



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

HYPOXIE V LETECTVÍ

HYPOXIA IN AVIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Doležel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

JUDr. Jaromír Hammer

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Jan Doležel**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Profesionální pilot
Vedoucí práce: **JUDr. Jaromír Hammer**
Akademický rok: 2021/22

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 bakalářské práce:

Hypoxie v letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Účinky hypoxie na pilota a rizika s tímto jevem spojená.

Cíle bakalářské práce:

Popsat účinky hypoxie, jejich počáteční projevy a příznaky pro rozpoznání nástupu hypoxie na pilota.

Způsoby předcházení projevům hypoxie.

Příklady leteckých nehod, u kterých byla stanovena jako příčina hypoxie.

Seznam doporučené literatury:

Lidská výkonnost a omezení - Učební texty pro teoretickou přípravu pilotů - Akademické vydavatelství CERM, s.r.o. ISBN: 978-80-7204-688-1.

Biologie pro gymnázia ISBN: 978-80-7182-345-2.

Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod - www.uzpln.cz.

Ústav leteckého zdravotnictví Praha - www.ulz.cz.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá hypoxií jak ve všeobecném, tak v dopravním civilním letectví. Cílem práce je vytvořit všeobecný přehled v oblasti letecké hypoxie a porozumění nebezpečí rozvoje hypoxie u posádky za letu. Součástí práce jsou kapitoly popisující fyziologické principy lidského těla, fyzikální zákony spjaté s hypoxií, palubní kyslíkové a přetlakové vybavení letounu. V závěru práce autor provedl rozbor dvou leteckých nehod jejichž příčinou byla hypoxie.

Klíčová slova

hypoxie, parciální tlak, kyslík, ztráta vědomí

Abstract

This bachelor thesis focuses on hypoxia in general and commercial civil aviation. The goal of the thesis is to create a general overview of hypoxia in aviation and the dangers connected to it. The thesis includes chapters describing the physiological principles of the human body, the physical laws associated with hypoxia, and the on-board oxygen and pressurization of aircraft. At the end of the thesis the author made an analysis of two aviation accidents caused by hypoxia.

Keywords

hypoxia, partial pressure, oxygen, loss of consciousness

Bibliografická citace

DOLEŽEL, Jan. *Hypoxie v letectví*. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141446>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jaromír Hammer.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Hypoxie v letectví“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v části Seznam použité literatury.

V Brně dne

.....

Jan Doležel

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce JUDr. Jaromíru Hammerovi za pomoc a ochotu při psaní této práce. Dále bych také poděkoval Ing. Karolovi Bencalíkovi Ph.D. za poskytnutí podkladů z oblasti konstrukce letounů.

Obsah

1	Úvod	11
1.1	Cíl práce	11
2	Fyziologie člověka.....	12
2.1	Dýchací soustava.....	12
2.2	Oběhová soustava.....	14
2.2.1	Krev	14
2.2.2	Srdce a krevní oběh	14
2.3	Centrální nervová soustava	16
2.3.1	Orgány CNS	16
3	Fyzikální zákony a jevy	18
3.1	Daltonův zákon	18
3.2	Henryho zákon	18
3.3	Difuze	19
3.4	Osmóza.....	19
3.5	Chemická afinita	19
4	Druhy hypoxie	20
4.1	Hypoxická	20
4.2	Anemická	20
4.3	Cirkulační (Ischemická)	20
4.4	Histotoxická	20
5	Příznaky hypoxie, její rozpoznání a metody pro zábranu hypoxické hypoxie.....	21
5.1	Příznaky hypoxie.....	22
5.2	Doba užitečného vědomí (DUV).....	23
5.3	Zábrana projevu hypoxie.....	23
6	Letecké zákony	24
6.1	Hlava 4 ustanovení 4.3.9.....	24
6.1.1	Ustanovení 4.3.9.1	24
6.1.2	Ustanovení 4.3.9.2.....	24
6.2	Hlava 6 ustanovení 6.7	24
6.2.1	Ustanovení 6.7.2	24

6.2.2	Ustanovení 6.7.4	24
7	Palubní vybavení	25
7.1	System přetlakování a klimatizace vzduchu	25
7.2	Nouzový kyslíkový systém	27
8	Letecké nehody způsobené hypoxií.....	29
8.1	Let HCY 522	29
8.1.1	Základní informace.....	29
8.1.2	Příčina.....	30
8.1.3	Důsledky	30
8.2	Let kluzáku v dlouhé vlně	31
8.2.1	Základní informace.....	31
8.2.2	Příčina	32
9	Závěr.....	33

1 Úvod

První vědecké zmínky o neblahých účincích pobytu ve vyšších výškách pocházejí z Mexika a byly sepsány lékařem francouzského původu Denisem Jourdanetem (1815-1892). Jourdanet nejprve zkoumal symptomy některých svých pacientů a zaznamenal, že se podobají příznakům anémie. Dále se také zabýval fyziologickými rozdíly v populacích, žijících v odlišných nadmořských výškách. Z jeho poznatků vzešly první termíny *anoxyhémie* a *anémie barométrique*. Jak již název napovídá, Jourdanet věděl, že příznaky jsou způsobeny nízkým obsahem kyslíku ve vdechovaném vzduchu. Jourdanet byl s letectvím spjat až v roce 1875 při tragickém letu francouzského horkovzdušného balónu Zenith. Jourdanet se posádce snažil pomocí dopisu varovat před nedostatkem kyslíku ovšem dopis nebyl včas doručen a balón s trojčlennou posádkou vystoupal do výšky 8600 metrů, při čemž zemřeli dva ze tří pilotů uvnitř na akutní hypoxii.^[1]

S hypoxickými poruchami posádek letounů se setkáváme až během druhé světové války specificky u posádek bombardérů, kterým častý pohyb zabraňoval v nošení kyslíkové masky. Pro vyhnutí se nepřátelské střelbě, využívaly letouny co možná nejvyšších letových hladin na hranici dostupy ve FL250 až FL300. Tyto lety trvaly až 8 hodin, což způsobovalo značný fyzický i psychický diskomfort. Armádní výzkumná střediska se tímto fenoménem začala hlouběji zabývat a pomocí podtlakových komor podrobněji popsala příčiny a účinky hypoxie^[2]. Z toho výzkumu vyplynula potřeba vývoje přetlakových kabin letounů. Prvním takovýmto letounem se stal bombardér Boeing B-29 Superfortress.

1.1 Cíl práce

Hypoxie a problematika přetlakování ovšem není pouze otázkou minulosti a může vést ke katastrofickým důsledkům při nepozornosti, nezkušenosti nebo nerespektování pravidel. Především ve sportovním a volnočasovém letectví, kde posádka není dostatečně kvalifikovaná a obeznámena s nebezpečím je hypoxie velmi riskantním jevem. Proto je cílem této práce obeznámit čtenáře s principem rozvoje hypoxie, jejími účinky na lidské tělo, systémy zabraňujícími hypoxii a s nehodami zapříčiněnými hypoxií.

2 Fyziologie člověka

2.1 Dýchací soustava

Začíná dutinou nosní tvořenou nosními dírkami a nozdrami (lat. *choana*), kde vzduch vstupuje do nosohltanu (lat. *nasospharynx*). Dutina je vystlána řasinkovým epitelem, jehož funkce je zachytit prach a jiné nečistoty a zabránit tak vstupu cizích částic dále do těla. Další funkcí nosní dutiny je zvlhčení a prohřátí vdechované vzduchu. Ohřev vzduchu je zprostředkován žilními pleteněmi (lat. *plexus venosus*) prokrvující sliznici.

Nosohltan je první částí hltanu (lat. *pharynx*), který je společný jak dýchací, tak trávicí soustavě. Vzduch odsud dále pokračuje do hrtanu skládajícího se z řady vzájemně spojených chrupavek. Na začátku hrtanu také nalezneme hrtanovou příklopku (lat. *epiglottis*), která má za úkol zabránit polknutému jídlu vstup do hrtanu.

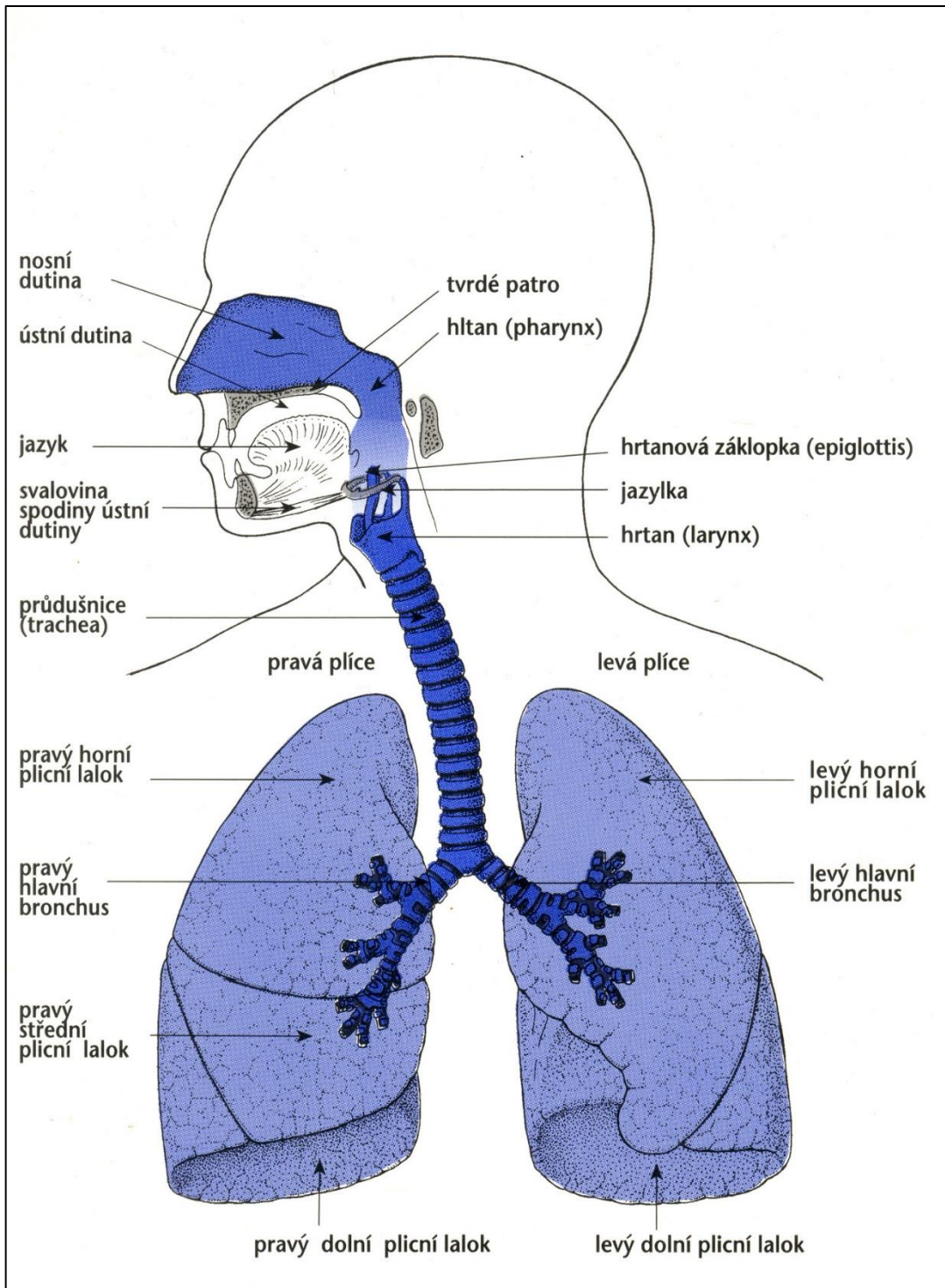
Na hrtan se napojuje chrupavkami tvořená deset až dvanáct centimetrů dlouhá trubice tzv. průdušnice (lat. *trachea*). Na úrovni čtvrtého až pátého hrudního obratle se trachea dále větví na menší průdušky (lat. *bronchi*), které se dále v plicích dělí na menší průdušinky (lat. *bronchioly*).

Plice (lat. *pulmo*) jsou párový orgán rozdělený mezihrudní přepážkou (lat. *mediastinum*) na pravou a levou plíci. Plíce nejsou symetrické, kvůli uložení srdce na levé straně se levá plíce skládá pouze ze dvou laloků, zatímco pravá ze tří.

Povrch plic je kryt vazivovou blánou tzv. poplicnicí (lat. *pleura pulmonalis*), která se napojuje na vnitřní stranu hrudníku jako pohrudnice (lat. *pleura parietalis*). Oblast mezi těmito blánami se nazývá šterbina pohrudniční (lat. *cavum pleurae*). Je vyplněna vazkou kapalinou umožňující vzájemné klouzání při dýchání a udržuje stálý podtlak nutný pro dýchání.

Průdušinky se v plicích dále větví na tenké alveolární chodbičky ústící do plicních sklípků (lat. *alveolů*). Funkcí alveolů je výměna plynů ze vzduchu a z krve. Na pomezí alveolů a vlásečnic (lat. *kapilár*), se z odkysličené krve odebere vyprodukovaný oxid uhličitý (CO₂) a krev se opět nasytí kyslíkem (O₂) z alveolárního vzduchu za vyrovnání vzájemných koncentrací.

Dýchání zajišťuje bránice (lat. *diaphragma*) a zevní mezižeberní svaly. Plíce jsou tlakem vnějšího vzduchu tlačeny k hrudní stěně. Při nádechu se bránice posouvá dolů a mezižeberní svaly se stahují, což vytvoří volný prostor pro expanzi plic a volný vstup vzduchu (lat. *inspirace*). Výdech pracuje na opačném principu, kde bránice a mezižeberní svaly ochabnou, zmenší tak prostor pro plíce a vytlačí vzduch ven z plic (lat. *expirace*).^[3]



Obr. 1
 Anatomie dýchací soustavy

2.2 Oběhová soustava

2.2.1 Krev

Krev je základní přenosové médium v lidském organismu, podílejí se na transportu dýchacích plynů, živin, hormonů a vitamínů. Mezi další funkce patří také rozvod tepla po těle obrana srážením se nebo také udržování stálého prostředí uvnitř těla tzv. homeostáza.

Krev se skládá z krevní plazmy a krevních tělísek. Mužské tělo obsahuje mezi pěti a šesti litry krve, ženské tělo přibližně čtyři a půl litru.

Krevní plazma je tvořena především vodou a bílkovinami, nemalou roli ovšem hrají také anorganické látky jako chlorid sodný a hydrogenuhličitan sodný které udržují stálé pH 7,4 a stálou osmotickou hodnotu plazmy odpovídající 0,9% roztoku chloridu sodného (tzv. fyziologický roztok). Fyzikální princip osmózy je dále popsán v kapitole 2.5 Osmóza.

Červené krvinky (lat. *erythrocyty*) jsou bezjaderné buňky obsahující červené barvivo hemoglobin, na který se váže kyslík za vytvoření dioxyhemoglobinu. z něhož se ve tkáních kyslík opět uvolňuje. V jednom mililitru krve se průměrně nachází pět miliard červených krvinek. Erythrocyty se tvoří a dozrávají v kostní dřeni a po sto dvaceti dnech zanikají ve slezině.

Bílé krvinky (lat. *leukocyty*) zajišťují buněčnou a humorální¹ imunitu lidského těla. Problematika funkce bílých krvinek je velmi komplexní a nemá přímou spojitost s hypoxií, a proto nebude dále rozvedena.

Krevní destičky (lat. *trombocyty*) jsou tvořeny odštěpováním z větších buněk v kostní dřeni a napomáhají zastavit krvácení srážením se na postiženém místě.^[3]

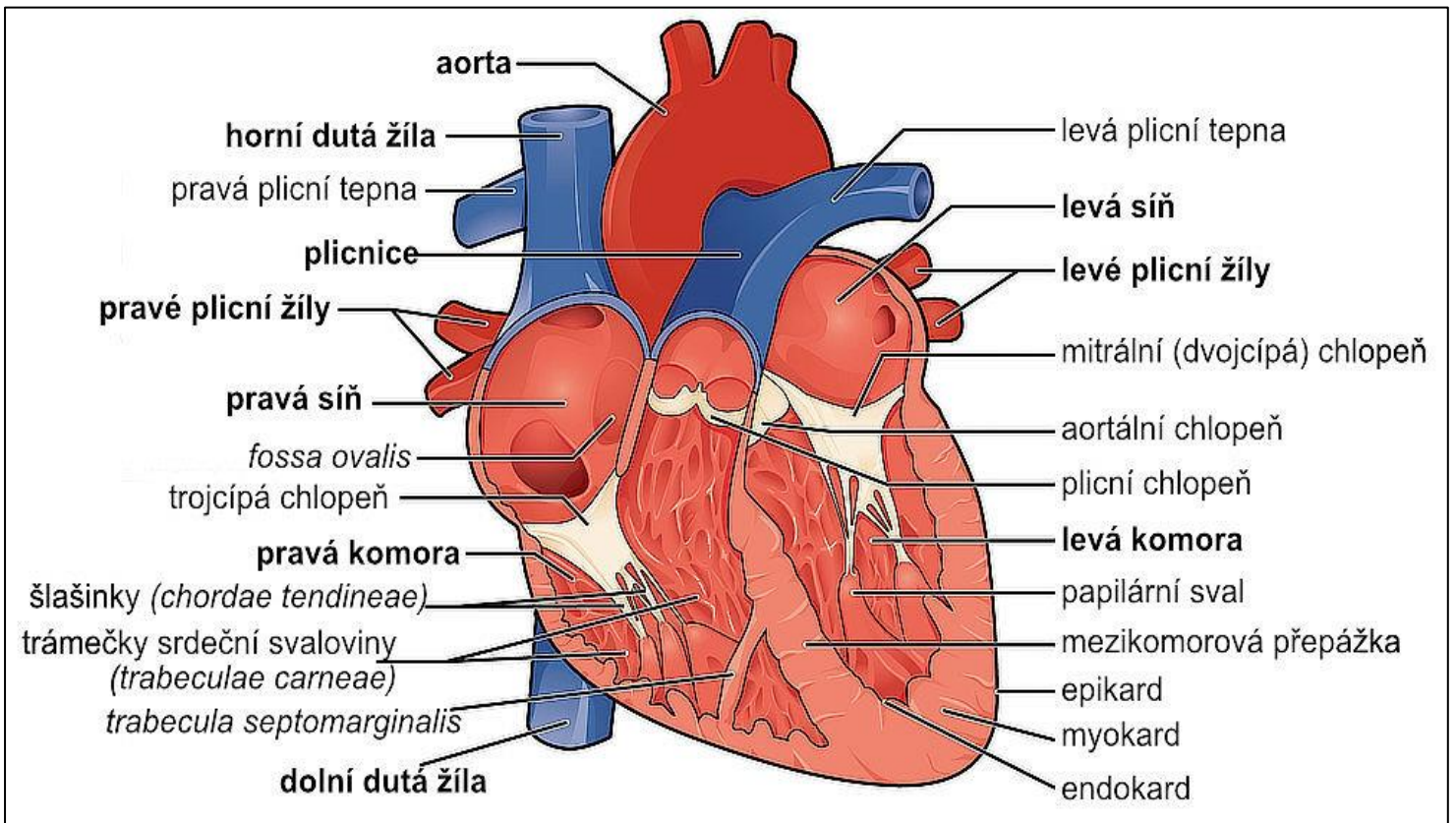
2.2.2 Srdce a krevní oběh

Hnací silou cirkulace krve je srdce (lat. *cor*), pracující na principu dvoukomorového čerpadla. Srdce je tvořeno dvěma předsíněmi (lat. *atrium*) a dvěma komorami (lat. *ventriculus*) společně tvořící dvě přepážkou oddělené poloviny srdce. Krev do srdce vstupuje horní a dolní dutou žilou (lat. *vena cava superior et inferior*) do pravé předsíně dále do pravé komory a následně do plicnice ústící do plic, kde probíhá okysličení krve. Plicními žilami se poté krev z plic dostává do levé předsíně a následně do levé komory. V levé komoře má krev již tlak odpovídající tlaku krve po celém těle². Krev srdce opouští přes osrdečnici (lat. *aortu*) a navazujícími tepnami se dále rozlévá do zbytku těla.

Při stáhnutí (lat. *systola*) srdeční svaloviny (lat. *myokardu*) se krev nejdříve vlévá z předsíní do komor a jejímu zpětnému návratu brání srdeční chlopně (lat. *valva*) na pomezí předsíně a komory. V druhé fázi dochází k systole komor a krev je ze srdce vypuzována do krevního řečiště. Následné ochabnutí svalů (lat. *diastola*) dovolí krvi opět zaplnit síně a navrátit tak systém do původního stavu schopného další systoly.^[3]

¹ Humorální neboli protilátková imunita je reakce leukocytů na cizorodé viry a bakterie

² Normální tlak krve je 120 mm Hg systolický tlak a 80 mm Hg diastolický tlak



Obr. 2
Anatomie srdce

2.3 Centrální nervová soustava

Základní stavební buňkou nervového systému člověka je neuron. Jedná se o velmi specializovanou buňku se specifickou stavbou. Tělo neuronu se skládá z mnoha menších výběžků (lat. *dendritů*) a jednoho delšího výběžku (lat. *axonu/neuritu*).

Šíření nervového vzruchu pracuje na principu přenosu elektrického náboje. Tělo neuronu je polopropustné a selektivně propouští kationty³ draslíku až 100krát více než kationty sodíku⁶, které se kumulují vně neuronu. V klidovém stavu se na membráně tvoří klidový elektrický potenciál (přibližně 0,1 V). Při podráždění se membrána stává dočasně propustnou pro sodné kationty a nastane depolarizace. Tento vzruch se dále šíří axony, na jejichž koncích se nachází zápoje (lat. *synapse*) spojující konce jednotlivých axonů do jednotné sítě. Po přenosu vzruchu se pomocí tzv. sodno-draselné pumpy navrácí prostředí membrány do původního stavu za spotřeby energie⁴.^[3]

2.3.1 Orgány CNS

CNS se skládá z mozku dělí se na: přední neboli koncový mozek (lat. *telencephalon*), mezimozek (lat. *diencephalon*), mozeček (lat. *cerebellum*), prodlouženou míchu (lat. *medulla oblongata*) a z páteřní míchy (lat. *medulla spinalis*) propojující receptory na periferních částech těla s mozkem.

Mozek je umístěn v dutině lební obalen tvrdou plenou (lat. *dura mater*), pavoučnicí (lat. *arachnoidea*) a omozečnicí (lat. *pia mater*). Prostor mezi pavoučnicí a omozečnicí je vyplněn mozkomíšním mokem (lat. *liquor cerebrospinalis*) utlumujícím otřesy a nárazy. Kůra mozku je tvořena šedou hmotou mozkovou skládající se z těl neuronů. Nitro mozku vyplňuje bílá hmota tvořená axony neuronů spojených do nervových drah.^[3]

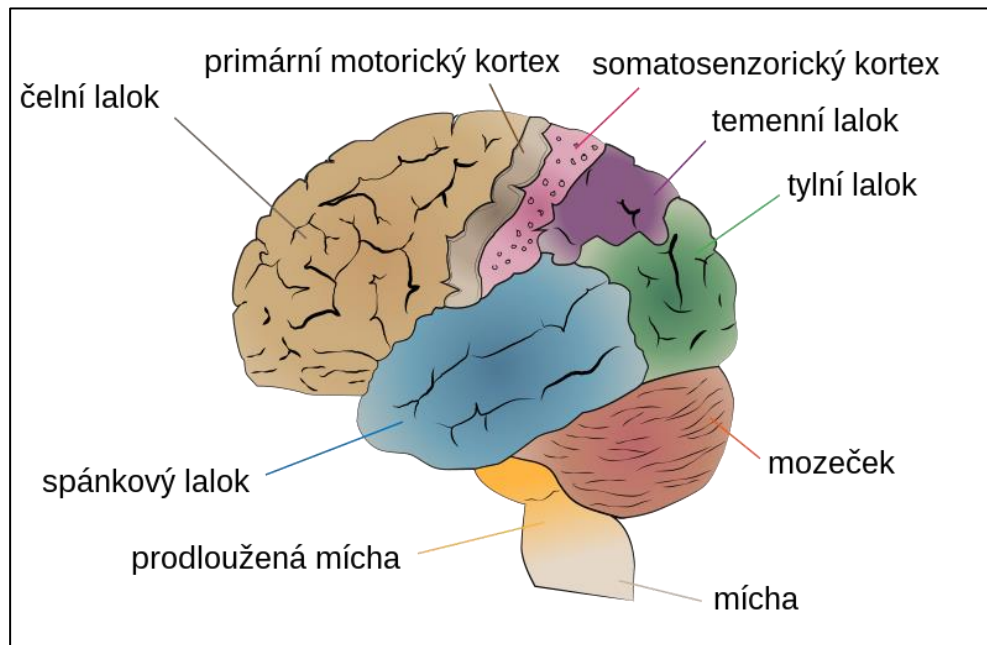
Funkcí mozku je komplexní řízení lidského organismu, jak při autonomních činnostech jako je dýchání a řízení srdeční frekvence ale i v komplexních úkonech jako je pilotáž, komunikace a organizace letecké posádky. Jeho kritické postavení v rozhodovací struktuře klade vysoké nároky na správnou funkci mozku během celého letu.

Jednotlivé části mozku jsou specializované na zpracování určitých informací a řízení různých funkcí v lidském těle. Synergickou spoluprací a vzájemným propojením vytvářejí celky, které mohou být anatomicky oddělené ale funkčně spojené. Při aktivaci jedné části mozku dochází k útlumu ostatních částí mozku^[4], což je důležité si včasné uvědomit a zabránit zatížení mnoha rozdílných částí mozku v jednom okamžiku.

3 Kation je kladně nabitá částice vzniklá odevzdáním jednoho elektronu z elektronového obalu. Anion je záporně nabitá částice vzniklá přijetím elektronu do elektronového obalu.

4 Přenos energie v lidském těle zprostředkovává molekula ATP (adenosin trifosfát) skládající se z adenosinu a tří fosfátových skupin. ATP odštěpuje fosforečnou skupinu, při čemž dochází k uvolnění energie potřebné pro funkci všech živých buněk.

Mozek tvoří jen dvě procenta hmotnosti lidského těla, ale je zodpovědný za přibližně dvacet procent spotřeby kyslíku v těle.^[5] Důvodem značné spotřeby kyslíku je fakt, že mozek produkuje většinu potřebné energie oxidací glukózy (oxidací jedné molekuly glukózy vznikne přibližně 32 molekul ATP)^{5, [6]}



Obr. 3
Anatomie mozku

5 Mozek je v krajních případech schopen oxidovat také kyselinu mléčnou vzniklou vysokou fyzickou aktivitou a získat tak až 60% potřebné energie.

3 Fyzikální zákony a jevy

Pro pochopení všech možných příčin hypoxie v lidském těle je třeba mít znalost několika základních zákonů o plynech a jejich interakci s okolním prostředím. Také stavové veličiny jako jsou tlak a objem plynu ovlivňují jeho chování v lidském těle.

3.1 Daltonův zákon

Daltonův zákon říká, že celkový tlak směsi vzájemně nereaktivních plynů je roven součtu parciálních tlaků jednotlivých plynů směsi.

$$P = p_1 + p_2 + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1)$$

P ... celkový tlak plynu

p_n ... parciální tlak n-tého plynu

Z tohoto si můžeme odvodit, že pokud je procentuální zastoupení kyslíku v atmosféře 20.95% a tlak odpovídající hodnotě MSA⁶ na mořské hladině 1013,25 hPa, tak parciální tlak kyslíku na mořské hladině činí 212.28 hPa. Tato hodnota klesá úměrně s úbytkem tlaku s rostoucí výškou, to znamená že v FL400 je tlak kyslíku pouze 39 hPa^[7] což není pro lidský organismus dostatečné pro přežití.

3.2 Henryho zákon

Henryho zákon definuje poměr mezi množstvím plynu rozpuštěného v kapalině a tlakem daného plynu nad kapalinou.

$$c = H \cdot p \quad (2)$$

*c ... molární koncentrace plynu v kapalině [mol * dm⁻³]*

*H ... konstanta rozpustnosti dle tlaku [mol * (m³ · Pa)⁻¹]*

p ... tlak plynu nad kapalinou [Pa]

Tento zákon je podstatný, jelikož popisuje velmi nebezpečný jev nastávající při explozivní dekompresi kabiny letounu. Při náhlém snížení okolního tlaku atmosféry se dusík běžně rozpuštěný v krvi uvolní, jelikož tlak plynného dusíku v okolí rapidně klesne. Důsledkem je velké množství drobných bublinek blokujících volný průchod krve kapilárami a dráždiví receptory bolesti. Takzvaná kesonová choroba se, jak název naznačuje poprvé objevila u potápěčů pracujících v kesonech při návratu nad vodní hladinu nepřiměřeně rychle. Individuální odolnost vůči dekompresní chorobě snižuje zvýšené procento tělesného tuku, a především potápění před letem. Bezpečnostní pauza mezi potápěním a letem může dosahovat až čtyřicet osm hodin při potápění do větších hloubek.^[8]

⁶ Mezinárodní standardní atmosféra je model atmosféry s předem definovanými stavovými veličinami. Tlak vzduchu na hladině moře činí 1013.25 hPa, teplota na hladině moře 15 °C a hustota 1225 kg/m³

3.3 Difuze

Difuze je fyzikální děj, při kterém se atomy látky samovolně přesunují z místa s vyšší koncentrací na místo s nižší koncentrací. Hnací silou pohybu je tepelný pohyb částic, tudíž rychlost difuze je úměrná teplotě směsi látek.

3.4 Osmóza

Osmóza je typ pasivního transportu, při kterém přestupuje rozpouštědlo (nejčastěji voda) přes polopropustnou membránu z prostoru s méně koncentrovaným roztokem do prostoru s více koncentrovaným roztokem. Polopropustná membrána je v tomto případě propustná pro rozpouštědlo a méně propustná nebo nepropustná pro rozpuštěné látky. Je-li polopropustná membrána alespoň částečně prostupná pro rozpuštěné látky, může voda přestupující přes membránu strhávat sebou i molekuly rozpuštěné látky. Velikost osmózy je dána rozdílem osmotických tlaků na obou stranách polopropustné membrány. Osmóza je zjednodušeně řečeno specifickým příkladem difuze. Obecně ale osmóza funguje nejen pro kapaliny, ale i pro plyny.^[9]

3.5 Chemická afinita

Afinita je schopnost látek slučovat se a vytvářet tak chemické sloučeniny. Také je možné tímto termínem označit pravděpodobnost, že mezi chemickými látkami proběhne chemická reakce za vytvoření chemické sloučeniny.

4 Druhy hypoxie

4.1 Hypoxická

Jedná se o nejčastější a nejvýznamnější formu hypoxie v letectví. Nastává, pokud se sníží parciální tlak kyslíku ve vdechovaném vzduchu pod optimální hladinu viz Daltonův a Henryho zákon. Následkem je nedostatečný tlak na rozmezí plicních sklípků (lat. alveolů) a kapilár malého plicního oběhu^[8]. Lidské tělo se snaží na pokles krevního kyslíku odpovědět roztažením cév (lat. vasodilatace) pro zvýšený tok krve. Současně probíhá opačný jev v plicích, tj. zúžení cév pro omezení přístupu krve (lat. vasokonstrikce). Tento jev má při lokální hypoxii tkání pozitivní efekt, protože napomáhá zasažené oblasti s efektivní a přiměřenou výměnou plynů. Při celotělové neboli globální hypoxii je nežádoucí, jelikož při zúžení cév dojde k ztuhnutí tkání a může vést až k smrtelnému otoku plic^[10]. Mezi patologické příčiny hypoxické hypoxie patří hypoventilace⁷ při plicních či nervosvalových chorobách.^[11]

4.2 Anemická

Méně častým, avšak stejně závažným (především v malých letounech) druhem hypoxie je anemická hypoxie. Anemické hypoxie je neschopnost krve přenášet kyslík. Příčinou může být buď nedostatek či abnormalita (např. srpkovitá *anémie*⁸) krevního barviva *hemoglobinu*⁹ nebo nasycení krve plynem lépe se vázajícím na krevní barvivo než kyslík viz chemická afinita. Například oxid uhelnatý má mnohonásobně (250x – 300x) vyšší afinitu k hemoglobinu a vytvoření karboxylhemoglobinu než kyslík k vytvoření oxyhemoglobinu. Při srpkové anémii nastává až ve výšce, avšak otrava oxidem uhelnatým může nastat i v nulové výšce.

4.3 Cirkulační (Ischemická)

S tímto druhem hypoxie se můžeme setkat u letců stíhaček nebo u lidí s křečovými žilami (lat. varixy). Příčiny jsou hromadění krve na periferních částech těla, hyperventilace¹⁰ nebo zúžení až uzavření tepen. Nejhorší situace nastává, pokud se cirkulace zastaví v oblasti mozku pak dochází k velmi rychlé degradaci myšlení, odumření neuronů, úpadku do kómatu až smrti hrozící v řádu minut.

4.4 Histotoxická

Poslední ze základních příčin hypoxie je neschopnost tkání zužitkovat dodávaný kyslík následkem intoxikace cizorodými látkami. Obsah kyslíku v krvi i krevní průtok je fyziologický ale enzymy zodpovědné za zpracování kyslíku jsou poškozené²⁰. Mezi tyto látky řadíme alkohol, sulfan nebo kyanidy.

7 Nedostatečné dýchání vůči momentální potřebě organismu

8 Anémie neboli chudokrevnost je nedostatek či mutace hemoglobinu.

9 Červené krevní barvivo umožňující přenos kyslíku v lidském těle.

10 Zvýšení dechové frekvence vedoucí k vyčerpání zásob oxidu uhličitého zodpovědného za regulaci dýchání

5 Příznaky hypoxie, její rozpoznání a metody pro zábranu hypoxické hypoxie

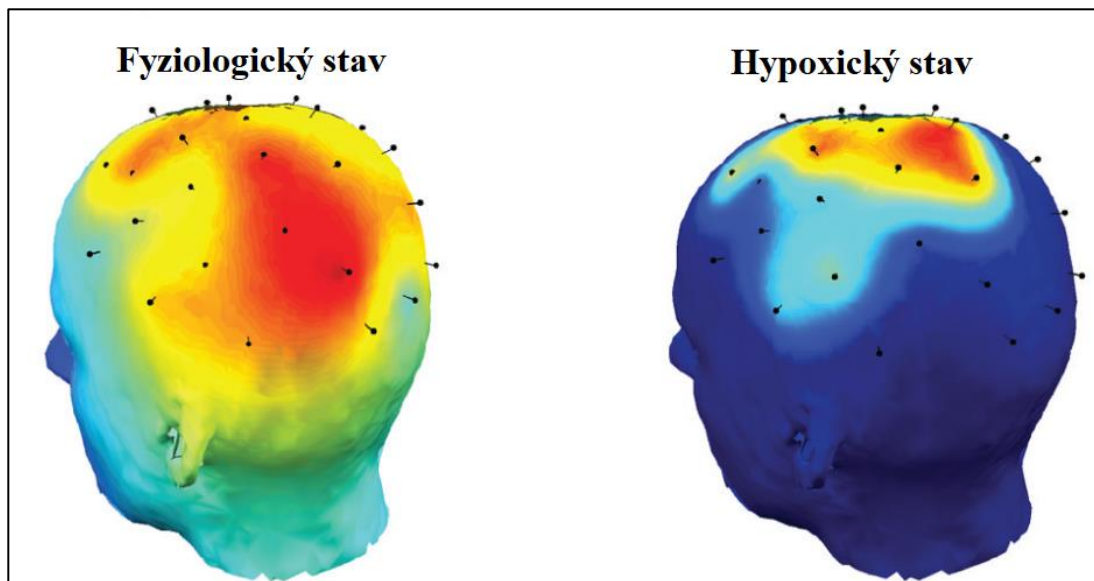
Základní znalostí pro vyhnutí se neočekávanému projevu hypoxie je povědomí o výškovém rozdělení atmosféry z hlediska fyziologických faktorů. Při letu v blízkosti zemského povrchu přibližně do výšky 6000 ft, se zdravý pilot bez přihoršujících faktorů s hypoxií pravděpodobně nesetká. Při dalším stoupání si již pilot může povšimnout zrychleného dýchaní či pocitů horka. Pilot se ocitl v úseku fyziologických kompenzací, kdy se organismus řadou změn snaží přizpůsobit poklesu O₂. Jak již název vypovídá tyto změny nejsou patogenní a nemají negativní vliv na kompetenci leteckých posádek. Zlom nastává ve výšce 13 000 ft až 15 000 ft v tzv. prahu hypoxických poruch. V této výšce již náchylnější jedinci vykazují známky degradace psychologických funkcí. Pásmo mezi 15 000 ft a 20 000 ft se nazývá úsek výskytu poruchy smyslů a úsudku. V tomto pásmu se již u všech vyskytují některé z příznaků popsanych v kapitole 5.1. a let bez dodávky kyslíku nebo přetlakové kabiny zde není možný. Nejrizikovější úsek se nachází nad výškou 20 000 ft tzv. kritický úsek. Při výpadku dodávky O₂ nebo ztráty přetlaku nastává riziko rychlé ztráty vědomí, selhání oběhového systému a následně smrt^[8]. Pro lepší přehlednost a usnadnění zapamatování si tohoto podstatného rozdělení je vložena tabulka níže.

Výška letu		Charakteristika
Metry [m]	Stopy [ft]	
0 – 1 800	0 – 6 000	Indiferentní úsek
1 800 – 4 500	6 000 – 15 000	Úsek fyziologických kompenzací
4 500 – 6 000	15 000 – 20 000	Úsek výskytu poruchy smyslů a úsudku
6 000 – 7 000	20 000 a výše	Kritický úsek

5.1 Příznaky hypoxie

Riziko hypoxie spočívá v pomalém rozvíjení jednotlivých příznaků s ubývajícím parciálním tlakem O₂ v organismu. Hypoxie se projevuje řadou objektivních i subjektivních příznaků rozdělených v tabulce níže. Ve většině případů se ovšem objeví pouze tři až čtyři. Žádný z příznaků ovšem není dostatečně specifický pro hypoxii a pilot neznalý stavu hypoxie si je lehce může spojit s řadou jiných příčin.

Subjektivní pocity	Objektivní příznaky
Pocit nedostatku vzduchu	Zrychlené a prohloubené dýchání
Bolesti hlavy	Zívání
Závratě	Třes
Nevolnost	Zmodrání rtů a nehtových lůžek ¹¹
Agresivita	Pocení
Pocity horka na končetinách	Smazaná řeč
Neostře, rozmlžené nebo dvojité vidění	Poruchy úsudku
Ospalost	Nekoordinované pohyby
Malátnost	Zrychlení nebo zpomalení srdeční frekvence
Pocit na omdlení	Bezvědomí, křeče



Obr. 4

Porovnání mozkové aktivity spojená s pamětí

¹¹ Zmodrání neboli cyanóza nastává, pokud zastoupení neokysličeného hemoglobinu v krvi stoupne

5.2 Doba užitečného vědomí (DUV)

Při nedostatku kyslíku dochází k omezení psychické funkce pilota a jeho schopnost řešit komplexní úkoly a ovládat letoun se zhoršují. V praxi se osvědčilo stanovit přibližný čas, po který je pilot schopen rozumného řešení situace, tzv. doba užitečného vědomí.

Doba užitečného vědomí obecně klesá s výškou letu, existuje ovšem mnoho vedlejších faktorů s efektem na DUV. Mladí tolerují hypoxii lépe než starší^[12], únava a fyzické vyčerpání zhoršují odolnost vůči hypoxii a zkracují DUV, kuřáci překvapivě i přes výše popsané účinky karboxylhemoglobinu mají toleranci lehce zvýšenou, což ovšem omezuje jejich schopnost rozpoznat problém způsobující hypoxii včas^[13].

Výška letu		Doba užitečného vědomí	
m	ft	Bez dodávky kyslíku	S dodávkou 100% kyslíku
6 000	20 000	30 minut	Neomezená
7 700	25 000	2 - 3 minuty	
9200	30 000	1 - 2 minuty	
10 700	35 000	30 - 90 sekund	
12 300	40 000	15 - 20 sekund	Až 10 minut

5.3 Zábrana projevu hypoxie

Jelikož hypoxická hypoxie nastává z fyziologických příčin není možné její nástup zabránit či výrazně oddálit. Snaha zabránit rozvoji hypoxie zrychleným hlubokým dýcháním je marná, jelikož červené krvinky dokáží pojmout pouze určité množství kyslíku. Hyperventilace ne jenom nezlepší odolnost vůči hypoxii, ale může vést k nedostatku oxidu uhličitého (CO₂) v organismu neboli tzv. hypokapnii. Důsledkem hypokapnie se sníží množství uvolněného O₂ z červených krvinek do tkání. Příznaky hypokapnie se také shodují s příznaky hypoxie s výjimkou cyanózy rtů a pokožky^[8].

Pokud se za letu rozvine u posádky či cestujících stav hypoxie existuje pouze jedno správné řešení této situace. Sklesání do maximální výšky 10 000 ft MSA a dýchání 100% O₂ tempem normálního klidového dýchání.

6 Letecké zákony

Bezpečností letu ve velkých výškách se zabývají předpisy řady L specificky L6/I Hlava 4 4.3.9 Zásoba kyslíku a Hlava 6 6.7 Všechny letouny pro let ve velkých výškách. Klade především požadavky na vybavení letounu a signalizaci poruch systému přetlakování.

6.1 Hlava 4 ustanovení 4.3.9

6.1.1 Ustanovení 4.3.9.1

Let, který má být vykonán ve výškách, v nichž je atmosférický tlak v prostorách pro cestující a posádku nižší než 700 hPa, nesmí být zahájen, není-li v letounu taková zásoba kyslíku k dýchání, která stačí pro zásobení:

a) všech členů posádky a 10 procent cestujících po dobu přesahující 30 min, po kterou tlak v těchto prostorách bude mezi 700–620 hPa,

b) posádky a cestujících po celou dobu, po kterou atmosférický tlak v těchto prostorách bude menší než 620 hPa.

6.1.2 Ustanovení 4.3.9.2

Let, který má být vykonán letounem s přetlakovou kabinou, nesmí být zahájen, není-li v letounu pro případ ztráty přetlaku zásoba kyslíku postačující pro zásobení všech členů posádky a cestujících, která odpovídá okolnostem zamýšleného letu po celou dobu, kdy atmosférický tlak v prostorách pro cestující a posádku by byl menší než 700 hPa.

Kromě toho, je-li letoun provozován ve výškách, v nichž je atmosférický tlak nižší než 376 hPa, nebo je-li provozován ve výškách, kde je atmosférický tlak větší než 376 hPa, ale není-li schopen provést bezpečný sestup do výšek, v nichž je atmosférický tlak roven 620 hPa, během čtyř minut, musí zásoba kyslíku zajistit dodávku kyslíku všem osobám v prostorách pro cestující po dobu nejméně 10 minut^[14].

6.2 Hlava 6 ustanovení 6.7

6.2.1 Ustanovení 6.7.2

Jestliže letoun musí konat lety ve výškách, v nichž je atmosférický tlak nižší než 700 hPa a jestliže je vybaven zařízením dovolujícím udržet tlak v prostorech pro cestující a posádku vyšší než 700 hPa, musí být tento letoun vybaven zásobníky kyslíku a dýchacími přístroji, které zajistí požadované množství a dodávky kyslíku dle ust. 4.3.8.2.

6.2.2 Ustanovení 6.7.4

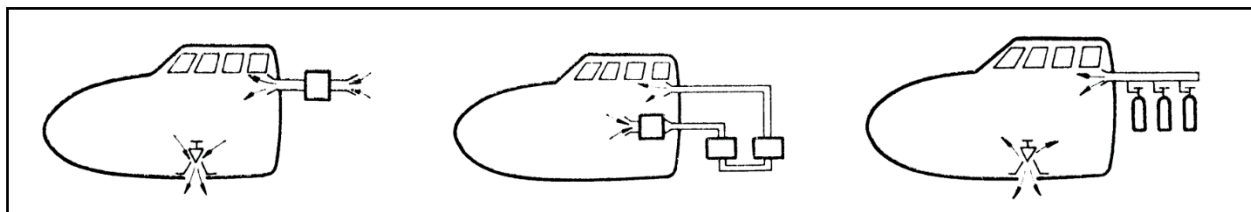
Každý letoun s přetlakovou kabinou, určený k provozu ve výškách, v nichž je atmosférický tlak nižší než 376 hPa, musí být vybaven signalizací, která bude letové posádce signalizovat každou nebezpečnou ztrátu přetlaku^[15].

7 Palubní vybavení

7.1 Systém přetlakování a klimatizace vzduchu

Pro dlouhodobý pobyt v kabině letadla a zajištění je zapotřebí zajistit několik parametrů ovzduší. Tlak, teplota a vlhkost se řadí mezi základní faktory ovlivňující lidský organismus. Všechny tyto parametry se udržují v uzavřeném prostoru v letounu v tzv přetlakové kabině.

Přetlakové kabiny se dělí na otevřené (atmosférické) a uzavřené. Otevřené kabiny jsou kabiny ventilačního typu, neboť jsou propojeny s okolní atmosférou jak na vstupu do přetlakové systému, tak i na výstupu. Uzavřené kabiny dále dělíme podle způsobu udržování dýchatelného vzduchu na kabiny regenerační a kabiny s vnitřním zdrojem. Regenerační kabiny recyklují vzduch odstraněním přebytečného CO_2 a po následném okysličením vypouští vzduch zpět do kabiny. Kabiny s vnitřním zdrojem využívají zásoby stlačeného vzduchu. Vydýchaný vzduch je odváděn mimo letadlo což časově omezuje provozní dobu tohoto systému. V civilním dopravním letectví se setkáváme výhradně s otevřenými systémy.



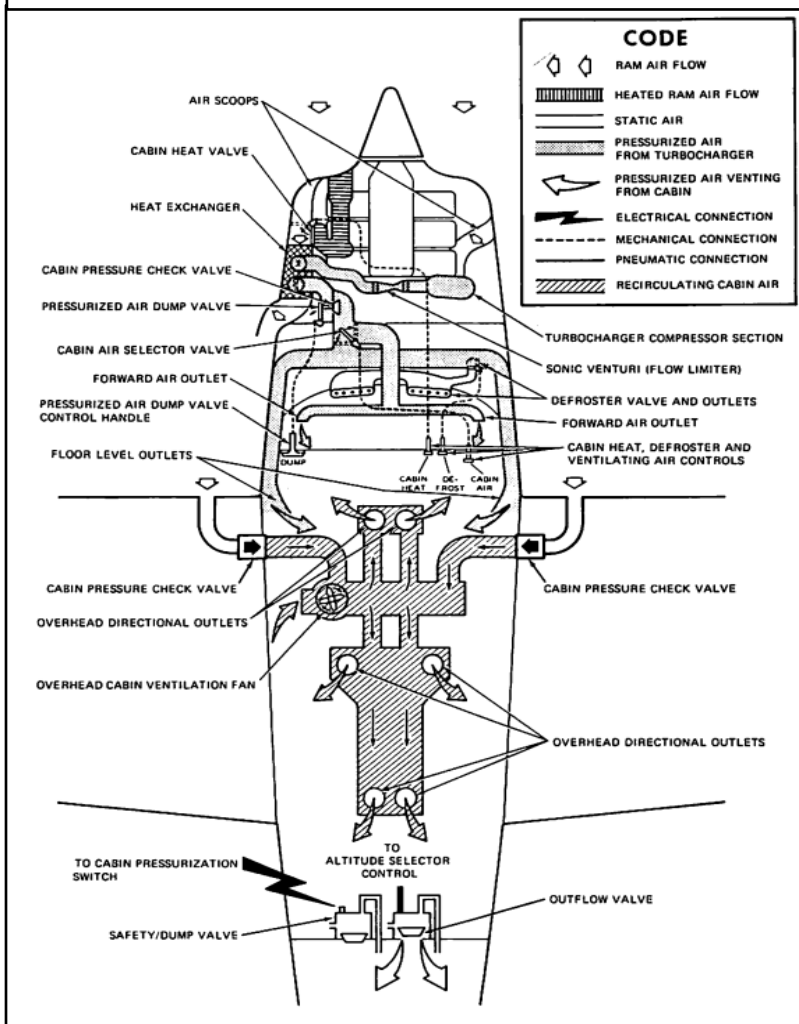
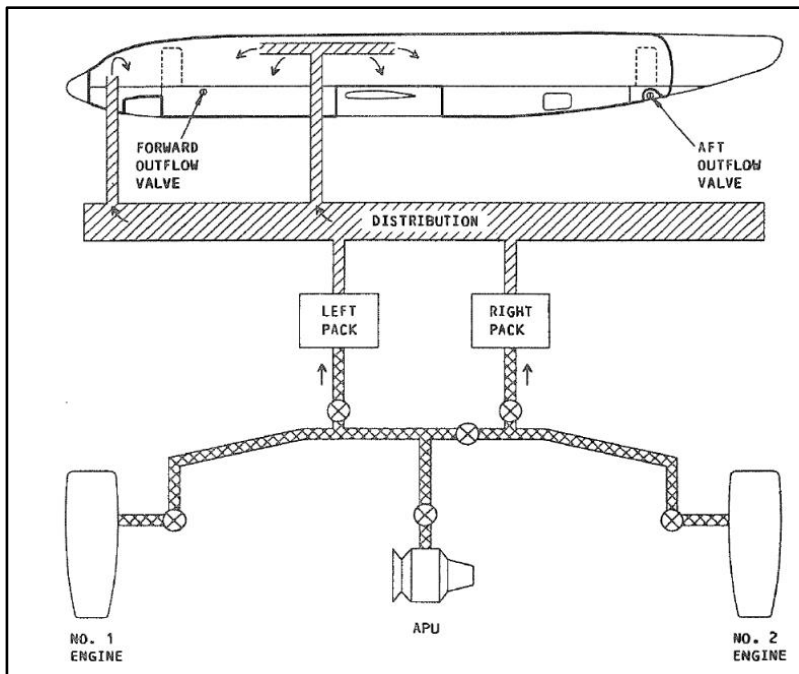
Obr. 5

1. Otevřená (ventilační) kabina 2. Uzavřená regenerační kabina 3. Uzavřená kabina s vnitřním zdrojem

U dopravních letounů s turbínovými motory jsou nízkotlaký a vysokotlaký kompresor zdroji tlakového vzduchu. Při postupném stlačování vzduchu v kompresorech motoru narůstá teplota, a tak vzniká několik možných odběrných míst s odlišnou teplotou¹². Ve směšovací komoře se smíchá horký vzduch z vysokotlaké části a vzduch z nízkotlaké části, který byl ochlazen expanzí na turbochladiči. Regulace tlaku v prostorech letounu je zajištěna vypouštěčím ventilem. Ventil může být řízen tlakem v kabině nebo pomocí servomotoru ovládající zdvih. Při selhání vypouštěčích ventilů a příliš vysokém tlaku v kabině se aktivují bezpečnostní přetlakové ventily.

U letounů GA s převážně pístovými motory je zdrojem tlakového vzduchu motorem poháněný kompresor a ohřev je zajištěn výměníkem vyhříváným výfukem. Regulace tlaku pracuje na stejném principu popsaném výše.

¹² Pro potřeby chlazení se používá vzduch z dmyhadla, pro klimatizaci a odmrazování z 5. a 9. stupně kompresoru



Obr. 6
 Porovnání přetlakových systémů dopravního
 letounu Boeing 737
 a GA letounu Cessna P210N Centurion

7.2 Nouzový kyslíkový systém

Pro zvýšení bezpečnosti letu se letouny vybavují také záložním neboli nouzovým kyslíkovým systémem, který se aktivuje pouze v případě výpadku přetlakového systému. Také jedním z jednodušších typů mohou být vybaveny letouny nepřetlakové u kterých je plánován let ve vyšších hladinách atmosféry.

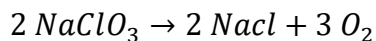
Kyslíkové systémy lze rozřadit podle více kritérií, avšak jedním ze základních je samotný zdroj kyslíku. Tlakové láhve naplněné zdravotnickým kyslíkem jsou používány jako zdroj převážně pro piloty a posádku. Kyslíkové masky připojené na takovýto zdroj dodávají buď kyslík smíchaný s okolním vzduchem pro zajištění dostatečného parciálního tlaku kyslíku v plicích nebo 100% O₂, pokud kabinová výška přesáhne 35 000 ft. U těchto systému se také můžeme setkat s rozvinutější variantou s takzvaným plicním automatem, který dodává kyslík pouze při nádechu, což optimalizuje spotřebované množství. Pravidelné použití soustavy kyslíku pro posádku předpokládá například nařízení CFR Part 91.211 Federálního leteckého úřadu Spojených států amerických. Dle tohoto nařízení je minimálně jeden pilot povinen použít kyslíkovou masku při letu na FL410 nebo pokud jeden z pilotů opustí kabinu při letu nad FL350 ukládá tuto povinnost druhému pilotovi. Tyto systémy jsou proto konstruovány jako znovupoužitelné.



Obr. 7

Příklad kyslíkové masky Sweep-On Fullface Oxygen Mask firmy Collins Aerospace

Pro potřebu cestujících se na palubě větších dopravních letounů nachází menší přenosná kyslíková soustava skládající se z masky a tlakové láhve. Pro rozsáhlou dodávku kyslíku všem cestujícím se používá systém s chemickým vyvíječem kyslíku. Kyslíkové masky jsou uloženy v prostoru nad hlavami cestujících a automaticky se spustí při poklesu kabinového tlaku pod bezpečná minima. Zatáhnutím za masku se spustí chemická reakce popsaná vzorcem ¹³ níže a po dobu přibližně patnácti minut je dodáván kyslík smíchaný s okolním vzduchem.



Obr. 8

Příklad kyslíkové masky s návodem pro cestující z dopravního letounu

¹³ Rozklad chlorečnanu sodného za vytvoření chloridu sodného (kuchyňské soli) a kyslíku.

8 Letecké nehody způsobené hypoxií

8.1 Let HCY 522

8.1.1 Základní informace

Tento let se zapsal do historie jako největší letecká tragédie zapříčiněná hypoxií. Dne 14.8.2005 se Boeing 737-300 registrace 5B-DBY společnosti Helios Airways vydal na pravidelnou linku z hlavního kyperského letiště Larnaka-Glafkos Clerides (ICAO: LCLK) s mezipřistáním na řeckém letišti Eleftheria Venizela Atény, do finální destinace letiště Praha Ruzyně (ICAO: LKPR).

Letoun vzlétl v 06:07 UTC a po vzletu si posádka vyžádala FL340 pro pokračování. Potvrzení povolení stoupat do FL340 byla poslední komunikace mezi letem HCY 522 a oblastním řízením Nicosia ACC. Po mnoha nezdařených pokusech o rádiový kontakt byly vyslány dva stíhací letouny F-16 řecké armády. Letoun se v tuto dobu nacházel nad Aténským letištěm ve vyčkávacím obrazci, avšak stále ve výšce 34 000 ft. Během desátého vyčkávání letounu pravděpodobně došlo prakticky veškeré palivo, levý motor přestal pracovat a letoun začal klesat. V přibližně 7000ft přestal pracovat i druhý motor a letoun začal prudce klesat až do kolize s okolním kopcovitým terénem. Na palubě se v daný den nacházelo 115 cestujících především řecké a kyperské národnosti a 6 členů posádky. Prudký náraz do země a následný požár nikdo nepřežil a letoun byl zničen^[16].

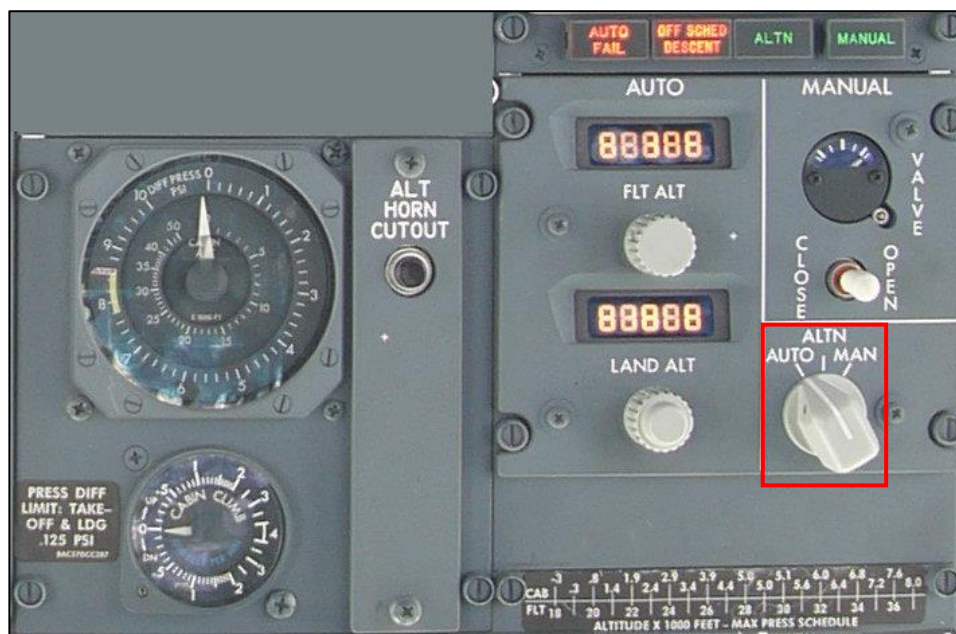


Obr. 9
Trať letu HCY522

8.1.2 Příčina

Den před katastrofou byla nahlášena závada pravých zadních dveří. Dle zápisu do knihy defektů namrzalo těsnění a bylo slyšet hlasité bouchání během letu. Ihned po přiletu letadla byla provedena vizuální kontrola a manuální přetlakový test na netěsnosti. Na letounu nebyla nalezena závada a byl stanoven způsobitelným.

Během stoupání do cestovní hladiny ovšem v kokpitu zaznělo upozornění kabinové výšky. Toto upozornění si posádka špatně vyložila a při hovoru s mechanikem nahlásila problém se vzletovou konfigurací a chlazením avioniky. Na otázku mechanika, jestli je na panelu ovládání přetlakování zvolen mód auto kapitán nereagoval a nadále se snažil vyřešit domnělé problémy. Podle záznamu z CVR asi pět minut po ustala komunikace mezi kapitánem a kopilotem. Dále už bylo letadlo vedeno autopilotem nad letiště určení a při další nečinnosti posádky přešlo do vyčkávacího obrazce.



Obr. 10

Ovládací panel přetlakování Boeing 737-300 se zvýrazněným ovladačem AUTO/MAN

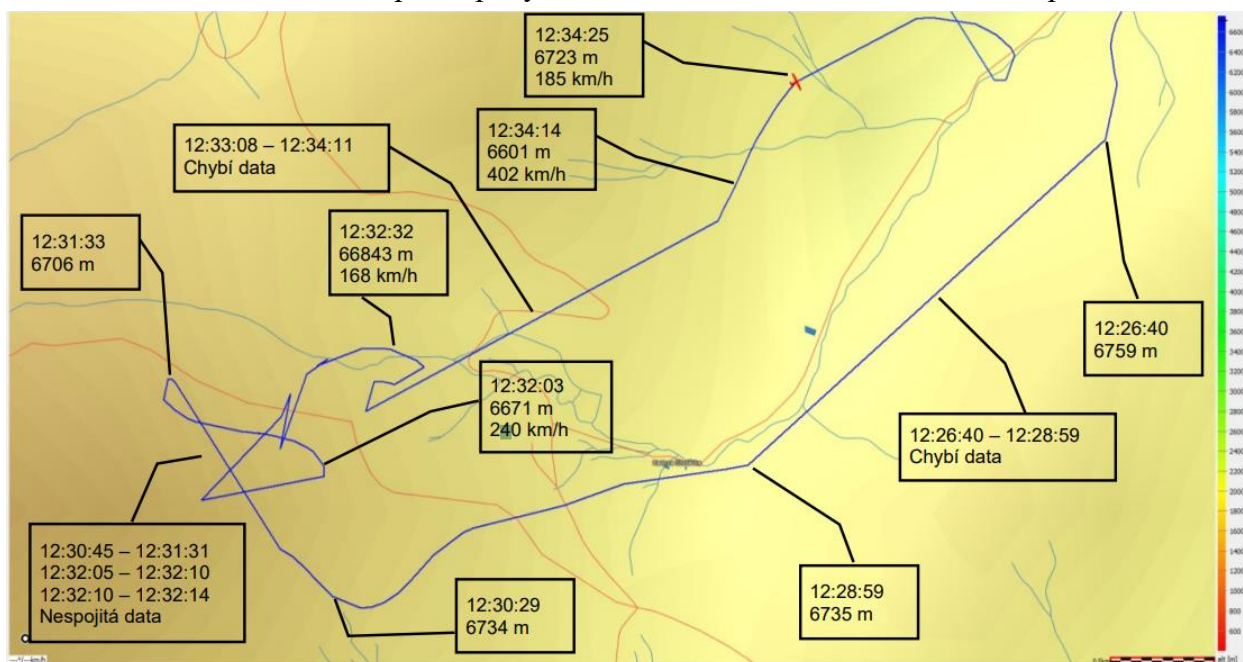
8.1.3 Důsledky

Tato nehoda poukázala na oblast v letectví, která nebyla dobře porozuměna a zdůrazněna pilotům či palubnímu personálu. V době nehody neprobíhala cvičení na rozpoznání hypoxie u většiny leteckých dopravců. Nehoda také vedla k přepracování příruček a manuálů firmy Boeing a k zahrnutí kapitoly vzduchové systémy a varování kabinového tlaku. V checklistech se také upravila část zahrnující přetlakování a nyní zahrnuje kontrolu ovladače přetlakování v poloze AUTO.

8.2 Let kluzáku v dlouhé vlně

8.2.1 Základní informace

Dne 3.11.2019 v cca 03:35 převzal pilot kluzák poznávací značky OK-4481 na letišti Soběslav a vydal se na přibližně pět hodin dlouhou cestu na letiště Mikulovice, provozované Aeroklubem Jeseník. Pilot měl v úmyslu využít tzv dlouhou vlnu¹⁴ tvořící se za pohořím Jeseníků pro dlouhý let v horské oblasti. Na letišti Mikulovice byl kluzák po transportu sestaven a zkontrolován před letem. Vzlet proběhl pomocí aerovleku letounem Z-42 z dráhy 23. Pilot dále postupným stoupáním ve vzestupných proudech dosáhl po přibližně dvou hodinách letu výšky 6759 metrů nad střední hladinou moře. Při dosažení této výšky se začala skokově měnit výška kluzáku a také rychlost, která několikrát velmi značně překročila maximální rychlost letu kluzáku¹⁵. V této době se pilot pohyboval v oblasti okolo obce Vrbno pod Pradědem.



Obr 11

Trajektorie a letová data kluzáku v kritické fázi letu

Poslední letová data zaznamenaná OGN¹⁶ ukazují prudké klesání, které s velkou pravděpodobností pokračoval až do kontaktu letounu se zemí. Maximální rychlost dle GPS dosahovala až 402 km/h tedy přibližně 1.6násobku nepřekročitelné rychlosti. Je velmi pravděpodobné že při této rychlosti došlo ke konstrukčním poškozením letounu a kompletní ztrátě ovladatelnosti.

¹⁴ Dlouhá vlna je zvlněné proudění v horských oblastech vhodné pro dlouhé lety kluzáků za využití vzestupných proudů.

¹⁵ Maximální rychlost kluzáku dle dostupných dat dosahovala 200 km/h.

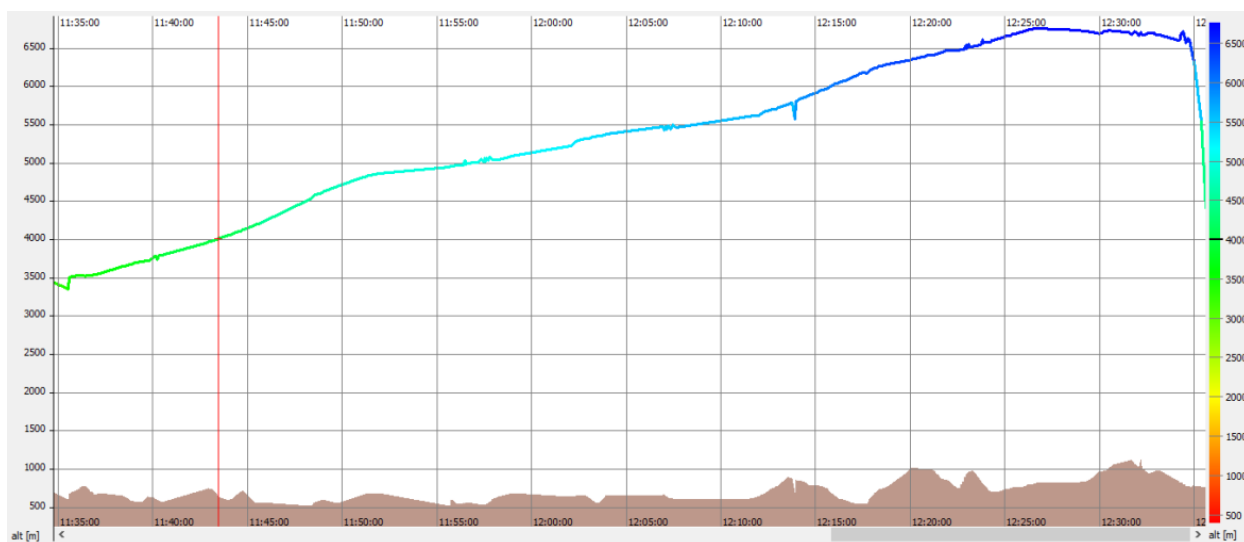
¹⁶ OGN je systém pro sledování kluzáků a lehkých letounů vybavených výstražným antikolizním systémem FLARM.

8.2.2 Příčina

ÚZPLN ve své závěrečné zprávě určil jako příčinu nehody ztrátu schopnosti kontroly nad řízením kluzáku a následnou nekontrolovanou sestupnou zatáčku doprava. Ovšem důvod ztráty kontroly nebyl jednoznačně stanoven. Jako jedna z možných příčin je uvedena hypoxie zesílená únavou pilota.

Pilot měl značné zkušenosti s pilotáží kluzáků. Jeho celkový nálet činil přes 2 600 hodin a zároveň měl platné osvědčení letového instruktora kluzáků. Pravděpodobnost, že ztráta kontroly byla způsobena neznalostí či pouhým nezvládnutím pilotáže je tedy velmi nepravděpodobná a za nehodou patrně stojí ovlivnění pilota okolními faktory.

Pilot před letem demontoval ELT¹⁷ a namísto něj upevnil kyslíkovou láhev s objemem dva litry. Bez fyzické či psychické zátěže by člověku tento objem vystačil přibližně na deset minut při dýchání 100% O₂ a plném využití dodané dávky^[17]. Dle již zmíněného ustanovení 4.3.9.1 Hlavy 4 předpisu L6/I je nutné zajistit dodávku kyslíku pro všechny osoby na palubě při letu ve výšce přesahující 13 000ft. Této výšce dosáhl pilot (dle grafu z dat OGN níže) v 11:40LT a pokračoval stoupavým letem až do pádu v 12:26LT. I při zanedbání předcházející fáze letu mezi 10 000 ft a 13 000 ft¹⁸ byla mnohonásobně překročena bezpečná doba letu ve vysokých výškách a rozvoj hypoxie je jednoznačný.



Obr. 12

Výškový profil letu kluzáku. Červená čára značí moment překročení 13 000 ft

17 Emergency Locator Transmitter je zařízení, které při detekci nárazu automaticky vyšle nouzový signál a vysílá svou polohu pro usnadnění záchrany.

18 Tato fáze trvala přibližně 37 minut tudíž dle výše zmíněných pravidel vyžadovala suplementaci kyslíku.

9 Závěr

Tato práce se zabývala hypoxií v leteckém prostředí a měla za cíl vytvořit komplexní pojem o problematice jak na teoretické, tak praktické úrovni v profesním letectví. Autor popsal fyziologii lidského těla, spojenou s dýcháním a hypoxií. Pro srozumitelnost dalších kapitol také zapracoval některé fyzikální jevy probíhající v lidském těle, především ve spojitosti s chováním plynů v organismu. Dále byla hypoxie rozdělena dle příčiny vzniku a hlouběji popsána hypoxická varianta, jelikož je v letectví nejčastější. Kapitoly šest a sedm seznamují čtenáře s problematikou přetlakování kabiny a zásoby kyslíku letounu z pohledu konstrukčních prvků a legislativy. V poslední kapitole autor provedl analýzu dvou leteckých nehod zapříčiněných hypoxií.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WEST, John B. a Jean-Paul RICHALET. Denis Jourdanet (1815–1892) and the early recognition of the role of hypoxia at high altitude. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology* [online]. 2013, 305(5), L333-L340 [cit. 2022-03-29]. ISSN 1040-0605. Dostupné z: doi:10.1152/ajplung.00128.2013
- [2] American Physiological Society. (2008, April 11). Historical Look at Physiology and WWII Air War. [online] [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080411092341.htm
- [3] JELÍNEK, Jan a Vladimír ZICHÁČEK. *Biologie pro gymnázia: (teoretická a praktická část)*. 12. vydání. Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 2021. ISBN 978-80-7182-319-3.
- [4] VÁGNEROVÁ, Marie. *Obecná psychologie :: Dílčí aspekty lidské psychiky a jejich orgánový základ* [online]. Univerzita Karlova: Nakladatelství Karolinum, 2017 [cit. 2022-03-14]. ISBN 978-80-246-3295-7. Dostupné z: <https://core.palmknihy.cz/api/books/331993/preview.pdf>
- [5] SHULMAN, Robert G, Douglas L ROTHMAN, Kevin L BEHAR a Fahmeed HYDER. Energetic basis of brain activity: implications for neuroimaging. *Trends in Neurosciences* [online]. 2004, 27(8), 489-495 [cit. 2022-03-12]. ISSN 01662236. Dostupné z: doi:10.1016/j.tins.2004.06.005
- [6] DIENEL, Gerald A. Brain Glucose Metabolism: Integration of Energetics with Function. *Physiological Reviews* [online]. 2019, 99(1), 949-1045 [cit. 2022-03-12]. ISSN 0031-9333. Dostupné z: doi:10.1152/physrev.00062.2017
- [7] Airbus Safety First [online]. December 2006. 2006 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://www.ukfsc.co.uk/files/Safety%20Briefings%20_%20Presentations/Airbus%20Safety%20First%20Mag%20-%20Dec%202006.pdf
- [8] ŠULC, Jiří, KULČÁK, Ludvík, ed. *Lidská výkonnost (040 00): [učebnice pro teoretickou přípravu pilotů ATPL, CPL a IR]*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 978-80-7204-688-1.
- [9] ŠVÍGLEROVÁ, Jitka. Osmóza [online] Poslední revize 18. 2. 2009, [cit. 8.3.2022] Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20160305042855/http://wiki.lfp-studium.cz/index.php/Osm%C3%B3za>
- [10] SWENSON, Erik R. High-Altitude Pulmonary Edema. YUAN, Jason X. -J., Joe G.N. GARCIA, John B. WEST, Charles A. HALES, Stuart RICH a Stephen L. ARCHER, ed. *Textbook of Pulmonary Vascular Disease* [online]. Boston, MA: Springer US, 2011, 2011-12-3, s. 871-888 [cit. 2022-03-13]. ISBN 978-0-387-87428-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-87429-6_61
- [11] SLAVÍKOVÁ, Jana a Jitka ŠVÍGLEROVÁ. *Fyziologie dýchání*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2065-7.
- [12] Yoneda I, Tomoda M, Tokumaru O, Sato T, Watanabe Y. Time of useful consciousness determination in aircrew members with reference to prior altitude chamber experience and age. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2000 Jan;71(1):72-76. PMID: 10632134.
- [13] Yoneda I, Watanabe Y. Comparisons of altitude tolerance and hypoxia symptoms between nonsmokers and habitual smokers. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 1997 Sep;68(9):807-811. PMID: 9293349.

- [14] LETECKÝ PŘEDPIS L 6 PROVOZ LETADEL: ČÁST I HLAVA 4 ustanovení 4.3.9.1 a 4.3.9.2 [online] 4. 4.11.2021. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [15] LETECKÝ PŘEDPIS L 6 PROVOZ LETADEL: ČÁST I HLAVA 6 ustanovení 6.7.2 a 6.7.4 [online] 4. 4.11.2021. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [16] HELLENIC REPUBLIC MINISTRY OF TRANSPORT & COMMUNICATIONS AIR ACCIDENT INVESTIGATION & AVIATION SAFETY BOARD (AAIASB) AIRCRAFT ACCIDENT REPORT: HELIOS AIRWAYS FLIGHT HCY522 BOEING 737-31S AT GRAMMATIKO, HELLAS ON 14 AUGUST 2005. 2006.
- [17] LOER, Stephan A., Thomas W. L. SCHEEREN a Jorg TARNOW. How Much Oxygen Does the Human Lung Consume? *Anesthesiology* [online]. 1997, 86(3), 532-537 [cit. 2022-04-09]. ISSN 0003-3022. Dostupné z: doi:10.1097/00000542-199703000-00004

ZDROJE OBRÁZKŮ

Obr. 1: https://wikisofia.cz/w/images/4/40/D%C3%BDchac%C3%AD_soustava.jpg

Obr. 2: <https://www.nzip.cz/clanek/912-srdce-struktura-a-funkce>

Obr. 3: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Cerebrum_lobes_cs.svg

Obr. 4: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22898646/>

Obr. 5: Kulčák a kol.: Učební texty ATPL(A) Všeobecné znalosti letounů 1.díl, CERM Brno, 2002

Obr. 6: <http://www.marksetcetera.com/N731PJ-P210N-POH.pdf>, Kulčák a kol.: Učební texty ATPL(A) Všeobecné znalosti letounů 1.díl, CERM Brno, 2002

Obr. 7: <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/Business-Aviation/Cabin/Oxygen-And-PSU-Systems/Crew-Oxygen-Systems/Crew-Masks/Sweep-On-Fullface-Oxygen-Mask>

Obr. 8: <https://www.worthpoint.com/worthopedia/airline-aircraft-passenger-emergency-2091963409>

Obr. 9: https://cs.wikipedia.org/wiki/Let_Helios_Airways_522#/media/Soubor:Flight_path_of_Helios_522-en.svg

Obr. 10: <http://www.b737.org.uk/pressurisation.htm>

Obr. 11: <https://uzpln.cz/pdf/20210112121005.pdf>

Obr. 12: <https://uzpln.cz/pdf/20210112121005.pdf>