

ANDRZEJ FLAGA*, ŁUKASZ FLAGA**

BADANIA MODELOWE ODDZIAŁYWANIA WIATRU NA EKSPONAT MODELU AKWAPORYNY

WIND TUNNEL TESTS OF WIND ACTION ON AN AQUAPORINE MODEL EXHIBIT

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania modelowe oddziaływania wiatru na eksponat modelu akwaporyny, przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. W badaniach tych spełniono większość z kryteriów podobieństwa opracowanych specjalnie w tym celu. Ponadto wykonano ocenę bezpieczeństwa eksponatu przy oddziaływaniu na niego silnego wiatru.

Słowa kluczowe: eksponat modelu akwaporyny, kryteria podobieństwa, badania aerodynamiczne

Abstract

In the paper, wind tunnel tests of wind action on an aquaporine model exhibit performed in a boundary layer wind tunnel of the Wind Engineering Laboratory at the Cracow University of Technology have been presented. In the experiments, most of the similarity criteria elaborated specially for this purpose have been fulfilled. Moreover, safety assessments of the exhibit with respect to a strong wind action have been done.

Keywords: aquaporine model exhibit, similarity criteria, wind tunnel tests

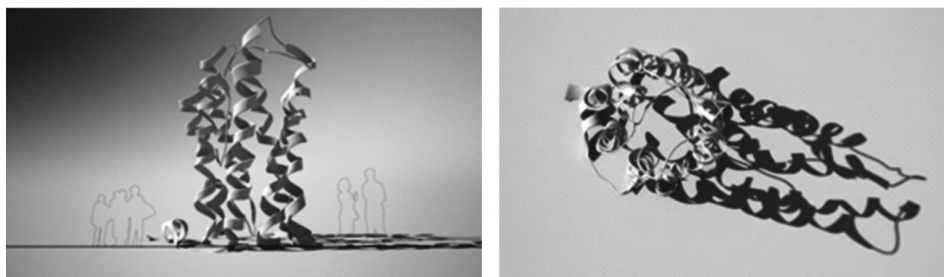
* Prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

** Mgr inż. Łukasz Flaga, Samodzielna Pracownia Architektoniczna, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Krakowska.

1. Przedmiot badań

Centrum Nauki „Kopernik” w Warszawie jest kompleksem budynków o dwóch kondygnacjach naziemnych i wysokości 11,80 m (lokalne przewyżki do 16 m wysokości: platforma widokowa planetarium oraz punkt zawieszenia wahadła Foucaulta) i jednej kondygnacji podziemnej. Teren inwestycji położony jest między Mostem Świętokrzyskim na południu, a ul. Lipową na północy Warszawy. Teren ten znajduje się częściowo nad tunelem Wisłostrazy.

Ekspонат artystyczny modelu akwaporyny – zaprojektowany i wykonany przez firmę DELTA Rafał Mikke – jest umieszczony na dachu budynku Centrum segmentu „B” w sektorze 10 pomiędzy osiami F-G/16-17. Ten nietypowy, niezwykle złożony obiekt małej architektury, wykonany z tworzywa sztucznego wzmocnianego elementami konstrukcyjnymi, ma wysokość ponad 4 m. Wizualizacje komputerowe tego eksponatu wykonane w firmie DELTA Rafał Mikke, przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Wizualizacja komputerowa elewacji eksponatu a) elewacja, b) widok od góry

Fig. 1. Computer visualization of aquaporine model exhibit: a) elevation, b) top view

2. Cel i zakres opracowania

- Opracowanie kryteriów podobieństwa w badaniach modelu akwaporyny;
- Przeprowadzenie badań modelu akwaporyny w tunelu aerodynamicznym przy różnych średnich prędkościach wiatru i ośmiu kierunkach napływu strumienia na model; etap I – bez dodatkowych stężeń helis; etap II – z dodatkowymi stężeniami helis;
- Ocena bezpieczeństwa eksponatu przy oddziaływaniu wiatru.

3. Model do badań

Model wykonano w skali 1:4 zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami. Wymiary modelu wynoszą odpowiednio: szerokość 0,81 m, długość 0,81 m, wysokość 1,00 m. Zasadniczą część modelu stanowi 7 helis, każda o innym kształcie i wysokości, wykonanych z wysoko-modułowego kompozytu węglowo-epoksydowego, utwierdzonych w podstawie wykonanej z poliuretanu, napełnionego pyłem dymnicowym, o wysokości 0,125 m i wadze kilkudziesię-

ciu kilogramów (wielokrotnie wyższej od badanych helis). Łączniki helis wykonano z drutu miedzianego oblanego kompozytem szklano-epoksydowym. Ponadto w trakcie badań stwierdzono konieczność dodania stężeń. Stężenia te wykonano z drutu stalowego i przytwierdzono do modelu taśmą PCV.

Widok modelu w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Widok modelu w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego

Fig. 2. View of the model inside the wind tunnel test section

4. Kryteria podobieństwa w badaniach modelowych

4.1. Informacje wstępne

Z analizy wymiarowej można wyprowadzić określone relacje, jakie powinny być spełnione dla skal wielkości fizycznych charakteryzujących dane zjawisko aerodynamiczne [1]. W analizowanym przypadku przyjęto następujące zbiory wielkości fizycznych, istotne do opisu zachowania się modelu akwaporyny przy wpływach wiatru:

- Zbiór wielkości wymiarowych i bezwymiarowych charakteryzujących napływające powietrze:

$$(W) = (\rho, \nu, V, \alpha, \theta, I_v, L_v),$$

gdzie:

- ρ – gęstość powietrza atmosferycznego,
- ν – lepkość kinematyczna powietrza,
- V – prędkość średnia wiatru na wysokości odniesienia,
- α – bezwymiarowy wykładnik w profilu potęgowym wiatru,
- θ – średni kąt natarcia wiatru (bezwymiarowy),
- I_v – intensywność turbulencji (bezwymiarowa),
- L_v – skala turbulencji;
- Zbiór wielkości geometrycznych modelu akwaporyny:

$$((G)_i) = (K(s), D(s), B(s), H, s)_i,$$

gdzie:

- $i = 1, \dots, 7$ – numer helisy,
- $s = s(x, y, z)$ – współrzędna krzywoliniowa linii łączącej środki ciężkości przekrojów poprzecznych helisy,
- x, y, z – współrzędne kartezjańskie,
- $K(s)$ – kształt przekroju poprzecznego helisy (bezwymiarowy),
- $D(s), B(s)$ – charakterystyczne wymiary przekroju poprzecznego helisy,
- H – wysokość helisy;

– Zbiór wielkości mechanicznych modelu akwaporyny:

$$((M)_i) = ((\rho_m, \gamma, E, G, \sigma(s, x_p, y_p, t), p(s, x_c, y_c, t), A_v(s, t), R, g, s, x_p, y_p, x_c, y_c, t)_i),$$

gdzie:

- ρ_m – gęstość materiału helisy,
- γ – bezwymiarowy współczynnik tłumienia krytycznego helisy,
- E, G – moduły odpowiednio sprężystości podłużnej i poprzecznej helisy,
- $\sigma(s, x_p, y_p, t)$ – naprężenie w przekroju poprzecznym helisy,
- $p(s, x_c, y_c, t)$ – ciśnienie wiatru na powierzchni helisy,
- $A_v(s, t)$ – amplituda drgań helisy,
- R – wytrzymałość materiału helisy,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- x_p, y_p, x_c, y_c – współrzędne punktu przekroju poprzecznego i punktu krzywej konturowej,
- t – czas.

Jako bazę wymiarową analizowanego zjawiska przyjęto trzy wielkości niezależne wymiarowo: ρ , V i L , których wymiary zawierają wymiary podstawowej bazy mechanicznej tj. masy, długości i czasu.

Dla dowolnej wielkości wymiarowej a_j stanowiącej parametr charakteryzujący badane zjawisko można napisać następujące relacje:

$$[a_j] = [\rho]^{\alpha_j} [V]^{\beta_j} [L]^{\gamma_j}$$

$$\left(\frac{a_j}{\rho^{\alpha_j} V^{\beta_j} L^{\gamma_j}} \right)_M = \Pi_{jM} = \Pi_{jN} = \left(\frac{a_j}{\rho^{\alpha_j} V^{\beta_j} L^{\gamma_j}} \right)_N$$

lub

$$\frac{a_{jM}}{a_{jN}} = k_{aj} = \frac{(\rho^{\alpha_j} V^{\beta_j} L^{\gamma_j})_M}{(\rho^{\alpha_j} V^{\beta_j} L^{\gamma_j})_N} = k_\rho^{\alpha_j} k_V^{\beta_j} k_L^{\gamma_j}$$

gdzie:

- k_ρ, k_V, k_L – skale wielkości bazy wymiarowej,
- k_{aj} – skale pozostałych wielkości zależnych wymiarowo.

Wówczas, przenosząc wyniki pomiarów uzyskanych z modelu na obiekt naturalny, należałoby korzystać z następujących relacji między skalami bazy wymiarowej: k_ρ, k_V, k_L oraz skalami pozostałych wielkości fizycznych charakteryzujących to zjawisko:

- skala lepkości k_ν : $[\nu] = [V][L]$; $k_\nu = k_\nu k_L$,
- skala skali długości korelacji (turbulencji) k_{L_v} : $[L_v] = [L]$; $k_{L_v} = k_L$,
- skale geometryczne k_D, k_B, k_H, k_s : $[D] = [L]$; $k_D = k_L$; $k_B = k_L$; $k_H = k_L$; $k_s = k_L$,
- skala gęstości masy k_{ρ_m} : $[\rho_m] = [\rho]$; $k_{\rho_m} = k_\rho$,
- skale modułów sprężystości k_E, k_G : $[E] = [\rho][V]^2$; $k_E = k_\rho k_V^2$; $k_G = k_\rho k_V^2$,
- skala ciśnień (naprężeń) $k_p(k_\sigma)$: $[p] = [\rho][V]^2$; $k_p = k_\rho k_V^2$; $k_\sigma = k_\rho k_V^2$,
- skala amplitud drgań k_{A_v} : $[A_v] = [L]$; $k_{A_v} = k_L$,
- skala wytrzymałości materiału: $[R] = [\rho][V]^2$; $k_R = k_\rho k_V^2$,
- skala grawitacji k_g : $[g] = [V]^2[L]^{-1}$; $k_g = k_V^2 k_L^{-1}$,
- skala czasu k_t : $[t] = [V]^{-1}[L]$; $k_t = k_V^{-1} k_L$.

Dla wszystkich wielkości bezwymiarowych – tj. wielkości niezależnych od układu jednostek miar – odpowiednie skale podobieństwa powinny być równe jedności. Czyli: $k_\alpha = 1$; $k_\theta = 1$; $k_\nu = 1$; $k_\gamma = 1$ (lub $k_\Delta = 1$, gdzie $\Delta = 2\pi\gamma$ – logarytmiczny dekrement tłumienia drgań).

Z przyjętymi wyżej zbiorami wielkości fizycznych charakteryzujących analizowane zjawisko aerodynamiczne można związać także inne zbiory wielkości fizycznych, np.: zbiór jednostkowych sił aerodynamicznych ($(P_a)_i$); zbiór jednostkowych sił grawitacyjnych ($(P_g)_i$); zbiór jednostkowych mas ($(m)_i$); zbiór jednostkowych momentów bezwładności masy ($(m_b)_i$); zbiór sztywności podłużnych, giętych i skrętnych ($(EA, EI, GI_s)_i$); gdzie A, I, I_s – odpowiednio pole przekroju, moment bezwładności przy zginaniu i moment bezwładności przy skręcaniu przekroju poprzecznego elementu; częstotliwość fluktuacji prędkości wiatru lub drgań f ; zbiór częstotliwości drgań własnych ($(f_w)_i$), itp. Wówczas skale pochodnych wielkości wymiarowych będą następujące:

- skala sił aerodynamicznych k_{P_a} : $[P_a] = [\rho][V]^2[L]$; $k_{P_a} = k_\rho k_V^2 k_L$,
- skala sił grawitacyjnych k_{P_g} : $[P_g] = [m][g] = [\rho][L]^2[V]^2[L]^{-1} = [\rho][V]^2[L]$; $k_{P_g} = k_\rho k_V^2 k_L$,
- skala częstotliwości k_f : $[f] = [V]^1[L]^{-1}$; $k_f = 1 / k_t = k_V k_L^{-1}$,
- skala jednostkowej gęstości masy k_m : $[m] = [\rho][L]^3$; $k_m = k_\rho k_L^3$,
- skala jednostkowej gęstości momentu bezwładności masy na jednostkę długości elementu (budowli) k_{m_b} : $[m_b] = [\rho][L]^4$; $k_{m_b} = k_\rho k_L^4$,
- skala sztywności podłużnej k_{EA} , giętej k_{EI} i skrętnej k_{GI_s} :
 $[EA] = [\rho][V]^2[L]^2$; $k_{EA} = k_\rho k_V^2 k_L^2$,
 $[EI] = [\rho][V]^2[L]^4$; $k_{EI} = k_\rho k_V^2 k_L^4$,
 $[GI_s] = [\rho][V]^2[L]^4$; $k_{GI_s} = k_\rho k_V^2 k_L^4 = k_{EI}$.

4.2. Dobór skal badanego zjawiska opływu modelu akwaporyny

Przyjęcie, iż w tunelu aerodynamicznym przepływającym płynem jest powietrze atmosferyczne w warunkach naturalnych oznacza, że przyjęto tu następujące skale podobieństwa:

- skalę gęstości: $k_\rho = \frac{\rho_M}{\rho_N} = 1$,
- skalę lepkości: $k_\nu = \frac{\nu_M}{\nu_N} = 1$
- skalę grawitacji: $k_g = \frac{g_M}{g_N} = 1$,
- skalę prędkości dźwięku (ściśliwość płynu): $k_a = \frac{a_M}{a_N} = 1$,

gdzie a – prędkość dźwięku.

Uwzględniając wymiary eksponatu w naturze i wymiary przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego, założono skalę podobieństwa geometrycznego $k_L \cong 1/4$.

Ponieważ faktycznie przyjętych jest na wstępie 5 skal podobieństwa, a można przyjąć tylko 3 skale jako niezależne, wnika stąd wniosek, że w ogólności mogą być nie spełnione inne skale podobieństwa (lub bezwymiarowe liczby kryterialne stanowiące określone kryteria podobieństwa).

Rozważmy teraz bardziej szczegółowo problem spełnienia poszczególnych skal podobieństwa w badaniach modelowych modelu akwaporyny:

● Skale wielkości charakteryzujących napływające powietrze ((W))

- skala gęstości $k_\rho = 1$ (założona i spełniona),
- skala lepkości $k_\nu = k_\nu k_L = 1$ (założona i niespełniona jeżeli $k_\nu k_L \neq 1$),
- skala prędkości k_ν (do ustalenia),
- skala profilu potęgowego $k_\alpha = 1$ (spełniona – wygenerowano w tunelu aerodynamicznym odpowiedni profil prędkości średniej wiatru),
- skala średniego kierunku wiatru $k_\theta = 1$ (spełniona – wygenerowano w tunelu aerodynamicznym odpowiednie kąty natarcia wiatru),
- skala intensywności turbulencji $k_{\nu'} = 1$ (spełniona – wygenerowano w tunelu odpowiedni poziom intensywności turbulencji napływającego powietrza),
- skala skali długości korelacji (turbulencji) $k_{L\nu'} = k_L$ (nie spełniona, gdyż na ogół w tunelu aerodynamicznym $k_{L\nu'} \neq k_L$).

● Skale wielkości geometrycznych modelu akwaporyny ($(G)_i$)

Model wykonano wiernie w skali $k_L \cong 1/4$. Wobec tego skale wielkości geometrycznych ($(G)_i$) są takie same i wynoszą $k_L \cong 1/4$.

● Skale wielkości mechanicznych modelu akwaporyny ($(M)_i$)

Przyjęto, iż materiał modelu akwaporyny jest taki sam jak i materiał eksponatu. Wynikają stąd następujące relacje:

- skala gęstości masy $k_{\rho m} = k_\rho = 1$ (spełniona),

- skala tłumienia drgań $k_\gamma = k_\Delta = 1$ (spełniona),
- skala modułów sprężystości $k_E = k_G = k_\rho k_V^2 = k_V^2 = 1$ (będzie spełniona, jeżeli $k_V = 1$),
- skala ciśnień (naprężeń) $k_p = k_\sigma = k_\rho k_V^2 = k_V^2$ ($k_p = k_\sigma = 1$, jeżeli $k_V = 1$),
- skala amplitud drgań $k_{A_v} = k_L = 1/4$,
- skala wytrzymałości materiału $k_R = k_\rho k_V^2 = k_V^2 = 1$ (będzie spełniona, jeżeli $k_V = 1$),
- skala grawitacji $k_g = k_V^2 k_L^{-1} = 4k_V^2 = 1$ (niespełniona, jeśli $k_V \neq 1/2$),
- skala czasu $k_t = k_V^{-1} k_L = \frac{1}{4} k_V^{-1}$ ($k_t = 1/4$, jeśli $k_V = 1$),
- skala częstotliwości $k_f = k_{f_w} = k_V k_L^{-1} = 4k_V$ ($k_f = k_{f_w} = 4$, jeśli $k_V = 1$).
- Dla skal związanych z powyższymi wielkościami będzie:
- skala jednostkowej gęstości masy $k_m = \frac{(\rho_m A)_M}{(\rho_m A)_N} = k_A = k_\rho k_L^2 = k_L^2 = \frac{1}{16}$ (spełniona),
- skala jednostkowej gęstości momentu bezwładności masy $k_{mb} = k_\rho k_L^4 = \left(\frac{1}{4}\right)^4$ (spełniona),
- skala sztywności podłużnej k_{EA} , giętej k_{EJ} i skrętnej k_{GIs} ,

$$k_{EA} = k_\rho k_V^2 k_L^2 = \frac{(EA)_M}{(EA)_N} = k_A = k_L^2$$
 (spełniona, jeżeli $k_V = 1$),

$$k_{EJ} = k_\rho k_V^2 k_L^4 = \frac{(EI)_M}{(EI)_N} = k_I = k_L^4$$
 (spełniona, jeżeli $k_V = 1$),

$$k_{GIs} = k_\rho k_V^2 k_L^4 = \frac{(GI_s)_M}{(GI_s)_N} = k_{Is} = k_L^4$$
 (spełniona, jeżeli $k_V = 1$),
- skala prędkości dźwięku $k_a = 1$ (spełniona).

Uwzględniając powyższe uwarunkowania przyjęto w badaniach $k_V = 1$. Z powyższej analizy wynika, że przy $k_V = 1$ nie spełnione są dwie skale:

- skala lepkości $k_\nu = k_V k_L = 1/4 \neq 1$,
- skala grawitacji $k_g = k_V^2 k_L^{-1} = 4 \neq 1$.

Z każdą ze skal podobieństwa lub z ich kombinacjami można związać bezwymiarowe liczby kryterialne, stanowiące określone kryteria podobieństwa analizowanych zjawisk. I tak np. z ostatnimi dwoma skalami, tj. skalą lepkości k_ν i skalą grawitacji k_g można związać dwie liczby kryterialne:

- liczbę Reynoldsa Re: $Re = \frac{VL}{\nu} = \text{idem}$,
- liczbę Froude’a Fr: $Fr = \frac{V^2}{gL} = \text{idem}$.

Spełnienie warunku liczby Reynoldsa Re : $\left(\frac{\rho VL}{\mu}\right)_M = \left(\frac{\rho VL}{\mu}\right)_N$ w sytuacji, gdy w tunelu

i w naturze przepływa to samo powietrze atmosferyczne, prowadzi do relacji: $k_V k_L = 1$ lub $k_V = k_L^{-1}$, co nie jest spełnione w badaniach przy założeniu $k_V = 1$. Tak więc skalowanie Reynoldsa jest niekompatybilne z wcześniej ustalonymi skalami, chyba że testowanie przebiega w warunkach naturalnych w wówczas $k_L = 1$.

Z kolei zaś z równości liczby Froude'a Fr : $\left(\frac{V^2}{gL}\right)_M = \left(\frac{V^2}{gL}\right)_N$ wynika, że: $\frac{k_V^2}{k_g k_L} = \frac{k_V^2}{k_L} = 1$.

A zatem jeśli skalowanie Froude'a jest respektowane: $k_V = k_L^{1/2}$, co nie jest spełnione w badaniach przy założeniu $k_V = 1$.

Z powyższych rozważań wynika, że w badaniach modelowych nie spełnione są kryteria Reynoldsa i Froude'a. Liczba Reynoldsa uwzględnia wpływ sił lepkości płynu na badane zjawisko. Nie spełnienie tego kryterium w przypadku przekrojów porzeczných helis zbliżonych do prostokątnych nie prowadzi do istotnych błędów. Podobnie będzie w przypadku liczby Froude'a, która uwzględnia wpływ sił ciężkości na analizowane zjawisko. Naprężenia spowodowane tymi siłami są o rząd niższe od naprężeń spowodowanych oddziaływaniem wiatru. A więc nie spełnienie kryterium Froude'a również nie prowadzi w tym przypadku do istotnych błędów.

5. Opis badań

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej [2]. W badaniach tych oprócz autorów pracy brali również udział Renata Kłaput oraz Piotr Matys. Więcej na ten temat podano w raporcie [3].

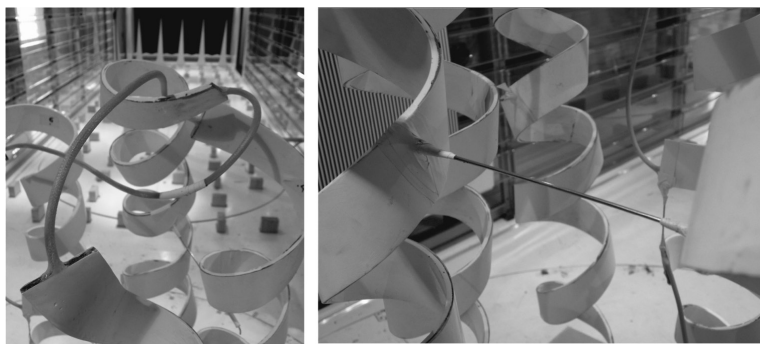
Warstwa przyścienna była symulowana przez barierkę, układ iglic i klocki. Badania prowadzono przy wysokości klocków 5 cm (rys. 2). Odpowiada to w naturze chropowatości terenu B (według PN-77/B-02011(1977) – lub chropowatości terenu II (według PN-EN 1991-1-4 (2008)). Warszawa leży w I strefie wiatrowej, której odpowiada prędkość bazowa wiatru 22 m/s.

Intensywność turbulencji w badaniach wynosiła około 25%.

Przeprowadzono badania wstępne bez dodatkowych stężeń helis przy prędkości średniej wiatru 8,5 m/s. Badania te wykazały nadmierną podatność helis na drgania łącznie z bezpośrednim wzajemnym uderzaniem helis o siebie. Doświadczenie to było podstawą podjęcia decyzji o dodatkowym stężeniu wszystkich helis, głównie w górnych ich partiach (rys. 3).

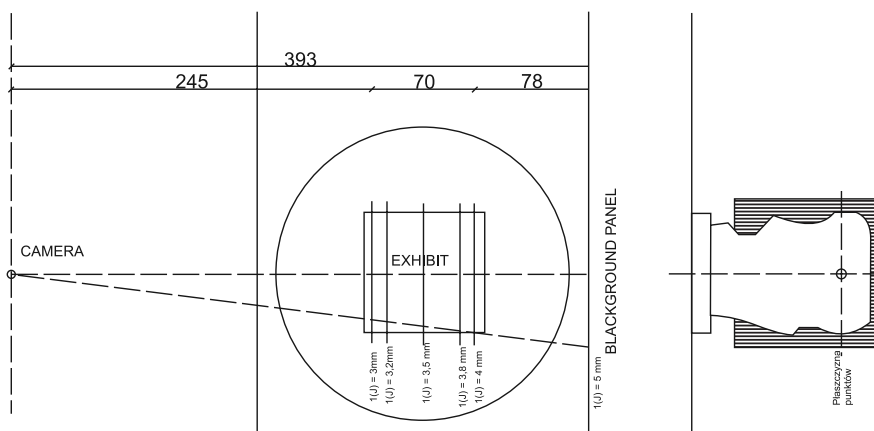
Następnie przeprowadzono badania eksponatu przy 8 kierunkach napływu wiatru (co 45°) kolejno przy prędkościach średnich 8,5 m/s, 12,6 m/s, 18,2 m/s, 20,8 m/s i 26,7 m/s.

W badaniach wykorzystano technikę fotogrametrii. Schemat przeprowadzenia badań zamieszczono na rys. 4 i rys. 5 Na każdej z helis umieszczono punkt, którego ruch następnie był rejestrowany serią zdjęć z określonym krokiem czasowym. Dla każdego z 8 położań modelu wykonano 90 fotografii w ciągu 6 s, uzyskując ruch helis (odkształcenie od pozycji początkowej) wywołany oddziaływaniem strumienia powietrza w tunelu.



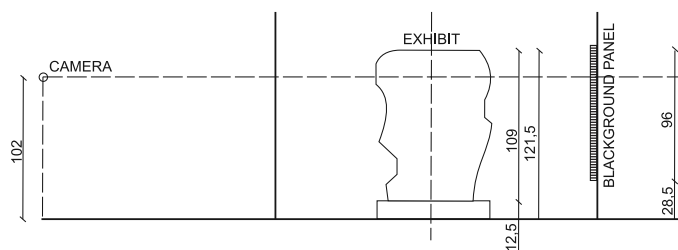
Rys. 3. Widok stalowych prętów – elementów stężących model: a) stężenia główne, b) stężenia dodatkowe

Fig. 3. Strengthening elements of the model: a) main steel wires, b) steel wire additional bracing



Rys. 4. Schemat przeprowadzenia badań, rzut

Fig. 4. Experiment scheme top view



Rys. 5. Schemat przeprowadzenia badań, przekrój

Fig. 5. Experiment scheme front view

6. Wyniki pomiarów

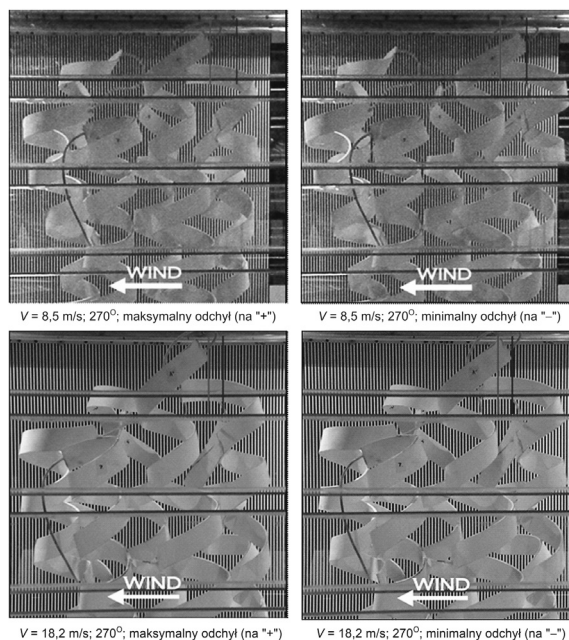
Wyniki pomiarów prędkości napływającego strumienia, opracowane na podstawie sondy ciśnienia dynamicznego, przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1
Wyniki pomiarów prędkości średniej
 V_{sr} i V_{max} [m/s]

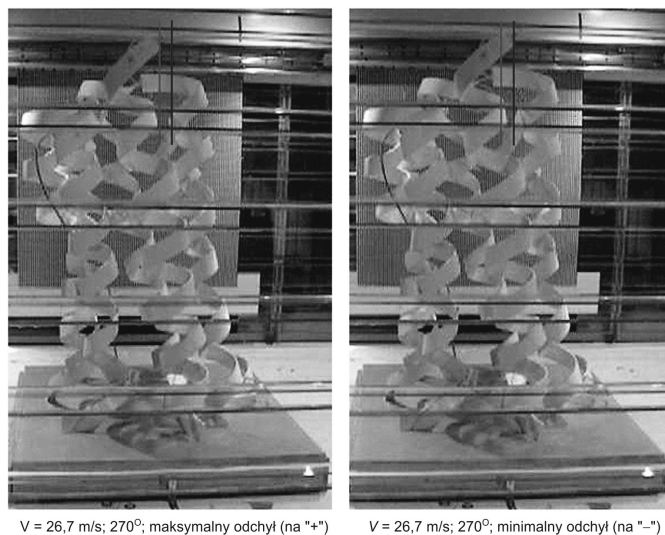
V_{sr}	V_{max}
8,5	10,7
12,6	15,7
18,2	20,1
20,8	22,9
26,7	28,8

Przykładowe wyniki badań drgań helis przedstawiono na rys. 6.

W wyniku obróbki komputerowej przemieszczeń zaznaczonych punktów helis odczytano ich przemieszczenia średnie oraz amplitudy drgań każdego z punktów. Wyniki badań przedstawiono w tabelach: 2, 3 i 4.



Rys. 6. Przykładowe wyniki drgań helis, odkształcenie modelu helis przy prędkości wiatru równej 8,5 m/s oraz 18,2 m/s: a) maksymalne, b) minimalne
Fig. 6. Deformations of model of aquaporine model exhibit at wind velocity of 8,5 m/s and 18,2 m/s: (a) maximum displacement (b) minimum displacement



Rys. 7. Przykładowe wyniki drgań helisy, odkształcenie modelu helisy przy prędkości wiatru równej 26,7 m/s: a) maksymalne, b) minimalne

Fig. 7. Deformations of model of aquaporine model exhibit at wind velocity of 26,7 m/s: a) maximum displacement, b) minimum displacement

Tabela 2

Amplitudy drgań, od odchylenia średniego, poszczególnych helisy przy prędkości wiatru 18,2 m/s [mm]

Kąt	0				45				90			
	+	p.0	-	Amplituda	+	p.0	-	Amplituda	+	p.0	-	Amplituda
1	15,8	13,1	10,5	26,25	12	10	8	20	15,2	12,6	10	25,2
2	12	13	14	26	12	10	8	20	14,1	12,6	11,1	25,2
3	13,3	12,4	11,4	24,7	14	12,3	10,5	24,5	13,8	12,5	11,2	24,96
4	13,4	11,5	9,6	23,04	16	14,4	12,8	28,8	12	15	18	30
5	10,5	9,75	9	19,5	13,5	14,3	15	28,5	19,2	20,8	22,4	41,6
6	12	10,5	9	21	12,8	12,8	12,8	25,6	15,8	16,6	17,5	33,25
7	9,6	12	14,4	24	10,5	8,75	7	17,5		0		0

Kąt	135				180				225			
	+	p.0	-	Amplituda	+	p.0	-	Amplituda	+	p.0	-	Amplituda
1	10,5	14	17,5	28	12,4	12,2	12	24,37	9,75	10,9	12	21,75
2	9,6	12,8	16	25,6	12,3	11,1	9,9	22,2	11,2	11,9	12,5	23,7
3	13,5	11,3	9	22,5	9,75	9,38	9	18,75	7	8,75	10,5	17,5
4	12,8	12,8	12,8	25,6	13,4	11,3	9,18	22,58	10,5	11,3	12,1	22,55
5	24,5	19,3	14	38,5	10,5	10,4	10,3	20,71	11,6	10,8	10	21,6
6	17,1	13,3	9,5	26,6	13	12,1	11,2	24,2	10,5	11,7	12,9	23,37
7	8	8,25	8	16,5	9,5	9,5	9,5	19	11,2	9,6	8	19,2

cd. tab. 2

Kąt	270				315			
	+	p.0	-	Amplituda	+	p.0	-	Amplituda
1	10,5	11,3	12	22,5	25,6	16	6,4	32
2	12,8	13,6	14,4	27,2	22,8	16,7	10,6	33,44
3	9,5	11	12,4	21,9	12	14	16	28
4	10	11,8	13,6	23,6	19	13,3	7,6	26,6
5	13,3	12,4	11,4	24,7	15,8	13,1	10,5	26,25
6	13,2	13,2	13,2	26,4	9	10,5	12	21
7	6	6,75	7,5	13,5	7,5	8,25	9	16,5

Odległość badanej helisy
od aparatu rejestrującego

315 [cm]	
305	
280	
255	
245	

Tabela 3

**Amplitudy drgań helis, dla wybranego kąta 270°
przy różnych prędkościach wiatru [mm]**

Amplituda drgań dla kąta 270° [mm]			
10 m/s	15 m/s	22 m/s	32 m/s
96	30	25,01	54
86	28	25,42	28
60	21	22,85	28
88	24	25,35	56
80	24	27,67	30
109	25	25,18	40
48	18	15,78	30

Tabela 4

**Odchylenie średnie helis, dla wybranego kąta 270°
przy prędkości wiatru 22 m/s [mm]**

Odchylenie średnie dla kąta 270° [mm]	
22 m/s	
	67
	22
	26
	65
	31
	46
	22

7. Wnioski

Ekspонат akwaporny wystawiony na oddziaływanie wiatru w warunkach naturalnych bezpiecznie przeniesie to oddziaływanie, pod warunkiem dodatkowego stężenia wszystkich helis w górnych ich partiach. Model akwaporny badany w tunelu aerodynamicznym prze-

niósł bezpiecznie oddziaływanie strumienia powietrza w zakresie prędkości do maksymalnej średniej prędkości przepływu równej $V = 26,7$ m/s, co przekracza prędkość bazową dla analizowanej lokalizacji równą 22 m/s.

Dodatkowe stężenie helis radykalnie zmniejsza ich przemieszczenia średnie i amplitudy drgań.

Tłumienie konstrukcyjne materiału akwaporyny jest bardzo małe, stąd nawet przy małych prędkościach wiatru amplitudy drgań są znaczące. Analizując wyniki badań dotyczących amplitud drgań helis można jednak zauważyć, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu znacząco wzrasta również tłumienie aerodynamiczne drgań, co korzystnie wpływa na obniżenie amplitud drgań helis.

L i t e r a t u r a

- [1] F l a g a A., *Inżynieria wiatrowa – podstawy i zastosowania*, Arkady, Warszawa 2008.
- [2] F l a g a A., *Laboratorium Inżynierii Wiatrowej z tunelem aerodynamicznym Politechniki Krakowskiej*, Inżynieria i Budownictwo, 3-4, 2002, 193-197.
- [3] F l a g a A., M a t y s P., K ł a p u t R., F l a g a Ł., *Raport z pracy naukowo-badawczej: Przeprowadzenie badań oddziaływań wiatru na konstrukcję modelu akwaporyny*, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.