

VETROM INDUKOVANÝ ZVUK V ARCHITEKTÚRE – ČO VIEME Z LITERATÚRY

Dagmara Čehel'ová¹, Daniel Urbán², Boris Bielek³, Monika Rychtáriková⁴ a Nicolaas Bernardus Roozen⁵

ABSTRAKT

Aeroacoustics is a scientific field that investigates properties of sound generated by turbulent fluid motion, aerodynamic forces and periodical varying airflow. For many years it has been explored by scientists originating from different fields, mainly for application in automotive, aerospace engineering, duct design or jets and turbine construction. Aeroacoustics is becoming more and more important in the architectural context, mainly in terms of new building constructions. Noise caused by wind flow around buildings having specific shapes and structures can lead to annoying sound levels and sound spectra of different kinds. Nevertheless, only little information on wind induced noise in building or architectural context can be found in literature. This article gives a literature overview of wind-induced noise on building facades.

ÚVOD

Aeroakustika, v porovnaní s rôznymi disciplínami klasickej mechaniky, je pomerne mladou vedeckou disciplínou. Teória aeroakustiky sa začala rozvíjať, keď Lighthill [1] formuloval jeho veľmi známu vlnovú rovnicu aeroakustiky. Od tejto chvíle boli aeroakustické problémy vznikajúce účinkom vetra riešené v množstve priemyselných oblastí, predovšetkým v oblasti prúdových motorov, automobilového priemyslu, veterných turbín a mnohých ďalších [2], [3], [4], [5], [6].

Existuje niekoľko prístupov, ktorými môžeme stanoviť účinok vetra na fasádne prvky a konštrukcie. Najdôležitejšími sú numerická predikcia, ktorá môže byť založená na empirickom alebo semi-empirickom prístupe; počítačové simulácie; merania

¹ Dagmara Čehel'ová, Ing., PhD., STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

² Daniel Urbán, Ing., PhD., A&Z Acoustics s.r.o., Repašského 2, 84102, Bratislava, Slovakia

³ Boris Bielek, prof. Ing., PhD., STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 813 68 Bratislava

⁴ Monika Rychtáriková, doc. Ing., PhD., KU Leuven, Dep. Physics and Astronomy, Soft Matter and Biophysics, Laboratory of Acoustics, Celestijnenlaan 200D, 3001 Heverlee, Belgium

⁵ Nicolaas Bernardus Roozen, prof. Dr. Ir., KU Leuven, Dep. Physics and Astronomy, Soft Matter and Biophysics, Laboratory of Acoustics, Celestijnenlaan 200D, 3001 Heverlee, Belgium

v aerodynamickom tuneli spojenom s anechoickou komorou a merania in-situ. Numerické riešenia akustických účinkov vetra sú založené na Lighthillovej teórii [1], [7]. Narastajúca výkonnosť výpočtovej techniky umožnila rozvoj výpočtovej dynamiky fluida (CFD) a jej využitie k zlepšeniu predpovedí nahradením parametrov prúdenia v semi-empirických modeloch vypočítanými hodnotami. Kombinácia týchto dvoch metód sa vyvinula do výpočtovej aeroakustiky (CAA).

Prehľad v oblasti prúdom indukovaných vibrácií a návrhových odporúčaní pre pravouhlé telesá a pravouhlé rošty publikovali Naudasher a Wand [2]. Tam [8] sa publikoval rozsiahly prehľad aeroakustických výpočtových prístupov a otvoril diskusiu o CFD metódach využiteľných v modeloch aeroakustickej predikcie. Lele [9] vypracoval sumarizáciu artefaktov ovplyvnených rôznymi okrajovými podmienkami, ktoré sú zahrnuté v numerických simuláciách. Upozornil aj na pokrok v riešení nelineárnych problémov generácie zvuku. Nedávne pokroky v aeroakustike vo vzťahu k vplyvu výpočtovej dynamiky fluida skúmal Gleg [10]. Doplnujúci prehľad napísali Bailly a Bogey [11], ktorí publikovali krátky prehľad o CFD, CAA a hybridných prístupoch vo výpočtoch hluku z turbín. Kurbatskii a Mankbadi [12] urobili iný prehľad CAA algoritmov, od metódy konečných diferencií (FDM) až po Adams-Bashforthovu a Runge-Kuttovu (RK) metódu. Teóriu vírových prstencov vo svojej rozsiahlej práci skúmal Kambe [3]. Porovnal teoretické predpovede a pozorovania a popísal kolízie a interakcie vírov. Adachi a kol. [4] zrealizoval akustickú štúdiu s využitím simulácie počítanej riešením vlnových rovníc s meniacim sa tlakom na povrchu krídla ako zdroja zvuku. Prípadová štúdia riešená numerickou simuláciou blízkeho poľa (metóda veľkých vírov – LES) a vzdialeného poľa (Ffowcs Williams and Hawing – FWH) šírenia zvukových vln bola prezentovaná Yangom a kol. [6].

AEROAKUSTICKÝ HLUK – PRINCÍPY

Oblasť akustiky zahŕňa viacero častí, z ktorých najdôležitejšie sú fyzikálna akustika (stavebná akustika, priestorová akustika, aeroakustika), elektroakustika, hudobná akustika, fyziologická akustika, psychoakustika a technická akustika [13]. Všeobecne povedané, existujú dva významné mechanizmy vzniku zvuku; zdroje zvuku šíriaceho sa vzduchom a zdroje zvuku šíriaceho sa konštrukciou. Keď hovoríme o zdroji zvuku šíriaceho sa konštrukciou, ide vlastne o konštrukciu, ktorá vibráciami vyžaruje zvuk. Pre ilustráciu, piest pohybujúci sa hore a dole bude vyžarovať zvuk do okolitého prostredia alebo rezonančná vibrácia dosky vyžaruje zvuk. Keď hovoríme o zdroji zvuku šíriaceho sa vzduchom, zdrojový mechanizmus je umiestnený priamo vo vzduchu. Príkladom takého zdroja zvuku je zvuk, ktorý je produkovaný vplyvom prúdenia vetra cez potrubie, napríklad stožiar vo veternom prístave. Je dôležité si všimnúť, že stožiar nemusí vibrovať na to, aby produkoval zvuk. Toto je pole aeroakustiky, kde vzdušný zdroj zvuku má svoj pôvod v nestabilných osciláciách vzduchu v inak rovnovážnom stave toku. Tieto nestabilné oscilácie vzduchu sú často dôsledkom prekážok (napríklad ostrých hrán tuhej konštrukcie) v prúde, čo spôsobuje turbulencie a vírenia. Tieto turbulencie a vírenia môžu spôsobovať nežiaduci zvuk.

HLUK V ARCHITEKTÚRE SPÔSOBENÝ VETROM

Vietor prúdiaci okolo budov môže spôsobiť spomínané efekty a hluk indukovaný vetrom môže viesť k pomerne silnému akustickému diskomfortu. Aeroakustika v architektúre je oblasť, ktorá zostávala dlhý čas nepovšimnutá, avšak dnes počet článkov a štúdií zaoberajúcich sa aeroakustickými problémami spôsobenými aktivitou vetra na budovách výrazne narastá.

Keď budova stojí v ceste vzduchovému prúdu, prúd vetra je na náveternej strane zastavený, na bočných stranách zrýchlený a na zadných stranách sa tvoria víry. Ako vietor prúdi cez a okolo architektonických prvkov (tieniacich prvkov, rebier, mreží, lán, klenieb, balustrád, markíz, vetracích otvorov a pod.), môže v závislosti od rýchlosti a smeru vetra dochádzať k nežiaducemu „pískaniu“ a „bzučaniu“. Predikcia týchto javov je obzvlášť dôležitá pri vysokých budovách. Sú známe prípady, kedy výškové budovy vydávali krátko po ich dokončení veľmi hlasné pískajúce zvuky. Ploemen a kol. [14] popísali dve budovy, Het Strijkijzer (130 m) a De Hotoren (110 m), obe v Holandsku, kde boli zdrojom zvuku oceľové rošty aplikované na budove ako dekoratívne alebo ako funkčné prvky. Ďalším veľmi známym prípadom je najvyššia budova v Manchesteri (Veľká Británia), tzv. Beetham tower (171 m). Na streche tejto budovy je umiestnená sklená platňa, ktorá vplyvom vysokých rýchlostí prúdiaceho vzduchu vydáva tonálny zvuk. Známym prípadom je aj Cityspire Center Tower (248 m) v New Yorku, ktorá mala krátko po postavení problémy s hlasným pískaním, ktoré bolo spôsobené prúdením vetra cez dekoratívnu kupolu na vrchole budovy. Je preto dôležité posúdiť tvar a pozíciu týchto elementov v závislosti na veterných podmienkach lokality ešte v návrhovej fáze budovy. To je možné pomocou dvoch metód. Prvou metódou je numerický prístup, pri ktorom sú architektonické detaily analyzované pomocou počítačových simulácií s cieľom identifikovať potenciálne nebezpečenstvo vzniku nežiaduceho zvuku, druhou možnosťou je experimentálny prístup, pri ktorom sú problematické architektonické prvky testované v skutočnej veľkosti v aerodynamických tuneloch.

Jednu z prvých výskumných štúdií v tejto oblasti zrealizoval Curle [15]. Berhaut [16] analyzoval vetrom indukovaný zvuk v budovách a Suda a Yoshioka [17] vykonali merania vetrom spôsobovaného akustického hluku na stredne vysokých a vysokých obytných budovách a rozoberali ich vplyv na pohodu a nepohodu obyvateľov. Gerhard a Grundmann [18] predstavili aeroakustický tunel v I.F.I. inštitúte v Aachen, ktorý bol špeciálne navrhnutý pre meranie vetrom indukovaného hluku na budovách a ich konštrukciách. Publikovali aj štúdiu zaoberajúcu sa prípadom, kedy fasádny diel výškovej budovy obchodného centra (125 m) produkoval hluk vplyvom prúdenia vzduchu. Graft a Drugin [19] merali akustickú rezonanciu v otvore rezonančnej dutiny. Moleney a kol. [20] prezentovali diskusiu o problémoch vetrom indukovaného hluku okolo budov a metódach jeho posúdenia. Granneman a kol. [21] a Ploemen a kol. [14] vyšetrovali oceľovú mrežu v skutočnej veľkosti s rôznymi veľkosťami obdĺžnikovej siete, pri rôznych veterných podmienkach v aerodynamickom tuneli. Feng [22] vyšetroval perforovanú platňu v laboratóriu pozostávajúceho z anechoickej komory a príľahlej dozvukovej komory. Chéné a kol. [23] rozoberali rozdielne meracie prístupy, ich výhody a obmedzenia. Ahmed a kol. [5] publikovali prípadovú štúdiu o budovaní anechoickej komory pre aeroakustické merania. Ukázali vplyv anechoickej komory (akusticky voľného poľa) na presnosť a odstup signálu od šumu počas aeroakustických meraní. Blinet a kol. [24] testovali hliníkové tyčové siete s rôznymi priermi

a medzerami medzi nimi a perforované platne s rôznymi charakteristikami vo veternom tuneli bez anechoickej komory.

Najnovší prístup pre odhad aeroakustického hluku je numerický prístup, kombinujúci výpočtovú dynamiku fluida (CFD) a výpočtovú aeroakustiku (CAA). Bies a kol. [25] a Oshima a kol. [26] vyšetřovali použitím numerickej simulácie metódou veľkých vírov (LES) vznik zvuku vplyvom prúdenia vzduchu cez zábradlie štvorcového prierezu na budove. Nasledovali ich Kitagawa a kol. [27], Kim a kol. [28], Liu a kol. [29] a mnoho ďalších štúdií založených na CFD analýze.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry MŠVVŠ SR a SAV pod názvom VEGA 1/0067/16 a H2020-MSCA-RISE-2015 No. 690970 „papabuild“.

ZOZNAM LITERATÚRY

- [1] M. J. Lighthill (1952): On sound Generated Aerodynamically. I. General theory. In *Proceedings of The Royal Society* Vol. 221, issue 1107, London, 1952, pg. 564-587.
- [2] E. Naudascher, Y. Wang (1993): Flow-induced vibrations of prismatic bodies and grids of prisms. In *Journal of Fluids and Structures* Vol. 7, pg. 341-373.
- [3] T. Kambe (2010): Vortex sound with special reference to vortex rings: theory, computer simulations, and experiments. In *International journal of Aeroacoustics* Vol. 9, number 1 & 2 (2010), pg. 51-89.
- [4] S. Adachi, P. Brandstät, J. C. Simpson (2010): Computational fluid dynamics and computational aeroacoustics for aircraft noise estimation. In *IBP Report 506. 37 New research result in brief*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Germany. 2010.
- [5] R. F. Ahmed, Y. Yendrew, N. A. Ahmed (2014): Building a Practical Anechoic Chamber for Aero-Acoustic measurements. In *Applied Mechanics and Materials* Vol. 607, pg. 685-693.
- [6] D. G. Yang, Y. H. Wu, J. M. Liang, J. Liu (2014): An Investigation on Numerical Simulation Method for Aero-Acoustics Based on Acoustics Analogy. In *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 444-445, pg. 462-467.
- [7] M. J. Lighthill (1954): On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound. In *Proceedings of The Royal Society* Vol. 222, issue 1148, London, 1954, pg. 1 – 32.
- [8] C. K. W. Tam (1995): Computational Aeroacoustics: Issues and Methods. In *AIAA Journal* Vol. 33, No. 10, pg. 1788-1796.
- [9] S. K. Lele (1997): Computational Aeroacoustics: a review. In *AIAA Paper 97-0018, 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 1997.
- [10] S. A. L. Glegg (1999): Recent advances aeroacoustics: the influence of computational fluid dynamics. In *6th International Congress on Sound and Vibration*. Copenhagen, Denmark, 1999, pg. 43–58.
- [11] C. Bailly, C. Bogey (2004): Contributions of Computational Aeroacoustics to Jet Noise Research and Prediction. In *International Journal of Computational Fluid Dynamics* Vol. 18 No. 6, pg. 481-491.

- [12] K. A. Kurbatskii, R. R. Mankbadi. (2004): Review of Computational Aeroacoustics Algorithms. In *International Journal of Computational Fluid Dynamics* Vol. 18, pg. 533-546.
- [13] J. Delfs (2014): Lecture notes. Grundlagen der Aeroakustik (Basics of Aeroacoustics). Germany: Technische Universität Braunschweig, October 2014.
- [14] J. C. F. Ploemen, L. Nijs, J. A. Pleysier, H. R. Schipper (2011): Wind-induced sound on buildings and structures. In *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering, ICWE 13, Amsterdam, July 2011*.
- [15] N. Curle (1955): The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound. In *Proceedings of the Royal Society* Vol. 231, issue 1187, pg. 505-514.
- [16] J. P. A. Berhault (1977): Wind noise in buildings. In *Wind Engineering* Vol. 1 No.1, pg. 67-82.
- [17] K. Suda, K. Yoshioka (1994): Full-scale measurements on wind-induced noise at tall apartments. In *Proceeding of The 13th National Symposium on Wind Engineering, Tokyo, Japan, 1994*, pg. 95-100.
- [18] H. J. Gerhardt, R. Grundmann (1997): The new IFI aeroacoustic wind tunnel – a tool or building acoustic investigation. In *Proceedings of International conference, Building envelope systems and technology, Bath, 1997*, pg. 399-404.
- [19] H. R. Graft, W. W. Durgin (1993): Measurement of the nonsteady flow field in the opening of a resonating cavity excited by grazing flow. In *Journal of Fluids and Structures* Vol. 7, pg. 387-400.
- [20] D. Moloney, D. Peoples, H. Mantophani (2003): Testing and assessment of wind noise around buildings. In *Proceedings of 10th Australasian Wind Engineering Society Workshop, Sydney, Australia, 2003*.
- [21] J. Granneman, M. Trooster, E. de Beer, T. van Diepen (2008): Whistling Building Objects, Origins and Solutions. In *InterNoise 2008: The 37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Shanghai, China, 2008*.
- [22] L. Feng (2012): Tone-like signal in the wind-induced noise of perforated plates. In *Acta Acustica United with Acustica* Vol. 98, pg. 188-197.
- [23] J. B. Chéné, P. Kerdudou, C. Guigou-Carter (2012): Which approach for aeroacoustic problems associated to facade elements? In *InterNoise 2012*. New York city, USA. 2012.
- [24] T. Blinet, P. Kerdudou, J. B. Chéné, G. Jacques (2015): Wind noise generated by facade elements: A simple measurement method and case studies. In *InterNoise 2015, California, USA, 2015*.
- [25] D. A. Bies, J. M. Pickles, D. J. J. Leclercq (1997): Aerodynamic noise generation by a stationary body in turbulent air stream. In *Journal of Sound and Vibration* Vol. 204 No. 4, pg. 631-643.
- [26] T. Oshima, M. Imano, T. Sakuma, K. Hirate (2000): Numerical prediction of aeroacoustic noise radiated from balusters of buildings with large eddy simulation. In *InterNoise 2000: The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Nice, France, August 2000*.
- [27] M. Kitagawa, T. Ogawa, K. Masuda, M. Nakayama (2001): Occurrence mechanism of wind noise on balustrade in high-rise apartments. In *Summaries of Technical Papers, Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, pg. 119-120.

- [28] Y. D. Kim, Y. J. Tri C, S. J. Baek (2009): A study on numerical simulation on flow-fields and wind-induced noise around buildings. In *Proceedings of The Seventh Asi-pacific Conference on Wind Engineering*. Taipei, Taiwan, 2009.
- [29] J. Liu (2012): Simulation of whistle noise using computational fluid dynamics and acoustic finite element simulation. Theses and Dissertations – Mechanical Engineering. Uknowledge, University of Kentucky. 2012.