

VĚTRNÁ ŽEBRA NA PLÁŠTÍCH CHLADÍCÍCH VĚŽÍ

Petr Harazim, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
petr.harazim@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá prouděním vzduchu kolem chladících věží s přirozeným tahem opatřenými meridionálními větrnými žebry v transkritickém režimu proudění. Práce se soustředí na účinnost snížení maximálního sání na plášti chladících věží pomocí větrných žeber. Účinnost větrných žeber byla zkoumána numerickými CFD modely. Pro výpočet byl použit program založený na metodě konečných objemů ANSYS Fluent, kde byla chladící věž modelována včetně technologie. Technologie NDCT byla modelována jako porézní prostředí, jemuž byly zadány ztráty tlaku a teplota. Větrná žebra byla modelována fyzicky s různou četností a výškou. Vypočtená data byla porovnána s experimentálními výsledky a normativními předpisy. Studie ukazuje účinnost různých tvarů větrných žeber.

KLÍČOVÁ SLOVA

Meridionální větrná žebra • Chladící věže s přirozeným tahem
• Zatížení větrem • CFD

ABSTRACT

This work deals with the air flow around natural draft cooling towers (NDCT) provided with meridional wind ribs in the transcritical flow regime. The work focuses on the effectiveness of reducing the maximum suction on the cooling towers shell by wind ribs effect. The efficiency of wind ribs was investigated by numerical CFD models. The ANSYS Fluent finite volume solver was used for the calculation. The cooling tower was modelled including the technology. NDCT technology was modelled as a porous medium with pressure losses and temperature losses. The wind ribs were physically modelled with different frequencies and heights. The calculated data were compared with experimental results and normative regulations. The study shows the efficiencies of different shapes of wind ribs.

KEYWORDS

Meridional wind ribs • Natural drag cooling tower • Wind load
• CFD

1. ÚVOD

Zatížení větrem na plášť chladící věže s přirozeným tahem je jedním z hlavních zatížení, jenž konstrukce přenáší během svého životního cyklu. Tyto mimořádné stavby s velmi tenkou skořepinou jsou velmi citlivé na rozdělení tlaků způsobených větrem (Gould a Kratzig, 1999). Při návrhu chladící věže má tedy distribuce tlaků na plášti chladící věže významný vliv na spotřebu betonářské výztuže. Samotné rozdělení větrných tlaků závisí na mnoha parametrech jako je drsnost povrchu, intenzita turbulencí a Reynoldsovo číslo (Pirner, 1982; Niemann a Hölscher, 1990; Prabhakar, 1990). Drsnost pláště chladící věže je jedním parametrem, jenž jsme schopni v praxi upravit. Z tohoto důvodu je studium je nezbytné zkoumat závislost drsnosti povrchu na rozdělení tlaků vetru pro efektivní a ekonomický návrh konstrukcí.

K získání účinků větru na kruhu válce se tradičně používají testy v aerodynamickém tunelu nebo měření v plném rozsahu. Mnohé studie prokázaly významný vliv drsnosti pláště na rozdělení tlaků okolo pláště chladící věže (Güven, Farell a Patel, 1980; Buresti, 1981; Niemann a Hölscher, 1990; Pirner, 1990). Výsledky ukázaly, že se zvyšující se drsností pláště dochází ke zmenšení maximální velikosti sání, doprovázené zvýšením sání na závětrné straně válce (Gould a Kratzig, 1999).

Na základě těchto studií bylo zjištěno, že zvýšení drsnosti povrchu chladící věže vede ke snížení napětí ve skořepině v důsledku vyrovnání střední hodnoty rozložení tlaků větru (Gould a Kratzig, 1999). V tomto ohledu byla na mnoha skořepinách chladících věží vytvořena vertikální meridionální větrná žebra. Mnoho chladících věží s aplikovými větrnými žebry je navrženo podle evropských norem, ačkoli tam není žádná technická podpora. Z tohoto důvodu se používá německý kód VGB-R 610Ue (VGB BTR, 2017), který zavádí šest standardizovaných křivek rozložení tlaku pro různé drsnosti povrchu. Model VGB-R 610Ue však obsahuje určitá zjednodušení a konzervativnost. Drsnost povrchu je u modelu VGB-R 610Ue založena na poměru výšek žeber k jejich vzdálenosti. Poměr výšek žeber k průměru válce, který má významný účinek, však není zohledněn (Pirner, 1982, 1990). Použití větrných žeber brání několik věcí. Přidání větrných žeber způsobuje problémy s jejich aplikováním, zvyšuje složitost bednění betonového pláště. Obdélníkový tvar žeber také způsobuje problémy. Při odskrucování dochází často k odštipnutí hran žeber. Meridionální větrná žebra nemají žádný významný vliv na snížení zatížení v bodě stagnace.

* Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

V našem výzkumu byly provedeny numerické simulace proudění kolem chladicí věže s výškou 185 m prováděny ve 2D a 3D. Meridionální větrná žebra různého tvaru a výšky byla testována na plášti chladicí věže. V analýze byl sledován zejména úhel náběhu větrných žeber a vliv výšky větrných žeber.

2. GEOMETRICKÝ MODEL

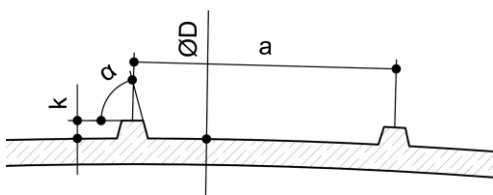
V této práci je představen trojrozměrný výpočetní model chladicí věže. Výpočet proudění okolo chladicí věže byl řešen v programu ANSYS Fluent v 17.0 pomocí Reynoldsova-Navier-Stokesových rovnic v transkritickém režimu proudění. Pro kalkulaci tlakovu a rychlosti v transportních rovnicích byl použit SIMPLEC algoritmus a pro řešení všech nezávislých proměnných byla použito diskretizační schéma druhého řádu.

Studovaný účinek vlivu větrných žeber byl studován na chladicí věži výšky 185 m s fyzicky modelovanými větrnými žebry, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Geometrické parametry chladicí věže.

	Size (m)
Tower height	185
Base diameter of tower	115
Outlet diameter of tower	70.71
Throat height of tower	158.63
Throat diameter of tower	69
Height of inlet mouth	10

Úkol proudění kolem kruhového válce s žebry byl vyřešen pro různé poměry k/a , k/D a různé úhly α . Geometrie větrných žeber je znázorněna na obr. 1. Větrná žebra byla modelována se dvěma výškami 0,05 m a 0,125 m a dvěma různými úhly náběhu: 90° a 60° .

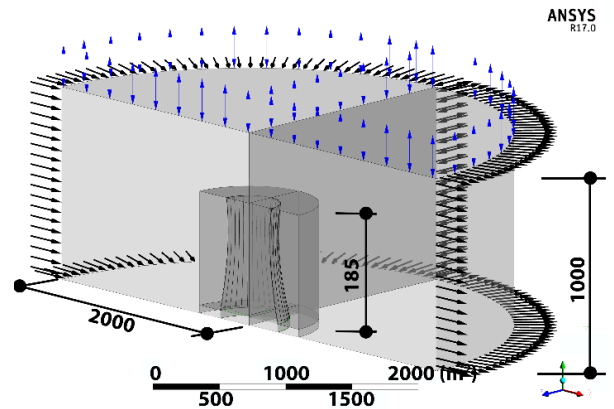


Obrázek 1: Geometrie větrných žeber.

3. METHODS

Velikost numerické domény byla zvoleny podle Murakami et al. a Malalasekera et al. kteří zkoumali 2D úlohy proudění okolo válce (Murakami a Mochida, 1995; Versteeg a Malalasekera, 2018).

Výpočetní oblast byla řešena jako polovina válce, aby se snížily výpočetní náklady 3D analýzy. Tohoto zjednodušení lze dosáhnout axiální symetrií konstrukce chladicí věže. Velikost řešené oblasti je znázorněna na obrázku 2. Pro samotný výpočet tedy byla použita půlválcová doména o průměru 4000 m. a výšce 1000 m. Výpočetní oblast obsahovala více



Obrázek 2: Výpočetní oblast

než 18 milionů strukturovaných a nestruturovaných objemů sítě. Velikost jednotlivých prvků byla volena tak, aby výška prvků vyhovovala pro použití standardní stěnové funkce.

3.1. Okrajové podmínky

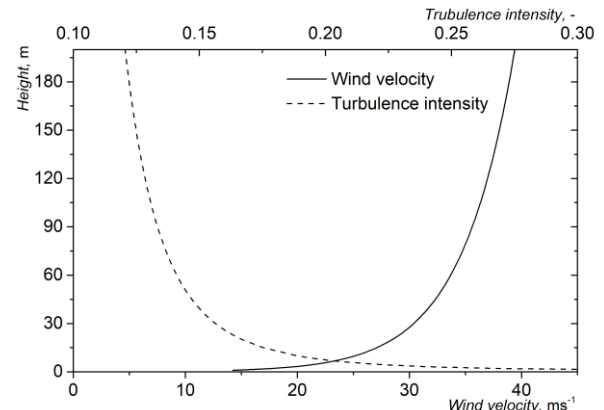
Rychlost proudění na vstupu byla zadána pomocí logaritmického zákona dle Eurokodu (EN 1991-1-4, 2007), rovnice (1),

$$v(z) = v_b \cdot k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0}, \quad (1)$$

kde z je výška nad terénem, v_b je referenční rychlost vzduchu dána hodnotou $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a další koeficient je dán hodnotou $k_r = 0,19$ a $z_0 = 0,05 \text{ m}$. Intenzita turbulencí byla do výpočtu zadána taktéž podle evropské normy pro navrhování konstrukcí, rovnice 2 (EN 1991-1-4, 2007),

$$I_v(z) = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}}. \quad (2)$$

Samotný průběh intenzity turbulencí a rychlosti proudění můžeme vidět na následujícím obrázku 3.



Obrázek 3: Rychlost proudění a intenzita turbulencí

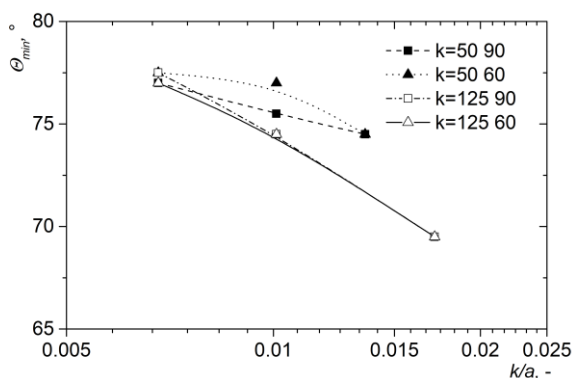
4. VÝSLEDKY

Podrobné výsledky 3D analýz v nejužší místě chladicí věže jsou popsány v následujících odstavcích. Obrázky 4a - e ukazují sledované parametry definující křivku rozložení vnějšího tlaku na úrovni hrdla chladicí věže opatřené žebry výšky 0,050 m a 0,125 m.

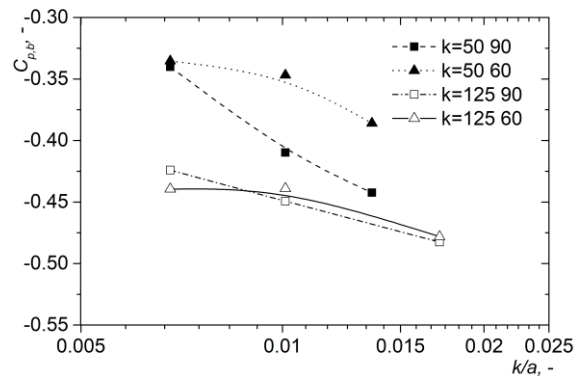
Hodnota koeficientu vnějšího tlaku v bodě stagnace je stejná a téměř rovná 1 pro všechny tvary žeber. Kromě toho je hodnota číselného koeficientu vnějšího tlaku relativně stabilní. Zde se na závětrné straně pohybuje koeficient od 0,3 do 0,5. Součinitel vnějšího tlaku na závětrné straně klesá s nárůstem drsnosti povrchu k/a (obr. 4b). Úhel pro minimální tlakový koeficient φ_{min} byl v jednotlivých simulacích mezi 65° a 80° , jak je znázorněno na obr. 4a. Absolutní hodnota minimálního tlakového koeficientu $C_{p, min}$ má významně klesající trend spolu se zvýšením ekvivalentní drsnosti. Obr. 4d ukazuje, že bod oddělení toku je mezi 95° a 115° a úhel se zmenšuje se zvyšující se drsností. Úhel koeficientu nulového tlaku je mezi 32° a 38° a postupně se zvyšuje se zvyšující se drsností k/a , jak je znázorněno na obr. 14c. Vliv ekvivalentní drsnosti na minimum součinitele vnějšího tlaku lze vidět na obr. 14e.

Vypočítané hodnoty jsou dále porovnány s německým standardem pro konstrukci chladičů věže (VGB BTR, 2017). Výsledky ukazují stejný trend jako VGB kód (VGB BTR, 2017) a 2D analýza. Na rozdíl od 2D analýzy jsou hodnoty více shodné s experimenty a německou normou. Výsledky ukazují vliv poměru k/D , který má vliv na minimální hodnotu tlakového koeficientu. Žebra vysoké výšky 0,125 m účinněji snižují minimální vnější tlak pro stejný poměr k/a . Tyto výsledky jsou v souladu se závěry Pirnera (Pirner, 1982). Větrná žebra s úhlem náběhu $\alpha = 60^\circ$ mají téměř stejnou účinnost jako u úhlu $\alpha = 90^\circ$. Tento výsledek navazuje na výsledek 2D analýzy, kde je zřejmá stejná účinnost pro úhly $\alpha = 75^\circ$ a $\alpha = 90^\circ$.

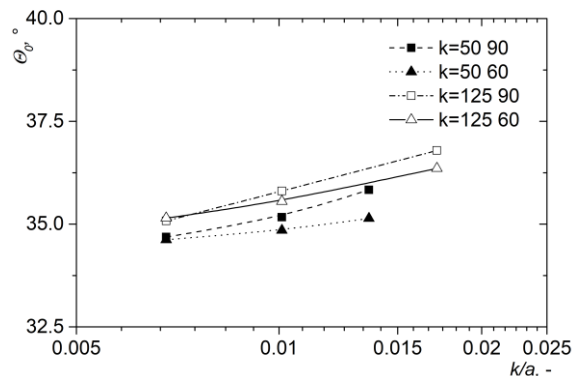
V tabulce 2 je vidět srovnání vypočítaných výsledků s historickými měřeními na věži Weiswiler, Schmehausen a



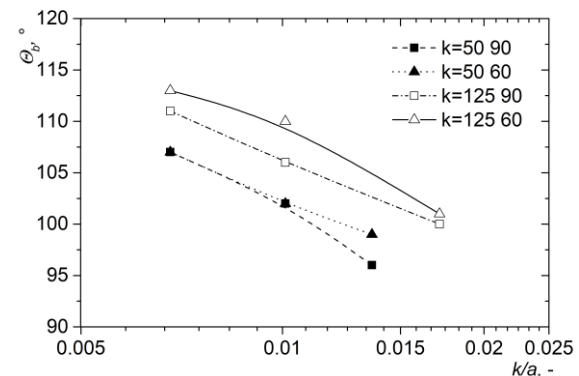
(a) úhel minima součinitele tlaku



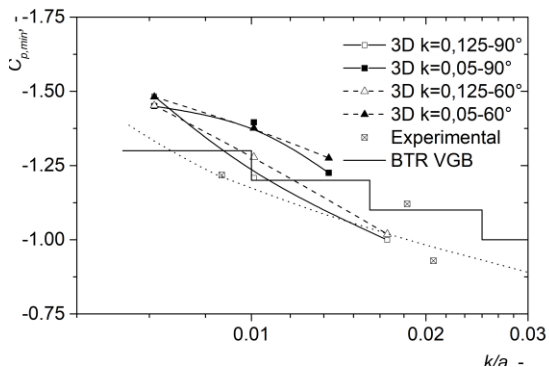
(b) součinitel tlaku na závětrné straně



(c) úhel nulového tlaku



(d) úhel separace proudu



(e) minimum součinitele tlaku

Obrázek 4: Vliv relativní drsnosti pláště na charakteristické parametry

Tabulka 2: Porovnání s měřením na skutečných chladicích věžích

Name	k m	k/a -	$C_{p,min}$ -	θ_{min} °	θ_0 °	θ_b °	$C_{p,b}$ -
Weisweiler tower		0.0065	-1.29	72.90	34.89	104.40	-0.38
Calculated	0.125	0.0068	-1.48	77.50	35.08	111.00	-0.42
	0.050	0.0068	-1.45	77.00	34.69	107.00	-0.34
Martin's Creek tower		0.0220	-1.23	73.80	36.56	111.60	-0.43
Schmehausen tower		0.0230	-1.05	70.20	33.42	116.40	-0.40
Calculated	0.125	0.0172	-1.00	69.50	36.79	100.00	-0.48

Martin's Creek (Sollenberger a Scanlan, 1974). Weisweiler tower lze porovnat s výsledky modelovanými s relativní drsností 0,0068. Výsledky minimálního tlakového koeficientu jsou o 13% menší než dosažené výsledky. Úhel nulového tlaku a separační bod se počítají blíže k závětrné straně. Výsledky měření na věži Martin's Creek a Schlesien tower jsou ve vynikající shodě s vypočtenými výsledky pro relativní drsnost 0,0172. Přesto se úhel oddělení opět posune blíže k závětrné straně. Stručně řečeno, lze dosáhnout dobré dohody s výsledky měření na skutečných strukturách.

5. ZÁVĚR

Výsledky této studie proudění vzduchu kolem chladicí věže vybavené meridionálními větrnými žebry lze shrnout následovně:

Naše vypočítaná analýza ukazuje, že velikost tlakového koeficientu se významně snižuje s rostoucí drsností povrchu. Tato skutečnost podporuje použití žebor na skořepinách velkých chladicích věží. Měření v plném rozsahu odpovídají výsledkům získaným numerickou simulací.

Minimální hodnota tlakového koeficientu závisí jak na ekvivalentní drsnosti k/a , tak na poměru k/D . Výsledky ukazují, že výška žebor hraje klíčovou roli při snižování velikosti maximálního sání. Je nutné věnovat pozornost bezrozměrným parametrům, jako jsou k/a a k/D , když jsou navržena větrná žebra na plášti chladicích věží.

Studie naznačuje, že účinnost meridionálních větrných žebor je zachována, i když je úhlový nápor žebor snížen. Stejně snížení maximálního sání po stranách pláště chladicí věže bylo vypočteno pro úhly náběhu žebor 90°, 75° a 60°.

Budoucí práce by proto měla zahrnovat hlubší analýzu interferenčního účinku chladicích věží vybavených meridionálními větrnými žebry. Zkoumání možných způsobů, jak snížit negativní tlak větru kolem chladicí věže, jako je změna geometrie vstupu a výstupu z chladicí věže.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory Technologické agentury České republiky TA04011743.

Literatura

- Buresti, G. (1981) „The effect of surface roughness on the flow regime around circular cylinders”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 8(1–2), s. 105–114. doi: 10.1016/0167-6105(81)90011-8.
- EN 1991-1-4 (2007) *Eurocode 1: Action on structures - Part 1-4: General actions - Wind loads*.
- Gould, P. L. a Kratzig, W. B. (1999) „Cooling Tower Structures”, in Chen, W.-F. (ed.) *Structural Engineering Handbook*. 1st vyd. New York: CRC Press LLC.
- Güven, O., Farrell, C. a Patel, V. C. (1980) „Surface-roughness effects on the mean flow past circular cylinders”, *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 98(4), s. 673–701. doi: 10.1017/S0022112080000341.
- Murakami, S. a Mochida, A. (1995) „On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 54–55, s. 191–211. doi: 10.1016/0167-6105(94)00043-D.
- Niemann, H.-J. a Hölscher, N. (1990) „A review of recent experiments on the flow past circular cylinders”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 33(1–2), s. 197–209. doi: 10.1016/0167-6105(90)90035-B.
- Pirner, M. (1982) „Wind pressure fluctuations on a cooling tower”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 10(3), s. 343–360. doi: 10.1016/0167-6105(82)90006-X.
- Pirner, M. (1990) *Aeroelasticity of cylinder loaded by the air stream*. 1. edition. Editoval F. Lávička. Praha: Academia.
- Prabhakar, N. R. (1990) „Wind effects on hyperbolic cooling tower”, in. Bombay: Oxford and IBH publishing CO. PVT. LTD., s. 205–214.
- Sollenberger, N. J. a Scanlan, R. H. (1974) „Pressure-difference measurements across the shell of a full-scale natural draft cooling tower.”, in *Proceedings of the symposium on full-scale measurements of wind effects*. Canada: University of Western Ontario.
- Versteeg, H. a Malalasekera, W. (2018) *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method / H. K. Versteeg and W. Malalasekera., SERBIULA (sistema Librum 2.0)*.
- VGB BTR (2017) „Structural Design of Cooling Towers”. VGB PowerTech Service GmbH.