

IX. Metody fyzikálního modelování

Již v úvodu bylo zmíněno, že výzkum MVA in situ je velice nákladný a vesměs dává pouze výsledky omezeného rozsahu. Proto jsou většinou používány metody modelování. Z kapitol o matematickém modelování lze zase vyvodit závěr, že i tato metoda modelování se stává pro případ mezní vrstvy atmosféry úlohou značně komplikovanou. A to je nutné ještě zdůraznit, že mnohé problémy nebyly zmíněny vůbec. Z uvedeného je zřejmé, že je možné metodu matematického modelování využívat především v případech jednodušších. Například již orograficky komplikovaný terén přináší značné obtíže. Je například možné zmínit otázku zavedení vhodného souřadného systému³⁹, vhodné volby sítě apod. Komplikacím tohoto druhu se dá vyhnout použitím analogových metod.

Pro případy modelování MVA je převážně užívána metoda, která je označována jako **fyzikální modelování**. Silně zjednodušeně ji lze charakterizovat tak, že její podstata spočívá v tom, že procesy jako je proudění, přenos tepla, transport příměsí a další v MVA nad krajinou jsou v aerodynamickém tunelu zmenšeny ve vhodném měřítku. Již méně zjednodušeně lze tvrdit, že zmenšení musí být takové, aby tyto zmenšené procesy měly stejné vlastnosti, jako procesy v MVA. To znamená, aby byly především zmenšeny okrajové podmínky. Jelikož jsou převážně řešeny úlohy na omezené oblasti (vlastně v nepatrné části MVA, která je uměle vyjmuta z celé atmosféry), je nutné, aby byly zmenšeny okrajové podmínky na hranici této omezené oblasti. Jedná se především o zmenšení okrajové podmínky na zemském povrchu. Zemský povrch včetně staveb, vegetace, vodních ploch apod. se realizuje vytvořením vhodného geometricky podobného modelu. Dále je nutné zmenšit okrajové podmínky pro všechny podstatné závislé i nezávislé proměnné na dalších hranicích omezené oblasti. Nakonec je nutné realizovat zmenšený model všech podstatných procesů uvnitř omezené oblasti nad modelem krajiny v aerodynamickém tunelu nebo vodním kanálu. Tato myšlenka není nová. Snad poprvé ji užil francouzský inženýr Eiffel, který

³⁹ Souřadný systém, jehož x-ová osa kopíruje zemský povrch, je většinou neortogonální se všemi komplikacemi.

se na předmětu podobném budově, jenž byl vložen do volného proudu v aerodynamickém tunelu, pokoušel nalézt optimální tvar budovy a odhadnout součinitel odporu.

Využívání aerodynamických tunelů pro účely modelování MVA se stává prostředkem zkoumání v relativně nedávné době. Aerodynamikové dlouho stáli před nepřekonatelnou překážkou, která spočívala v tom, že Reynoldsovo číslo dosahované na modelech v tunelech je vůči odpovídajícím hodnotám v přírodě (na díle) malé⁴⁰. V důsledku toho nebyly výsledky na modelu a díle v dobré shodě. K pozvolnému obratu došlo v okamžiku, kdy meteorologové si uvědomili podobnost nejspodnější části atmosféry s Prandtlovou mezní vrstvou a tuto část atmosféry nazvali MVA.

Koncem padesátých let začala dánská škola studiím aeroelasticity budov a konstrukcí. Z její dílny byla prokázána použitelnost fyzikálního modelování při určování sil působících na stavby. Znalost těchto sil je nutná pro návrhy



Obr. 9.1 Pohlednice zachycující zřícení Tacomského mostu způsobené silným větrem.

⁴⁰ Tento problém bude vysvětlen záhy.

obytných budov, zejména budov průmyslových a dalších konstrukcí. Začalo se dařit vysvětlovat příčiny nejružnějších katastrof, například zřícení mostů, jehož příkladem je zborcení takomského mostu, jak je vidět z obr. 9.1, a posléze těmto katastrofám předcházet.

Sedmdesátá a osmdesátá léta jsou ve znamení obrovského pokroku v tomto směru. Je nutné zejména zmínit prof. J. E. Cermaka, jeho spolupracovníky a studenty, kteří v laboratoři ve Fort Collins v Coloradu posunuli tento směr o velký kus kupředu. V současné době je metoda fyzikálního modelování ve vybraných problémech již standardně používána. Jedná se o úlohy spojené s aeroelasticitou budov a konstrukcí, problémy spojené s prouděním a znečištěním ovzduší v regionech velikosti mikro- a mezo- měřítka apod. Nově se touto metodou začínají řešit problémy spojené s haváriemi či teroristickými útoky, tedy případy, kdy dochází k náhlému krátkodobému úniku nebezpečných látek do ovzduší. Po politických a ekonomických změnách se i v České republice podařilo tento trend zachytit. Aeroelastické úlohy, spojené se stavebními konstrukcemi, se touto metodou řeší ve Výzkumném leteckém ústavu v Praze – viz například Jirsák (1998), a v Centru excelence Telč – viz například Pospíšil, Drdáký (2015). Problémy spojené s prouděním a znečištěním ovzduší jsou řešeny v Ústavu termomechaniky – viz Jaňour (1999).

Pokročně dále a pokusme se o něco podrobnější popis této metody. Bylo již řečeno, že nutnou podmínkou je geometricky podobný model zemského povrchu, podobné další okrajové podmínky a podobný model procesů uvnitř omezené oblasti. Celek budeme dále nazývat modelem. Na druhé straně MVA, přiléhající zemský povrch i další okrajové podmínky v přírodě (in-situ) nazveme dílem. O obou površích víme, že si musí být navzájem geometricky podobné. Není nutné, aby model naprosto věrně kopíroval zemský povrch, je však nutné, aby oba měly stejné charakteristické vlastnosti. Příkladem jsou modely Staroměstského náměstí a Pardubického nádraží na obr. 9.2, které byly vyrobeny a užívány pro studium problematiky znečištění ovzduší v Ústavu termomechaniky AV ČR, v.v.i.

Doposud nebyla zmíněna podobnost proudících tekutin. Pokusme se proto nalézt jejich vlastnosti, které by zaručovaly, že i tato proudění jsou si „podobná“. Jelikož chceme modelovat MVA, musíme začít s pohybovými rovnicemi, které MVA popisují. Omezme se pro jednoduchost na problémy s horizontálním měřítkem velikosti mezo-měřítka a menším. Pak rovnice popisující procesy v MVA na omezené oblasti, kterou studujeme, je možné popsat soustavou rovnic (6.4) až (6.10) a vhodnými okrajovými podmínkami na hranici této omezené oblasti. Abychom mohli použít stejné rovnice a stejné okrajové podmínky, je vhodné



a



b

Obr. 9.2 Model a) Staroměstského náměstí, b) Pardubického hlavního nádraží.

převést tuto soustavu do bezrozměrného tvaru. Předpokládejme proto, že uvažovaná oblast má charakteristické délkové měřítko L_0 , charakteristické měřítko pro rychlost U_0 , charakteristické měřítko pro teplotní diferenci ΔT_0 a úhlovou rychlost Ω . Pak soustavu pohybových rovnic pro MVA, ve které nyní nebudeme obecně zavádět žádný předpoklad o Reynoldsových napětích (soustava rovnic zůstává neuzavřená), lze převést do následujícího bezrozměrného tvaru

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \vec{\nabla}) \vec{V} = -\vec{\nabla} p' + Ri \Theta \vec{k} + \frac{1}{Re} \Delta \vec{V} - 2 \frac{1}{Ro} \vec{\Omega} \times \vec{V} - (\vec{V} \vec{\nabla}) \vec{V}, \quad (9.1)$$

$$\frac{\partial \Theta'}{\partial t} + (\vec{V} \vec{\nabla}) \Theta' = \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \Delta \Theta' - (\vec{\nabla} \vec{v}) \theta + \frac{Ec}{Re} \Theta', \quad (9.2)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} + (\vec{V} \vec{\nabla}) X = \frac{1}{Pr Sc} \Delta X + (\vec{\nabla} \vec{v}') \chi', \quad (9.3)$$

kde je:

$Ro = U_0 / (L_0 \Omega_0)$ – Rossbyho číslo,

$Ri = (\Delta T_0 / T_0) (L_0 / U_0^2) g_0$ – Richardsonovo číslo,

$Re = U_0 L_0 / \nu$ – Reynoldsovo číslo,

$Pr = \nu / (\kappa_0 / \rho_0 c_{p0})$ – Prandtlovo číslo,

$Ec = U_0^2 / c_{p0} \Delta T_0$ – Eckertovo číslo,

$Sc = \nu / k_\chi$ – Schmidtovo číslo.

Pro fyzikální modelování, jež spočívá ve vytvoření modelu atmosféry na stěně aerodynamického tunelu, který je s MVA aerodynamicky a termodynamicky podobný, odtud plynou následující nejdůležitější podobnostní kritéria:

- geometrická podobnost modelu povrchu,
- stejné Rossbyho číslo Ro ,
- stejné Richardsonovo číslo Ri ,
- stejné Reynoldsovo číslo Re ,
- stejné Prandtlovo číslo Pr ,
- stejné Eckertovo číslo Ec ,
- stejné Schmidtovo číslo Sc ,
- podobnost ostatních okrajových podmínek.