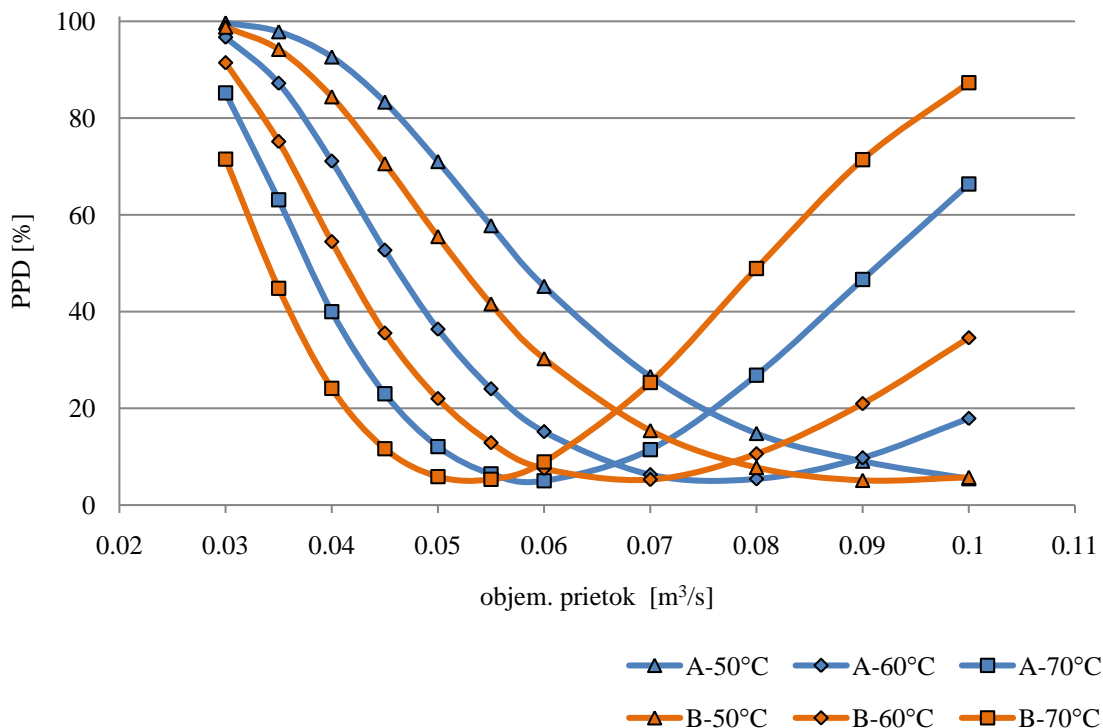


Obrázok 30

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri použitej variante zateplenia D- laboratórne

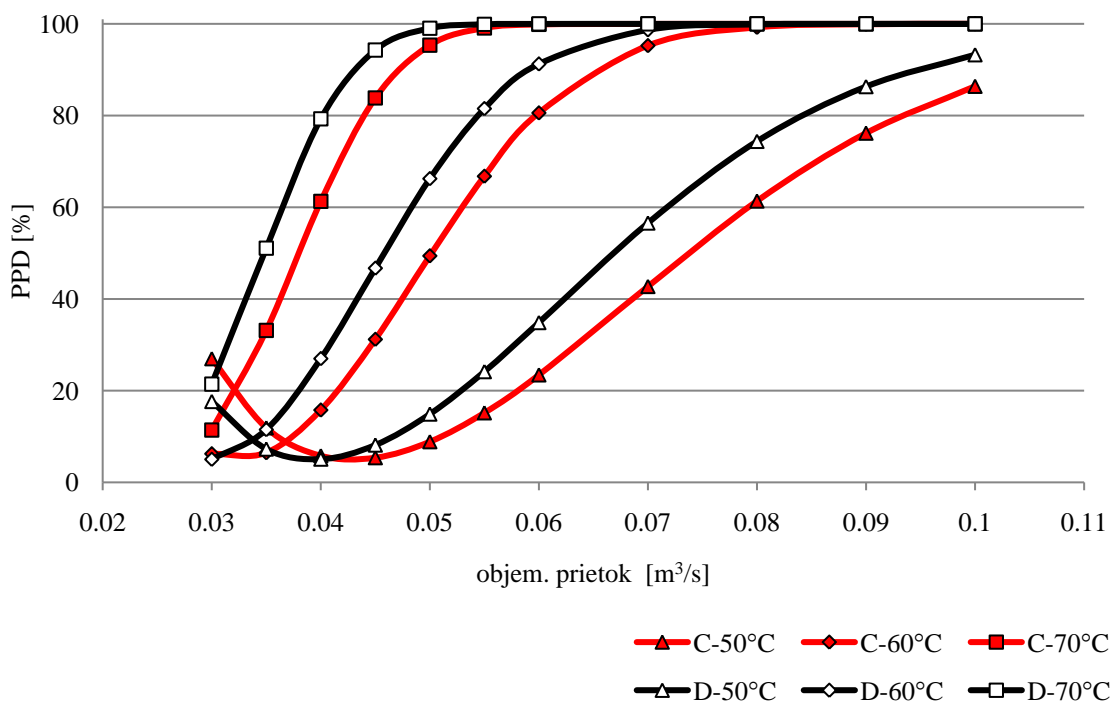
- a) *Teplota privádzaného vzduchu 50°C*
- b) *Teplota privádzaného vzduchu 60°C*
- c) *Teplota privádzaného vzduchu 70°C*

Na obrázku 31 a 32 je vidieť ako sú posunuté jednotlivé priebehy PPD indexov v závislosti na prítoku privádzaného vzduchu a je možné z nich odčítať pri akom prítoku sa dosahuje pohody pri jednotlivých použitých zatepleniach a vstupných teplotách. Napríklad z obrázku 32 je zrejmé, že pri použití kvalitnejšej izolácie sa dosahuje pohody pri nižších prítokoch privádzaného vzduchu, na druhú stranu maximálna izolácia C je od strednej izolácie B ťažšia o približne 6kg a od minimálnej A o približne 10kg (tabuľka 2).



Obrázok 31

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri variantách zateplenia A-minimálne, B-stredné a variantách privádzanej teploty 50°C, 60°C a 70°C



Obrázok 32

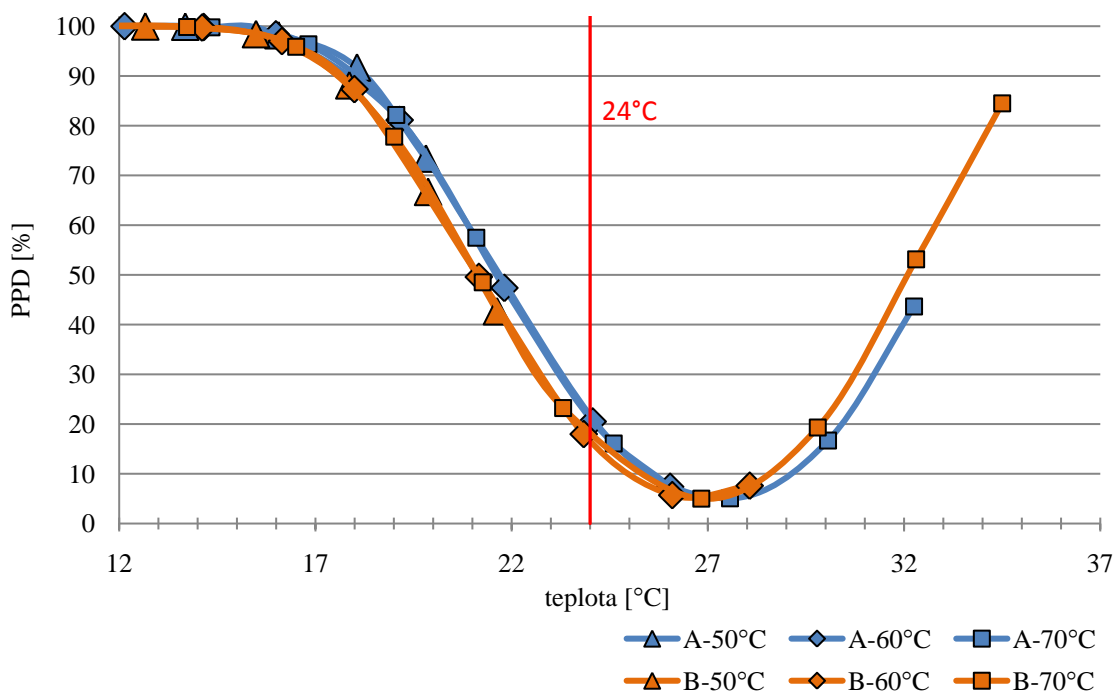
Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri variantách zateplenia C-maximálne, D-laboratórne a variantách privádzanej teploty 50°C, 60°C a 70°C

8.1.3. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne počas letového režimu

Aktivita pasažierov počas letu odpovedá hodnote 1met, čo predstavuje kľudné sedenie. Pri nastupovaní na palubu ľudské telo produkuje viac tepelnej energie z dôvodu zvýšenej fyzickej aktivity pri chôdzi, manipulácii s batožinou a inými aktivitami spojených s nástupom. Tento energetický výdaj odpovedá hodnote približne 1,7met a tomu musí odpovedať aj stav vnútorného prostredia, aby teplo odvádzané z povrchu človeka bolo v tepelnej bilancii s produkovaným teplom. Po určitej chvíli sedenia po nastúpení pasažierov klesne ich energetický výdaj na hodnotu reflektujúcu kľudné sedenie (1met), čo znamená, že podmienky v prostredí na zaistenie tepelnej pohody sa musia zmeniť.

Podľa medzinárodných štandardov FAR by mala teplota vzduchu v kabíne počas letu dosahovať hodnotu približne 24°C pre zaistenie tepelného komfortu pasažierov. Hodnota 24°C v porovnaní s 21°C počas nastupovania odpovedá nižšiemu energetickému výdaju, ktorý musí byť kompenzovaný zvýšením teploty okolitého prostredia na zaistenie tepelnej rovnováhy.

Na obrázku 33 a obrázku 34 sú uvedené priebehy PPD indexu v závislosti na teplote pre rôzne druhy zateplenia, pričom je zrejmé, že v prípade minimálneho a stredného zateplenia (obrázok 33) sa stav tepelnej pohody nachádza pri vyššej teplote než stanovujú medzinárodné štandardy. Teplota 24°C sa v tomto prípade nachádza na hranici 20% nespokojnosti zo strany pasažierov.

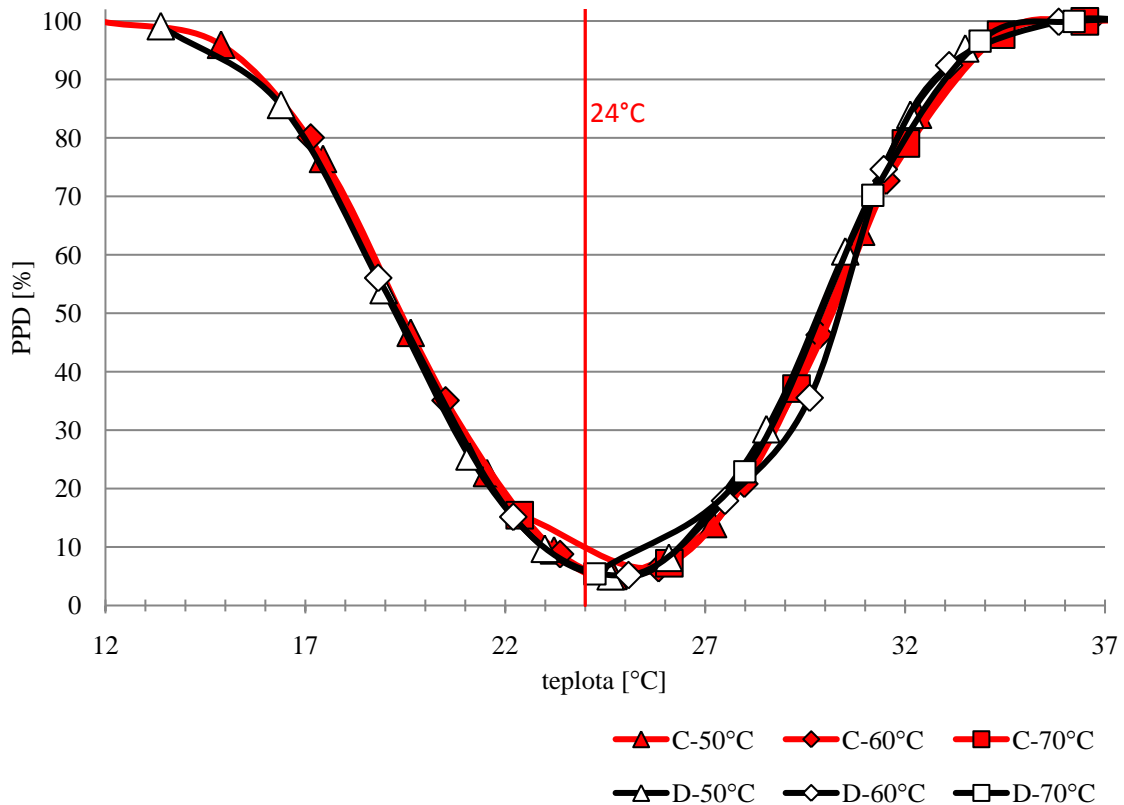


Obrázok 33

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri variantách zateplenia A- minimálne, B- stredné a uvažovanej teplote privádzaného vzduchu 50°C, 60°C a 70°C

Zatiaľ čo maximálne a laboratórne zateplenie (obrázok 34) splňuje požiadavky FAR na teplotu vzduchu v kabíne pri zaistení tepelného komfortu. Dôvodom vyšších teplôt vzduchu

potrebných pre zaistenie tepelnej pohody je nižšia radiačná teplota (povrchová teplota okolitých stien) z titulu menšieho zateplenia.

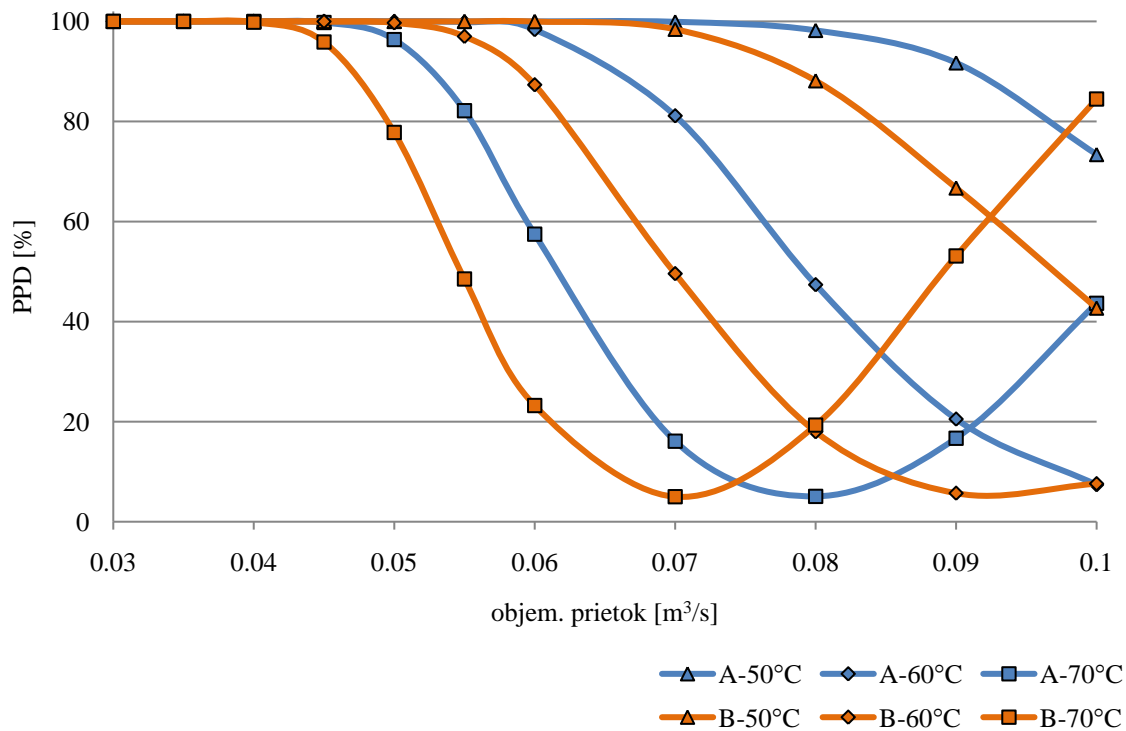


Obrázok 34

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri variantách zateplenia C-maximálne, D-laboratórne a variantách privádzanej teploty 50°C, 60°C a 70°C

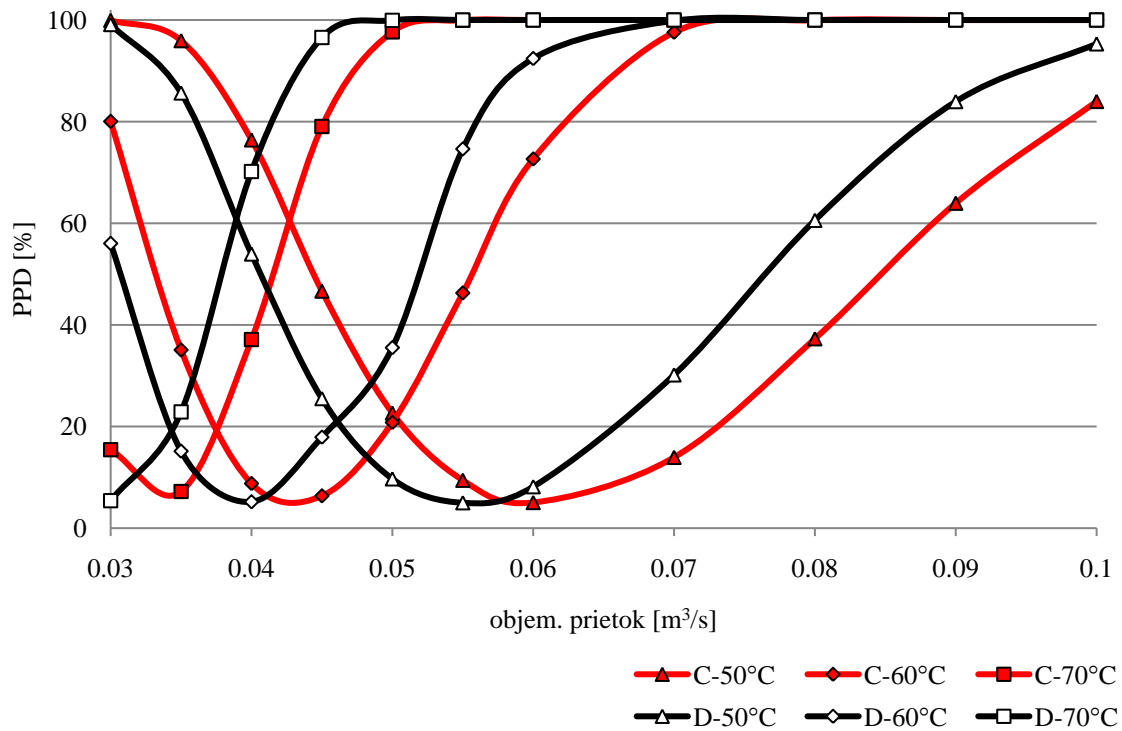
Priebehy PPD indexov v závislosti na dosiahnutej teplote v kabíne podávajú informáciu o tom pri akých teplotách je možné prevádzkovať vnútorné prostredie kabíny aby pasažieri nepocíťovali nadmerný chlad alebo teplo. Veľmi dôležitým parametrom je však aj hodnota objemového prietoku vzduchu potrebného na zaistenie daného komfortného stavu. Na obrázku 35 a obrázku 36 je priebeh PPD indexu v závislosti na objemovom prietoku privádzaného vzduchu pre uvažované varianty zateplenia.

Je zrejmé, že pri menšej hrúbke zateplenia je potrebné na zaistenie komfortného stavu vyšších objemových prietokov privádzaného teplého vzduchu (obrázok 35), zatiaľ čo kvalitnejšie zateplenie (obrázok 36) vedie k nižším prietokom, a tým aj k nižšiemu riziku vzniku nespokojnosti z dôvodu obťažovania prievanom. Taktiež sa zníži odber teplého vzduchu od kompresora motora (bleed air), čím sa navýši užitočný výkon motorov pre samotný let.



Obrázok 35

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri variantách zateplenia A-minimálne, B-stredné a variantách privádzanej teploty 50°C, 60°C a 70°C



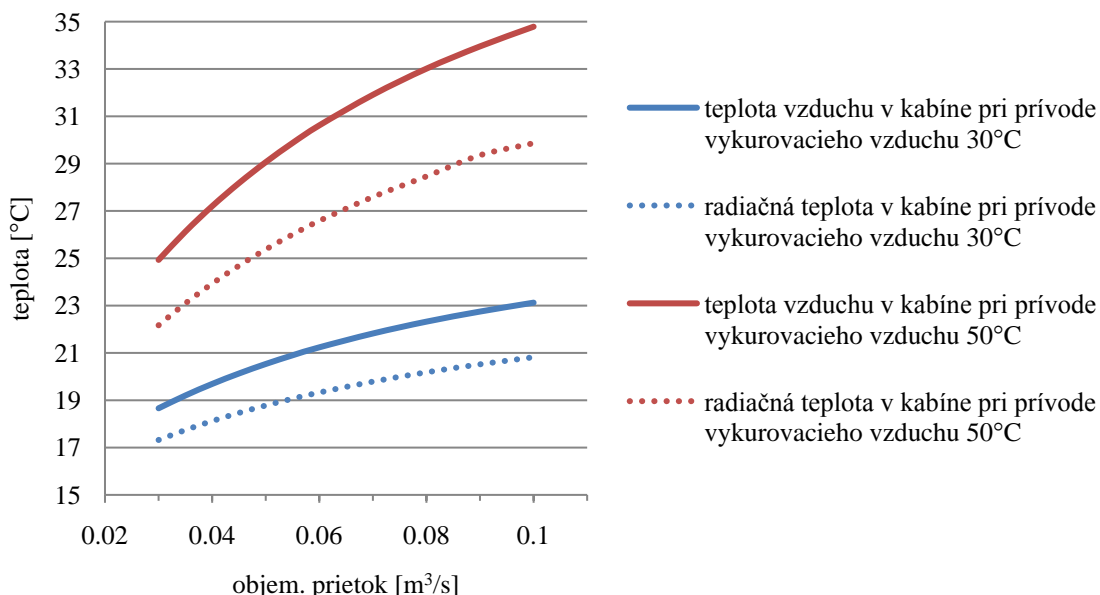
Obrázok 36

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri variantách zateplenia C-maximálne, D-laboratórne a variantách privádzanej teploty 50°C, 60°C a 70°C

8.2. Umiestnenie lietadla v prostredí s normálnymi podmienkami

Pri tejto variante externého prostredia sa uvažuje vonkajšia teplota 15°C a relatívna vlhkosť vzduchu 70% podľa medzinárodného atmosférického štandardu. Opäť sa predpokladá odstavené lietadlo dlhšiu dobu na letisku v daných podmienkach, a teda vnútorné podmienky v kabíne sú rovnaké ako v okolitom prostredí. Do kabíny sa privádza teplý vzduch od kompresora motora (bleed air), ktorý je v určitom pomere zmiešavaný s vonkajším vzduchom a regulovaný na dosiahnutie požadovaného prietoku a teploty.

Pri vonkajšej teplote 15°C nie je potrebné do kabíny privádzať na jej vyhriatie na 21°C vzduch o takých vysokých teplotách ako v predošlom prípade, keď sme uvažovali externú teplotu -30°C . Pri tejto variante je už aj teplota privádzaného vzduchu 50°C moc vysoká, čo je evidentné z obrázku 37, kde pri minimálnom uvažovanom zateplení sa prívodom vzduchu s teplotou 50°C dostávame už pri najnižšom objemovom prietoku privádzaného vzduchu na vysokú a nevyhovujúcu strednú teplotu v kabíne. Z tohto dôvodu je v uvažovanej variante externého prostredia s normálnymi podmienkami predpokladaný len prívod vzduchu s teplotou 30°C , ktorý je postačujúci na dosiahnutie požadovanej teploty v kabíne (viď obrázok 37).



Obrázok 37

Povrchová (radiačná) teplota a teplota vzduchu v kabíne v závislosti na prietoku privádzaného vzduchu pri variante zateplenia A- minimálne

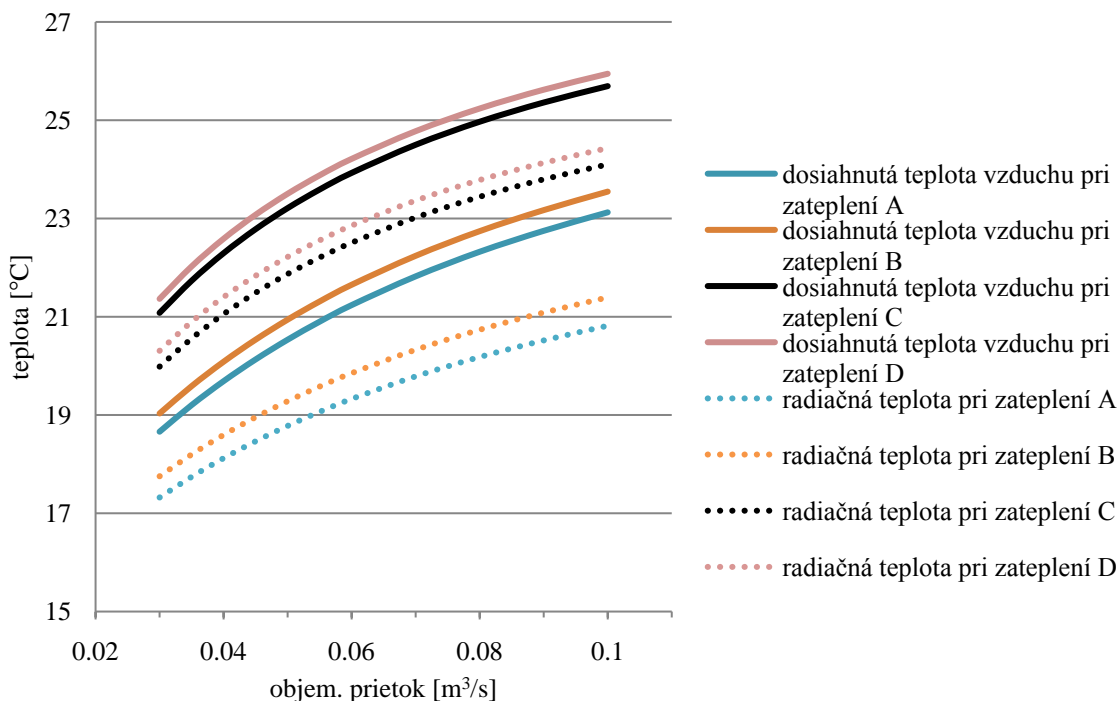
Je tiež možné použiť aj prívod vzduchu s nižšou teplotou, ale v tom prípade sa musí uvažovať väčšie zateplenie než minimálne, pretože tohto zateplenia by bolo považované za nedostačujúce z hľadiska dosiahnutia požadovanej teploty vzduchu v kabíne 21°C .

V následnej štúdií a vyhodnocovaní prostredia v kabíne je preto uvažovaný prívod vykurovacieho vzduchu len pri teplote 30°C . Taktiež bude toto vyhodnocovanie prebiehať pre stav kabíny pripravený na nástup s energetickým výdajom pasažierov 1,7met a letový stav s energetickým výdajom 1met.

8.2.1. Vyhodnotenie stavu prostredia v kabíne

Po prívode vykurovacieho vzduchu sa do 30minút ustáli stredná teplota vzduchu v kabíne na určitej konštantnej hodnote (dosiahne sa rovnováhy medzi tepelnými stratami a teplom dodaným do kabíny), ktorá závisí na množstve privádzaného vzduchu, teplote a druhu zateplenia.

Na obrázku 38 sú vidieť priebehy maximálnych teplôt vzduchu a radiačných teplôt okolitých plôch dosiahnutých v kabíne po 30 minútach prívodu vykurovacieho vzduchu. Teploty dosiahnuté pri minimálnom a strednom zateplení sú veľmi podobné rovnako ako v prípade maximálneho a laboratórneho zateplenia. Je to spôsobené podobnými tepelnými vlastnosťami zateplenia v jednotlivých prípadoch z čoho plynie aj podobnosť v stratách u jednotlivých dvojíc zateplení A,C a C,D (viď obrázok 15).



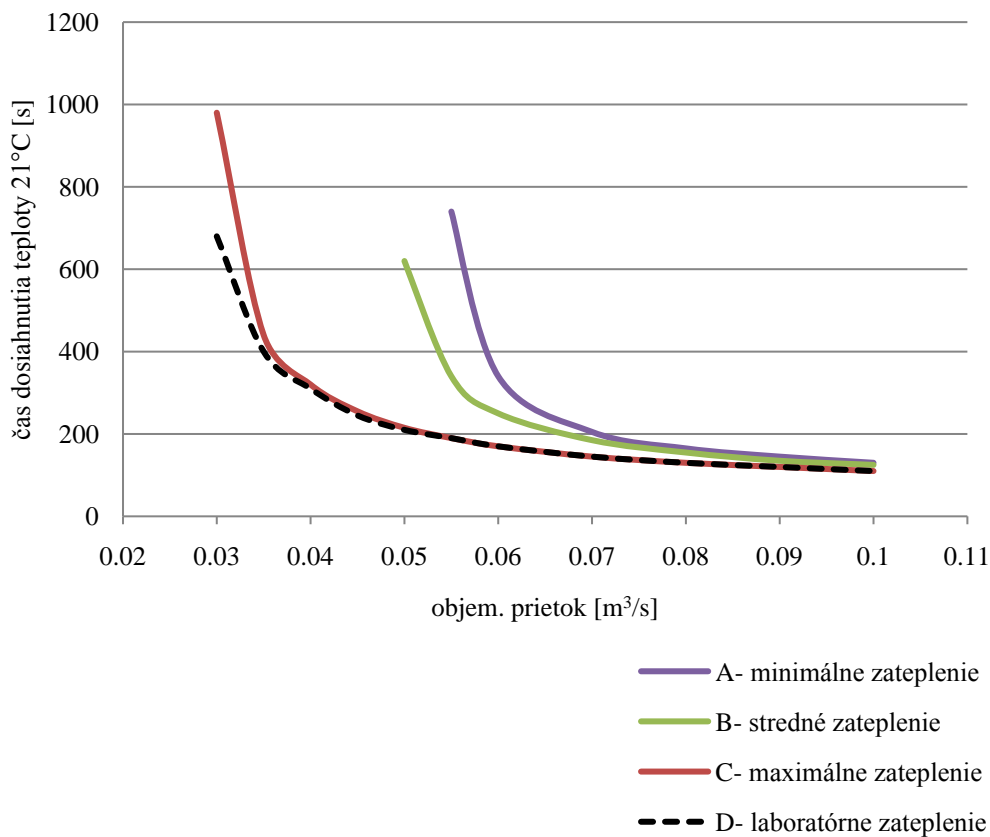
Obrázok 38

Maximálne teploty vzduchu a radiačné teploty dosiahnuté v kabíne pri prietokoch od 0,03 do 0,1 m³/s a teplote privádzaného vzduchu 30°C

- A- minimálne zateplenie
- B- stredné zateplenie
- C- maximálne zateplenie
- D- laboratórne zateplenie

Jednotlivé varianty zateplenia majú vplyv nie len na výšku dosiahnutej teploty v kabíne, ale taktiež na rýchlosť dosiahnutia požadovanej teploty 21°C. Časové priebehy dosiahnutia požadovanej teploty v závislosti na objemovom prietoku privádzaného vzduchu sú znázornené na obrázku 39. Je zrejmé, že pri minimálnom a strednom zateplení je možné dosiahnuť teplotu 21°C až od objemového prietoku približne 0,055 m³/s zatiaľ čo pri maximálnom a laboratórnom zateplení sa teplota 21°C dosahuje už pri minimálne uvažovanom objemovom prietoku 0,03m³/s. Z pohľadu nižších energetických nárokov na zaistenie požadovanej teploty je preto výhodnejšie maximálne zateplenie, keďže už pri

minimálnom prietoku dosahujeme 21°C za približne 16 minút. Sú teda požadované nižšie energetické nároky na prívod vzduchu a v konečnom dôsledku sa z kompresora motora odoberá menej teplého vzduchu (bleed air), čo neznižuje výkon motorov vo veľkej miere.



Obrázok 39

Čas dosiahnutia strednej teploty vzduchu 21°C v kabíne pri prietokoch od 0,03 do 0,1 m³/s a jednotlivých uvažovaných zatepleniach

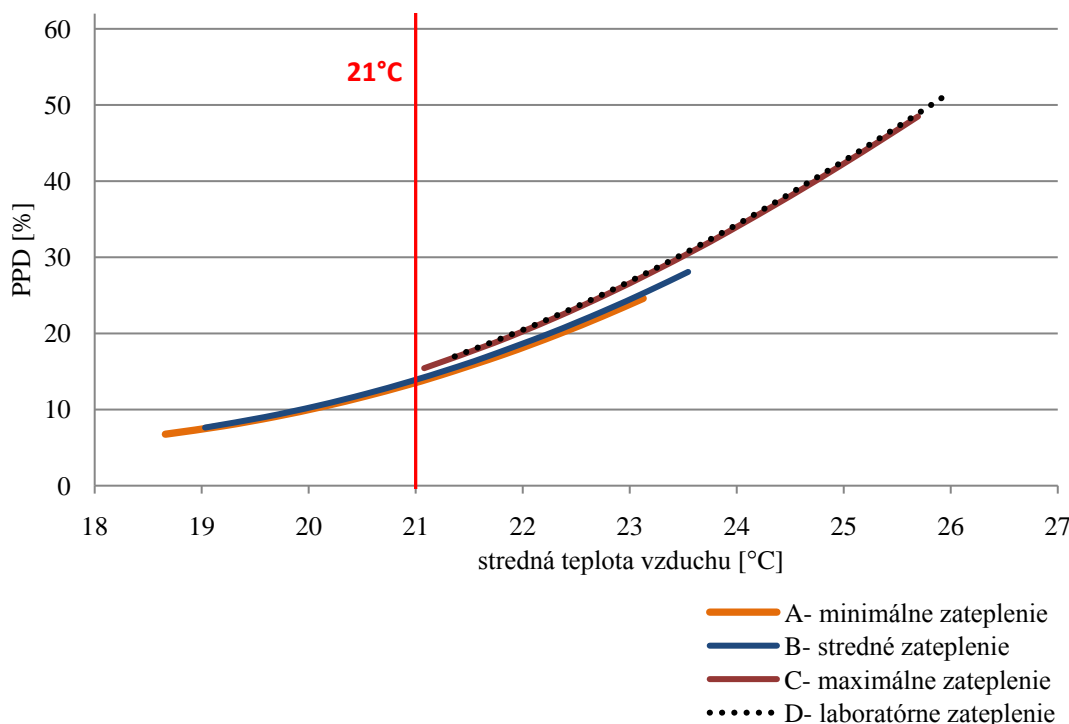
Pre voľbu najvýhodnejšieho zateplenia je však nutné vybrať kompromisné riešenie medzi množstvom potrebného vzduchu, jeho teplotou, dosiahnutím tepelnej pohody a v neposlednom rade aj hmotnosťou uvažovaného zateplenia.

8.2.2. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne počas nástupu pasažierov na palubu

Na vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne budú použité ukazovatele pohody PMV a PPD indexy rovnako ako v kapitole 8.1.2. Tieto ukazovatele popisujú tepelný komfort a stanovujú percento nespokojných ľudí s daným stavom prostredia. Spôsob výpočtu a parametre ovplyvňujúce tepelný komfort sú vysvetlené v kapitole 6.

Percentuálny podiel nespokojných ľudí s dosiahnutými podmienkami v prostredí kabíny (PPD index) sa stanoví pomocou rovnice 9. Pre zaistenie komfortných podmienok by sa PPD index mal podľa príručky ASHRAE pohybovať v rozmedzí 5% až 20%.

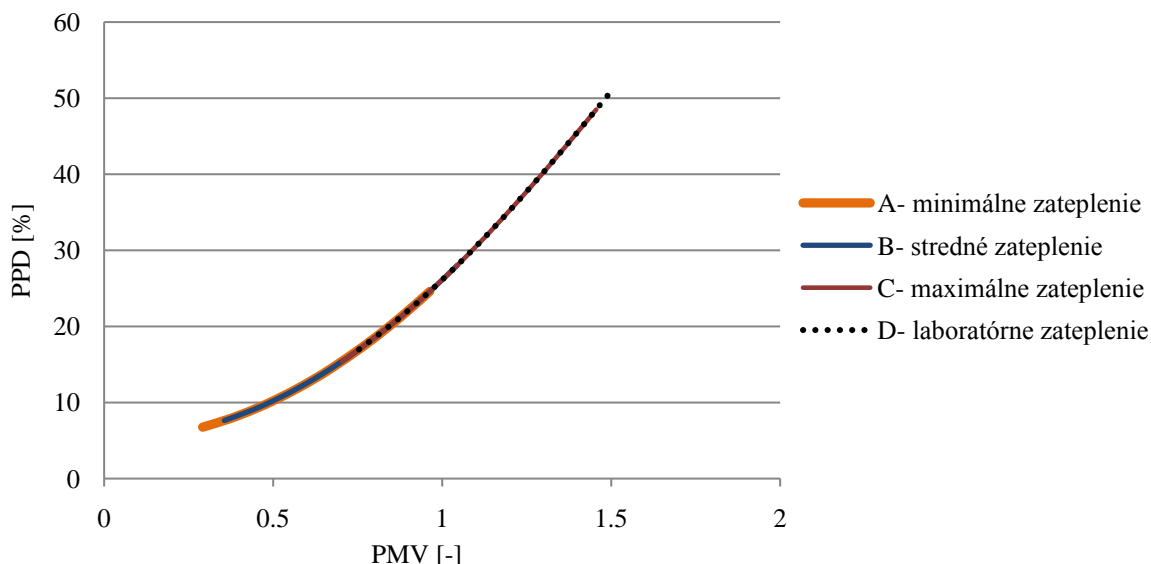
Počas nástupu pasažierov sa uvažuje energetický výdaj 1,7met, ktorý odpovedá chôdzi ľudí počas nastupovania a manipulácie s batožinou. Pri tejto aktivite dochádza k produkcii určitého množstva tepla a pri uvažovanom oblečení 1clo sa musí zabezpečiť tepelná rovnováha, medzi produkovaným teplom človeka a jeho odvodom z povrchu človeka. Podľa medzinárodných štandardov by k tejto tepelnej rovnováhe malo dochádzať pri teplote 21°C, čo podľa obrázku 40 približne vyhovuje pre všetky uvažované varianty zateplenia kabíny, pokiaľ budeme uvažovať splnenie tepelného komfortu po hranicu 20% nespokojných (podľa príručky ASHRAE).



Obrázok 40

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri privode vykurovacieho vzduchu s teplotou 30°C a jednotlivých variantách zateplenia

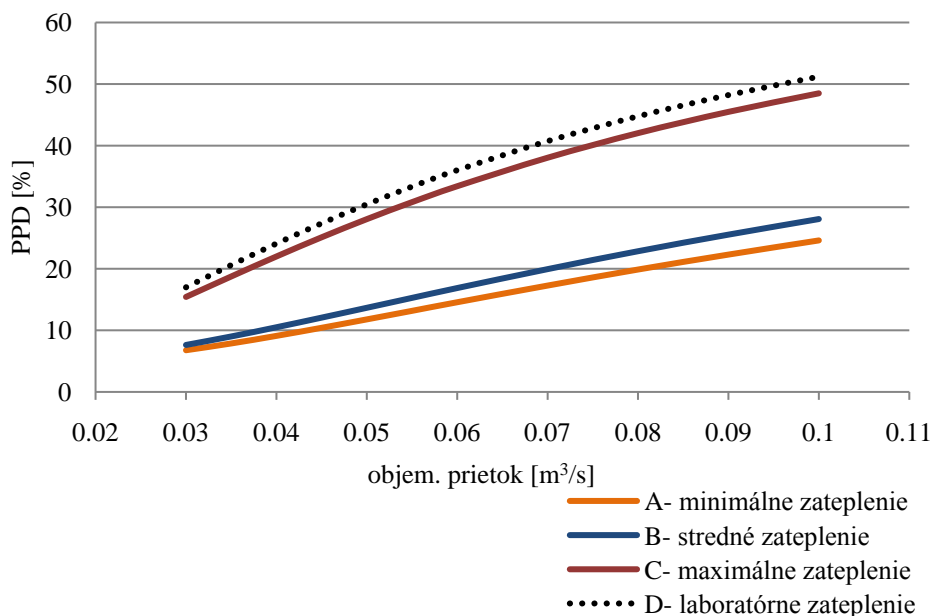
K dosiahnutiu tepelnej pohody pri teplote 21°C dochádza približne pri PPD indexe 15% (obrázok 40), čo značí, že približne 15% ľudí bude nespokojných so stavom prostredia v kabíne. Zo závislosti PPD a PMV indexu (obrázok 41) vyplýva, že títo nespokojní pasažieri budú pociťovať len mierne teplo, čo je vyjadrené PMV indexom, ktorý sa pohybuje do hodnoty 1 (rozsahu 5 až 20% nespokojných pasažierov).



Obrázok 41

Závislosť PPD a PMV indexu pri jednotlivých variantách zateplenia

Na obrázku 42 je vykreslený priebeh PPD indexu v závislosti na prietoku vykurovacieho vzduchu dodávaného do kabíny, z čoho je zrejmé, že pri rôznom zateplení nastáva tepelná pohoda pri rôznych objemových prietokoch vzduchu. Pokiaľ uvažujeme že po dosiahnutí teploty 21°C v kabíne je 15% pasažierov nespokojných, tak je možné určiť prietok vykurovacieho vzduchu odpovedajúci 15% nespokojných pri určitom zateplení. Pri minimálnom a strednom zateplení sa tento prietok približne pohybuje od 0,055 až 0,06 m³/s, zatiaľ čo pri maximálnom a laboratórnom zateplení je to približne prietok vzduchu 0,03m³/s.

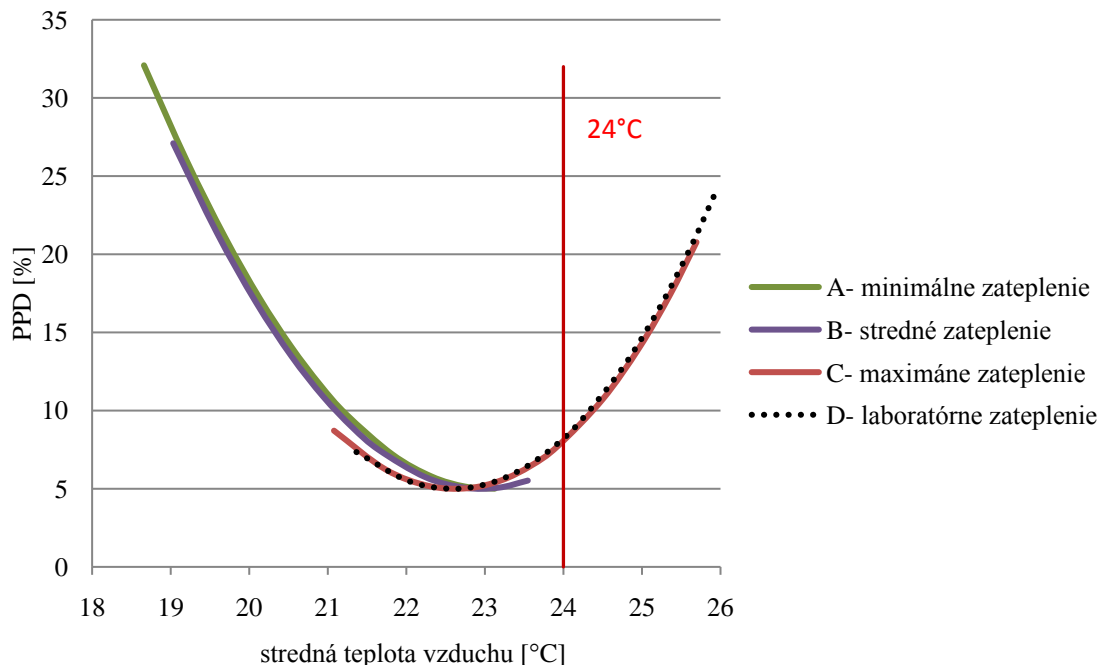


Obrázok 42

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri uvažovaných variantách zateplenia a teplote privádzaného vzduchu 30°C

8.2.3. Vyhodnotenie tepelnej pohody v kabíne počas letového režimu

Počas letu sa uvažuje energetický výdaj pasažierov na úrovni 1 met, čo odpovedá kľudnému sedeniu človeka. Jedná sa o nižšiu produkciu telesného tepla, než v prípade nástupu na palubu, a preto je na zaistenie tepelnej bilancie požadovaná aj vyššia teplota v prostredí kabíny, ktorá je podľa medzinárodných štandardov stanovená na hodnotu 24°C.



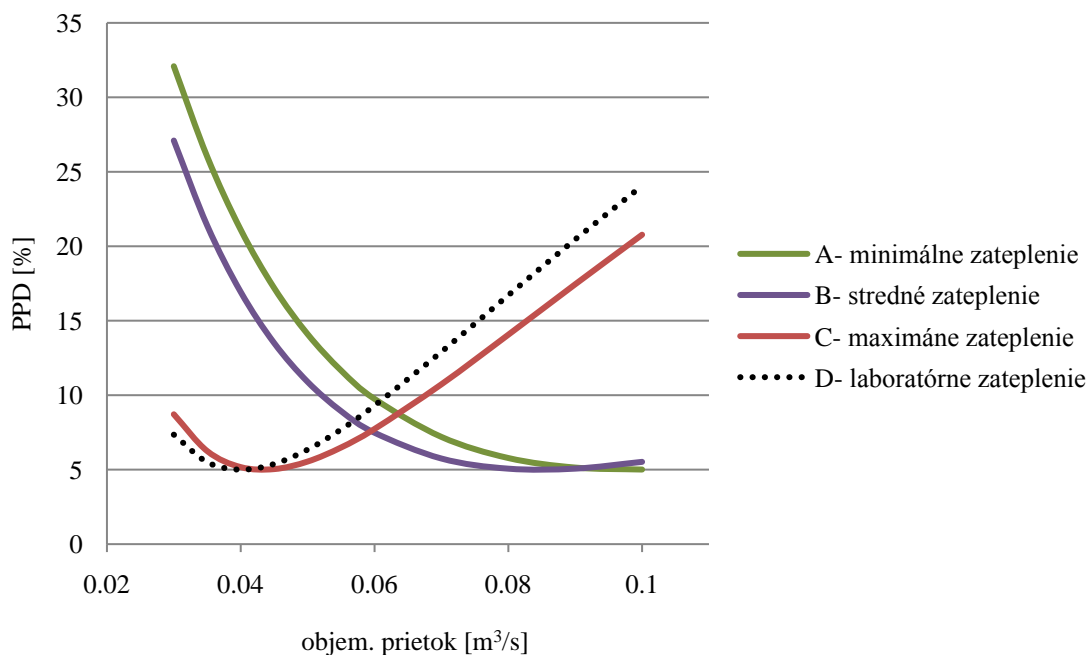
Obrázok 43

Závislosť PPD indexu na strednej teplote vzduchu dosiahnutej v kabíne po 30 minútach privádzania vykurovacieho vzduchu pri uvažovaných variantách zateplenia a teplote privádzaného vzduchu 30°C

Závislosť PPD indexu na strednej teplote vzduchu dosiahnutej v kabíne za 30 minút nepretržitého prívodu vykurovacieho vzduchu je zobrazená na obrázku 43, z ktorého je zrejmé, že tepelnej pohody (PPD v rozmedzí 5% až 20%) pri energetickom výdaji 1 met sa dosahuje v relatívne širokom pásme teplôt 19°C až 25°C. Toto široké pásmo teplôt vyhovujúce tepelnému komfortu je dané pomerne vysokou radiačnou (povrchovou) teplotou okolitých plôch v kabíne čo vyplýva z vyššej teploty externého prostredia 15°C a tým nižšími tepelnými stratami prestupu tepla stenou kabíny (obrázok 15).

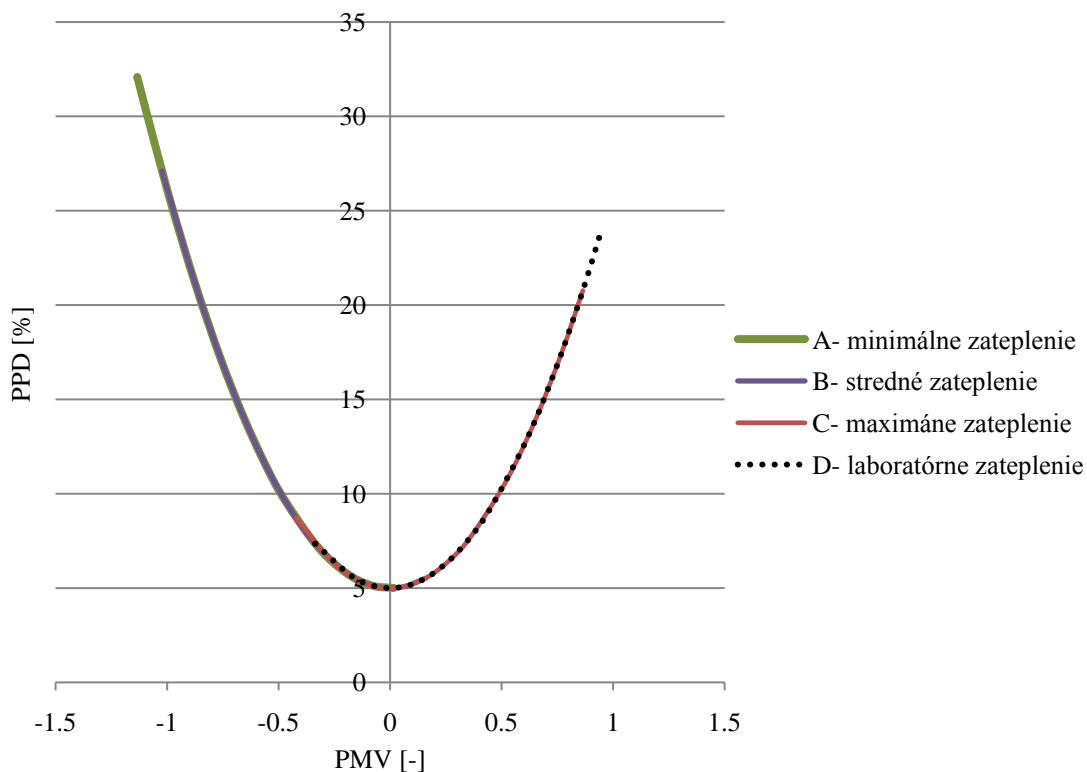
Pri minimálnom a strednom zateplení nie sme schopní ani pri maximálne uvažovanom prietoku vzduchu do kabíny dosiahnuť požadovaných 24°C, zatiaľ čo pri maximálnom a laboratórnom zateplení sa teplota 24°C dosiahne už pri prietoku vzduchu približne 0,06m³/s (obrázok 43 a obrázok 44).

Zo závislosti PPD a PMV indexu (obrázok 45) je vidieť, že pri minimálnom a strednom zateplení budú pasažieri pri nižších prietokoch vykurovacieho vzduchu pociťovať mierny chlad až chlad, ktorý prechádza v tepelnú pohodu pri maximálnych prietokoch a pri maximálnom zateplení prechádza stredný tepelný pocit od mierneho chladu pri najnižších prietokoch vykurovacieho vzduchu až k pocitu mierneho tepla pri maximálne uvažovanom prietoku 0,01m³/s.



Obrázok 44

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri uvažovaných variantách zateplenia a teplote privádzaného vzduchu 30°C



Obrázok 45

Závislosť PPD a PMV indexu pri jednotlivých variantách zateplenia

9. Vyhodnotenie a voľba optimálneho zateplenia kabíny

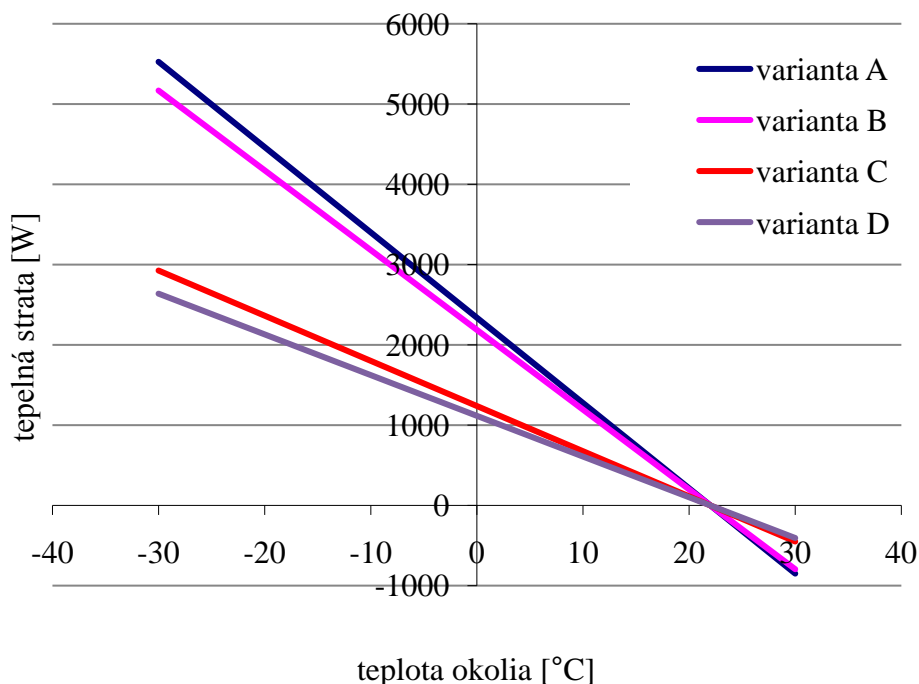
Pri voľbe optimálneho zateplenia je potrebné zohľadňovať viaceré faktory, ktoré svojou vzájomnou kombináciou budú v konečnom dôsledku zaisťovať stav tepelnej pohody pri optimálnych energetických nárokoch na jej zaistenie.

Jedným s faktorov je hmotnosť použitého zateplenia, ktorá rastie s hrúbkou izolácie a množstvom zateplených stien v jednotlivých variantoch tepelnej izolácie (tabuľka 6). Uvažujú sa tri varianty zateplenia (*A- minimálne, B- stredné, C- maximálne*), ktoré sú reálne aplikovateľné počas prevádzky a jedna laboratórna varianta (*D- laboratórne zateplenie*), použitá len pri laboratórnom výskume a meraní jednotlivých parametrov na makete lietadla.

Tabuľka 6- *hmotnosti jednotlivých variant zateplenia*

A- minimálne zateplenie	26,318 kg
B- stredné zateplenie	29,356 kg
C- maximálne zateplenie	35,811 kg
D- laboratórne zateplenie	14,215 kg

O kvalite zateplenia vypovedajú jeho tepelnoizolačné vlastnosti, ktoré sa v konečnom dôsledku prejavujú vo veľkosti tepelných strát prestupom tepla cez danú zateplenú stenu. Obrázok 15 potvrdzuje, že minimálne zateplenie má najväčšie tepelné straty v závislosti na externej teplote zatiaľ čo maximálne zateplenie predpokladá približne polovičné tepelné úniky cez steny kabíny, a preto sa z tohto hľadiska javí ako najlepšia varianta, je však aj najťažšia.



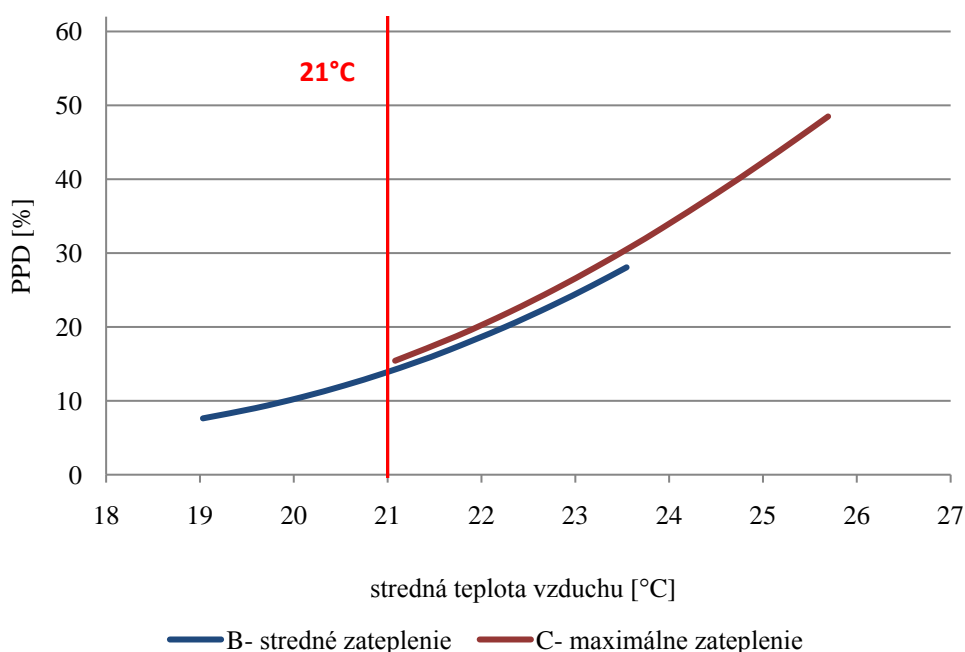
Obrázok 15

Tepelná strata v závislosti na vonkajšej teplote pre uvažované varianty izolácie (vnútorná teplota je uvažovaná 21°C)

Z hľadiska dosiahnutej tepelnej pohody, čo predstavuje hlavný faktor pri voľbe zateplenia, je nutné vybrať variantu, ktorá v dostatočnej miere spĺňa požiadavky na dosiahnutie komfortu. Pri uvažovaných externých podmienkach s chladom až -30°C by sme boli schopní

dosiahnuť požadovanú teplotu 21°C u všetkých zateplení, ale u varianty minimálneho zateplenia by to bolo energeticky náročnejšie a pri letových podmienkach, kde je požadovaná teplota 24°C by bolo potrebné privádzať veľké množstvo vzduchu do kabíny, čo by už mohlo spôsobiť nebezpečenstvo prievanu.

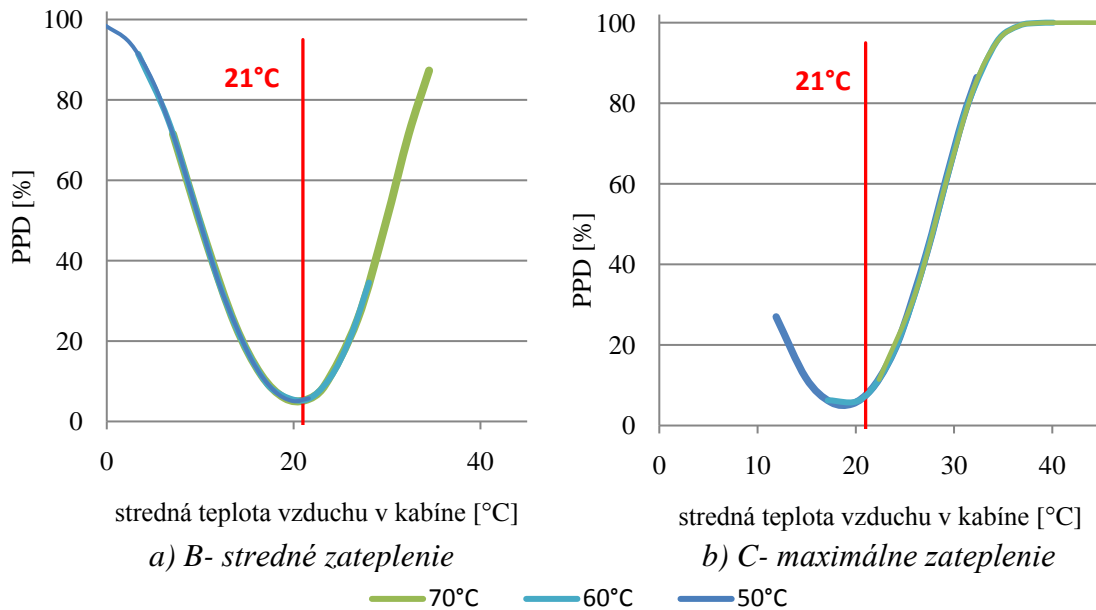
Ako optimálne zateplenie z hľadiska minimalizácie prívodu vzduchu je zateplenie *C-maximálne*, toto je ale približne o $6,5\text{kg}$ ťažšie a neuvažuje sa tu hluková izolácia podlahy kabíny na rozdiel od predchádzajúcich zateplení *A* a *B*, aby sa redukovala hmotnosť v miestach, kadiaľ sa hluk od motora vo veľkej miere nešíri. Maximálne zateplenie je schopné rýchlo a vo veľmi kvalitnej miere zaistiť komfortné tepelné podmienky v kabíne pred nástupom pasažierov pri vonkajšej teplote -30°C ale za normálnych podmienok, ktoré predpokladajú teplotu vzduchu 15°C sa javí byť lepšie zateplenie *B- stredné*, pri ktorom sme schopní dosiahnuť vyššej spokojnosti (nižší PPD index) so vzniknutými podmienkami v kabíne (obrázok 46).



Obrázok 46

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri prívode vykurovacieho vzduchu s teplotou 30°C a normálnych externých podmienkach a aktivite 1,7met

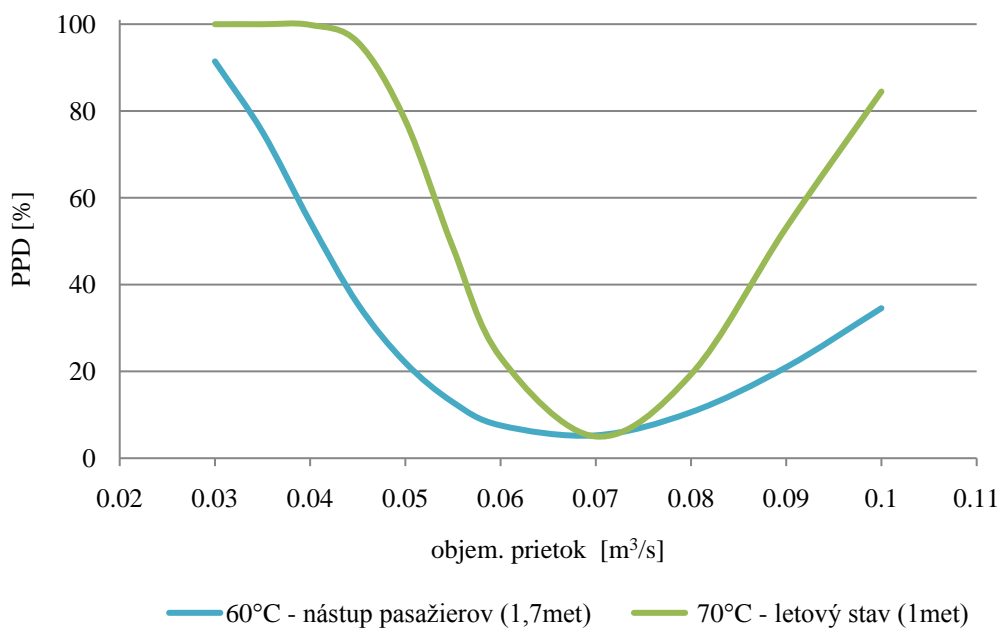
Pri porovnaní maximálneho a stredného zateplenia pri externých podmienkach s teplotou -30°C (obrázok 47) je vidieť, že v oboch prípadoch dochádza k splneniu tepelnej pohody. Pri maximálnom zateplení sa ale táto pohoda dosahuje skôr a pri nižších objemových prietokoch, čo v prípade neobsadeného lietadla pri príprave na nastúpenie pasažierov nemá vplyv na vznik nepriaznivého pocitu prievanu. Vzhľadom k tomuto stavu nám pri prvotnom zahrievaní kabíny neprekáža vyšší objemový prietok vzduchu. Pre zaistenie tepelného komfortu pred nastúpením pri vonkajšej teplote -30°C teda postačí stredné zateplenie a teplota privádzaného vzduchu 60°C .



Obrázok 47

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri externej teplote - 30°C a uvažovanej teplote privádzaného vzduchu 50°C, 60°C a 70°C (nástup pasažierov – uvažovaná aktivita 1,7met)

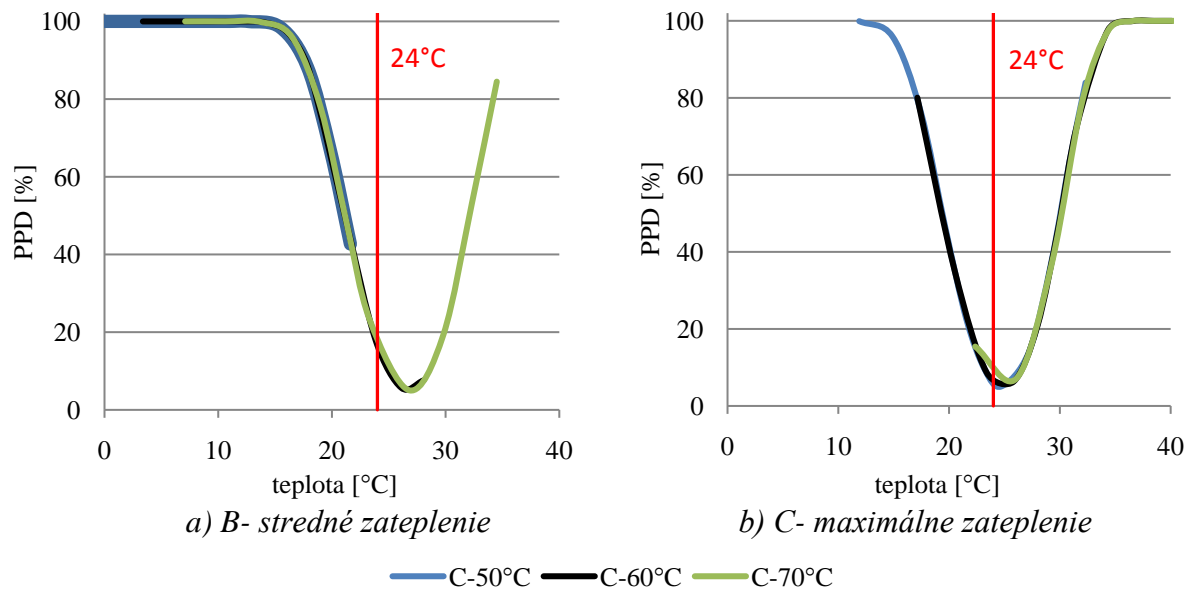
Pri letových podmienkach je potom pri strednom zateplení potrebné k udržaniu tepelného komfortu, ktorý je podľa medzinárodných štandardov pri teplote 24°C, zvýšiť teplotu privádzaného vzduchu na 70°C, čím sa zaisťuje objemový prietok vykurovacieho vzduchu o maximálnej hodnote okolo 0,07m³/s (obrázok 48), a tým sa docielia vznik relatívnej rýchlosti prúdenia vzduchu v okolí pasažiera maximálne okolo 0,3 m/s, ako bolo zistené pri CFD simulácii prúdenia vzduchu (viď kapitola 7.5.- obrázok 22).



Obrázok 48

Závislosť PPD indexu na objemovom prietoku privádzaného vzduchu do kabíny pri strednom zateplení „B“

Pri podmienkach počas letu nastáva nižší PPD index použitím maximálneho zateplenia v porovnaní so stredným zateplením (obrázok 49) v dôsledku vyššej povrchovej teploty okolitých stien. Z dôvodu, že pasažieri trávajú v lietadla najviac času počas letu, je potrebné zaistiť aby bolo čo najmenšie percento cestujúcich nespokojných s danými tepelnými podmienkami, a preto budeme ako vhodné zateplenie voliť variantu *C- maximálne zateplenie*.



Obrázok 49

Závislosť PPD indexu na dosiahnutej strednej teplote vzduchu v kabíne pri externej teplote - 30°C a uvažovanej teplote privádzaného vzduchu 50°C, 60°C a 70°C (letový stav – uvažovaná aktivita 1met)

Maximálnym zateplením dosiahneme nízke prietoky vzduchu potrebné na vykúrenie kabíny a zaistenie komfortu, čím sa redukuje aj nebezpečenstvo prievanu. Vyššia hmotnosť u tejto varianty sa dá stále považovať za prijateľnú. Pri normálnych podmienkach externého prostredia môže nastať vyššia teplota pri príprave kabíny na nastúpenie cestujúcich ale po ich usadnutí a znížení ich metabolického tepla, ktoré odpovedá kľudnému sedeniu bude zaistená pohoda pre viac ako 90% pasažierov, čo môžeme považovať za veľmi dobrý výsledok.

10. Záver

Práca je zameraná na modelovanie prostredia v kabíne malého dopravného lietadla EV-55, kde ako geometrická predloha bola použitá maketa kabíny, ktorá je k dispozícii v laboratóriu vetrania OTTP. Simulácie prostredia v kabíne boli vytvorené v programe THESEUS-FE 3.0 a okrajovo sa využil CFD kód prostredníctvom programu STAR CCM+, ktorý poskytol odhad relatívnej rýchlosti prúdenia vzduchu v okolí pasažierov pri uvažovaných prietokoch vykurovacieho vzduchu.

Simulácie sú vytvorené pre dve základné varianty externého prostredia. V prvom prípade sa uvažujú podmienky za extrémneho chladu až -30°C a v druhom prípade sa predpokladajú medzinárodne stanové normálne podmienky, ktoré stanovujú teplotu prostredia 15°C . V uvedených variantách externého prostredia sa vyšetruje kvalita vnútornej mikroklimy v kabíne pri rôznych variantách zateplenia stien kabíny a pri rôznych objemových prietokoch vykurovacieho vzduchu privádzaného do kabíny výustakami umiestnenými pod sedačkami pasažierov. Zateplenie sa uvažuje v troch variantách od minimálneho s najväčšími tepelnými stratami až po maximálne zateplenie, ktoré znižuje tepelné straty zhruba na polovičnú hodnotu. Ďalej sa simuluje aj stav pri použití laboratórneho zateplenia, ktoré odpovedá zatepleniu makety umiestnenej v laboratóriu a nie je aplikovateľné do reálnej prevádzky lietadla.

Prívod vzduchu do kabíny sa simuluje v rozmedzí od $0,03\text{m}^3/\text{s}$ až po $0,1\text{m}^3/\text{s}$, pričom spodná hranica je daná minimálnym množstvom vzduchu, ktorý je potrebné priviesť pre uvažovaných deväť pasažierov. Prívod vzduchu s objemovým prietokom pri hornej hranici $0,1\text{m}^3/\text{s}$ nie je žiaduci, keďže by mohlo dôjsť k obťažovaniu prievanom vplyvom vzniku relatívne vysokej rýchlosti prúdenia vzduchu v okolí pasažierov. Smer a rozloženie rýchlosti prúdenia vzduchu v kabíne pre jednotlivé varianty nie je možné vyhodnotiť vzhľadom k tomu, že simulačný nástroj THESEUS-FE neumožňuje vyšetovanie vektorových veličín a preto na odhad relatívnej rýchlosti vzduchu v okolí človeka, ktorá je potrebná na vyhodnotenie PMV indexu, bol použitý CFD kód. Pri rôznych teplotách externého prostredia sa uvažuje aj rozdielna teplota privádzaného vzduchu na vykurovanie kabíny. Pri prostredí s teplotou -30°C sa simulovali tri varianty teploty privádzaného vzduchu (50°C , 60°C , 70°C) a pri prostredí s normálnymi podmienkami a teplotou 15°C sa uvažuje teplota 30°C , ktorá bola zvolená ako najvhodnejšia varianta pre dané podmienky (viď kapitola 8.2).

Vyšetrovanie vnútorného prostredia kabíny a pohody pasažierov je zamerané na stav pred nastúpením na palubu a letový stav, kde sú tepelné podmienky na dosiahnutie komfortu definované rozdielne. Ako činiteľ hodnotiaci stav prostredia je použitý PPD a PMV index, ktoré stanovujú stupeň spokojnosti s podmienkami a stanovujú percentuálny počet ľudí, ktorý môžu v danom prostredí pociťovať diskomfort. Úlohou tejto štúdie bolo tiež stanovenie a výber vhodného zateplenia, pri ktorom sa za uvažovaných podmienok externého prostredia dosiahne tepelnej pohody. Ako optimálna varianta zateplenia je zvolené maximálne zateplenie (označené indexom C), v ktorom sa uvažujú väčšie hrúbky jednotlivých vrstiev izolácie (tabuľka 2). Pri tomto zateplení sa dosahuje tepelného komfortu už pri malých objemových prietokoch vykurovacieho vzduchu do kabíny, čím sa zamedzí vzniku nežiaduceho obťažovania prievanom a ukazovateľ pohody (PPD index) sa pohybuje rozmedzí 5% až 15%, čo znamená, že maximálne jeden pasažier z deviatich bude pociťovať mierny tepelný diskomfort.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] *Commercial airplanes*. Boeing. [online].
Dostupný z WWW: <<http://www.boeing.com/commercial/cabinair/index.html>>
- [2] ELWOOD, H.; SPACE, D.R. The Airplane Cabin Environment. *Cabin Air Quality Works* [online]. 2008-06-27, [cit. 2011-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.boeing.com/commercial/cabinair/ventilation.pdf>>.
- [3] SPACE, D. R., WATERS K. L., WILLES D. L., HVAC applications-Aircrafts, chapter 9, ASHRAE, Inc., Atlanta 1999, USA
- [4] SPACE, D. R., WATERS K. L., WILLES D. L., HVAC applications-Aircrafts, chapter 8.7, ASHRAE, Inc., Atlanta 1999, USA
- [5] FIŠER, J., Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravných letadel, Pojednání k disertační práci, Brno 2006, CZ
- [6] *Development completion of small multipurpose aircraft EV-55*. Aeronautical research and test institute. [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.vzlu.cz/en/research-projects/national-projects-with-targeted-subsidy-provision-from-mpo/development-completion-of-small-multipurpose-aircraft-ev-55-outback>>
- [7] VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., An introduction to Computational Fluid Dynamics. Malaysia: Longman Group Ltd, 1995. ISBN-13: 978-0-582-21884-0
- [8] *THESEUS-FE* [online]. 2009-07-01 [cit. 2011-05-14]. THESEUS-FE Product Website. Dostupné z WWW: <<http://www.theseus-fe.com/product/product.html>>.
- [9] RYDOCK, J.P.; HAMLIN, S., Air quality in passenger aircraft : Aircraft cabin ventilation. *Results from the Cabin Air project*. 2005-04-26, s. 6.
- [10] EV-55 Outback. *Interné materiály firmy EVEKTOR*. 2003-2010.
- [11] *Thermal comfort models* [online]. 2002-11-8 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z WWW: <http://www.esru.strath.ac.uk/Reference/concepts/thermal_comfort.htm>.
- [12] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ANSI/ASHRAE STANDARD* [online]. 2004, 55, [cit. 2011-03-20]. Dostupný z WWW: <http://c0131231.cdn.cloudfiles.rackspacecloud.com/ASHRAE_Thermal_Comfort_Standard.pdf>. ISSN 1041-2336.

- [13] MATHAUSEROVÁ, Z., *Státní Zdravotní Ústav : Mikroklimatické podmínky vnitřního prostředí pracovišť* [online]. 2007-11-14 [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/mikroklimaticke-podminky-vnitriho-prostredi-pracovist>>.
- [14] ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. Praha : Český normalizační institut, 2006-10-01. 35 s.
- [15] PAVELEK, M. a kolektiv, *Termomechanika*. 1.vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. 286 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [16] FIŠER, J., *Izoplochy šíření vzduchu v kabíne lietadla EV-55*, Výsledky predchádzajúcej štúdie poskytnuté vedúcim diplomovej práce.

Zoznam použitých symbolov

Veličina	Symbol	Jednotka
Tepelná strata konvekciou z povrchu oblečeného človeka	C	W/m ²
Stupeň obťažovania prievanom	DR	%
Tepelná strata latentným teplom dýchaním	E _{dl}	W/m ²
Tepelná strata suchým dýchaním	E _{dr}	W/m ²
Tepelná strata v dôsledku mokrého potenia	E _p	W/m ²
Tepelná strata vplyvom difúzie vody z pokožky do okolia	E _{vd}	W/m ²
Pomer povrchu oblečeného človeka k povrchu nahého človeka	f _{cl}	-
Vnútoraná produkcia tepla človeka	H	W/m ²
Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou	h _{cl}	W/m ² K
Tepelný odpor odevu	I _{cl}	m ² K/W
Tepelná záťaž na človeka	L	W/m ²
Energetický výdaj	M	W/m ²
Tlak okolitého vzduchu	p	Pa
Parciálny tlak vodnej pary	p _a	Pa
Předpověď středného tepelného pocitu	PMV	-
Předpověď percentuálneho podielu nespokojných	PPD	%
Tepelná strata radiáciou z povrchu oblečeného človeka	R	W/m ²
Celková plocha kabíny	S	m ²
Plocha okien kabíny	S ₁	m ²
Plocha podlahy kabíny	S ₂	m ²
Plocha bočných stien kabíny	S ₃	m ²
Plocha strechy kabíny	S ₄	m ²
Plocha dverí kabíny	S ₅	m ²
Povrchová teplota okien	t ₁	°C
Povrchová teplota podlahy	t ₂	°C
Povrchová teplota bočných stien	t ₃	°C
Povrchová teplota strechy	t ₄	°C
Povrchová teplota dverí	t ₅	°C
Teplota vzduchu	t _a	°C

Teplota povrchu odevu	t_{cl}	°C
Turbulentná kinetická energia	t_{ke}	-
Stredná radiačná teplota	\bar{t}_r	°C
Intenzita turbulencie	T_u	%
Miestna priemerná rýchlosť vzduchu	v	m/s
Relatívna rýchlosť prúdenia vzduchu (voči ľudskému telu)	v_{ar}	m/s
Užitočný mechanický výkon (vonkajšia práca)	W	W/m^2
Merná vlhkosť vzduchu	x	kg/kg_{sv}
Koeficient prestupu tepla izolácie	λ	W/mK
Hustota izolácie	ρ	kg/m^3
Relatívna vlhkosť vzduchu	φ	-

Prílohy

Príloha č.1- Tabuľka 7- rozpis skladby materiálov

Varianta	časť makety	konštrukcia					izolácia			
		sololit	preglejka	polykarbonát	fólia	papier	tepelná			hluková
							Minerálna vlna	polystyrén	Tepelne Izolačná pena	Hlukovo izolačná pena
Hrúbka materiálu [mm]										
A - minimálna izolácia	Kokpit_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	-	-
	Kokpit_bočná stena	3	-	-	0,5	-	25,4	-	-	6,3
	Kokpit_strecha	3	-	-	-	2	25,4	-	-	6,3
	Kokpit_predná stena	3	-	-	-	-	-	-	-	6,3
	Kabína_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	-	6,3
	Kabína_bočná stena	3	-	-	0,5	-	25,4	-	-	6,3
	Kabína_strecha	3	-	-	-	2	-	-	25,4	6,3
	Kabína_okná	-	-	4	-	-	-	-	-	-
	Kargo_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	25,4	-
	Kargo_bočná stena	3	-	-	0,5	-	25,4	-	-	-
	Kargo_strecha	3	-	-	-	2	-	-	25,4	-
	Kargo_zadná stena	-	10	-	-	-	-	-	-	-
B - stredná izolácia	Kokpit_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	-	-
	Kokpit_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	6,3
	Kokpit_strecha	3	-	-	-	2	50,8	-	-	6,3
	Kokpit_predná stena	3	-	-	-	-	-	-	-	6,3
	Kabína_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	-	6,3
	Kabína_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	6,3
	Kabína_strecha	3	-	-	-	2	-	-	25,4	6,3
	Kabína_okná	-	-	4	-	-	-	-	-	-
	Kargo_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	25,4	-
	Kargo_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	-
	Kargo_strecha	3	-	-	-	2	-	-	25,4	-
	Kargo_zadná stena	-	10	-	-	-	-	-	-	-

Varianta	časť makety	konštrukcia					izolácia			
		sololit	preglejka	polykarbonát	fólia	papier	tepelná			hluková
							Minerálna vlna	polystyrén	Tepelne Izolačná pena	Hlukovo izolačná pena
Hrúbka materiálu [mm]										
C - maximálna izolácia	Kokpit_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	25,4	-
	Kokpit_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	6,3
	Kokpit_strecha	3	-	-	-	2	50,8	-	-	6,3
	Kokpit_predná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	6,3
	Kabína_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	50,8	-
	Kabína_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	6,3
	Kabína_strecha	3	-	-	-	2	-	-	50,8	6,3
	Kabína_okná	-	-	4	-	-	-	-	-	-
	Kargo_podlaha	-	10	-	-	-	-	-	25,4	-
	Kargo_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50,8	-	-	-
	Kargo_strecha	3	-	-	-	2	-	-	25,4	-
	Kargo_zadná stena	-	10	-	-	-	50,8	-	-	-
D – laboratórne zateplenie	Kokpit_podlaha	-	10	-	-	-	-	20	-	-
	Kokpit_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50	-	-	-
	Kokpit_strecha	3	-	-	-	2	50	-	-	-
	Kokpit_predná stena	3	-	-	0,5	-	50	-	-	-
	Kabína_podlaha	-	10	-	-	-	-	20	-	-
	Kabína_bočná stena	3	-	-	0,5	-	50	-	-	-
	Kabína_strecha	3	-	-	-	2	50	-	-	-
	Kabína_okná	-	-	4	-	-	-	-	-	-
	Kargo_podlaha	-	10	-	-	-	-	20	-	-
	Kargo bočná stena	3	-	-	0,5	-	50	-	-	-
	Kargo strecha	3	-	-	-	2	50	-	-	-
	Kargo zadná stena	3	-	-	0,5	-	50	-	-	-

Príloha č.2- Tabuľka 8- *typické energetické výdaje osôb pri rôznych aktivitách* [4]

Metabolic Rates for Typical Tasks

Activity	Met Units	Metabolic Rate
		W/m ²
Resting		
Sleeping	0.7	40
Reclining	0.8	45
Seated, quiet	1.0	60
Standing, relaxed	1.2	70
Walking (on level surface)		
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220
Office Activities		
Seated, reading, or writing	1.0	60
Typing	1.1	65
Filing, seated	1.2	70
Filing, standing	1.4	80
Walking about	1.7	100
Lifting/packing	2.1	120
Driving/Flying		
Automobile	1.0-2.0	60-115
Aircraft, routine	1.2	70
Aircraft, instrument landing	1.8	105
Aircraft, combat	2.4	140
Heavy vehicle	3.2	185
Miscellaneous Occupational Activities		
Cooking	1.6-2.0	95-115
House cleaning	2.0-3.4	115-200
Seated, heavy limb movement	2.2	130
Machine work		
sawing (table saw)	1.8	105
light (electrical industry)	2.0-2.4	115-140
heavy	4.0	235
Handling 50 kg (100 lb) bags	4.0	235
Pick and shovel work	4.0-4.8	235-280
Miscellaneous Leisure Activities		
Dancing, social	2.4-4.4	140-255
Calisthenics/exercise	3.0-4.0	175-235
Tennis, single	3.6-4.0	210-270
Basketball	5.0-7.6	290-440
Wrestling, competitive	7.0-8.7	410-505

SUMMARY

This diploma thesis is focused on investigation of thermal comfort and ventilation in cabin of small transport aircraft EV-55 which is in prototype testing stage. This aircraft is manufactured by Czech producer and designer EVECTOR with corporation of other companies. The initial boundary conditions for indoor environment are treated the same as the external conditions as we suppose long exposure of the aircraft to external conditions when the airplane is out of duty (staying at the airport without any energy supply to keep temperature level). This aircraft is expected to be supplied at Eastern market such as Asia, China and others where external environment temperature varies in range from -30°C to $+30^{\circ}\text{C}$ or more under some particular conditions.

Accordingly to these expected external conditions is necessary to investigate how to obtain comfortable inner environment under extreme cold and hot external conditions. In this paper is our interest restricted only on heating and gaining the desired temperature which is specified in the international standard FAR (Federal Aviation Regulation). This regulation appoints temperature 21°C which has to be gained in the cabin before passengers boarding which refers to activity approximately $1,7\text{met}$ ($100\text{W}/\text{m}^2$) and 24°C during flight conditions when passengers are sitting in their seats what refers to activity approximately 1met ($58,15\text{W}/\text{m}^2$) – see table 8. There is also specified minimum air volume flowage per passenger which has to be supplied to the cabin to detain sufficient inflow of fresh air without any harmful elements (aerosols, dust etc.). Under normal operating conditions and in the event of any probable failure, the ventilation system must be designed to provide each occupant with an airflow containing at least $0,25\text{kg}$ of fresh air per minute ($5\text{L}/\text{s}$ at altitude 2400m). In this study we consider 7 occupants in the aircraft cabin which means that we have to detain at least $1,75\text{kg}$ of fresh air per minute ($0,03\text{m}^3/\text{s}$). This value $0,03\text{m}^3/\text{s}$ of fresh air appoints the minimal considered airflow to the cabin in our heating simulation. Range of considered airflows is between $0,03\text{m}^3/\text{s}$ and $0,1\text{m}^3/\text{s}$ (see table 4). Air is supplied into cabin via under seat inlets which are placed under every seat (figure 18). Shape and dimensions of individual inlets are shown in figure 19. Air from cabin is distributed into cockpit and cargo part via recirculation.

To gain appropriate thermal conditions in the cabin is necessary to supply heated air which consists of bleed air (preconditioned air from engine compressor) and recirculation air from cabin to keep humidity level (mixing rate is 50% to 50%). Temperature of supplied air depends on external conditions. In this study we treat extreme cold conditions -30°C and normal conditions $+15^{\circ}\text{C}$ which is international standard. For external conditions with temperature -30°C is considered inlet air temperature 50°C , 60°C and 70°C respectively and for normal conditions we investigate only heating with use of air at 30°C as it is sufficient enough to gain desired thermal comfort.

Due to variety of external conditions and in the order to minimize energy supply for heating up of inner environment is very important to use thermal insulation and due to high level of noise spreading from engines is necessary to apply noise insulation as well. The individual considerations of insulation and layers placement used respectively are shown in table 7, where we consider 4 options of insulation. Option A refers to minimal insulation, B is medium insulation, C maximum and D refers to laboratory insulation which is applied on cabin model located in laboratory of energy institute.

In table 3 are shown two types of external environment with individual features (temperature and RH- relative humidity) for each compartment in the airplane which are considered in this study.

Table 3- air zones in aircraft

Air zone	volume [m ³]	Initial external conditions			
		EXTREME COLD		NORMAL CONDITIONS	
		temperature [°C]	RH [%]	temperature [°C]	RH [%]
COCKIPT	2	-30	80	15	70
CABIN	9	-30	80	15	70
CARGO	2	-30	80	15	70

For thermal comfort evaluating appropriate tool has to be used, which is able to give us valuable result about patterns of inner environment. For this purpose PMV and PPD indexes are applied, where PMV represents “Predicted Mean Vote” (on thermal sensation scale) of a large population of people exposed to a certain environment. PMV establishes a thermal strain based on steady-state heat transfer between body and the environment and assigns a comfort vote to that amount of strain. PPD is the “Predicted Percent of Dissatisfied” people at each PMV. As PMV changes away from zero in either the positive or negative direction, PPD increases. The PMV equation only applies to humans exposed for a long period to constant conditions at a constant metabolic rate. Conservation of energy leads to the heat balance equation (equation 1) [3].

$$H - E_{vd} - E_p - E_d - L = R + C \quad (1)$$

Where:

H	- internal heat production of human	[W/m ²]
E _{vd}	- heat loss due to water vapor diffusion through the skin	[W/m ²]
E _p	- heat loss due to sweating	[W/m ²]
E _{d1}	- latent heat loss due to respiration	[W/m ²]
E _{dr}	- dry respiration heat loss	[W/m ²]
R	- heat loss by radiation from the surface of the clothed body	[W/m ²]
C	- heat loss by convection from the surface of the clothed body	[W/m ²]

The equation is expanded by substituting each component with a function derivable from basic physics (see equation 2, 3, 4, 5). All of the functions have measurable values with exception of clothing surface, temperature and the convective heat transfer coefficient which are functions of each other. To solve the equation, an initial value of clothing temperature is estimated, the convective heat transfer computed, a new clothing temperature calculated etc., by iteration until both are known to a satisfactory degree [3].

The thermal comfort in the cabin is evaluated in two different external conditions and two different passenger activities (passengers boarding $M=1,7met$ and steady sitting during a flight $M=1met$ – see table 8).

Clothing considered in every case of this study is I_{clo} . Mechanical useful work W is mostly equal to zero. Clothing insulation coefficient I_{cl} depends on clothing value and in our case (I_{clo}) it is equal to $0,155[m^2K/W]$. Relation between surfaces of clothed human to naked human is given by f_{cl} . Relative air velocity in very close occupant surrounding is expressed by value v_{ar} . To chaise this velocity, CFD code had to be used which can

simulate the airflow distribution and give us an appropriate velocity value in immediate occupant area (see chapter 7.5). For inlet airflow rate $0,03m^3/s$; $0,06m^3/s$ and $0,09m^3/s$ is medial relative velocity equal approximately to $0,2m/s$ in ankle and head height (see figure 22).

Table 5- constant values considered in thermal comfort evaluating

Passenger activity	clothing	M	W	I_{cl}	f_{cl}	v_{ar}
	[clo]	[met]	[met]	[m^2K/W]	[-]	[m/s]
Boarding	1	1,7	0	0,155	1,15	0,2
Flight (steady sitting)	1	1	0	0,155	1,15	0,2

The optimal insulation option and its evaluating

In the choice of the optimal insulation is necessary to consider several factors. The combination of individual factors has to reach comfortable conditions while lowest possible energy use. One of the factors which are considered in thermal comfort evaluation is weight of individual insulation option (A-minimal, B- medium, C- maximal and D- laboratory insulation). Weight of individual insulation options are listed in table 6.

Table 6- weight of individual insulation option

A- minimal insulation	26,32 kg
B- medium insulation	29,36 kg
C- maximal insulation	35,81 kg
D- laboratory insulation	14,22 kg

The insulation quality is given by thermo-insulating features, which are expressed via heat loss through the cabin wall. The figure 15 confirms that minimal insulation has the highest heat loss which rises with descending external temperature while cabin temperature is kept on $21^{\circ}C$.

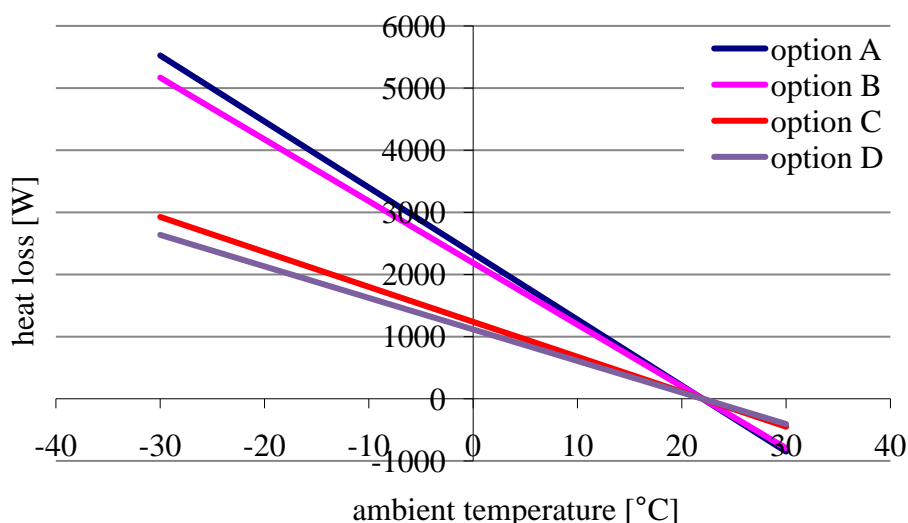


Figure 15

*Heat loss in relation with ambient temperature for individual insulation options
(Inner cabin temperature $21^{\circ}C$)*

The main factor during insulation choice is the thermal comfort and number of people satisfied with conditions in the environment. For extreme cold external conditions -30°C would be possible to reach desired temperature 21°C in every case of insulation, however in case of minimal insulation it would be very height energy use to keep temperature on desired level and during flight conditions when desired air temperature is 24°C , it would be necessary to supply heating air at very height velocity rate what could lead to rise a draught rating which is treated as ineligible.

As an optimal insulation with minimal inlet airflow in to cabin is option C-maximal insulation, however it is about 6,5kg heavier than medium option and there is no noise insulation on floor area in comparison with the option A and B in order to minimize weight in areas where noise from engines does not spread in significant way. With use of maximal insulation, it is possible to reach thermal comfort very fast and with very high degree of occupant satisfaction before boarding during extreme cold external conditions (-30°C) but during normal conditions (15°C) it seems better to use option B-medium insulation which enables higher degree of occupant satisfaction (lower PPD index) in this considered conditions (figure 46).

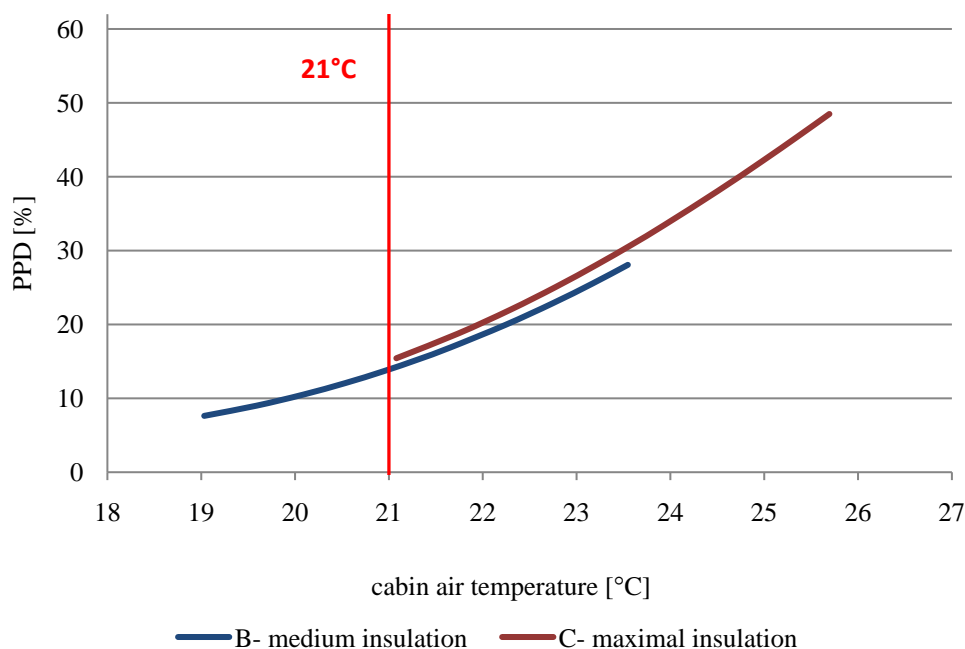


Figure 46

Relation between PPD index and cabin air temperature while supplied air has temperature 30°C , during normal external conditions (Passenger activity 1,7met- passengers boarding)

From comparison of maximal and medium insulation during ambient conditions with temperature -30°C (figure 47) is obvious that in both cases is thermal comfort in very good agreement with desired values of dissatisfaction percentage. With use of maximal insulation is possible to reach comfortable conditions faster and with lower inlet airflow rate however this point is not relevant if we consider empty airplane (without any passenger= no sensible drought rating) which is getting ready for boarding. Due to empty airplane there is no negative impress on passengers regarding high velocity rate inside the cabin and it is possible to consider higher inlet airflow rate and that means lower level of insulation quality. According this reason is for external temperature -30°C sufficient enough to apply medium insulation and to supply the heating air at temperature 60°C .

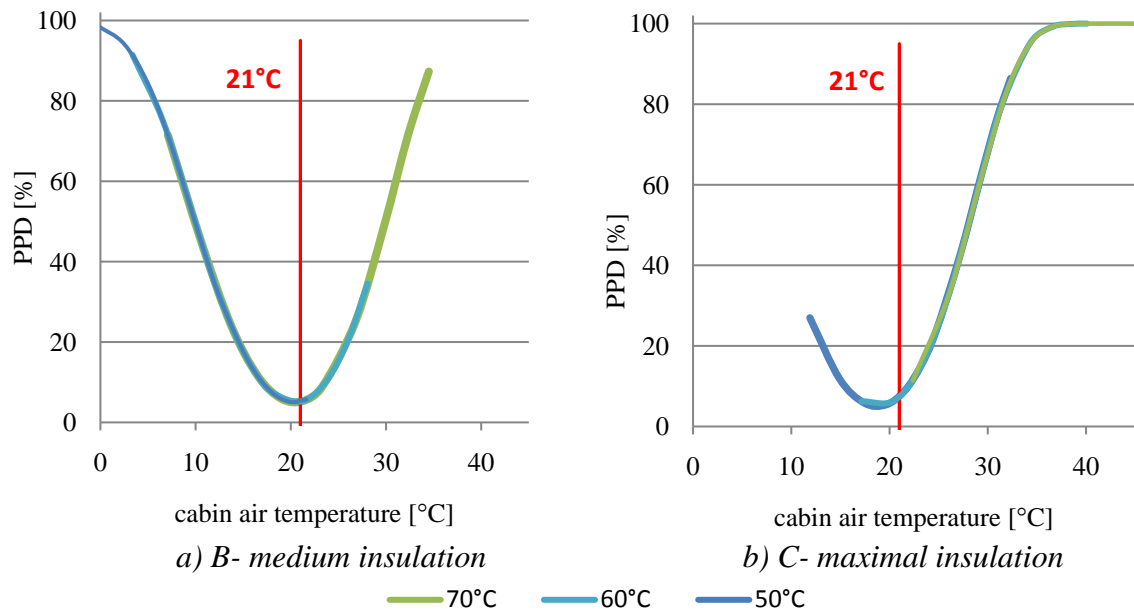


Figure 47

Relation between PPD and cabin air temperature while external temperature is -30°C and considered air supply temperature is 50°C , 60°C and 70°C respectively (Passenger activity 1,7met- passengers boarding)

During flight conditions and with medium insulation considered is necessary to increase temperature of supplied air at 70°C to keep thermal comfort at eligible degree which is according international standard obtained at temperature 24°C during flight conditions as passengers have lower level of activity. With temperature 70°C of supplied heating air is sufficient to supply it at volume rate approximately $0,07\text{m}^3/\text{s}$ (figure 48) and therefore relative velocity in immediate area of passenger is approximately $0,3\text{m}/\text{s}$ what fulfils comfortable environment request without any expectable drought rating risk (see figure 22- chapter 7.5.).

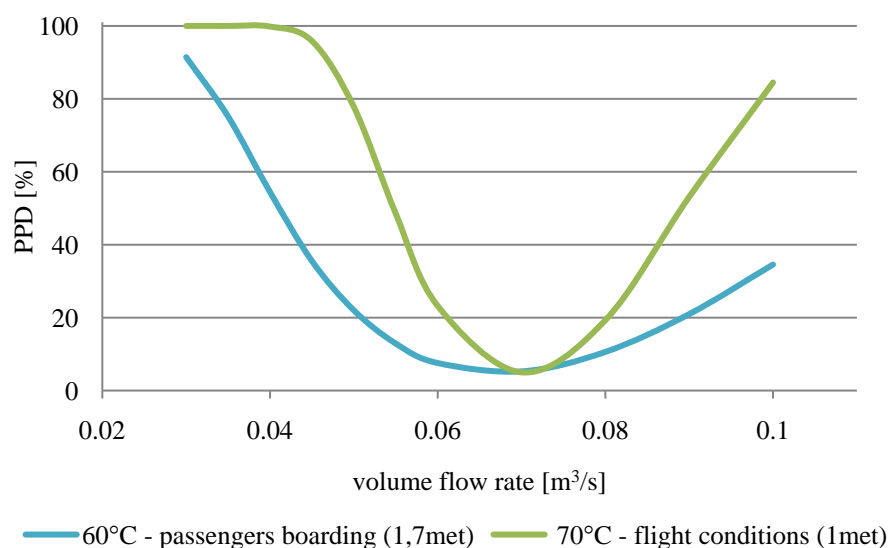


Figure 48

Relation between PPD and volume flow rate of supplied air into cabin with medium insulation applied

If maximal insulation is applied than during flight conditions is possible to obtain higher degree of comfort (represented by lower PPD index) in compare with medium insulation (figure 49). This phenomenon is given by higher radiation temperature (temperature of walls surrounding the investigated compartment) due to better insulation.

As passengers spend much more time in airplane during a flight it is more relevant to reach better result with PPD index (less dissatisfied occupants) during a flight than during passengers boarding. In order to obtain the comfortable environment, maximal insulation is eligible as the best solution.

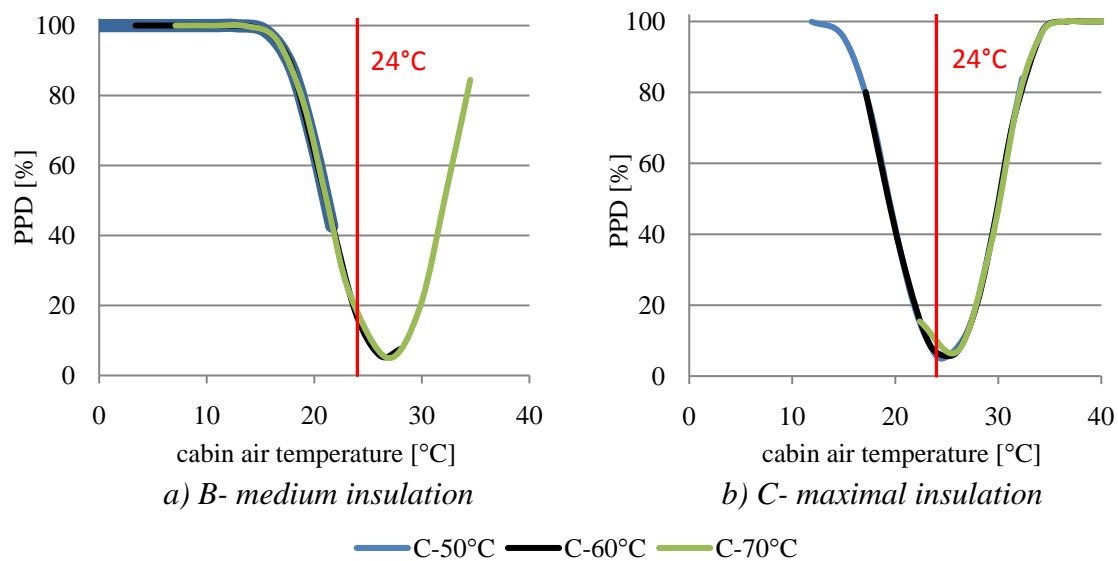


Figure 49

Relation between PPD and cabin air temperature during external environment temperature -30°C and considered heating air supply at temperature 50°C , 60°C a 70°C (Passenger activity 1met- flight conditions)

With use of maximal insulation we can obtain desired comfort conditions at very low volume flow into the cabin, what leads to reduction of drought risk. The Higher weight of this insulation can still treated as acceptable. During normal external conditions when airplane is getting prepared for boarding is obtained minimal temperature after heating process a bit higher than desired temperature 21°C (figure 46) however after descending of metabolic heat production of passengers (which refers to steady sitting) is thermal comfort getting under PPD value 10%.

At the end of this study can be concluded that with use of maximal insulation is possible to obtain thermal comfort in every considered case of external environment with PPD index from 5% to 15% what can be treated as a very good result.