

613.693:616.12-001.9-008.31

ZMĚNY SRDEČNÍ FREKVENCE PŘI VYŠETŘOVÁNÍ NA LIDSKÉ CENTRIFUZE

Mjr. MUDr. Petr DOŠEL
Ústav leteckého zdravotnictví, Praha
(náčelník: plk. doc. MUDr. Jiří Šulc, CSc.)

Úvod

V roce 1989 byl zařazen do výzbroje Československé armády nový typ nadzvukového letounu MiG-29. Tento letoun je typickým reprezentantem nové generace bojových letadel, která se vyznačuje vysokým nárůstem výkonných parametrů, zvláště v oblasti manévrovosti. Letci pilotující tento letoun mohou být vystaveni vysokému dlouhotrvajícímu přetížení, což je nový prvek letové zátěže. Z tohoto důvodu byla obvyklá škála vyšetřovacích metod rozšířena o vyšetření odolnosti vůči přetížení na lidské centrifuze. Vysoké dlouhotrvající přetížení je přetížení o hodnotě $+6 G_z$ a vyšší působící po dobu delší než 15 s. Označením $+G_z$ rozumíme násobek tíhového zrychlení ve směru hlava-pánev.

Soubor a metodika vyšetřovaných

Bylo vyšetřeno 11 zdravých mužů ve věkovém rozmezí 26 až 38 let (průměr 31,4 roku). Jednalo se o piloty I. třídy s průměrným počtem 843 nalétaných hodin. Před vlastním vyšetřením na lidské centrifuze prošli všichni probandi komplexním vyšetřením v ÚLZ Praha.

Vyšetření na lidské centrifuze fy Austria Metall bylo provedeno v Institutu letecké medicíny v Königsbrücku v NDR. Odolnost vůči $+G_z$ přetížení byla stanovena ve dvou vyšetřovacích režimech:

1. Intervalový režim

Proband je vystaven cyklům postupně se zvyšujícího přetížení. Gradient nárůstu přetížení je $0,5 G \cdot s^{-1}$. Doba

trvání jednotlivých platů přetížení je 15 sekund. Mezi fázemi zátěže klesá přetížení na dobu 15 s na výchozí úroveň. Gradient zbrzdění je $0,3 \text{ G.s}^{-1}$. Hodnoty přetížení postupně narůstaly o $0,5 \text{ G}$ v rozsahu od $+3$ do $+6 \text{ G}_z$.

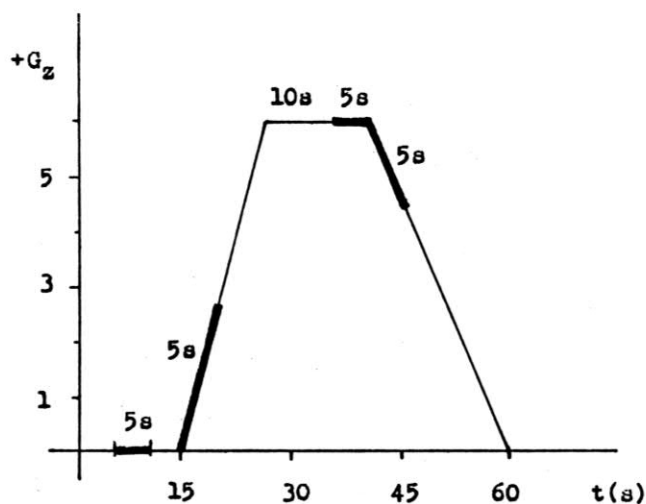
2. Lineární režim

Vyšetřovaný jedinec je vystaven rovnoměrně narůstajícímu přetížení (gradient $0,18 \text{ G.s}^{-1}$) do hodnoty maximálně $+8 \text{ G}_z$. Gradient zbrzdění je $0,4 \text{ G.s}^{-1}$. Vyšetření může přerušit proband sám na základě svých subjektivních pocitů.

Oba režimy přerušuje lékař na základě dosažení objektivních známek maximální tolerance (greyout, překročení srdeční frekvence nad $180 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$, respektive $200 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ u jedinců mladších 30 let).

Vyšetření bylo prováděno vsedě v pilotním křesle (sklon opěradla -18°). Vyšetřovaní nebyli vybaveni anti-g oděvem. Z aktivních obranných manévru proti přetížení bylo povoleno napnutí svalstva dolních končetin při zachovaném volném dýchání. Zcela vyloučeny byly dýchací a napínací ochranné manévry (L-1 a M-1).

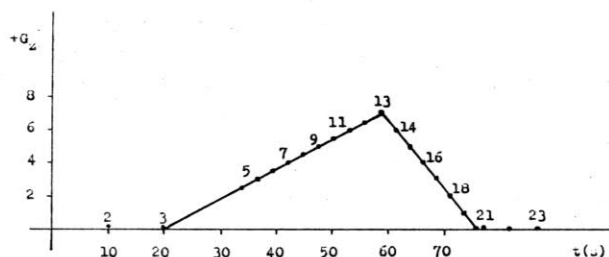
V průběhu vyšetřování byly kontinuálně monitorovány hodnoty krevního tlaku (systolický, diastolický a střední), srdeční frekvence (SF), dechová frekvence, reakční doba na světelné podněty na periférii zorného pole, pulsace na obou ušních lalůčcích a jeden svod EKG. Sledované parametry byly zaznamenávány polygraficky. Hodnoty SF byly získány vyhodnocením 5sekundového úseku EKG záznamu v rámci jednotlivých cyklů přetížení intervalového režimu (graf 1) a 3 po sobě následujících R-R intervalů v lineárním režimu (graf 2).



Graf 1

Průběh přetížení v jednom cyklu intervalového režimu. Tlustá čára označuje úseky měření SF.

Výsledky byly statisticky vyhodnoceny analýzou rozptylu při jednoduchém třídění, simultánní testování bylo provedeno Duncanovým testem shody pořadí.



Graf 2

Průběh přetížení v čase v lineárním režimu. Číslované body označují okamžiky odečtení SF podle tří následujících R-R intervalů.

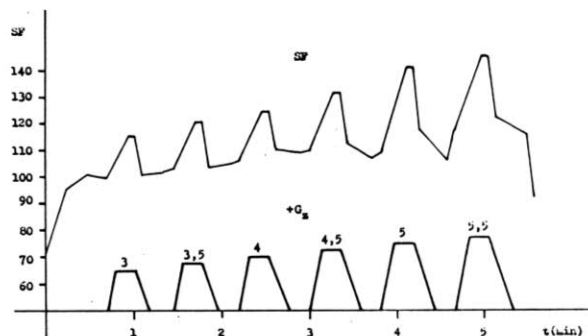
Výsledky

1. Intervalový režim

Hodnoty SF naměřené během vyšetření v intervalovém režimu jsou shrnuty v tabulce 1. Dynamika změn SF je znázorněna na grafu 3. Při vyšetřování v intervalovém programu byla zjištěna vyšší předstartovní hodnota SF ($96 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$) oproti obvyklé klidové hodnotě měřené na letišti ($73 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$). Tato diference je statisticky významná ($p < 0,01$).

Tabulka 1
Průměrné hodnoty SF (x) v závislosti na velikosti přetížení ($+G_z$) - intervalový režim

Poř. č.	$+G_z$	x	s	h
1	1	72,5	4,1	11
2	1	95,4	7,2	11
3	1	100,9	9,1	11
4	1	99,5	11,0	11
5	3,0	115,4	9,0	11
6	1,5	100,4	10,8	11
7	1	101,8	12,9	11
8	1	102,7	12,7	11
9	3,5	120,7	11,9	11
10	2,0	103,2	16,3	11
11	1	105,0	16,5	11
12	1	105,9	13,9	11
13	4,0	124,5	13,8	11
14	2,5	110,0	17,4	11
15	1	109,0	18,9	11
16	1	109,5	13,8	11
17	4,5	132,3	14,0	11
18	3,0	112,3	21,5	11
19	1	107,3	17,8	11
20	1	109,4	17,0	8
21	5,0	141,2	14,1	8
22	3,5	117,5	19,6	8
23	1	106,2	22,8	8
24	1	117,5	23,9	4
25	5,5	145,0	12,9	4
26	4,0	122,5	30,1	4
27	1	116,2	23,5	11
28	1	92,7	12,9	11



Graf 3

Průběh SF v intervalovém režimu. Znáznorněny jednotlivé cykly přetížení. Čísla označují maximální hodnotu přetížení.

V rámci jednotlivých cyklů přetížení docházelo k statisticky vysoce významnému zvýšení SF na plató jednotlivých přetížení ($p < 0,001$) vzhledem k SF v obdobích mezi cykly jednotlivých přetížení. Hodnoty SF na plató přetížení stoupaly postupně v jednotlivých cyklech v rozmezí průměrných hodnot $116 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ (při $+3 \text{ G}_z$) až $145 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ (při $+5,5 \text{ G}_z$). Statistickým porovnáním SF na plató nejnižšího přetížení ($+3 \text{ G}_z$) s ostatními stupni přetížení nacházíme hranici statisticky významného nárůstu SF ($p < 0,05$) při hodnotě přetížení $+4,5 \text{ G}_z$. Tato statistická významnost se dále zvyšuje ($p < 0,01$) na úrovních $+5$ a $+5,5 \text{ G}_z$.

Závěrečná hodnota SF (1 min po ukončení přetížení) je však dokonce nižší (i když statisticky nevýznamně) než předstartovní hodnota. Zjistili jsme přímou závislost ($r_s=0,82$; $p < 0,05$) mezi hodnotami SF při malém arteficiálním přetížení a hodnotami SF na plató jednotlivých cyklů přetížení, avšak maximální hodnoty SF a hodnoty maximálně snášeného přetížení nekoreluji ($r_s=0,55$; NS).

2. Lineární režim

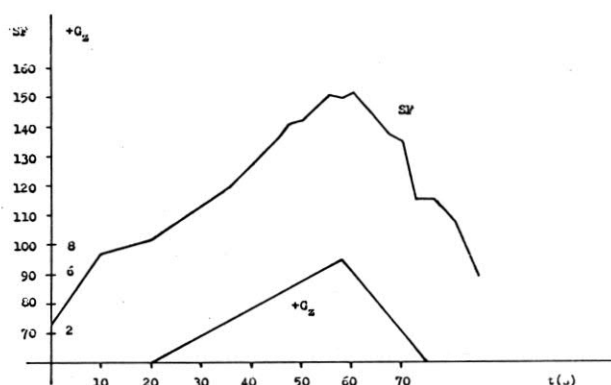
Hodnoty SF naměřené během vyšetření v lineárním režimu jsou shrnuty v tabulce 2. Dynamika změn SF je znázorněna na grafu 4. Byl nalezen opět mírný vzestup v okamžiku startu. Spolu s narůstajícími hodnotami přetížení stoupaly lineárně i hodnoty SF z průměrné klidové hodnoty $96 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ až na průměrnou hodnotu $151 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ při přetížení $+6,5 \text{ G}_z$. Tento nárůst je statisticky vysoce významný ($p < 0,001$). Maximální individuální hodnota SF ve sledovaném souboru byla $165 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ při hodnotě přetížení $+7,0 \text{ G}_z$.

Během decelerace byl pokles hodnot SF rovněž lineární k průměrné hodnotě $115 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ po ukončení zátěže

Tabulka 2

Průměrná hodnota SF (x) v závislosti na velikosti přetížení ($+G_z$) - lineární režim

Poř. č.	$+G_z$	x	s	h
1	1	72,5	4	11
2	1	96,4	14	11
3	1	101,4	13	11
4	2,5	117,3	11	11
5	3	120,9	10	11
6	3,5	127,7	11	11
7	4	130,9	11	11
8	4,5	135,9	12	11
9	5	140,9	13	11
10	5,5	142,0	17	10
11	6	147,5	13	10
12	6,5	151,0	15	5
13	7	150,0	15	4
14	6	151,4	14	7
15	5	147,0	15	10
16	4	141,0	16	10
17	3	137,0	17	10
18	2	135,0	16	10
19	1	115,5	21	10
20	1	115,5	18	10
21	1	115,5	18	10
22	1	107,0	22	10
23	1	89,0	21	10



Graf 4

Průběh SF v trvání lineárního režimu. V dolní části znázorněn průběh přetížení.

přetížením. Tyto hodnoty přetrvávaly do páté sekundy od konce působení přetížení. Pak došlo k dalšímu poklesu na hodnoty $107 \text{ tepů} \cdot \text{min}^{-1}$ v 1. minutě po ukončení přetížení. Srovnáním hodnot SF na jednotlivých úrovních přetížení při akceleraci a deceleraci nacházíme nevelké rozdíly ve prospěch deceleračních hodnot, které však nejsou statisticky významné. Výjimku tvoří srovnání na úrovni $+3 \text{ G}_z$ a při nulovém arteficiálním přetížení, kde jsou decelerační hodnoty SF významně vyšší ($p < 0,05$). Teprve v klidové hodnotě 1 minutu po ukončení gravitační zátěže se vrací SF mírně (statisticky nevýznamně) pod úroveň úvodní klidové hodnoty. Mezi klidovými a maximálními hodnotami SF existuje jen volný vztah ($r_s=0,64$; $p < 0,1$), maximální SF a $+G_z$ tolerance nekoreluji ($r_s=0,08$; NS).

U jednoho z probandů sledovaného souboru byly v obou režimech vyšetření pozorovány komorové extrasystoly. Jednalo se o monotopní extrasystoly zachycené při intervalovém režimu ve fázi decelerace z úrovní přetížení $+3, +3,5, +4 \text{ G}_z$ a v počáteční fázi závěrečné klidové periody. Celkem bylo zaznamenáno 8 extrasystol. Při vyšetření v lineárním režimu byly nalezeny 4 komorové extrasystoly s aberantním komorovým vedením. Jiné poruchy rytmu nebyly pozorovány.

Diskuse

Statisticky významnou diferenci mezi obvyklou klidovou hodnotou a okamžitou klidovou hodnotou SF před vyšetřením na centrifuze u obou typů programu vyšetření si vysvětlujeme aktivačními mechanismy oběhového systému a okamžitým psychickým stavem (odráží velikost a trvání očekávaného přetížení) v rámci anticipace zátěžové situace (1, 3).

1. Intervalový režim

Gradient nástupu přetížení $0,5 \text{ G} \cdot \text{s}^{-1}$ použitý u intervalového programu stojí uprostřed mezi pomalým ($0,1 \text{ G} \cdot \text{s}^{-1}$) a rychlým ($1 \text{ G} \cdot \text{s}^{-1}$) nástupem přetížení (dělení podle Forsterové). Skutečnost, že rychlost změny SF zaostávala za rychlostí změny přetížení, nás vede k závěru, že použitý gradient se řadí spíše do skupiny rychlého nástupu přetížení.

Gravitační stres působí na oběhový systém komplexně, a to zejména hydrostatickou redistribucí krevního objemu, změnou srdečního tvaru a polohy, změnou plnění

srdečních dutin a koronárního průtoku a vlastním mechanickým stresem srdce. Zvýšení SF je jedním z kompenzačních mechanismů. Podílí se na něm synergicky působící a navzájem propojené složky:

A) reflexní receptorová odpověď, která je podmíněna:

- a) hydrostatickými změnami s jejich důsledky - pokles TK v aortě a karotických sinech, nižší plnění srdce, pokles koronárního průtoku, mechanický stres z deformace a přemístění srdce, provázené následnou stimulací vazomotorických center;
- b) změnami provázejícími svalové napětí při ochranných manévrech;

B) časná odpověď vegetativního nervstva:

- zvýšení tonu sympatického a parasympatického nervstva s převahou aktivity sympatiku v období akcelerace a přetížení a s přetrvávající aktivitou vagu v období decelerace;

C) aktuální psychická reakce.

Výsledky získané kolerační analýzou potvrdily závěry jiných autorů (1, 5, 6), že dosažené individuální maximální hodnoty SF nemají žádný vztah ke $+G_z$ toleranci. Naproti tomu jedinci s vyššími klidovými a předstartovními hodnotami SF dosáhli vyšších maximálních hodnot SF. Z dosažených výsledků vyplývá, že přetížení v rozmezí +4 až +5 G_z představuje určitou hranici (při vyloučení M-1 ochranných manévru a za daného gradientu nárůstu přetížení), při které dochází k výraznému nárůstu reakce SF. Pokles hodnoty SF popisovaný některými autory (5, 6) v intervalu 16-40 s po dosažení maxima přetížení (pramenící z postupně převažující aktivity vagu) nebyl v našich pokusech vzhledem ke kratšímu plató přetížení (15 s) pozorován.

Statisticky významné zpomalení SF v období decelerace si vysvětlujeme dvěma vzájemně propojenými příčinami:

A) reakcí na redistribuci krevního objemu (nárazové zvětšení nabídky krve srdci) při ukončení vlivu hypergravitace (rebound fenomen);

B) zvýšenou aktivací vagu při zbrzdění (2, 3, 5, 6).

Z vyhodnocení výsledků decelerační fáze vyšetření je možno učinit závěr, že bezprostřední reakce SF na brzdění byla na všech úrovních přetížení kvantitativně téměř totožná, tedy stejně intenzivní, i když na různé úrovni aktivity obou složek vegetativního systému. Na nižších hladinách přetížení (do +4 G_z) tato kombinovaná kompenzační reakce "přestřelovala" pod úroveň hodnot SF mezi jednotlivými cykly přetížení. Při přetížení vyšším než +4 G_z , kdy hodnoty SF při přetížení značně vzrůstaly, již tato bezprostřední reakce nedosahovala ani klidových hodnot a ve zbývajícím průběhu brzdění a v klidové fázi docházelo k dalšímu snižování SF až na klidové hodnoty jednotlivých cyklů. I v decelerační fázi se jeví hladina přetížení +4,5 G_z jako hraniční oblast pro významný kvantitativní nárůst změn hodnot SF.

Skutečnost, že závěrečná klidová hodnota byla nižší než předstartovní, lze vysvětlit jednak zvýšenou aktivací vagu při deceleraci, jednak nepřítomností emoční složky tachykardie.

2. Lineární režim

Rovnoměrný statisticky významný nárůst hodnot SF při lineárně stoupající gravitační zátěži zjištěný v našem souboru je v souladu s literárními údaji (3, 4, 8).

Gradient nárůstu přetížení 0,18 $G \cdot s^{-1}$ odpovídá klasifikační skupině pomalého nárůstu přetížení. Ve všech případech dosáhla SF svého maxima současně s maximem přetížení. To svědčí o skutečnosti, že dynamika reakcí oběhového systému sledovala změny v přetížení. Pozorovali jsme snížení nárůstu SF při hodnotách přetížení nad +7 G_z (popisované v literatuře 2, 11, 15), avšak statisticky jsme toto snížení nevyhodnocovali pro malý počet probandů, kteří dosáhli této úrovně přetížení.

Průběh změn SF v decelerační fázi lineárního režimu a po ní lze vysvětlit přetrvávajícími důsledky gravitačního stresu ve vegetativní a humorální oblasti, zejména po odeznění bradykardizujících vlivů vlastní gravitační zátěže a decelerace.

Ani v tomto režimu zátěže jsme nezjistili vztah mezi dosaženou maximální SF a $+G_z$ tolerancí, přičemž vztah mezi klidovou a maximální SF dosáhl jen hranice statistické významnosti.

V literatuře jsou v období akcelerace a plató přetížení popisovány různé změny srdečního rytmu: SA blok, AV disociace, supraventrikulární extrasystoly, komorové extrasystoly, nodální rytmus (5, 8, 9, 10, 11). Tyto změny jsou vysvětlovány aktivací sympatiku a parasympatiku, arytmiogenním působením katecholaminů, změnami tvaru, polohy a plnění srdce, jakož i dalšími faktory. V období decelerace jsou popisovány komorové extrasystoly a bradykardie s junkčním rytmem. Tomu odpovídá i nález komorových extrasystol v námi sledovaném souboru.

Závěr

Na základě našich vlastních experimentů a po zhodnocení publikovaných poznatků lze shrnout:

1. V akcelerační i decelerační fázi intervalového režimu je přetížení +4,5 G_z hranicí statisticky významného nárůstu změn SF.

2. Bezprostřední reakce SF na zbrzdění je na různých úrovních přetížení (v rozmezí od +3 G_z do +5,5 G_z) totožná.

3. Prediktivní hodnota změn SF vzhledem k toleranci přetížení je nízká a nutno ji posuzovat v souvislosti s dalšími fyziologickými parametry.

Souhrn

Po zavedení letounů MiG-29 do výzbroje ČSA bylo lékařské vyšetřování pilotů doplněno o vyšetření na lidské centrifuze. Piloti byli vyšetřeni v intervalovém a lineárním režimu, při kterých bylo dosaženo přetížení +5,5 G_z , resp. +7 G_z . V akcelerační i decelerační fázi intervalového režimu je přetížení +4,5 G_z hranicí statisticky významného nárůstu změn SF. Bezprostřední reakce SF na zbrzdění je na různých úrovních přetížení (v rozmezí od +3 G_z do +5,5 G_z) totožná. Prediktivní hodnota změn SF vzhledem k toleranci přetížení je nízká a nutno ji posuzovat v souvislosti s dalšími fyziologickými parametry.

Literatura

1. FORSTER, E. M. - WHINNERY, J. E.: Reflex heart rate response to variable onset $+G_z$. *Aviat. Space Environ. Med.*, 59, 1988, č. 3, s. 249-254.
2. GILLINGHAM, K. K. - FOSDICK, J. P.: High-G training for fighter aircrew. *Aviat. Space Environ. Med.*, 59, 1988, č. 1, s. 12-19.
3. GILLINGHAM, K. K.: High-G stress and orientational stress. Physiologic effects of aerial maneuvering. *Aviat. Space Environ. Med.*, 58, 1988, č. 11/II, s. A10-A20.
4. PALEC, B. P. et al.: Gemodinamika pri gravitacionnyh peregruzkach (matematičeskoje modelirovanije). *Fiziol. človeka*, 11, 1985, č. 2, s. 185-191.
5. PARKHURST, M. J. - LEVERRETT, S. D. - SHUBROOKS, S. J.: Human tolerance to high, sustained $+G_z$ acceleration. *Aerospace Med.*, 43, 1972, č. 7, s. 708-712.
6. SHUBROOKS, S. J.: Changes in cardiac rhythm during sustained high levels of positive $+G_z$ acceleration. *Aerospace Med.*, 43, 1972, č. 11, s. 1200-1206.
7. ULLRICH, B. - KOLLANDE, G.: Einsatz von Humanzentrifugen zur Untersuchung der Überlastungsverträglichkeit. *Z. Milit. Med.*, 29, 1988, č. 6, s. 300-303.
8. TOMASELLI, C. M. et al.: Relationship of age and cardiovascular response to postural stress. (Abstract.) *Aviat. Space Environ. Med.*, 58, 1987, č. 5, s. 483-518.
9. WHINNERY, J. E.: Post-acceleration chaotic atrial rhythm. *Aviat. Space Environ. Med.*, 53, 1982b, č. 4, s. 390-392.
10. WHINNERY, J. E. - LAUGHLIN, M. H. - UHL, G. S.: Coincident loss of consciousness and ventricular tachycardia during $+G_z$ stress. *Aviat. Space Environ. Med.*, 51, 1980, č. 8, s. 827-831.
11. WHINNERY, J. E. - LAUGHLIN, M. H. - HICKMAN, J. R.: Coincident loss of consciousness and sino-atrial block during $+G_z$ stress. *Aviat. Space Environ. Med.*, 50, 1979, č. 6, s. 635-638.

Klíčová slova: Srdeční frekvence; Přetížení.