

## Antonín Pišťek

### ERNST MACH A LETECTVÍ

### Ernst Mach and Aviation

The paper deals with the air compressibility effects on high speed flight and the aerodynamic qualities of the airplane when reaching the speed of sound. This field is connected with the person of physicist Ernst Mach, who defined the ratio of the motion speed of an object to the speed of sound, now called after him Mach's number, which is one of the so-called dimensionless quantities in aerodynamics and has become important in modern aviation. Also the history of the "sound barrier" story is described, the essence and consequences of the supersonic flight effects as sonic-boom and other phenomena connected with Mach's number or Mach's cone.



PIŠTĚK, Antonín. Ernst Mach a letectví. In: DUB, Petr a Jana MUSILOVÁ. *Ernst Mach – Fyzika – Filosofie – Vzdělávání*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2010, s. 123–129. ISBN 978-80-210-4808-9. DOI: 10.5817/CZ.MUNI.M210-4808-2011-123.

# Ernst Mach a letectví

## Antonín Píštěk

### Historie Machova čísla

Hodnocení Machových prací z oblasti fyziky přísluší odborníkům a životopiscům. To, že tak velké množství pojmů a názvů se dostalo nejen do výuky fyziky, ale i do praxe, je obdivuhodné. Známe Machův vlnostroj a Machovo kyvadlo, aerodynamika nadzvukových rychlostí se neobejde bez Machova kužele, Machova úhlu a Machova čísla, rychlost letounu se měří machmetrem atd. Uvážíme-li, že Mach většinu svých prací napsal mnohem dříve, než lidstvo uskutečnilo svůj dlouholetý sen, a v roce 1903 poprvé vzletl člověk s letounem těžším vzduchu, je velmi obtížné hovořit o Ernstu Machovi a letectví. Přesto, Mach a letectví je tak propojeno, že i malé děti vědí, kolik „Machů“ udělá ten který letoun. Machův přínos vědeckému poznání v nadzvukové aerodynamice byl založen na těsném souladu teoretické a experimentální práce. Ta zejména byla na svou dobu naprosto unikátní. Mach dokázal v 80. letech 19. století fotografovat nadzvukovou rychlostí se pohybující projektil (viz obr. 1).

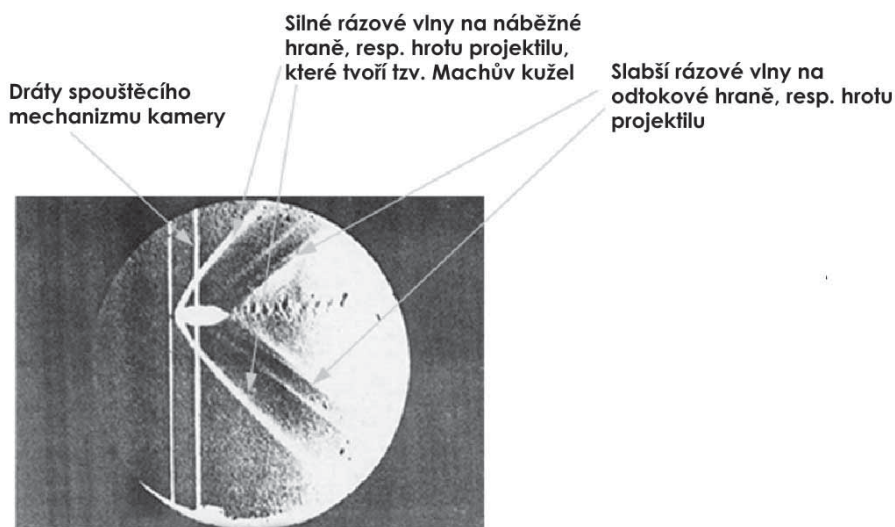
Mach byl rovněž první, kdo k vizualizaci dějů spojených s razantními změnami stavů plynu použil tzv. schlierovou metodu, vynález Augusta Toeplera, metodu používanou ke zkouškám homogenity optického skla. Schlierová fotografie rázových vln v okolí nadzvukovou rychlostí se pohybujícího projektilu byla součástí zásadní publikace „*Photographische Fixierung der durch Projektile in der Luft eingeleiteten Vorgänge*“ přednesené v roce 1887 na Vídeňské akademii věd [1]. Machovým zcela zásadním poznatkem bylo objevení jevů spojených se skokovými změnami stavu plynu v okolí pohybujících se těles, pokud se jejich rychlost blíží právě rychlosti šíření zvuku v daném plynu. Mach definoval proto rychlosti těles v poměru k rychlosti šíření zvuku a tento poměr je dnes znám právě jako Machovo číslo. Dnešní aerodynamiku si již bez pojmu Machova čísla nedovedeme představit, ovšem ještě do II. světové války se používalo několik různých označení (např.: Bairstowovo, Boothovo či Sarrauovo číslo) a teprve v roce 1929, tj. 13 let po Machově smrti švýcarský aerodynamik Jakob Ackeret (1898–1981) nazval při své přednášce na curyšské technice zmíněný poměr rychlostí Machovým číslem. Analogicky dostalo své jméno další podobnostní číslo, kdy Sommerfeld pojmenoval Reynoldsovo číslo mnoho let poté, co Reynolds prováděl své výzkumy.

## Machovo číslo a letectví

Machovo číslo, symbol  $M$  nebo  $Ma$ , je bezrozměrná veličina, která dává do poměru rychlost pohybujícího se tělesa určitým prostředím k rychlosti šíření zvuku v tomto prostředí.

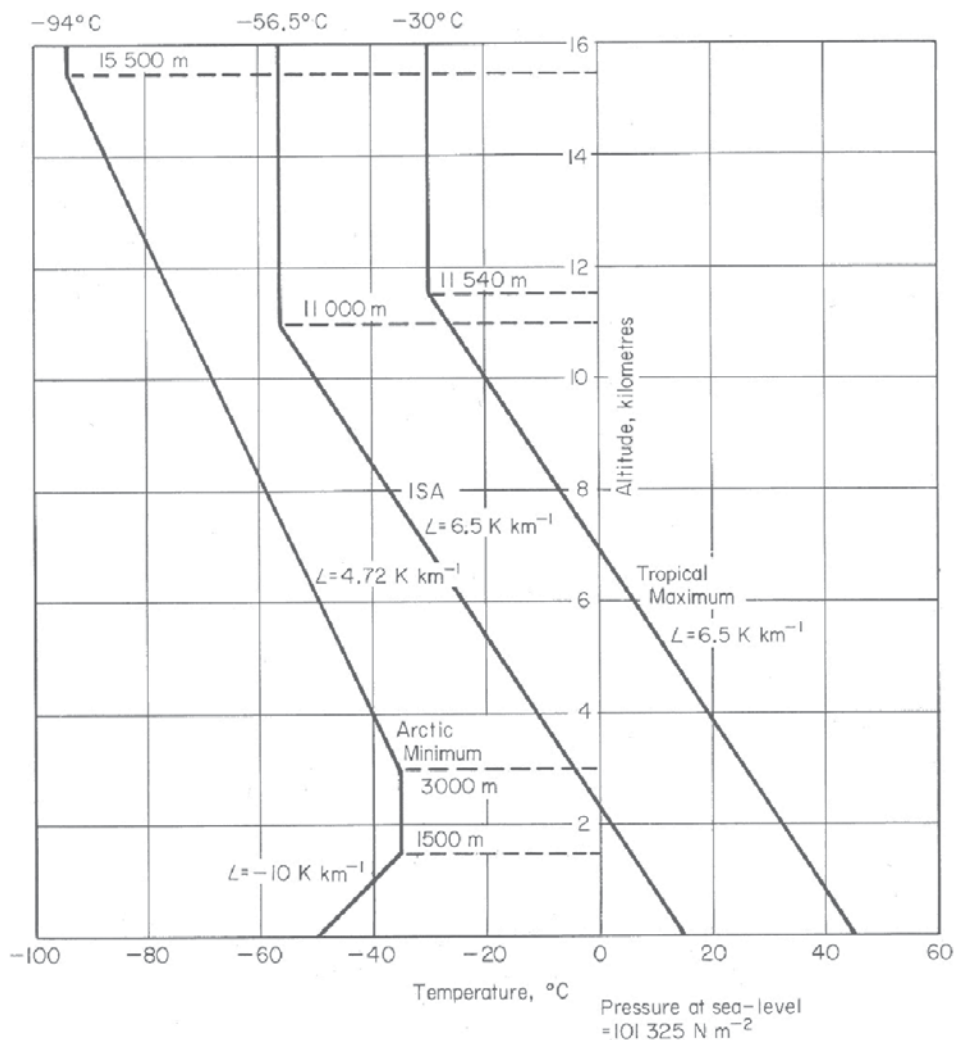
$$M = \frac{v}{a},$$

kde  $v$  je rychlost tělesa, tj. letounu, a  $a$  je rychlost šíření zvuku v daném prostředí, tj. atmosféře. Parametry atmosféry, rychlost zvuku nevyjímaje, jsou závislé na nadmořské výšce. Pro praxi se v leteckém inženýrství používá matematický model atmosféry známý jako ISA – International standard atmosphere. Na obr. 2. je znázorněn průběh teploty s nadmořskou výškou, a to jak pro ISA, tak pro tropický a arktický extrém. Rychlost zvuku, která závisí na teplotě vztahem  $a = \sqrt{\kappa RT}$ , se tudíž mění také. Pro ilustraci, při teplotě  $20\text{ }^\circ\text{C}$  je rychlost zvuku u hladiny moře  $1225\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a ve výšce 11 kilometrů je již  $1062\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .



Obrázek 1: Projektíl pohybující se nadzvukovou rychlostí.

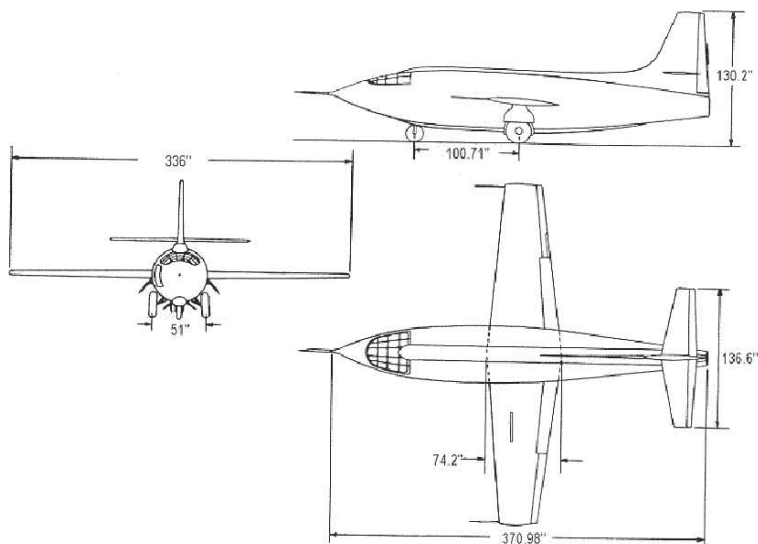
Vzhledem k distinktivnímu charakteru proudění při určitých rychlostech se rychlosti letu v souvislosti s Machovým číslem dělí na pět základních kategorií: oblast subsonická (podzvuková)  $M < 1$ , oblast transsonická  $0,8 < M < 1,3$ , oblast sonická  $M = 1$ , oblast supersonická (nadzvuková)  $1,2 < M < 5$  a oblast hypersonickou, kdy  $M > 5$ . Dosažení rychlosti zvuku při vodorovném letu letounu narazilo na mnoho technických potíží a nepoznaných jevů a pro sonickou oblast se vžil termín „zvuková bariéra“.



Obrázek 2: Závislost teploty na nadmořské výšce pro mezinárodní standardní atmosféru (dle [2]).

## Zvuková bariéra

Letouny s vrtulovým pohonem dosahovaly maximálních rychlostí kolem  $600 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , což bylo dáno výkonovými možnostmi tehdejších pohonných jednotek a limity účinnosti vrtulí. Ke konci II. světové války se objevily nové koncepte proudových motorů a byla zahájena bitva o dosažení  $M = 1$ , tj. rychlosti letu rovnající se rychlosti zvuku. Tento boj stál několik životů zkušebních pilotů a bylo třeba vyřešit celou řadu dosud neznámých zákonitostí souvisejících s nadzvukovým obtékáním. Při přiblížení k rychlosti zvuku a rovněž při jejím překročení dochází ke skokovým změnám ve stabilitě a říditelnosti letounu, což často vedlo k fatálnímu konci pokusu o let nadzvukovou rychlostí, jak nejlépe dokumentují záznamy některých letů z poválečného období.



Obrázek 3: Bell X-1, americký experimentální letoun, s nímž byla poprvé dosažena rychlost  $M = 1$ .

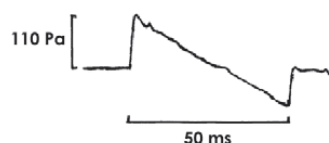
Rychlost zvuku poprvé překonal 14. 10. 1947 americký pilot Charles Yeager na pokusném raketovém letadle Bell X-1 (viz obr. 3), které bylo speciálně zkonstruováno pro účely výzkumu transsonické oblasti. Letoun s rozpětím křídel 8,5 m a „vzletové“ hmotností 5545 kg byl do letové hladiny vynášen v podvěsu pod upraveným bombardérem B-29. K pohonu sloužily 4 raketové motory Reaction Motors XLR-11-RM3 na tekuté palivo

s tahem každého 26,7 kN. Doba chodu motorů byla 5 minut. Letoun dosáhl maximální rychlosti  $M = 1,26$ . Další vývoj, stimulovaný především vojenskými aplikacemi, dospěl v roce 1961 k překonání rychlosti  $M = 6$ . Americký experimentální raketoplán North American X-15 dosáhl ve výšce 30 km rychlosti  $M = 6,04$ . Otevřela se oblast hypersoniky. Od této doby letectví urazilo obrovskou cestu. Vojenské letouny létají zcela běžně nadzvukovými rychlostmi. Roku 1976 vstoupil do služby dokonce civilní dopravní nadzvukový letoun – Concorde. V službě setrval do roku 2003.

## Sonický třesk

Při letu nadzvukovou rychlostí se vytvářejí na přídě a zádi letounu mohutné rázové vlny, které mohou dosahovat až na zem. Dosáhnou-li rázové vlny povrchu země, vnímáme tuto prudkou tlakovou změnu jako sonický či aerodynamický třesk (angl. sonic boom). Jedná se vlastně o skokovou tlakovou změnu v prostředí, tedy atmosféře, která se šíří od pohybujícího se letadla. Může dosahovat až destruktivních hodnot – poškozujících sluch či rozbíjejících okna. Aerodynamický třesk může vzniknout jen při nadzvukové rychlosti letadla. Na intenzitu třesku má vliv výška letu nad povrchem země a jeho rychlost.

Princip vzniku spočívá v omezené rychlosti šíření rozruchu ve vzduchu. Při pohybu letounu rychlostí vyšší než  $M = 1$  se vytvoří tzv. Machův kužel vycházející z nosu letounu. Ten je tvořen čelem vlnoploch rozruchů tvořených letounem. Tlakový skok na ploše Machova kužele, který je vlastně rázovou vlnou, může dosahovat hodnot přes 100 Pa. O účincích se osobně přesvědčili obyvatelé Oklahoma City v roce 1964, kdy FAA – americký Federální úřad pro letectví uskutečnil okolo 1 200 měřících nadzvukových letů nad městem. Výsledkem bylo 14 000 stížností a 147 rozbitých oken.



Obrázek 4: Typický průběh tlaku před rázovou vlnou (zdroj [3]).

## Měření rychlosti a experimenty v nadzvukové oblasti

S provozem letadel v nadzvukové oblasti souvisí potřeba měřit jejich rychlost. Machovo číslo je používanou jednotkou pro měření rychlosti a je obvyklé, že rychloměry mají dvě stupnice – s údaji v  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  pro nízké rychlosti a s údaji v  $M$  pro vysoké rychlosti. Rychlost letu je měřena pomocí pitotstatické soustavy (měření dynamického a statického tlaku vzduchu), z jejichž poměru lze určit Machovo číslo.



Obrázek 5: Letoun FA-18 Hornet při překročení rychlosti zvuku. Skokové změny stavových veličin na čele rázové vlny způsobují kondenzaci ve vlhkém vzduchu.

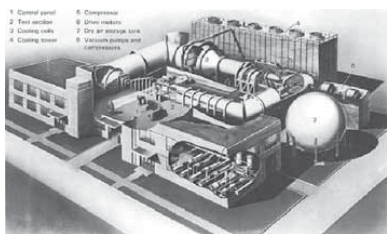
Konstrukci letounů pro nadzvukové rychlosti musí samozřejmě podporovat výzkum a rozsáhlé experimenty. Problém spočívá v extrémní energetické náročnosti, a tudíž i nákladnosti těchto experimentů. Supersonické aerodynamické tunely, které poskytují informace o aerodynamice nadzvukových rychlostí, vznikly už v období II. světové války. Měření jsou však komplikovaná, nadzvukové rychlosti v měřicím prostoru je dosahováno po dobu řádu desítek sekund. Problémy způsobují interakce rázových vln se stěnami tunelu a je nutno provádět mnoho korekcí. Tunely mají v zásadě dvě koncepce. Buď to je evakuován velký prostor a následně je do něj prudce přiveden přes měřicí prostor vzduch z volné atmosféry, nebo je natlakován zásobník a z něj naopak vzduch přes měřicí prostor vypuštěn. V obou případech musí být poměr tlaků v obou rezervoárech nadkritický, tak aby mohlo proudění dosáhnout sonické rychlosti.



Obrázek 6: Machmetr LUN 1170, stupnice v uzlech  $\times 10$  a  $M$ .

## Závěr

Přestože to nemohl tušit, Ernst Mach svými pokusy otevřel dveře do oblasti, jež v letectví znamenala odolávající bariéru, tajemnou komnatu a posléze známku prestiže. Dnes létají nadzvukovými rychlostmi letouny denně a pojem Machova čísla je zcela běžný a v aerodynamice vyšších rychlostí zcela zásadní. A tak, přestože se velký fyzik a experimentátor dožil pouze létání člověka rychlostmi desítek  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ , jeho jméno se do letectví nesmazatelně zapsalo.



Obrázek 7: Obří nadzvukový tunel v Ames Research Center, NASA, USA. Velikost měřicího prostoru  $2,7 \times 2,1$  m.

## Seznam odkazů

- [1] E. Mach: *Sitzungsbericht der Wiener Akademie Ila* **95** (1887), 164.
- [2] E. L. Houghton, P. W. Carpenter: *Aerodynamics for Engineering Students*. Butterworth Heinemann 2000.
- [3] R. Rylander: The sonic boom – Effects on humans, *Sozial- und Präventivmedizin/Social and Preventive Medicine Journal* **19** (1974) 3, 217.