

ANALÝZA A RIEŠENIE NIEKTORÝCH FYZIKÁLNYCH PROBLÉMOV PRI BUDOVANÍ AERODYNAMICKÉHO TUNELU STU BRATISLAVA

Štefan Húšťava, Anton Puškár
Stavebná fakulta STU Bratislava

Abstrakt: Práca sa zaoberá analýzou základných meraných parametrov a fyzikálnych veličín pri spúšťaní veterného tunela s medznou vrstvou. Sú popísané vlastnosti základných meraných veličín potrebných na prevádzku veterného tunela s atmosférickou medznou vrstvou. V závere je zhrnutý význam, užitočnosť a možnosti využitia veterného tunela.

Kľúčové slová: aerodynamický tunel, medzná vrstva, meranie tlaku a prietoku, simulácia medznej vrstvy, fyzikálne modelovanie, kritériá podobnosti.

Úvod

Na území Slovenska doteraz nie je možnosť laboratórneho overovania aerodynamických vlastností budov. Preto sa na Stavebnej fakulte STU rozhodlo o výstavbe aerodynamického tunela. Pri jeho návrhu boli prizvaní odborníci z VZLU, a.s. Praha [1]. Bolo treba pripraviť zoznam aplikačných meracích metód pre veterný tunel s medznou vrstvou (BLWT- Boundary Layer Wind Tunnel). Bude treba navrhnúť meraciu techniku a meraciu metodiku používanú pri meraniach vo vetrených tuneloch.

Všetky merané veličiny sú dnes pomocou vhodných prevodníkov menené na elektrickú veličinu a tá je ďalej spracovaná pomocou A/D prevodníkov inštalovaných v počítači. Pre komunikáciu s A/D prevodníkmi a pre prípravu tzv. „Virtuálnych meracích prístrojov“ je vhodné použiť k tomu určené programovacie rozhranie.

Stavebné normy obsahujú časť zaťaženia stavieb vetrom. Norma popisuje zaťaženie stavieb štandardných tvarov a do určitých výšok. Pokiaľ sa architekt či projektant od štandardných rozmerov či výšok odchýli je vhodné pre stanovenie tlakových koeficientov na plášti objektu použiť veterný tunel so simulovanou atmosférickou medznou vrstvou (BLWT). Pri dodržaní základných podmienok fyzikálneho modelovania takého problému možno dostať verné rozloženie stredných tlakov na fasáde objektov. S ohľadom na odozvu meracej linky možno sledovať aj dynamické tlakové javy odohrávajúce sa v oblastiach oddeľovania sa prúdenia prípadne v úplavoch za detailmi budov. Pri modelovaní projektovaných objektov a stávajúcej zástavby možno sledovať vývoj veternej situácie v úrovni chodcov tzv. veternú pohodu chodcov. Tieto tlakové merania sú zvládnuté rutinne v aplikácii BLWT.

1 Zber dát a základné merané veličiny

Zber dát sa dnes vykonáva výhradne s využitím počítačov. Merané fyzikálne veličiny sú pomocou vhodných prevodníkov snímané ako veličiny elektrické. Signál z prevodníkov, ak je analógový, je digitalizovaný pomocou meracích kariet a ďalej ukladaný na disku počítača. Takto získaný signál je ďalej spracovaný na základe fyzikálnych zákonov a predchádzajúcich kalibrácií je potom rekonštruovaný meraný priebeh fyzikálnej veličiny. Moderné meracie karty obsahujú obvykle analógové vstupy, analógové výstupy, digitálne vstupy a výstupy. . Zoznam základných meraných veličín:

Tlak vzduchu: statický a dynamický tlak prúdiaceho vzduchu v rozsahu cca 0 – 2,5 kPa

Rýchlosť prúdenia vzduchu: v rozsahu 0 až do rýchlosti cca 40 m/s

Koncentráciu stopujúceho plynu: v rádoch ppm.

2 Základné pravidlá fyzikálneho modelovania v BLWT

Fyzikálne modelovanie v oblasti veterného inžinierstva a využitia veterných tunelov BLWT so simulovanou atmosférickou medznou vrstvou zahŕňa predovšetkým kritériá podobnosti pri modelovaní.

2.1 Mierka modelovania

Je nutné skúmané dielo zmenšiť v mierke, ktoré bude približne odpovedať mierke simulácie atmosférickej medznej vrstvy (AMV). Simulácia realizovaná v BLWT je založená na prúdení vzduchu nad drsným povrchom. Jedná sa o rovnomernú drsnosť, ktorá generuje turbulentnú medznú vrstvu s príslušnými parametrami pozdĺž zložky vektoru rýchlosti, intenzity turbulencie, charakteristických rozmerov vírov a existencie inerciálnej podoblasti pri rozpade vírov. Všetky tieto parametre sú pre reálnu atmosféru stanovené a tabelované pre štandardné drsnosti terénu. Pomer hodnôt simulácie a reálnej atmosférickej medznej vrstvy tak určuje mierka modelovanej medznej vrstvy.

Použitie rovnomernej drsnosti pre vytvorenie simulácie určitej kategórie terénu poslúži k modelovaniu takzvaného vzdialeného poľa. Teda oblasti značne vzdialené od premeriavaného objektu. Pre prípravu metodík a výskum obecných fyzikálnych princípov v atmosférickej medznej vrstve je takáto simulácia dostatočná. Prípady kedy sa jedná o premeranie objektu projektovaného v konkrétnom mieste, je nutné zohľadniť jeho blízke okolie. Ak sa jedná o zástavbu je treba ju modelovať v dostatočnom dosahu. Modelovanie okolia zástavby vyžaduje dodržanie relevantnej geometrickej podobnosti topografie okolitého terénu včítane zástavby. V tomto prípade je možné aj i výraznejšie sa odchýliť od mierky simulácie [2], [3].

Mierka modelu by mala byť volená aj s ohľadom na merateľnosť sledovaných parametrov. Model by mal byť vyrobiteľný a relatívne ľahko osaditeľný tlakovými odbermi.

2.2 Kritériá podobnosti

Kritériá podobnosti sú dané bezrozmernými číslami, rovnosť ktorých pre model aj pre dielo zaručuje prenositeľnosť výsledkov medzi simuláciou a reálnou situáciou. Myslíme hlavne na nasledujúce čísla Reynoldsovo číslo Re vyjadruje pomer zotrvačných síl a síl viskózneho trenia, Froudeovo číslo Fr vyjadruje pomer zotrvačných síl a tiažových síl, Rosbiho číslo Ro

Vyjadruje vplyv pôsobenia zemskej rotácie a Strouhalovo číslo St na využívanie časovej mierky medzi simuláciou a reálnou situáciou pri sledovaní dynamických javov atmosférickej medznej vrstve.

3 Základné merané fyzikálne veličiny v BLWT

3.1 Tlak vzduchu

V prípade aplikácií v BLWT budeme vždy hovoriť o tlakovom rozdielom meranom v sledovaných miestach. Statický tlak vnútri kanálu veterného tunela bude meraný oproti atmosférickému tlaku v jeho okolí, tlak na modeloch bude meraný proti statickému tlaku vnútri veterného tunelu, dynamický tlak prúdiaceho média je rozdiel tlaku celkového a statického v mieste merania. Barometrický tlak spolu s okolitou teplotou vstupuje pri prevádzke veterného tunela do výpočtov na mieste hustoty vzduchu, ktorá vyplýva zo stavovej rovnice a je daná vzťahom

$$\rho = \frac{P}{rT},$$

kde ρ je hustota vzduchu, p je barometrický tlak, r je univerzálna plynová konštanta (pre vzduch $r = 287,056 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$) T je termodynamická teplota v okolí.

Statický tlak p_{stat} [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$] – obecné sa jedná o tlak spôsobený len tiažou vzduchového stĺpca. Veterný tunel typu BLWT navrhnutý STU Bratislava je z princípu tunel podtlakový. Pokiaľ bude tunel mimo prevádzky bude statický tlak v tuneli zhodný s barometrickým tlakom v okolí. Pokiaľ sa tunel rozbehne statický tlak sa zníži na úkor nárastu tlaku dynamického. Statický tlak v prúde vzduchu sa meria pomocou statických tlakových odberov, podrobnejšie popísané napr. v [2]. Zjednodušene je tlakový odber statického tlaku umiestnený kolmo k prúdniciam. Takéto meranie statického tlaku je zaťažené určitou neistotou merania, lebo pri prúde vzduchu okolo odberu môže dochádzať k pohybu vzduchu vnútri odberu. Geometria a poloha statických tlakových odberov môže túto neistotu merania zväčšiť aj zmenšiť.

V prípade Prandtlovej sondy (Pitot statická trubica) je to zaistené vhodným tvarovaním hlavice tejto sondy a umiestnením statických odberov dostatočne ďaleko od jej čela.

V prípade kontroly zaťaženie stien kanálu veterného tunela je toto zabezpečené umiestnením statických odberov do stien kanála.

Pokiaľ treba stanoviť statický tlak v mieste modelu je treba použiť špeciálne sondy pre meranie statického tlaku, alebo tiež Prandtlovu trubicu, ktorá statický odber obsahuje. Každá zo sond má svoje výhody i nevýhody. Pre meranie v mieste modelu v BLWT sa javí ako najvhodnejšia disková sonda s dostatočne veľkým priemerom disku. Teória tlakových sond a závislosti chyby merania na ich geometrii sú dobre popísané v [2].

Dynamický tlak q [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$] – je popísaný ako kinetická energia objemovej jednotky prúdiaceho vzduchu

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Jedná sa o statický tlak spotrebovaný na uvedenie do pohybu objemovej jednotky vzduchu s hustotou ρ na rýchlosť v . Možno potom písať:

$$q = p_{\text{celk}} - p_{\text{stat}}$$

kde p_{celk} je celkový tlak prúdiaceho vzduchu v mieste merania a p_{stat} je statický tlak v mieste merania. Z uvedeného vyplýva, že zvyšovanie dynamického tlaku sa deje na úkor tlaku statického.

Základný postup merania tlaku: odber tlaku (príslušný senzor), tlaková cesta, prevodník tlaku na elektrickú veličinu (alebo priame meranie klasickými analógovými senzormi), analógovo-digitálny prevodník, spracovanie signálu v PC.

3.2 Rýchlosť prúdiaceho vzduchu

Počas prevádzky BLWT je nutné merať rýchlostné profily, ktoré dávajú informáciu o charaktere a kvalite simulovanej medznej vrstvy. Aplikácie vhodné pre BLWT niekedy vyžadujú stanovenie prúdových polí v okolí projektovaných objektov prípadne meranie rýchlosti vetra v relevantných miestach v okolí objektov.

Simulácia atmosférickej medznej vrstvy vyžaduje zachovanie podobnosti v troch základných parametroch. Jedná sa o profil strednej hodnoty pozdĺžnej zložky vektoru rýchlosti vetra. Profil intenzity turbulencie tejto zložky a spektrálnu hustotu vírov obsiahnutých v generovanom prúde vzduchu.

Najvhodnejším prostriedkom pre kontrolu spomenutých parametrov je tzv. anemometer so žhavenými elementmi - drôtikmi. Pre BLWT sa jedná o žhavené drôtičky obvykle o priemere do $5\mu\text{m}$ HWA (Hot Wire Anemometer) [4], [5].

3.3 Koncentrácia emisií

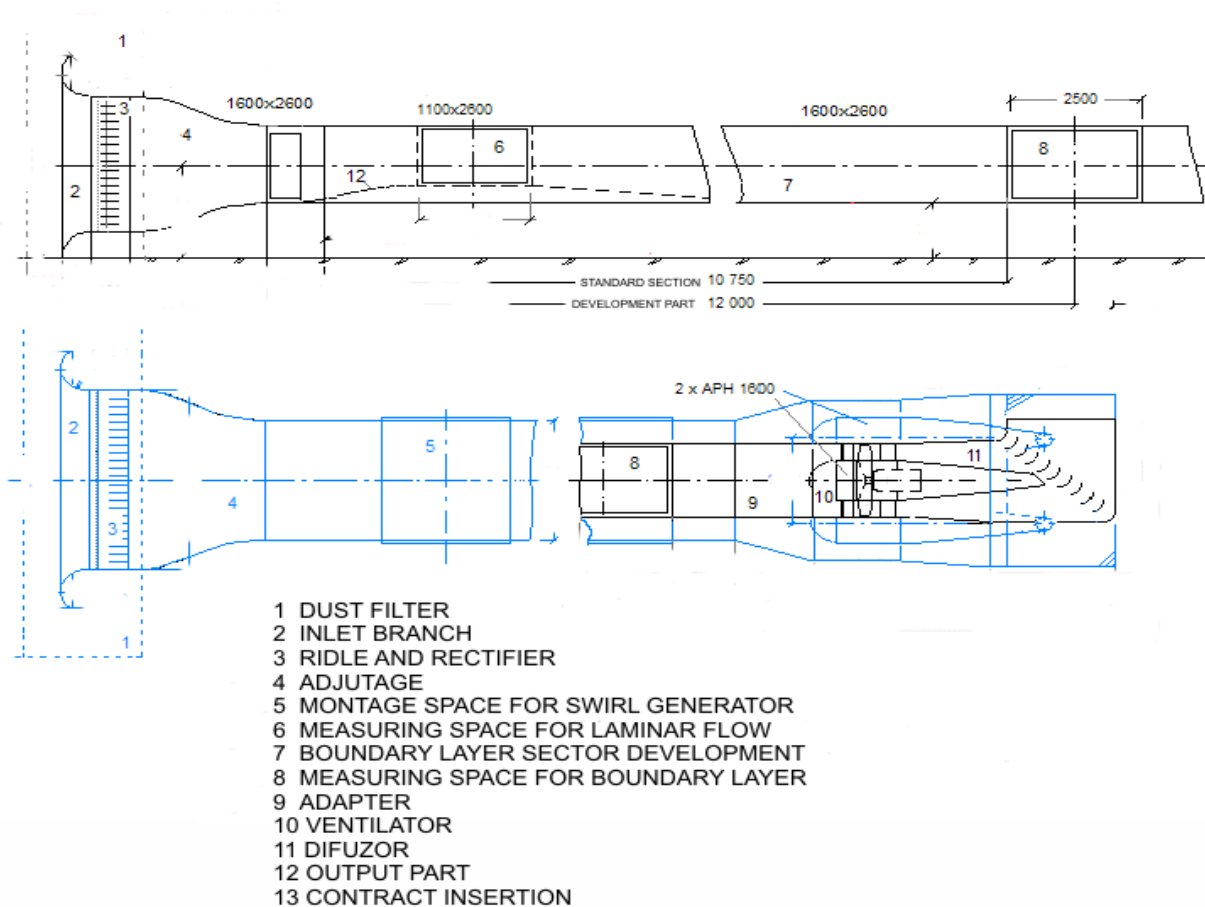
BLWT je dobre využiteľný pre štúdie rozptylu emisií nad konkrétnou topografiou a z rôznych typov zdrojov.

Tieto merania sa vykonávajú na základe detekcie stopovacieho plynu vypúšťaného do simulovanej atmosférickej medznej vrstvy v mieste predpokladaného zdroja emisií. Voľba stopovacieho plynu súvisí s voľbou detektoru.

Vhodným prostriedkom pre meranie rozptylu emisií v BLWT sa ukázal tzv. plamenný ionizačný detektor (Flame Ionization Detector FID), ktorý spaľovaním vzorku vzduchu dotovaného uhľovodíkom mení vodivosť medzi elektródami snímača úmerne množstvu uhľovodíkovej dotácie.

Odber plynu býva vykonávaný tenkými kapilármi, prípadne hadičkami zo sledovaných oblastí, odberová cesta slúži k doprave vzorku plynu do spaľovacej komôrky FID-u, čerpadlo je súčasťou odberovej cesty. Plamenný ionizačný detektor mení koncentráciu stopovacieho plynu na elektrickú veličinu meranú pomocou elektrometru, signál je ďalej digitalizovaný a vedený k ďalšiemu spracovaniu na disku PC.

Základný postup merania koncentrácií: odber plynu (príslušný senzor), odberová cesta, čerpadlo, plamenný ionizačný detektor, voltmeter, prevodník na elektrickú veličinu (analogovo-digitálny prevodník), spracovanie signálu v PC.



Obr. 1. Náčrt veterného tunela s atmosférickou medznou vrstvou [1].

Záver

Na obr. 1. vidieť náčrt budovaného tunela BLWT s dvomi meracími priestormi pre laminárne a turbulentné prúdenie, v laboratóriách Stavebnej fakulty STU Bratislava. Vybudovaním aerodynamického tunela v priestoroch Stavebnej fakulty STU v Bratislave bude možné overovať náročné konštrukcie pozemných ako aj inžinierskych stavieb, pričom sa úroveň vedeckých poznatkov v tejto oblasti zásadne posunie ďalej. Pri uvedení do chodu BLWT tunela bude treba postupne zaviesť metodiku a techniku merania vyššie uvedených základných veličín nutných na základné prevádzkovanie tunela. Ďalej bude treba vybrať vhodné prístrojové vybavenie a namerané výsledky softvérove vyhodnotiť pomocou PC.

Literatúra

- [1] JIRSÁK, Milan. 2010. *Aerodynamický návrh větrního tunelu pro STU Bratislava*, Praha, 2010
- [2] ŠOCH, P – VRÁTNÝ, J. 1987 *Experimentální metody v mechanice tekutin I*, ČVUT, Praha
- [3] BEDNAŘ, J, - ZIKMUNDA, O. 1985. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*, ACADEMIA, Praha
- [4] SCHICHTLING, H – GERSTEN, K. 2000. *Boundary Layer Theory*, Springer
- [5] BRUNN, H. 1995. *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press, Oxford, New York

Adresa autorov

Doc. RNDr. Štefan Húšťava, PhD.

Prof. Ing. Anton Puškár

Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta

Radlinského 11

813 68 Bratislava

e-mail: shustava@hotmail.com

e-mail: anton.puskar@stuba.sk