

Proudění větru a jeho vliv na válcovité objekty ve stavebnictví

26.5.2023 - | Grantová agentura ČR

Projekt profesora Stanislava Pospíšila z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR přinesl nové přístupy k vysvětlení chování proudění a podstaty jevů existujících při dvourozměrném proudění vzduchu kolem válce s drsným povrchem, a to v rozsahu Reynoldsova čísla charakteristického pro nízké a středně vysoké turbulence proudů, typické pro reálné situace.

Aerodynamika je širokým vědním oborem, ve kterém je studováno proudění vzduchu kolem různých objektů. Patří mezi obtížné teoretické disciplíny s širokým uplatněním téměř kdekoli, kde vzduch nebo plyny existují. Je to dáno především tím, že plyny se řadí mezi tekutiny, které tekou s nízkými i vysokými rychlostmi, což znamená, že proudění se odehrává v různých režimech, ve kterých jsou již vlastnosti plynů rozdílné. Aerodynamika je využívána při stanovení sil působících na dopravní prostředky, v oblasti energetiky, ale rovněž i pro návrhy vnitřních účinků proudění v motorech, při výpočtech chlazení, stanovení komfortu v místnostech a prostorách provozů.

Zajímavostí je, že z oblasti aerodynamiky pochází jeden z tzv. nevyřešených problémů techniky. Jedná se o turbulentní proudění, které přivádí vědce k otázce, zda je vůbec možné vytvořit jeho teoretický model k popisu statistik jeho vnitřních struktur. V minulém století se oblast aerodynamiky rozšířila i do oblasti stavebnictví a návrhu inženýrských konstrukcí. Také se vyvinul obor příbuzný – stavební aeroelasticita, kterou lze definovat jako součást mechaniky zabývající se nejen působením vzdušných sil na konstrukci, ale i jejich interakcemi s konstrukcí, která se pohybuje. Tato disciplína zasahuje proto do důležitých oblastí bezpečnosti staveb a infrastruktury, ale také třeba kvality životního prostředí a energetiky, akustiky a optimalizace návrhu vysokých staveb. Jen do roku 1940 se v důsledku silných bouří mnoho konstrukcí a mostů zřítilo, aniž by byly známy přesné příčiny těchto katastrof. Jednou z nich byl například kolaps mostu v Tacomě (USA), který v podstatě nasměroval výzkum v aerodynamice i do stavebnictví, což vedlo k bezpečnějším návrhům a v podstatě zamezilo opakování podobných katastrof.

Vítr a jeho statické působení jsou tedy významnými faktory při návrhu konstrukcí a škody, které vítr každoročně způsobí, jsou důvodem mnoha alarmujících titulků v novinách. Méně je známo, že nezanedbatelná část škod vzniká v případech, ve kterých je hlavním příčinou dynamické působení a odezva, ke které nemusí docházet pouze za extrémních rychlostí větru, ale naopak za poměrně běžných, a dokonce nečekaných okolností. Je to dáno také tím, že rychlost (tlak větru) je možné popsat jako kompozici střední hodnoty a flukтуаčních složek, které hrají důležitou roli. Flukтуаční složka větru je pro běžné rychlosti a pro většinu případů považována za náhodný stacionární a ergodický proces, který má charakteristické frekvenční spektrum. Obecně se účinky větru dělí na statické a dynamické, které pak dělíme podle druhu odezvy a převažujících frekvencí, což situaci značně komplikuje, protože mezi těmito jevy dochází ke kombinacím a ke vzniku nových jevů například v důsledku energetických přechodů a působení flukтуаací, zvaných šumy. Ty mohou mít silný vliv na chování konstrukce například v oblasti větvení rovnováhy.

K laboratorní tvorbě větru a ke zkoumání proudění a zatížení staveb jsou vědci využívány aerodynamické tunely s relativně nízkými rychlostmi. Jsou určeny pro stavebnictví a jejich primárním experimentálním požadavkem je, aby byla v modelování fyzikálních jevů zachována důležitá podobnost kritérií, které zajistí spolehlivé a do reality přenositelné výsledky získané na menších modelech. Experimenty v tunelech pochopitelně slouží i k lepšímu pochopení teoreticky stále

nedokonale popsáných aerodynamických jevů a náhodnosti. Společně s výpočetními procedurami z oblasti numerické dynamiky tekutin tvoří dnes ucelený vědní nástroj.

Obr. 1. Schéma aerodynamického tunelu ÚTAM AV ČR, v. v. i.

Je zřejmé, že stavební aerodynamika není jen záležitostí větších stavebních celků. Nachází své místo v návrhu konstrukčních detailů a nosných prvků, jako jsou například mostní lana a závěsy s různým tvarem. Průřezové profily těchto stavebních prvků podstatně ovlivňují režimy obtékání. Řešitelé projektu GA ČR nasměrovali své úsilí na výzkum aerodynamiky a aeroelasticity na válce s nominálně kruhovým průřezem a s různou povrchovou drsností, která vzniká v různých klimatických nebo technologických podmínkách a která režim obtékání silně ovlivňuje v negativním i pozitivním smyslu. Příkladem je námraza na laně nebo jeho trvalý defekt vzniklý při výrobě, případně během používání. Při obtékání tělesa na povrchu (v případě necylindrických ostrých průřezů pak na hranách) vznikají poruchy ve stabilitě proudu, tvoří se tzv. smykové vrstvy pokračující do úplavu. Dochází k odtrhávání a tvorbě vírů a k prudkým změnám tlaků, které pak generují odezvu v určitém frekvenčním pásmu. Takto vytvořená odezva může za určitých okolností trvat velmi dlouhou dobu. Frekvenční pásmo, nebo lépe řečeno jeho střední frekvence, je charakterizováno bezrozměrným Strouhalovým číslem, zatímco amplituda závisí na útlumu, vyjádřeného hodnotou čísla Scrutonova.

K zajímavému průběhu kmitání dochází, když při určité rychlosti větru dojde k rezonanci. Pokud výchylka překročí jistou hranici, interakce proudění a tělesa vede ke změně frekvence odtrhávání vírů, a ta se začne přizpůsobovat vlastní frekvenci oscilátoru. Tento jev je znám jako uzamčení a je projevem nelineárních oscilací v tzv. limitním cyklu. Kmity se odehrávají za velkých výchylek vedoucích k poškozením, jak je patrné na fotografii na obrázku 2d).

Obr. 2. Příklady námraz a poškození lana od aeroelastického kmitání.

Obr. 3. Uspořádání experimentu v aerodynamickém tunelu.

Obr. 4. Vrstevnicové mapy pro různé režimy obtékání válce s námrazou

Vznik vírů, rychlostní pole a převažující frekvence změn tlaků je výsledkem režimu obtékání. Ten se zjišťuje nejčastěji měřením rychlostí proudu v jednotlivých bodech úplavu metodou žhaveného drátku, případně integrální metodou zvanou Laserové zobrazení rychlostního pole částic. Schéma uspořádání se znázorněním této metody je uvedeno na obrázku 3. Tři režimy proudění jsou pak vyobrazeny na vrstevnicových mapách na obrázku 4, z kterých lze určit rozměry vírů, jejich vzdálenosti a také například odporové síly, které proud na tělese vytváří. Ty jsou uváděny v hodnotách silových koeficientů jako na obrázku 5, ze kterých je patrné, že se skutečně mohou významně lišit v závislosti na povrchu. Například odpor hladkého tělesa klesá na polovinu, je-li proud více turbulentní. Jinými slovy, turbulence proudu je v dané oblasti Re jistou obdobou drsnosti povrchu. Pokud je na válci námraza, vrostle intuitivně také jeho odpor, na druhé straně ale vede přítomnost námrazy k nárůstu síly příčné a někdy i ke změně silového momentu, což může zapříčinit nestabilní kmitání ve větru.

Obr. 5. Hodnoty silových koeficientů na válci s hladkým povrchem a s námrazou

Pro Strouhalovo číslo charakterizující frekvenční režim vírové cesty platí, že je námrazou rovněž silně ovlivněno. V rozsahu měřených rychlostí daných Reynoldsovým číslem St roste, je-li turbulence proudu vysoká, zatímco pro válce s námrazou je vliv turbulence na změnu frekvence vírů potlačen, jak je vidět na pravém spodním grafu.

Obr. 6. Strouhalovo číslo charakterizující možnost vzniku kmitání hladkého válce či válce s námrazou od vznikajících vírů jako funkce rychlosti větru.

V návaznosti na stanovení statických sil a frekvencí tým profesora Pospíšila pokračoval ve studii vzniku kmitání na oscilátorech s různou technologickou drsností a s námrazou. Základem této práce byla analýza „rezonančních“ křivek a amplitud kmitání. Pozornost je nutné obrátit na skutečnost, že při zvyšování rychlosti větru dochází k oscilacím v zásadě ve čtyřech experimentálních režimech, které se vědeckému týmu podařilo identifikovat ve shodě s teoretickými analýzami nelineárního oscilátoru Van der Polova typu.

Obr. 7. Odezva válce při interakci proudění a tělesa, která vede k fyzikálnímu jevu „uzamčení“ a která je výsledkem nelineárních oscilací v tzv. limitním cyklu

V předkritickém režimu znázorněném na obrázku 7a) je odezva determinována náhodně se oddělujícími víry v poměrně širokém frekvenčním pásmu. Při zvýšení rychlosti v oblasti Strouhalova čísla nastává krátký úsek rezonance, kdy je frekvence oddělování vírů velmi blízká vlastní frekvenci táhla (obrázek 7b). Z tohoto stavu přechází oscilátor do tzv. kvaziperiodického režimu vznikajícího při efektu uzamčení, ve kterém dochází k záněmům a synchronizaci mezi frekvencemi výchylky a vírů, které jsou si blízké (obrázek 7c). Při dalším zvýšení rychlosti větru přechází soustava do pokritického režimu.

Projekt rovněž přispěl k problematice laboratorní tvorby námrazy v klimatickém tunelu a jeho zachycení digitální fotogrammetrickou metodou v plném měřítku zkombinovanou s numerickou analýzou obrazu založeného na trojrozměrných modelech prvků, mapujících profily námrazy podobné těm, které byly pozorovány v přírodě.

<https://gacr.cz/proudeni-vetru-a-jeho-vliv-na-valcovite-objekty-ve-stavebnictvi>