

Analiza dynamiczna chłodni kominowych

Dynamic analysis of cooling towers

mgr inż. Michał Ejsymont (ORCID: 0009-0003-1601-2698), dr hab. inż. Jolanta Anna Prusiel
prof. PB (ORCID: 0000-0001-6827-1059), prof. PB – promotor, Politechnika Białostocka,
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1340

Streszczenie: Określenie wpływu obciążeń dynamicznych na oddziaływanie wiatru na powierzchnię płaszcza powłoki chłodni kominowej oraz optymalizacja kształtu powłoki w celu uzyskania jak najmniejszych sił wewnętrznych – sił południkowych i równoleżnikowych. Zmiennymi parametrami są: grubość powłoki żelbetowej i lokalizacja przewężenia powłoki.

Słowa kluczowe: konstrukcje, analiza dynamiczna, chłodnie kominowe.

Abstract: Determination of the effect of dynamic loads on the effect of wind on the surface of the cooling tower shell and to optimize the shell shape in order to obtain the lowest possible internal forces – longitudinal and latitudinal forces (meridional and hoop stresses). The variable parameters are thickness of the reinforced concrete wall and location of the throat of the shell.

Keywords: structures, dynamic analysis, cooling towers.

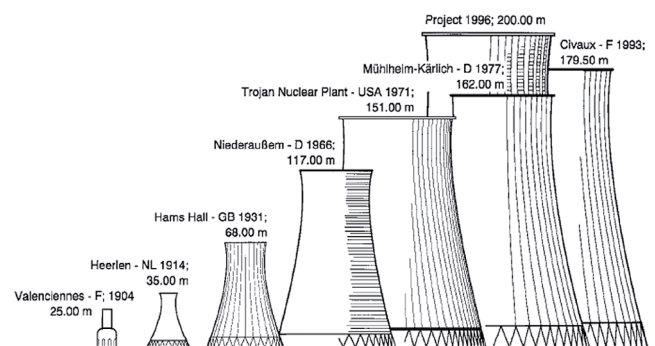
1. Wprowadzenie

Z punktu widzenia inżynierów budownictwa powłoki chłodni kominowych są najbardziej wymagającymi konstrukcjami, jakie kiedykolwiek zostały wybudowane w technologii betonu zbrojonego [2]. Decyzja o wyborze typu chłodni kominowej powinna być oparta na analizie techniczno-ekonomicznej. Przy projektowaniu ważne jest, aby wykonać analizę liniową i nieliniową z zakresu statyki i dynamiki żelbetowych chłodni kominowych. Obecnie prowadzi się wiele badań z zakresu wyznaczania obciążenia wiatrem, wybożenia powłoki, posadowienia chłodni kominowej na terenach wpływów sejsmicznych i przedłużenia ich eksploatacji oraz właściwości nieliniowych materiałów [15].

Przy projektowaniu chłodni kominowych należy wziąć pod uwagę wiele aspektów, takich jak: charakterystyka działania, lokalizacja zakładu produkcyjnego, efekt chłodzenia, warunki lokalne oraz występowanie naturalnych zbiorników wodnych w sąsiedztwie chłodni. Wybór odpowiedniego rodzaju chłodni może stanowić poważne wyzwanie projektowo-technologiczne, ponieważ istnieje wiele klasyfikacji chłodni kominowych, między innymi ze względu na sposób przekazywania ciepła, sposób wymuszania przepływu powietrza, np. chłodnie kominowe o ciągu naturalnym, chłodnie wentylatorowe, kierunek przepływu powietrza w stosunku do kierunku przepływu wody, typ zraszalnika (w przypadku chłodni kominowych), rodzaj konstrukcji, kształt powłoki chłodni (stożkowe, walcowe, hiperboloidalne) oraz sposób wznoszenia obiektu.

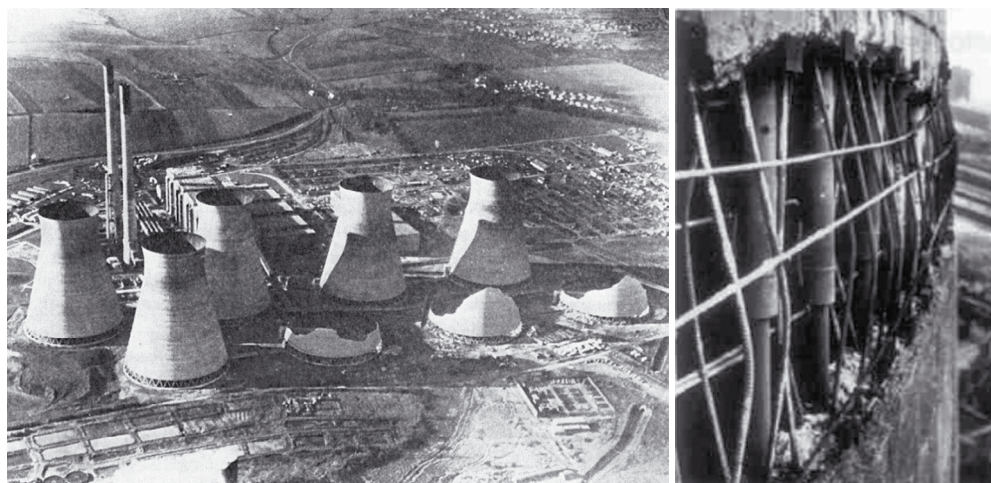
Ważnym aspektem przy projektowaniu chłodni kominowych jest poznanie historii wznoszenia tego typu obiektów, zmian w podejściach projektowych oraz analiza stanów

technicznych i awaryjnych tych obiektów. Początkowo chłodnie kominowe były konstruowane z drewna, a zbiorniki na zimną wodę obiegową były murowane. Na szczycie chłodni znajdował się system rozpraszający wodę, która spływała w dół po drewnianych listwach lub panelach z drutu plecionego. Wtedy najpopularniejsze były chłodnie o układzie otwartym, czyli te, które były budowane przy zbiornikach wodnych i rzekach. Zapewniało to niższą temperaturę wody niż w przypadku chłodni o układzie zamkniętym. W Polsce budowa chłodni o układzie otwartym była jednak nieopłacalna i często niemożliwa ze względu na lokalizację obiektów przemysłowych. W późniejszym okresie konstrukcje te zastępowano układami nośnymi ze stalowych szkieletów z wewnętrzną obudową drewnianą lub żelbetową powłoką oraz żelbetowymi basenami. Rozwój historyczny chłodni kominowych zobrazowano na rysunku 1. Chłodnie kominowe są obecnie wykorzystywane do chłodzenia wody obiegowej oraz odprowadzania gazów spalinyowych w zakładach produkcyjnych, które spalają paliwa kopalne [6, 14, 16, 20].



Rys. 1. Historyczny rozwój chłodni kominowych [3, 5]

Rys. 2. Przykładowe awarie chłodni kominowych [13, 15]



Do początku XXI wieku w Polsce wybudowano ponad 80 chłodni hiperboloidalnych. W ostatnich latach wiele chłodni w kształcie powłoki hiperboloidalnej uległo awariom i katastrofom. Przykładowe awarie chłodni kominowych pokazano na rysunku 2. Powody tych incydentów są różnorodne,

a kontrole techniczne wykazały uszkodzenia o różnym charakterze. W większości chłodni wybudowanych w drugiej połowie XX w. grubość powłoki żelbetowej i otuliny betonowej okazała się niewystarczająca. W przeszłości grubość tych powłok stopniowo zwiększała się, począwszy od min. 10 cm, aż do obecnych min. 18 cm. Istotnymi czynnikami, które również mogą pomóc projektantom, są wnioski wyciągnięte z analiz stanów awaryjnych chłodni kominowych. W takich sytuacjach często zaobserwowano problemy związane ze zbyt małą ilością założonego zbrojenia południkowego i równoleżnikowego, sięgającą 30% w stosunku do obecnych zaleceń i norm projektowych, niewłaściwie zaprojektowaną mieszanką betonową, małą szczelnością betonu, oddziaływaniem czynników szkodliwych (takich jak gazy spalinyowe, woda miękka) oraz oddziaływaniem termicznym. Dodatkowo brak odpowiedniego zabezpieczenia wewnętrznych powłok lub stosowanie niewłaściwych materiałów ochronnych może również prowadzić do awarii chłodni [4, 7, 9, 11, 12].

2. Model obliczeniowy chłodni kominowej

2.1. Wybór typu chłodni

Przy wyborze typu chłodni kluczowe znaczenie ma analiza techniczno-ekonomiczna. Chłodnie wentylatorowe wymagają mniejszych nakładów inwestycyjnych, krótszego czasu budowy i mniejszej powierzchni zabudowy w porównaniu z chłodniami kominowymi (wieżowymi). Jednakże chłodnie wentylatorowe wymagają dodatkowych systemów mechanicznych i elektrycznych, obsługiwanych przez wykwalifikowaną kadrę, a ponadto używają znaczne ilości energii elektrycznej [4]. W pracy zdecydowano się analizować chłodnie kominowe o kształcie powłoki hiperboloidalnej ze względu na dużą powszechność występowania w Polsce i UE.

2.2. Ustalenie wymiarów chłodni

Przy ustalaniu wymiarów chłodni kominowych niezbędne są obliczenia termodynamiczne, uwzględniające takie parametry jak: temperatura wody ciepłej, temperatura wody ochłodzonej,

temperatura powietrza atmosferycznego, wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne, obciążenie hydrauliczne, skład chemiczny wody obiegowej oraz typ i konstrukcja zraszalnika. Parametry do projektowania chłodni zostały określone w tabeli 1. Modele opracowane przez H. Chiltona, Kennedy'ego i Margena pozwalają na wyznaczenie wymiarów chłodni przeciwprądowych przy różnych warunkach pracy [1, 10, 11, 16]. Wymiary chłodni kominowej zostały przyjęte w tabeli 2.

Tabela 1. Zestawienie przyjętych parametrów i wyników obliczeń termodynamicznych chłodni

Obciążenie hydrauliczne chłodni	$q_w(m_w)$	115000	m ³ /h
Obciążenie hydrauliczne chłodni	$q_w(m_w)$	31944,44	kg/s
Szerokość strefy chłodzenia	Δt	10	°C
Temperatura wody obiegowej	$t_1 = \Delta t + t$	35	°C
Temperatura wody ochłodzonej	t_2	25	°C
Średnia temperatura wody ochłodzonej	$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$	30	°C
Średnia entalpia powietrza nasyczonego	i_m''	98,8	kJ/kg
Temperatura powietrza atmosferycznego	v_1	15	°C
Wilgotność powietrza atmosferycznego	φ_1	70	%
Entalpia powietrza atmosferycznego które dopływa do chłodni	i_1	33,5	kJ/kg
Liczba chłodzenia Merkela	α	1,56	[-]
Współczynnik atmosferyczny	I_N	3,37	[-]
Ciepło właściwe wody	c	4,1855	kcal/kg
Współczynnik obciążenia chłodni kominowej	O_k	15675,37	m ⁵

Tabela 2. Zestawienie wymiarów chłodni kominowej z obliczeń termodynamicznych

Średnica zraszalnika	$D_z = 2,9111 O_k^{0,3943}$	131,290 m	przyjęto	130 m
Całkowita wysokość chłodni kominowej	$H = 1,333 D_z$	175,010 m	przyjęto	180 m
Wysokość powłoki od przewężenia do korony	$H_p = 0,102 H$	17,851 m	przyjęto	zmienna
Wysokość okien wlotowych powietrza	$H_o = 0,0615 D_z + 0,3846$	8,459 m	przyjęto	10 m
Średnica korony komina	$D_k = 0,537 D_z$	70,503 m	przyjęto	70m
Średnica przewężenia powłoki	$D_p = 0,97 D_k$	68,388 m	przyjęto	67 m
Średnica zbiornika na zimną wodę obiegową	$D_{zb} = 1,15 D_z - 4,5$	146,483 m	przyjęto	145 m

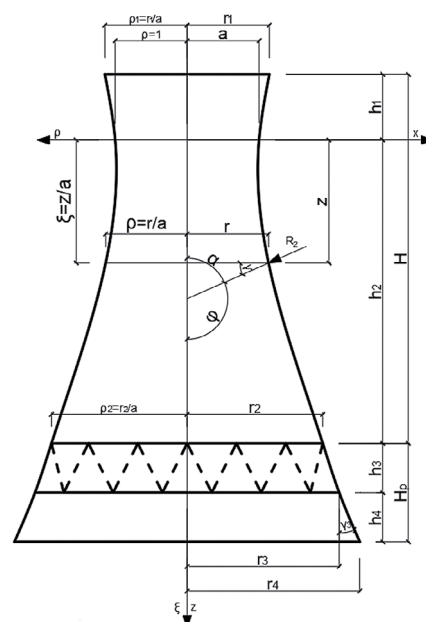
2.3. Warianty testów obliczeniowych chłodni kominowych

Opracowano 16 wariantów modeli chłodni kominowych o powłoce hiperboloidalnej w celu przeprowadzenia analizy metodami analitycznymi oraz numerycznymi dotyczącej rozkładu sił wewnętrznych w powłoce. Wszystkie modele chłodni mają te same parametry, takie jak: wysokość, średnica podstawy, przewężenia i korony chłodni oraz średnica zraszalnika i zbiornika na wodę ochłodzoną. Różnią się wysokością powłoki od podstawy chłodni do przewężenia oraz grubością powłoki chłodni kominowej. Zestawienia przyjętych danych geometrii chłodni kominowej i równań powierzchni środkowych zestawiono w tabelach 3 i 4.

2.4. Przygotowanie modelu MES – modelowanie konstrukcji

W celu wyznaczenia sił wewnętrznych w płaszczu powłoki chłodni kominowej metodą numeryczną konieczne było

Rys. 3. Schemat chłodni kominowej z zaznaczonymi współrzędnymi, osiami głównymi oraz wymiarami


Tabela 3. Zestawienie przyjętych danych geometrii chłodni kominowej (oznaczenia pokazano na rysunku 3)

Dane geometrii chłodni kominowej		Model 1/9	Model 2/10	Model 3/11	Model 4/12	Model 5/13	Model 6/14	Model 7/15	Model 8/16
Całkowita wysokość chłodni kominowej	$H + h_3$ [m]	180	180	180	180	180	180	180	180
Wysokość powłoki chłodni kominowej	H [m]	170	170	170	170	170	170	170	170
Wysokość powłoki od podstawy powłoki do przewężenia	h_2	87,5%	85%	84,6%	82,5%	80%	77,5%	75%	72,5%
Wysokość powłoki od podstawy powłoki do przewężenia	h_2 [m]	148,75	144,5	143,82	140,25	136	131,75	127,5	123,25
Wysokość powłoki od przewężenia do korony	h_1	12,5%	15%	15,4%	17,5%	20%	22,5%	25%	27,5%
Wysokość powłoki od przewężenia do korony	h_1 [m]	21,25	25,5	26,173	29,75	34	38,25	42,5	46,75
Wysokość okien wlotowych powietrza	h_3 [m]	10	10	10	10	10	10	10	10
Promień korony komina	r_1 [m]	35	35	35	35	35	35	35	35
Promień przewężenia powłoki	a [m]	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
Promień zraszalnika (podstawa powłoki)	r_2 [m]	65	65	65	65	65	65	65	65
Promień zbiornika na zimną wodę obiegową	r_4 [m]	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5	72,5
Grubość powłoki chłodni kominowej	t [m]	0,25/0,3	0,25/0,3	0,25/0,3	0,25/0,3	0,25/0,3	0,25/0,3	0,25/0,3	0,25/0,3

utworzenie modelu 3D opartego na metodzie elementów skończonych [R1]. Model stworzono tak by węzły znajdowały się na krzywej południkowej zakładając, że węzły będą w rozstawie co 10° odległości kątowej i 5 m względem wysokości powłoki. W celu uproszczenia modelowania i odczytywania wyników, węzły numerowano w odpowiedniej kolejności w zależności od przekroju i odległości kątowej. Warunki brzegowe powinny zapewnić stateczność konstrukcji, z tego powodu na dolnej krawędzi ograniczającej powłokę zaproponowano podporę liniową w postaci utwierdzenia, zablokowane zostały kierunki $u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, natomiast górna krawędź powłoki była swobodna. Zastosowano elementy skończone w kształcie trójkątów i kwadratów o maksymalnej długości 0,5 m.

3. Obliczenia statyczne i dynamiczne analizowanych chłodni

Współczynniki obciążenia wiatrem ulegały zmianom wraz z rozwojem technologii i poszerzaniem się wiedzy na temat oddziaływania wiatru. Norma krajowa [18] zalecała wartości współczynnika od 1,35 dla chłodni niskich, do wartości 3,0 dla chłodni wysokich. Autorzy monografii [11] zalecali wartość współczynnika dynamicznego 1,4. Norma hinduska [17] wprowadziła współczynnik ryzyka wynoszący 1,06/1,08 oraz współczynnik składowy ciśnienia zewnętrznego.

W pracy dyplomowej korzystano z wytycznych projektowych VGB [20], według których wzór na ciśnienie wiatru działające na powierzchnię zewnętrzną konstrukcji chłodni ma postać:

$$w_e(z, \Theta) = c_{pe}(\Theta) \cdot \varphi \cdot F_I \cdot q_p(z) \quad (1)$$

gdzie:

$c_{pe}(\Theta)$ – współczynnik ciśnienia zewnętrznego [19],

φ – współczynnik dynamiczny wg pkt 3.1.3.5 [20],

Tabela 4. Równania powierzchni środkowej dla jednopowłokowej hiperboloidy obrotowej z rozróżnieniem na górną i dolną część powłoki chłodni kominowej dla modeli 1–16

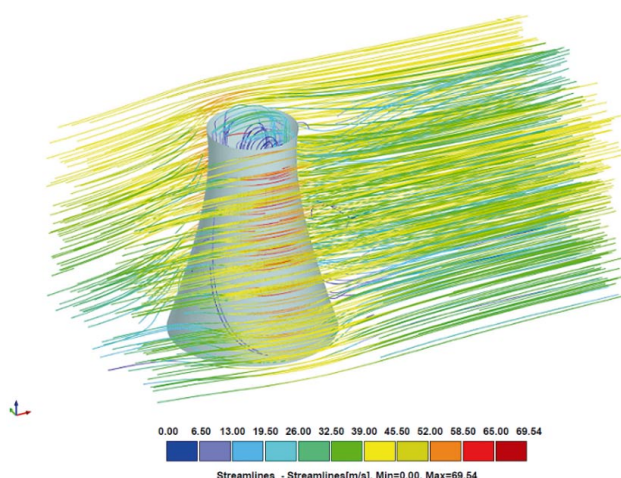
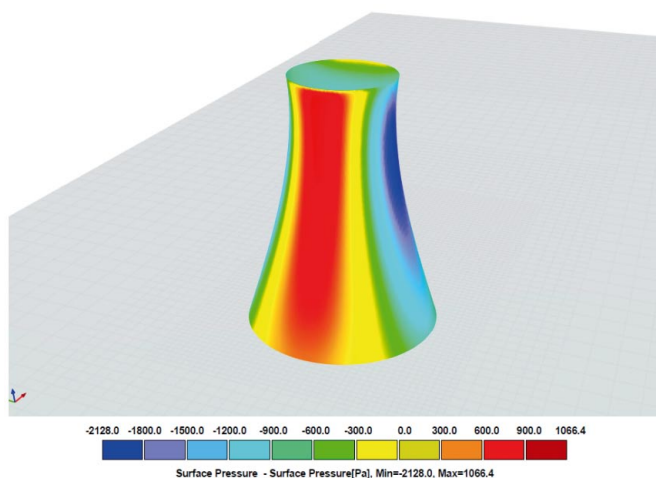
Model	Równanie powierzchni środkowej powłoki chłodni kominowej od przewężenia powłoki do korony chłodni	Równanie powierzchni środkowej powłoki chłodni kominowej od przewężenia powłoki do podstawy chłodni
1/9	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{70,22841^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{89,45990^2} = 1$
2/10	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{84,27409^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{86,90390^2} = 1$
3/11	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{86,49901^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{86,49901^2} = 1$
4/12	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{98,31977^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{84,34790^2} = 1$
5/13	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{112,36545^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{81,79190^2} = 1$
6/14	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{126,41114^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{79,23591^2} = 1$
7/15	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{140,45682^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{76,67991^2} = 1$
8/16	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{154,50250^2} = 1$	$\frac{x^2}{33,5^2} - \frac{z^2}{74,12391^2} = 1$

F_I – współczynnik interferencji, uwzględniający sąsiedztwo innych budowli wg pkt 3.1.3.6 [20],

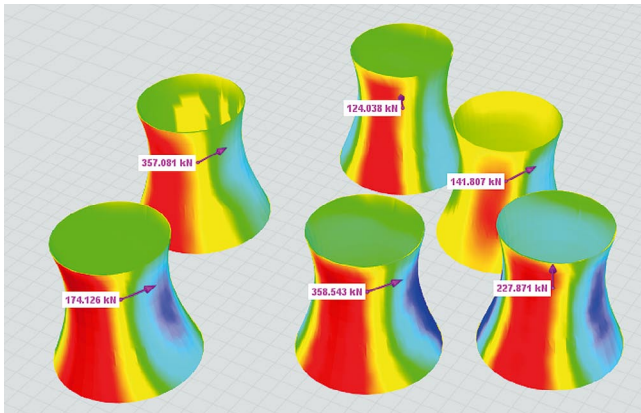
$q_p(z)$ – wartość szczytowa ciśnienia prędkości [19].

Ciśnienie wiatru możemy również wyznaczyć na podstawie analizy CFD, co pokazano na rysunku 4.

W analizowanych chłodniach kominowych zrezygnowano z żeber usztywniających konstrukcję (żeber wiatrowych). Powierzchnia chłodni jest jednorodna i zamknięta, stąd na podstawie [20] przyjęto minimalną wartość współczynnika ciśnienia $c_{pe}(\Theta) = -1,5$. Przyjęto, że w pobliżu projektowanej chłodni kominowej nie znajdują się inne chłodnie kominowe lub wysokie budynki. Tym samym efekt oddziaływań wiatru nie jest brany pod uwagę, stąd współczynnik



Rys. 4. Ciśnienie wiatru i linie przepływu wiatru działające na powierzchnię konstrukcji chłodni kominowej na podstawie analizy CFD [R4]



Rys. 5. Różnice w wartościach ciśnienia wiatru działającego na powierzchnię zespołu chłodni kominowych uzyskane na podstawie analizy CFD

interferencji jest równy $F_f = 1,0$. W przypadku analizy zespołu chłodni kominowych, wartość współczynnika interferencji może być zwiększona do 1,3 i w niektórych przypadkach wymaga przeprowadzenia szczegółowych badań w tunelu aerodynamicznym lub wykorzystując modele CFD (rys. 5). Współczynnik dynamiczny ϕ zależy od kilku czynników, takich jak vibracje rezonansowe spowodowane pulsacyjnym działaniem wiatru, średnica przewężenia powłoki, wartość szczytowego ciśnienia prędkości na poziomie korony powłoki oraz minimalna częstotliwość drgań własnych powłoki chłodni kominowej, biorąc pod uwagę wpływ podparcia i fundamentu [20]. Współczynnik dynamiczny ϕ można wyznaczyć na podstawie funkcji:

$$\phi = 0,0006 \cdot \left(\frac{q_{pe}(H)}{(d_r \cdot n_{min})^2} \cdot 10^4 \right)^2 + 0,01 \cdot \left(\frac{q_{pe}(H)}{(d_r \cdot n_{min})^2} \cdot 10^4 \right) + 1,0007 \quad (2)$$

gdzie:

d_r – średnica przewężenia powłoki,

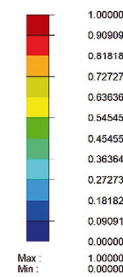
n_{min} – wartość częstotliwości drgań własnych dla pierwszej postaci drgań.

W celu przeprowadzenia analizy dynamicznej zastosowano metodę Lanczosa, która pozwala uzyskać pierwsze osiem wartości drgań własnych $\lambda [1/s^2]$ analizowanych modeli obliczeniowych chłodni wraz z kształtami drgań w relatywnie szybkim czasie. Wyniki pierwszej postaci drgań własnych powłoki pokazano na rysunku 6.

Uzyskane wartości współczynnika dynamicznego, które mieszczą się w przedziale 1,04–1,05 zestawiono na rysunkach 7 i 8.

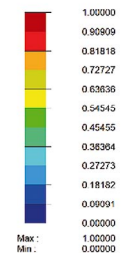
Dodatkowo w pracy przeprowadzono analizę dynamiczną w celu porównania wartości własnych przy zmieniających się wymiarach chłodni kominowych (rys. 9). Modele różnią się między sobą wysokością chłodni kominowej, każdy kolejny model jest niższy od poprzedniego o 10 m. Promień podstawy powłoki, promień przewężenia oraz promień korony komina różni się między innymi o stosunek wynikający z różnicy wysokości h_{n+1}/h_n , gdzie model 17 jest to chłodnia najwyższa, a model 24 – chłodnia najniższa.

RF-DYNAM Pro
Drgania własne u [-]
Kształt drgań nr 1 - 0.871 Hz
Drgania własne u [-]



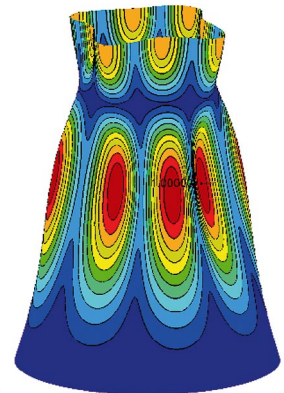
Max u: 1.00000, Min u: 0.00000 [-]
Współczynnik odkształceń: 8.90

RF-DYNAM Pro
Drgania własne u [-]
Kształt drgań nr 1 - 0.871 Hz
Drgania własne u [-]

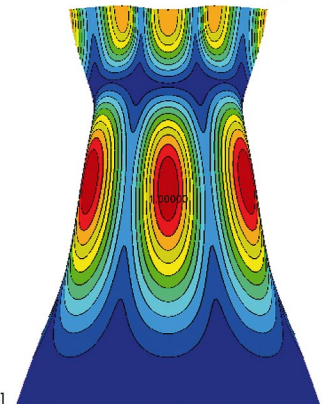


Max u: 1.00000, Min u: 0.00000 [-]
Współczynnik odkształceń: 8.90

Izometria

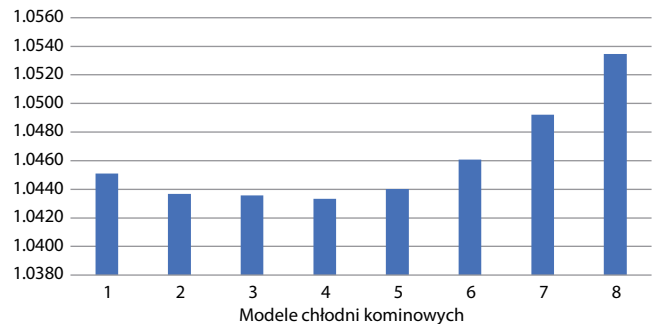


W kierunku X



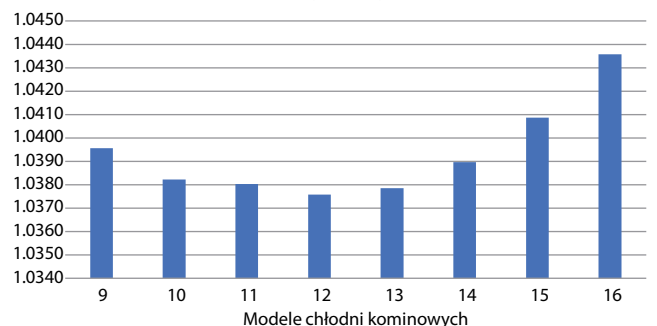
Rys. 6. Pierwsza postać drgań własnych powłoki chłodni [R2]

Wartość współczynnika dynamicznego ϕ [-]

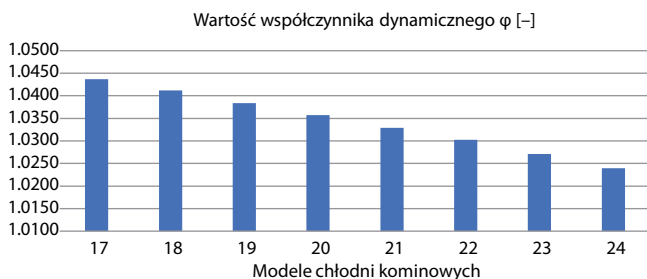


Rys. 7. Porównanie wartości współczynnika dynamicznego ϕ modeli chłodni 1-8

Wartość współczynnika dynamicznego ϕ [-]



Rys. 8. Porównanie wartości współczynnika dynamicznego ϕ modeli chłodni 9-16



Rys. 9. Porównanie wartości współczynnika dynamicznego φ modeli chłodni 17-24

4. Wielowariantowa analiza chłodni kominowych

Łącznie w pracy przeanalizowano 5 sytuacji obliczeniowych dla każdego modelu obliczeniowego, trzy przypadki obciążenia: PO1 – oddziaływanie stałe z ciężarem własnym konstrukcji, PO2 – oddziaływanie wiatru na powierzchnię zewnętrzną powłoki chłodni kominowej, PO3 – oddziaływanie wiatru na powierzchnię wewnętrzną powłoki chłodni kominowej oraz dwie kombinacje obciążeń – oddziaływanie stałe z oddziaływaniem wiatru – KO7 – PO1+PO2 (rys. 10) i KO8 – PO1+PO3.

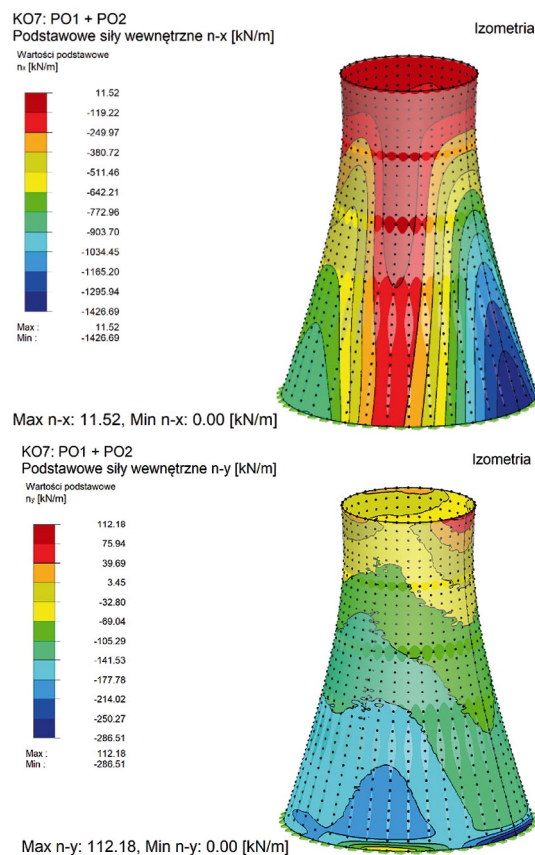
4.1. Wyniki analizy numerycznej chłodni kominowych

Wyniki uzyskanych sił wewnętrznych należy w odpowiedni sposób opracować, sortując je zgodnie z ustalonym wcześniej systemem nazywania węzłów konstrukcji, tak aby można było je odróżnić od węzłów siatki elementów skończonych [R3]. Dodatkowo w programie numerycznym należy sprawdzić, czy nie wystąpiły problemy numeryczne wynikające z różnicy sztywności. Polega to na sprawdzeniu sum kontrolnych obciążeń i reakcji podporowych. Jeżeli odchylenie jest większe niż 1% w każdym kierunku oznacza to, że model może mieć niewystarczającą stateczność lub w obliczeniach wykonano maksymalną liczbę iteracji, a wyniki nie osiągnęły zbieżności.

Łącznie na podstawie analizy jakościowej i ilościowej opracowano 354 tabele z wynikami oraz 150 wykresów wynikowych, które w sposób graficzny pozwalają przeanalizować uzyskane rezultaty.

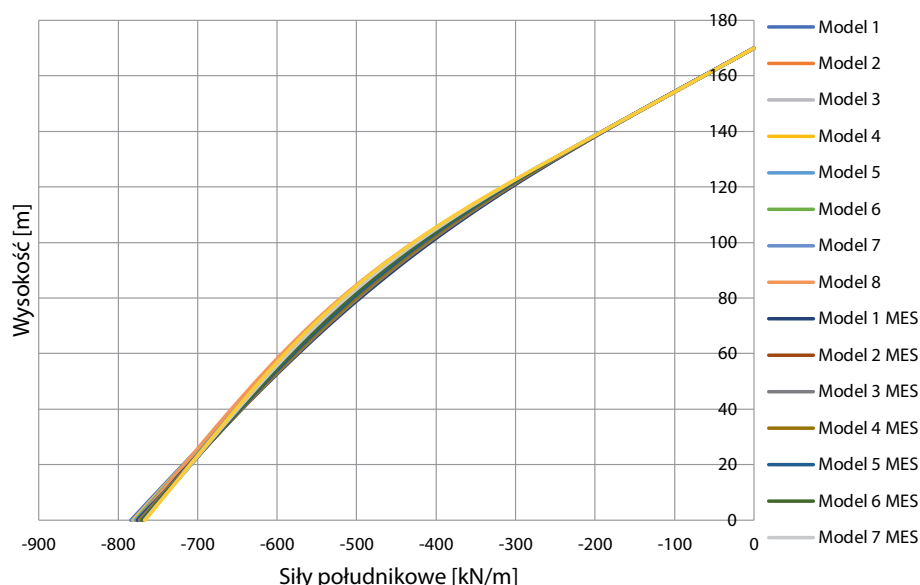
4.2. Weryfikacja obliczeń numerycznych modeli chłodni kominowych metodą analityczną

Do weryfikacji wyników numerycznych użyto metody analitycznej opartej na teorii powłok dla hiperboloidy jednopowłokowej obrotowej.



Rys. 10. Przykładowe wyniki: kombinacja obciążeń numer 7 (KO7), podstawowe siły wewnętrzne n-x siły południkowe, n-y siły równoleżnikowe [kN/m]

Wyniki uzyskane z obu metod były zbieżne, co pokazano na wykresach (rys. 11 i 12). Różnice dotyczyły tylko sił równoleżnikowych, a pojawiły się w dwóch pierwszych przekrojach powyżej zamocowania oraz w przekrojach blisko przewężenia powłoki.



Rys. 11. Wykresy sił południkowych uzyskanych metodą analityczną i numeryczną (MES) – modele chłodni kominowych od 1 do 8

5. Podsumowanie

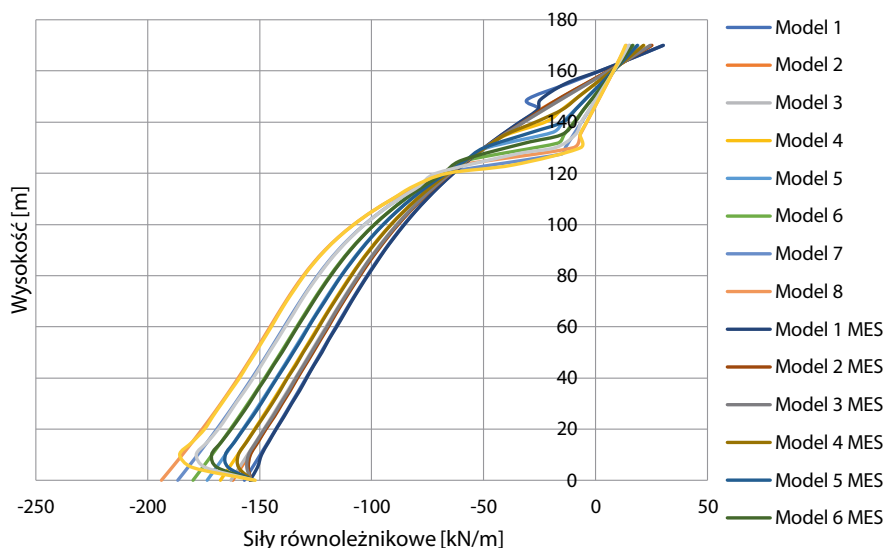
Przedmiotem pracy dyplomowej była analiza dynamiczna żelbetowych chłodziń kominowych o powłoce hiperboloidalnej o zróżnicowanych promieniach krzywizn i wymiarach. Wybrano chłodziń kominową o ciągu naturalnym (NDCT) na podstawie analizy techniczno-ekonomicznej. Przed przystąpieniem do modelowania przeprowadzono obliczenia termodynamiczne w celu wyznaczenia wymiarów chłodziń z wykorzystaniem parametrów pracy zakładu przemysłowego. Następnie przeprowadzono analizę oddziaływania wiatru z uwzględnieniem norm europejskich [19], wytycznych projektowych VGB [20] oraz norm hinduskich [17] dotyczących rozkładu ciśnienia zewnętrznego na powierzchnię powłoki. Opracowano łącznie 24 modele numeryczne chłodziń kominowych. Spośród nich 16 modeli służyło do wyznaczenia sił wewnętrznych w płaszczu powłoki i różniły się one między sobą lokalizacją przewężenia oraz grubością powłoki. Pozostałe 8 modeli służyło do przeprowadzenia analizy dynamicznej, obliczeń i porównań wartości własnych i różniły się one wymiarami, przy czym parametr lokalizacji przewężenia powłoki był stały. Wyniki obliczeń uzyskane z użyciem metody elementów skończonych zweryfikowano metodą analityczną opartą na teorii powłoki hiperboloidalnej. Otrzymałe wyniki z obu metod były bardzo zbliżone.

Poszukując optymalnego kształtu powinniśmy brać pod uwagę chłodziń o kształcie zbliżonym do krzywej hiperboloidalnej. Dają one najmniejsze wartości współczynnika dynamicznego oraz wartości własne. W przypadku wyboru konkretnego kształtu krzywej, zaleca się umieszczenie przewężenia powłoki jak najwyżej.

Praca dyplomowa magisterska „Analiza dynamiczna chłodziń kominowych” otrzymała wyróżnienie Rady Wydziału Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechniki Białostockiej w 2020 roku i została nagrodzona w Konkursie PZITB „Najlepsze Prace Dyplomowe Absolwentów Studiów Wyższych kierunku Budownictwo” w 2021 roku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cholewiński M., Pospolita W., Kamiński M., Projekt koncepcyjny chłodziń kominowych dla bloku jądrowego o mocy elektrycznej 1000 MW, Puzzle 2016, Wrocław, Wroclawska Konferencja Studentów Nauk Technicznych i Ścisłych, tom 4, str. 364–371
- [2] Deshmukh A., Bhangale P. P., Disaster Management for Cooling Tower – Case Study, Journal of Engineering Research and Applications, tom 6, 5/2016, str. 9–14
- [3] Gould P. L., Krätzig W. B. Cooling Tower Structures, Structural Engineering Handbook, C. Wai-Fah (Ed.) CRC Press LLC, Boca Raton, 1999
- [4] Grabiec K., Żelbetowe konstrukcje cienkościenne, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Poznań, 1999



Rys. 12. Wykresy sił równoleżnikowych uzyskanych metodą analityczną i numeryczną (MES) – modele chłodziń kominowych od 1 do 8

- [5] Harte R., Krätzig W. B., Large-scale cooling towers as part of an efficient and cleaner energy generating technology, Thin-Walled Structures, tom 40, 7–8/2002, str. 651–664, DOI: 10.1016/S0263-8231(02)00018-6
- [6] Kikkawa H., Ishizaka H., Kai K., Nakamoto T., DeNOx, DeSOx, and CO2 removal technology for power plant, Hitachi Review, tom 57, 5/2008, str. 174–178
- [7] Knapik A., Historia jednej(?) chłodziń kominowej, Ochrona przed Korozją, tom 53, 6/2010, str. 330–332
- [8] Kobiak J., Stachurski W., Konstrukcje żelbetowe, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1960
- [9] Konderla P., Kasprzak T., Kutylowski G., Waśniewski G., Analiza stanu wyężenia konstrukcji chłodziń kominowej w trakcie jej eksploatacji, Awary budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje, Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, 2017, str. 793–804
- [10] Kossowski J., Owczarzy J., Woronowicz P., Monitoring chłodziń kominowych – ciągła ocena efektywności układu chłodzenia, Gospodarka paliwami i energią, tom 12, 2001
- [11] Ledwoń J., Golczyk M., Chłodziń kominowe i wentylatorowe, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1967
- [12] Lewiński P., Więch P., Analiza diagnostyczna uszkodzeń chłodziń kominowych, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, tom 90, 19/2008
- [13] Melcer J., Important moments in the history of structural aerodynamics, MATEC Web of Conferences 107, tom 00074, 1–5/2017, DOI:10.1051/mateconf/201710700074
- [14] Mulyandasari V., Cooling Tower Selection and Sizing Engineering Design Guideline
- [15] Seręga S., Płachecki M., Nieliniowa analiza nośności powłoki hiperboloidalnej chłodziń kominowej z uwzględnieniem nowych wymagań normowych, Inżynieria i Budownictwo, 4/2013, str. 213–216
- [16] Zembaty W., Systemy i urządzenia chłodzące elektrowni ciepłych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993
- [17] Indian Standard IS 11504:1985 Criteria for structural design of reinforced concrete natural draught cooling towers
- [18] PN-64/B-02011: Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem
- [19] PN-EN 1991-1-4:2005 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje Część 1-4: Oddziaływania ogólne Oddziaływanie wiatru
- [20] VGB PowerTech, Structural Design of Cooling Towers, 2010

PROGRAMY KOMPUTEROWE

- [R1] RFEM 5.23.02, Dlubal Software GmbH
- [R2] RF-DYNAM Pro, Dlubal Software GmbH
- [R3] RF-COM, Dlubal Software GmbH
- [R4] RWIND Simulation, Dlubal Software GmbH