

Vladimíra MICHALCOVÁ¹, Lenka LAUSOVÁ²

NUMERICKÝ VÝPOČET AERODYNAMICKÉ DRSNOSTI KOMÍNA OPLÁŠTĚNÉHO
VLNITÝM PLECHEM

NUMERICAL CALCULATION OF AERODYNAMIC ROUGHNESS OF CHIMNEY JACKETED
WITH CORRUGATED SHEETS

Abstrakt

Článek se zabývá vlivem tvaru opláštění komína na jeho výsledné zatížení od účinků větru. Popisuje možnosti definování ekvivalentní aerodynamické drsnosti a součinitele čelního odporu při numerickém modelování obtékání kruhového válce. Zaměřuje se na stanovení součinitele síly větru pro komín válcového tvaru, který je opláštěný tvarovaným plechem. Proudění kolem komína je řešeno pomocí software Ansys Fluent s využitím DES modelu.

Klíčová slova

Kruhový válec, součinitel čelního odporu, aerodynamická drsnost, CFD, DES model, vysoké Reynolsovo číslo, mezní vrstva, stěnová funkce.

Abstract

The article deals with the influence of a shape of the smokestacks casing on the final load from wind effects. It describes possibilities of defining an equivalent aerodynamic roughness and aerodynamic drag coefficient for numerical modelling of the flow around a circular cylinder. The aim is to solve the force coefficient for a smokestack of a cylindrical shape, which is jacketed with corrugated sheets. The flow around a smokestack is solved in software Ansys Fluent using the DES model.

Keywords

Circular cylinder, drag coefficient, aerodynamic roughness, CFD, DES model, high Reynolds number, boundary layer, wall function.

1 ÚVOD

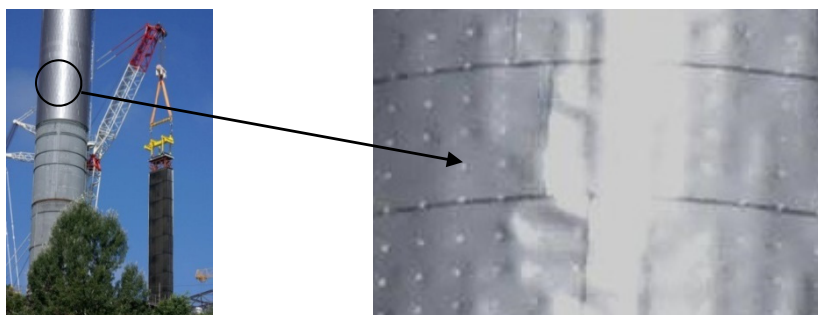
Zatížení vysokých komínů od účinků větru výraznou mírou ovlivňuje tvar jejich opláštění. Opláštění komína klasickým hladkým netvarovaným plechem je standardním řešením, které s sebou nese určité komplikace. Důvodem je dilatace materiálu, která je problematická zvláště u komínů velkých rozměrů (Obr. 1). Nežádoucím jevům přispívá také kombinace odlišných materiálů nosné skořepiny a vnějšího pláště (ocel × hliník). Z těchto důvodů vzniká často požadavek na opláštění komína plechem tvarovaným. Problém nastává při dimenzování takovéto konstrukce, konkrétně při stanovení součinitele síly větru, nazývaného také součinitele čelního odporu (drag coefficient c_d).

Výpočet podle platné normy EN 1991-1-4 zohledňuje pouze obtékání válce s hrubým povrchem, ale neudává, jakou ekvivalentní drsnost povrchu přiřadit válci s povrchem typu hladké

¹ Ing. Vladimíra Michalcová, Ph.D., VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, e-mail: vladimira.michalcova@vsb.cz.

² Ing. Lenka Lausová, Ph.D., VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, e-mail: lenka.lausova@vsb.cz.

vlnovky. V případě zohlednění pouze výšky vlny bez ohledu na její tvar podle požadavků normy dochází k vysokému nárůstu součinitele síly větru, často až dvojnásobnému.



Obr.1: Deformace opláštění komína

Cílem práce je pomocí CFD kódů v software Ansys Fluent najít možnosti definování hodnoty součinitele čelního odporu obtékaného komína opláštěného dvěma typy tvarovaných plechů (vlnitý a trapézový). Odporový koeficient je veličina v normě uváděna jako výše zmiňovaný součinitel síly větru.

2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Problematika obtékání válce s prouděním o vysokých Reynoldsových číslech je složitý jev, jehož řešením se zabývají na mnoha mezinárodních pracovištích, ať již v experimentálním [1, 2, 3, 4] nebo numerickém výzkumu [3-8].

V rámci předkládané práce je simulováno obtékání reálného komína kruhového průřezu o průměru 3,36 m. Opláštění tvoří vlnitý plech SP18/76 firmy Kovové profily (Obr. 2) a trapézový plech SAT158 firmy Satjam (Obr.3). Oba mají výšku vlny 18 mm. Základní rychlost větru se předpokládá 20 m/s. Jedná se o proudění vzduchu s hodnotou Reynoldsova čísla kolem $Re = 4,5 \cdot 10^6$ a je daleko v nadkritické oblasti a proto v mezní vrstvě kolem stěny komína je možno předpokládat plně rozvinutou turbulenci.

2.1 Modelování proudění v blízkosti stěny

V blízkosti stěny se řešené veličiny rychle mění, výrazně se zde uplatňuje přenos hybnosti a skalárních veličin. Turbulence těsně u stěny (ve viskózní podvrstvě a přechodové vrstvě) je potlačena, ve vnější části mezní vrstvy však dochází k výrazné produkci turbulentní kinetické energie v důsledku Reynoldsových napětí a gradientu střední rychlosti. Proudění v blízkosti stěny lze modelovat dvěma způsoby. První z nich definuje stěnovou funkci, pomocí níž se překlene oblast laminární podvrstvy a přechodové vrstvy, tj. oblast mezi stěnou a oblastí plně vyvinutého turbulentního proudění, kde se uplatňuje molekulární i turbulentní viskozita. Druhý způsob řešení spočívá v podrobném modelování v blízkosti stěny (tzv. near-wall modelling) včetně vazké podvrstvy v souvislosti s jemností sítě. Při výpočtu s near-wall modelling se skutečnou geometrií opláštění komína je požadavek na počet buněk ve výpočtové oblasti v současné době zatím nereálný pro řešení na stolních PC.

Řešením zůstává modelování obtékání neprofilovaného válce s výrazně nižším počtem buněk. Vliv skutečného tvaru opláštění nahrazuje využití stěnové funkce, která představuje soubor polo empirických vztahů a funkcí, pomocí nichž lze pro řešenou veličinu přemostit vzdálenost mezi stěnou a buňkou v blízkosti stěny. Stěnová funkce zahrnuje zákon stěny pro střední rychlost i teplotu (zde pouze izotermní děj) a vztahy pro turbulentní veličiny v blízkosti stěny.

Stěnová funkce je určena modifikovaným logaritmickým zákonem:

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln f_r \quad (1)$$

kde:

B je aditivní konstanta popisující funkci drsnosti [-],

κ von Karmanova konstanta [-] a

f_r funkce drsnosti ve Fluentu.

Univerzální popis funkce drsnosti f_r pro různé typy nerovností neexistuje, ale je obecně zjištěno, že dobře koreluje s bezrozměrnou veličinou K_S^+ :

$$K_S^+ = \frac{\rho \cdot K_S \cdot u^*}{\mu}, \quad (2)$$

kde:

K_S je výška fyzické drsnosti [m],

ρ hustota proudícího média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

u^* třecí rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a

μ dynamická viskozita proudícího média [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

Funkci drsnosti obtékaného povrchu s výraznou nerovností lze pak definovat:

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(1 + C_S \cdot K_S^+), \quad (3)$$

kde:

C_S je veličina popisující typ drsnosti [-].

V manuálu Fluent je doporučovaná hodnota 0,5 s možností rozmezí 0,5–1,1.

Do výpočtu s využitím stěnové funkce vstupují v rámci okrajových podmínek uživatelem zadané veličiny C_S a K_S , kterými je definována aerodynamická drsnost ekvivalentní se skutečnou drsností obtékaného tělesa, tady opláštěného komína. Výpočtová síť musí být vytvořena tak, aby hodnota K_S zasahovala maximálně do středu první buňky u stěny. Výpočet je k správnému zadávání okrajových podmínek velice citlivý.

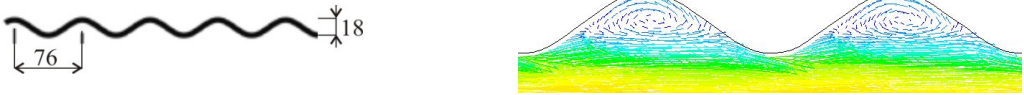
Jelikož hodnoty C_S a K_S pro daný simulovaný děj nejsou známy, je řešení úlohy rozděleno do dvou fází. V první fázi se jedná o stanovení ekvivalentní aerodynamické drsnosti obou profilovaných plechů. Jedná se o stanovení hodnot C_S a K_S na základě vyhodnocených tlakových ztrát a rychlosti proudění v úloze, která umožňuje zpětnou kontrolu s naměřenými hodnotami dohledatelnými v odborné literatuře např. [9].

Ve druhé fázi řešení jsou již definované veličiny C_S a K_S využity pro výpočet součinitele čelního obtékaného válce (komína).

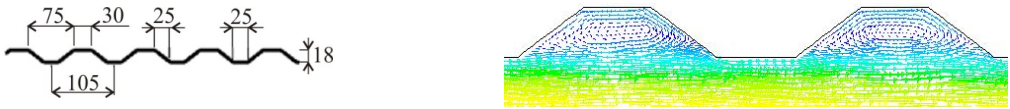
2.2 Stanovení ekvivalentní aerodynamické drsnosti

Úloha je modelována jako turbulentní proudění v drsném potrubí o průměru jeden metr a délce 20 metrů. Geometrie stěn jsou shodné s geometriemi obou vybraných plechů (Obr. 2 a Obr. 3). Jedná se o 2D osově symetrickou úlohu. Výpočtové oblasti jsou dlouhé 20 metrů a z důvodu zajištění ustáleného proudu je každá rozdělena na tři části. Neprofilovaný náběh je jeden metr dlouhý, neprofilovaný doběh tvoří poslední 4 metry oblasti. Sledované střední úseky o délce 15 metrů mají geometrie stěn shodné s geometriemi plechů. Mřížky tvoří cca 160 tisíc tetra buněk. Úlohy jsou řešeny stacionárně pomocí SST k- ω modelu a jejich výsledky jsou verifikovány s literaturou [9].

Úkolem je navrhnout konstanty C_S a K_S , které umožní nahradit skutečnou drsnost obtékaného tělesa stěnovou funkcí. Sledované jsou tlakové ztráty (Obr. 4) v závislosti na axiální rychlosti, na základě kterých je možné hodnoty konstant stanovit. Jak je patrné z obrázků, průběhy sledovaných veličin u vlnitého i trapézového plechu jsou téměř shodné. Z toho vyplývá, že ekvivalentní aerodynamické drsnosti a tudíž hledané konstanty C_S a K_S obou plechů budou stejné.



Obr. 2: Vlnitý plech SP18/76 (rozměry v mm) a proudové pole v jeho okolí

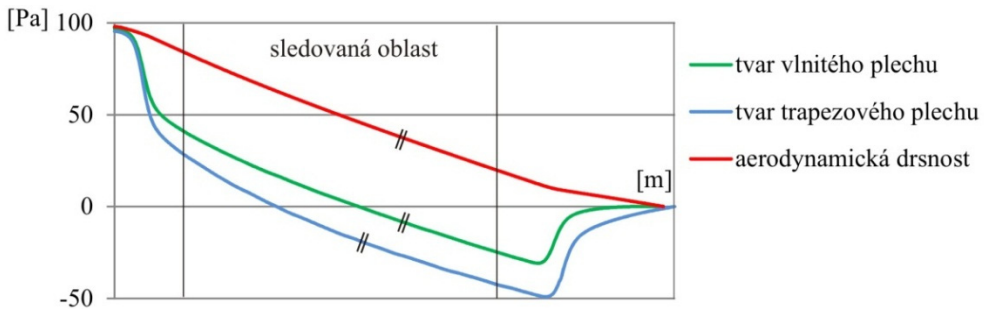


Obr. 3: Trapézový plech SAT158 (rozměry v mm) a proudové pole v jeho okolí

Na základě následných testovacích úloh jsou hledány hodnoty veličin C_S a K_S pro definování aerodynamické drsnosti tak, aby tlakové ztráty při dané rychlosti zůstaly nezměněny. Zájmem je zachovat doporučenou hodnotu pro C_S . Nejlepších výsledků je dosaženo při poměrně malé fyzické výšce drsnosti a hodnoty jsou stanoveny:

- Veličina popisující typ drsnosti: $C_S = 0,5 [-]$,
- Hodnota fyzické drsnosti: $K_S = 1,0 \text{ mm}$.

Kontrola správnosti navržené drsnosti je provedena a potvrzena při následné simulaci. Jedná se o modelování proudu vzduchu v rozměrově shodném potrubí s tím rozdílem, že 15 metrové oblasti profilovaných stěn jsou nahrazeny rovnými stěnami. Drsnost skutečných profilovaných povrchů je nahrazena ekvivalentní aerodynamickou drsností definovanou výše uvedenými konstantami. Pro tento případ je použita mřížka z cca 7 tisíc hexa buněk. Průběhy tlakových ztrát (Obr. 4) jsou shodné jako při modelování skutečné geometrie. Lze tudíž předpokládat, že veličiny C_S a K_S jsou navrženy správně a je možné využít jejich hodnoty ve druhé fázi úkolu - při definování požadovaného součinitele čelního odporu, potřebného pro výpočet účinků větru na zatížení konstrukce.



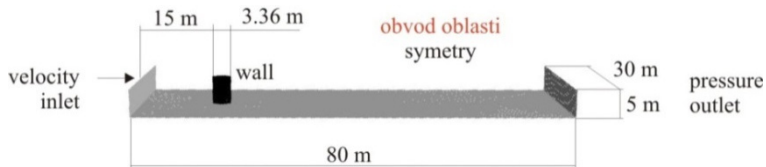
Obr. 4: Tlakové ztráty v podélné ose potrubí

2.3 Součinitel čelního odporu

Jedná se o 3D úlohu obtékání válce (komína). Modelováno je obtékání 5 m dlouhé části neprofilovaného komína ve výpočtové oblasti o rozměrech $80 \times 30 \times 5$ metrů (Obr. 5). Pro výpočet je vytvořena mřížka o počtu 360 tisíc tetra buněk. První buňky u stěny jsou tvořeny pomocí mezní vrstvy a stanoveny tak, aby výška ekvivalentní aerodynamické drsnosti dosahovala maximálně do poloviny výšky první buňky u stěny. Úloha je řešena nestacionárně s využitím DES modelu.

Za účelem možnosti porovnání výsledků byly provedeny 2 výpočty:

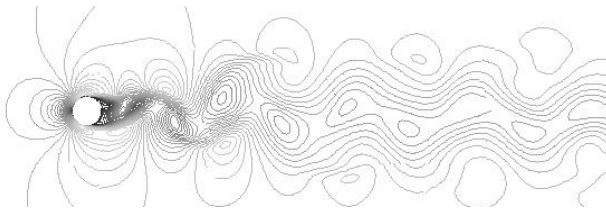
- Výpočet s ekvivalentní aerodynamickou drsností s hodnotou fyzické drsnosti definovanou podle závěrů předešlé kapitoly $K_S = 1,0 \text{ mm}$,
- Výpočet s aerodynamickou drsností s hodnotou fyzické drsnosti zadanou podle požadavků platné normy, kdy K_S odpovídá výšce vlny, tedy $K_S = 18 \text{ mm}$.



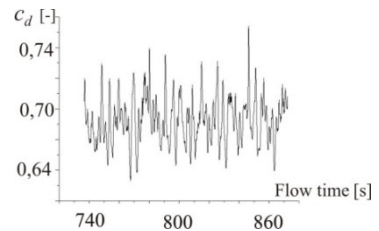
Obr. 5: Schéma výpočtové oblasti s okrajovými podmínkami

V rámci každého výpočtu byl zvolen časový krok 0,05 sekundy, výpočet simuluje proud po dobu 900 sekund s tím, že středování veličin bylo nastaveno až po 200 sekundě simulovaného děje, kdy je možné považovat proudové pole za ustálené. Výsledný čas proudu při časovém středování veličin představuje asi 175 násobnou výměnu vzduchu ve výpočtové oblasti. V rámci výpočtu proběhlo asi $1,57 \cdot 10^5$ iterací. Okrajové podmínky jsou patrné z obrázku 5, kde turbulence na vstupu do oblasti je zadána pomocí intenzity (20 %) a délkového měřítka (Length scale = 1 m).

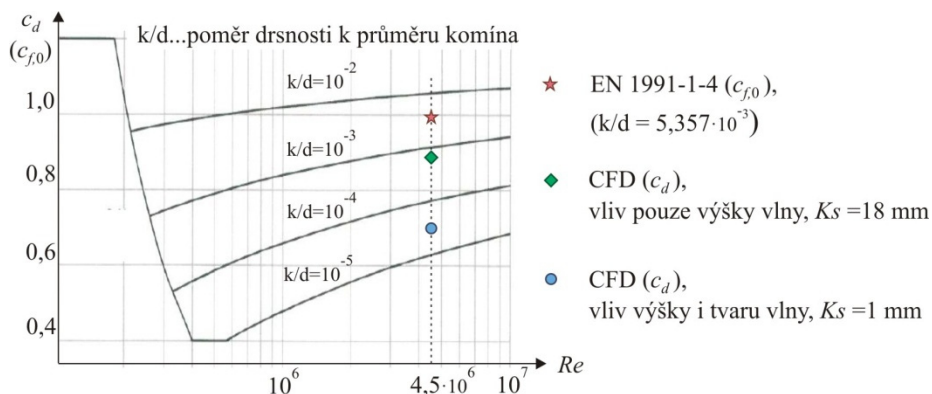
Při výpočtu byly sledovány vírové struktury za obtékáním komínem (Obr. 6) i časový záznam součinitele čelního odporu c_d (Obr. 7). Jeho výsledné střední hodnoty pro $Re = 4,5 \cdot 10^6$ vyhodnocené přímo v Ansys Fluent včetně ekvivalentní normové hodnoty označované c_{f0} jsou zřetelná z obrázku 8.



Obr. 6: Vírové struktury za obtékáním komínem



Obr. 7: Časový záznam c_d koeficientu



Obr. 8: Hodnota součinitele čelního odporu (CFD), resp. součinitel síly větru (EN)

3 ZÁVĚR

Z výsledků práce vyplývá, že pro oba použité plechy, vlnitý (Obr. 2) i trapézový (Obr. 3), vychází součinitel čelního odporu (v literatuře uváděný drag coefficient c_d) shodně (kapitola 2.2). Jeho hodnota stanovená výpočtem s fyzickou drsností odpovídající skutečné výšce vlny ($K_S = 18$ mm) je o 13 % nižší, než udává platná norma EN 1991-1-4. Při výpočtu se stanovenou ekvivalentní aerodynamickou drsností ($K_S = 1,0$ mm) je hodnota součinitel čelního odporu nižší dokonce o 33 % (Obr. 9).

Výsledky získané pomocí CFD kódů jsou pouze informativní. Ze závěrů lze však s určitostí konstatovat, že výpočet účinků větru na komín opláštěný tvarovaným plechem je v normě nadhodnocen. Pro potvrzení výsledků numerických simulací je nutná verifikace s fyzikálním experimentem nebo detailní numerická simulace s přesnou geometrií obtékaného komína, kterou je možné řešit například v Národním superpočítačovém centru v Ostravě (<http://www.it4i.cz/>). Toto téma bude předmětem dalšího zkoumání autorek.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl realizován za finančního přispění z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2015 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

LITERATURA

- [1] DOBES, J. & KOZUBKOVA, M. The influence of numerical models on determining the drag coefficient. In *Proceeding of the International Conference on Experimental Fluid Mechanics*. Kutná Hora, Czech Republic, 2013. EPJ Web of Conferences.
- [2] ROSHKO, A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006, X. Nr. 1, pp. 345-356. ISSN 0022-1120.
- [3] LAUSOVÁ, L., MATEČKOVÁ, P. & SKOTNICOVÁ, I. Experimental and numerical analysis of sSteel frame structure exposed to high temperature. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw, Poland: Versita, 2014, Vol. 14, Issue 2, pp. 64-68 (5 pp). ISSN 1804-4824 (Online); ISSN 1213-1962 (Print). DOI: 10.2478/tvsb-2014-0022.
- [4] MICHALCOVÁ, V., KUZNĚTSOV, S. & POSPÍŠIL, S. Numerical modelling of air flow attributes in a Contractions chamber. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw, Poland: Versita, 2014, Vol. 14, Issue 2, pp. 11-16 (6 pp). ISSN 1804-4824 (Online); ISSN 1213-1962 (Print). DOI: 10.2478/tvsb-2014-0026.
- [5] CATALANO, P., WANG, M. & IACCARINO, G. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers. *Journal of Heat and Fluid Flow*. 2003, XXIV, pp. 463-469. ISSN 0142-727X.
- [6] BREUER, M. A challenging test case for large eddy simulation: high Reynolds number circular cylinder flow. *Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000, XXI. Nr. 1, pp. 648-654. ISSN 0142-727X.
- [7] SQUIRES, K. D., KRISHNAN, V. & FORSYTHE, J. R. Prediction of the flow a circular cylinder at high Reynolds number using detached-eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008, XCVI, pp. 1528-1536. ISSN 0167-6105.
- [8] SHUR, M. L. Unsteady A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. *Journal of Heat and Fluid Flow*. 2008, XXIX, pp.1638-1649. ISSN 0142-727X.
- [9] KOLÁŘ, V. & VINOPAL, S. *Hydraulika průmyslových armatur*, (Příručka praktických výpočtů. Praha: SNTL, 1963. 650 pp.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Oľga Hubová, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Prof. Ing. Miroš Pirner, DrSc., Oddělení dynamiky a stochastické mechaniky, ÚTAM AV ČR, v. v. i.