

dr inż. Jolanta Anna Prusiel*
mgr inż. Marcin Gryniiewicz*

Analiza dynamiczna żelbetowej chłodni kominowej hiperbolooidalnej

Dynamic analysis of hyperboloidal reinforced cooling tower

Streszczenie. Żelbetowe powłokowe chłodnie kominowe są to złożone konstrukcje inżynierskie stosowane w energetyce ciepłej, które na etapie projektowania wymagają szerokiej analizy oddziaływań na konstrukcję. Istotną jest analiza termodynamiczna chłodni, mająca bezpośredni wpływ na wymiary konstrukcji powłokowej. Decydującym obciążeniem chłodni jest oddziaływanie wiatru i związana z tym analiza dynamiczna. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń dynamicznych przykładowej chłodni kominowej z wykorzystaniem programu ROBOT.

Słowa kluczowe: chłodnia kominowa, konstrukcja żelbetowa, analiza dynamiczna.

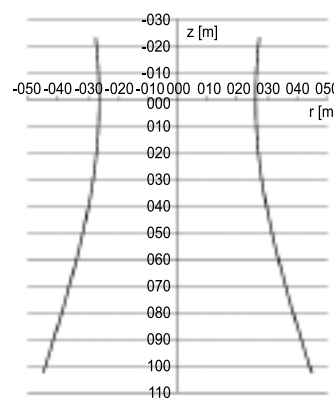
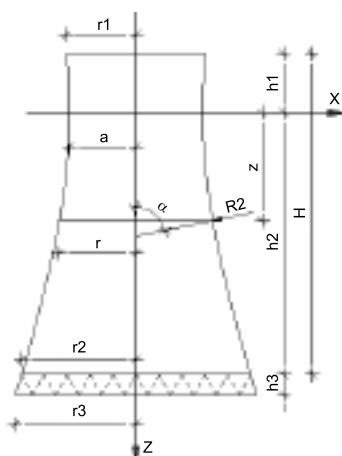
Abstract. Reinforced concrete cooling towers are complex engineering structures used in thermal energy engineering, which require wide analysis of actions on their structure at the design stage. Thermodynamic analysis of cooling tower is very important due to effects directly on the sizes of shell. The decisive load in cooling tower is wind load and dynamics analysis related with. In this article the results of dynamic analysis of shell of cooling tower are presented with using numerical calculations in ROBOT program.

Keywords: cooling tower, reinforced concrete structure, dynamic analysis.

Powłokowe chłodnie kominowe są konstrukcjami wieżowymi wysokości powyżej 100 m i średnicy $50 \div 100$ m. Krajowe uregulowania normowe dotyczące ich projektowania nie są wystarczająco szczegółowe, dlatego wykorzystuje się zagraniczną literaturę naukowo-techniczną [1, 4] wraz z adaptacją zaleceń projektowych do przepisów krajowych [2, 3]. W artykule przedstawimy sposób wyznaczania obciążenia wiatrem hiperboloidalnej chłodni kominowej wysokości 125,4 m, na podstawie niemieckich wytycznych VGB [4] i Eurokodu 1, cz. 1-4 [3], z uwzględnieniem obliczeń dynamicznych powłoki. Stosowanie specjalistycznych zaleceń [2, 4] spowodowane jest brakiem w Eurokocie [3] procedur dotyczących powłokowych chłodni kominowych. Wytyczne VGB [4, 5] dotyczą głównie określania i kombinacji obciążeń dla chłodni, a także technologii wykonania i ochrony konstrukcji.

Charakterystyka analizowanej chłodni kominowej

Geometrię chłodni kominowej, przeciwprądowej (rysunek 1) ustalono na podstawie obliczeń termodyna-



Rys. 1. Geometria chłodni kominowej – oznaczenia i kształt funkcji krzywej tworzącej

micznych dla zadanych parametrów technologicznych [6]. Wysokość okna wlotowego, średnice wlotu i wylotu sprzyjają utworzeniu właściwych warunków naturalnego przepływu powietrza wewnątrz chłodni. Kształt hiperboloidalny przyczynia się do korzystnego rozkładu naprężeń w powłoce (większa sztywność globalna). Grubość ściany powłoki zmienia się liniowo od 0,75 m (na dolnej krawędzi) do 0,19 m (od poziomu 25,2 m, licząc od dołu powłoki). Do analizy dynamicznej przyjęto następujące wymiary chłodni kominowej:

- całkowitą wysokość powłoki hiperboloidalnej – $H = 125,4$ m;

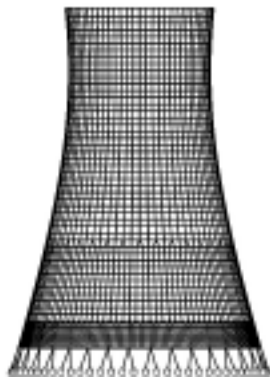
- średnicę powłoki u wylotu kominy – $2r_1 = 54,728$ m;
- średnicę powłoki na wlocie powietrza – $2r_2 = 89,452$ m;
- średnicę przewężenia powłoki – $2a = 52,204$ m.

Model obliczeniowy chłodni

Do zamodelowania powłoki hiperboloidalnej użyto 1359 elementów skończonych – prostokątnych, czterokątowych powierzchniowych o max wymiarze 2,0 m i zróżnicowanej grubości. Słupy żelbetowe, stanowiące konstrukcję wsporczą powłoki, zostały zamodelowane 36 elementami prętowy-

* Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

mi, sztywnie utwierdzonymi w fundamencie. W koronie powłoki wprowadzono usztywnienie w formie belek uwzględniających sztywny pierścień górny (pomost inspekcyjny). Wykorzystano model materiałowy dla betonu C30/37 o następujących parametrach: moduł Younga $E = 33000$ MPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,2$, współczynnik Kirchoffa $G = 1333,33$ MPa oraz ciężar właściwy $\gamma = 25$ kN/m³. Na rysunku 2 przedstawiono model MES chłodni kominowej hiperboloidalnej.



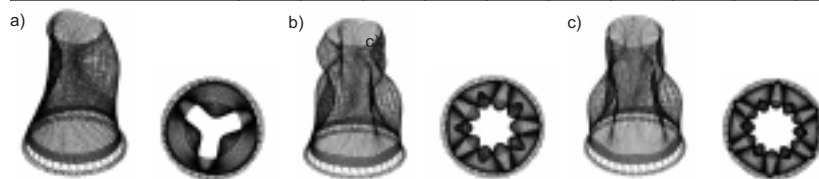
Rys. 2. Model MES chłodni kominowej hiperboloidalnej

Wyniki obliczeń dynamicznych chłodni hiperboloidalnej

W celu określenia oddziaływania wiatru na żelbetową chłodnię kominową przeprowadzono obliczenia dynamiczne konstrukcji powłoki z wykorzystaniem analizy modalnej zaimplementowanej w programie ROBOT. W tabeli zestawiono wyniki obliczeń dynamicznych chłodni. Otrzymane z analizy dynamicznej wybrane postacie drgań własnych powłoki w kształcie hiperboloidy pokazano na rysunku 3. W przypadku postaci drgań powłoki o pokrywających się częstotliwościach, różnią się one kierunkiem drgań.

Wyniki obliczeń częstotliwości drgań własnych konstrukcji chłodni kominowej

Postać drgań	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Częstotliwość n [Hz]	1,24	1,24	1,26	1,26	1,37	1,37	1,45	1,45	1,49	1,49
Okres drgań T [s]	0,81	0,81	0,79	0,79	0,73	0,73	0,69	0,69	0,67	0,67



Rys. 3. Postacie drgań własnych powłoki (widok z boku i z góry); a) 1; b) 3; c) 9

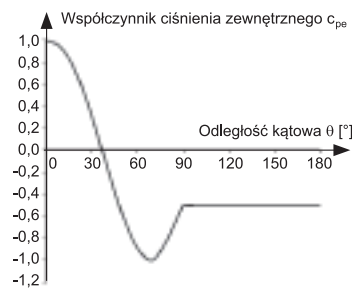
Wyznaczanie ciśnienia zewnętrznego wiatru na powłokę chłodni kominowej

Oddziaływanie wiatru na zewnętrzną powierzchnię powłoki można wyznaczyć wg wytycznych VGB [4] z zależności: $w_e = (z, \theta) = c_{pe}(\theta) \cdot \varphi \cdot F_I \cdot q_p(z)$ (1) gdzie:

- z – wysokość nad terenem;
- θ – odległość kątowna rozpatrywanego punktu względem kierunku działania wiatru;
- $c_{pe}(\theta)$ – współczynnik ciśnienia parcia zewnętrznego, wg [4];
- $q_p(z)$ – wartość szczytowa ciśnienia prędkości, wg [3];
- φ – współczynnik dynamiczny, wg [4];
- F_I – współczynnik interferencji, uwzględniający sąsiedztwo innych budowli, wg [4].

Współczynnik ciśnienia parcia zewnętrznego $c_{pe}(\theta)$ opisuje krzywa dystrybucji (rysunek 4), przyjęta na podstawie zaleceń VGB [4], przy $c_{pe,min} = -1,0$. Wartość współczynnika $c_{pe}(\theta)$ zależy od odległości kątowej θ względem kierunku wiatru, podobnie jak dla konstrukcji walcowych w normie [3], lecz bez konieczności obliczania liczby Reynoldsa.

Współczynnik dynamiczny φ , uwzględniający częstotliwość drgań własnych powłoki wyznaczoną z analizy dynamicznej, jest odczytywany z wy-



strefa I ($0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$): $c_{pe} = 1 - 2,0 \left(\sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2,267}$

strefa II ($70^\circ \leq \theta \leq 91^\circ$): $c_{pe} = -1 + 0,5 \left[\sin \left(\frac{90}{21} (\theta - 70) \right) \right]^{2,395}$

strefa III ($91^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$): $c_{pe} = -0,5$

Rys. 4. Wykres krzywej dystrybucji ciśnienia zewnętrznego wiatru

kresu zamieszczonego w [4], z wykorzystaniem zależności (2).

$$\frac{q_p(H)}{(d_T \cdot n_{min})^2} \cdot 10^4 \quad (2)$$

gdzie:

- $q_p(H)$ – wartość szczytowa ciśnienia prędkości na poziomie krawędzi korony powłoki; dla I strefy wiatrowej wg [3] $q_p(H = 133,20 \text{ m}) = 1,27$ kN/m²;
- d_T – średnica przewężenia powłoki; $d_T = 52,20$ m;
- n_{min} – minimalna częstotliwość drgań własnych powłoki chłodni; $n_{min} = 1,24$ Hz (tabela).

W przypadku analizowanej chłodni kominowej hiperboloidalnej wartość współczynnika dynamicznego wynosi $\varphi = 1,04$.

Podsumowanie

Przy wyznaczaniu oddziaływania wiatru na konstrukcję chłodni kominowej ważne jest określenie współczynnika oporu aerodynamicznego, uwzględniającego vibracje rezonansowe spowodowane pulsacyjnym działaniem wiatru. Przeprowadzone obliczenia dynamiczne analizowanej chłodni kominowej, przy użyciu programu numerycznego, pozwoliły na dokładne wyznaczenie częstotliwości drgań własnych powłoki. Wyniki tych obliczeń posłużyły do określenia współczynnika dynamicznego wg prostej procedury przyjętej na podstawie niemieckich wytycznych VGB [4]. Prawidłowe określenie dynamicznego oddziaływania wiatru na powłokę chłodni kominowej, właściwa technologia wykonania [5, 7] oraz zachowanie odpowiednich warunków eksploatacyjnych [8], mają wpływ na niezawodną pracę konstrukcji chłodni.

Literatura

- [1] Wai-Fah Chen, Lui Eric M., Handbook of structural engineering. CRC Press, USA 2005.
- [2] Wytyczne projektowania chłodni kominowych opracowane przez firmę PROJCHŁOD, Gliwice 2010.
- [3] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
- [4] VGB Guideline. Structural Design of Cooling Towers. 2010 Edition. VGB PowerTech e.V.
- [5] VGB Guideline. Protection Measures on Reinforced Concrete Cooling Tower and Chimneys against Operational and Environmental Impacts. Third Edition 2010. VGB PowerTech e.V.
- [6] Kozioł J., Stechman A., Przemysłowa woda chłodząca. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [7] Runkiewicz L., Wykonanie i odbiór robót konstrukcji żelbetowych w energetyce. Prace Naukowe Polskiego Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Nr 19/2008, s. 173–186.
- [8] Stechman A., Eksploatacja chłodni kominowych w warunkach zimowych. Wydanie I. UNISERV, Budownictwo Przemysłowe S. A., Katowice 2008.