BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-B/2012
ZESZYT 20
ROK 109
ISSUE 20
YEAR 109

GRZEGORZ BOSAK*

BADANIA INTERFERENCJI AERODYNAMICZNEJ ZBIORNIKÓW DWUPŁASZCZOWYCH

WIND TUNNEL TESTS OF AERODYNAMIC INTERFERENCE OF DOUBLE-SHELL TANKS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań interferencji aerodynamicznej stalowych zbiorników dwupłaszczowych o dachu stałym i pływającym. Układ interferencyjny składał się z dwóch zbiorników. Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną.

Słowa kluczowe: *zbiornik dwupłaszczowy*, *interferencja aerodynamiczna*

Abstract

The paper summarizes the results of wind tunnel tests of aerodynamic interference between steel double-shell tanks with fix and floating roof. The interference configuration has been consisted of two tanks. Aerodynamic tests have been accomplished in boundary layer wind tunnel.

Keywords: *double-shell tank*, *aerodynamic interference*

* Dr inż. Grzegorz Bosak, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

p_{net} – chwilowe wypadkowe ciśnienie wiatru [Pa]
p_e – chwilowe ciśnienie wiatru na powierzchni zewnętrznej [Pa]
q_{ref} – ciśnienie referencyjne na poziomie z [Pa]
$\overline{p}_{net}$ – średnia wartość wypadkowego ciśnienia wiatru [Pa]
$\overline{p}_e$ – średnia wartość ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej [Pa]
$C_{p,net}$ – współczynnik aerodynamiczny wypadkowego ciśnienia wiatru
C_{pe} – współczynnik aerodynamiczny ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej
I_p^c – współczynnik interferencji aerodynamicznej ciśnienia wiatru
L – odległość osi środkowych modeli zbiorników [mm]
D_z – średnica płaszcza zewnętrznego modeli zbiorników [mm]
D_w – średnica płaszcza wewnętrznego modeli zbiorników [mm]
H_z – wysokość płaszcza zewnętrznego modeli zbiorników [mm]
H_w – wysokość płaszcza wewnętrznego modeli zbiorników [mm]
Re – liczba Reynoldsa
V_{ref} – prędkość referencyjna [m/s]
I_v – współczynnik intensywności turbulencji
dir – kierunek napływu wiatru [°]
α – wykładnik prawa potęgowego pionowego profilu wiatru
λ – smukłość zbiornika

1. Wstęp

Zbiorniki dwupłaszczowe o dachach stałych i pływających wykorzystywane są zwykle w zakładach petrochemicznych do składowania ropy naftowej. Niższy płaszcz zewnętrzny o większej średnicy oraz podwójne dno mają uniemożliwić w przypadku nieszczelności płaszcza wewnętrznego przedostanie się ropy naftowej do ośrodka gruntowego. Tym samym, ze względów ekologicznych, przy zastosowaniu dwóch płaszczy nie wymaga się budowy wokół zbiornika rozległych niecek awaryjnych. Tego typu zbiorniki można budować w bliższych odległościach od siebie, podnosząc wydajność składowania danego terenu. Ponadto, ze względów pożarowych są to konstrukcje bardziej bezpieczne i umożliwiają podjęcie skuteczniejszej akcji przeciwpożarowej.

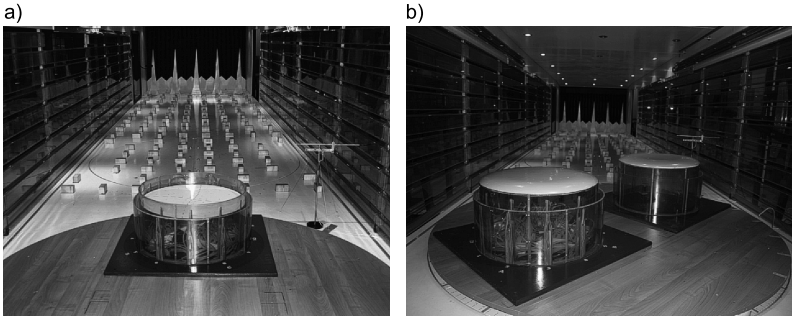
Płaszcze zbiornika są powłokami cienkimi projektowanymi głównie na parcie hydrostatyczne działające na powierzchnię wewnętrzną od materiału składowanego. W tym przypadku występują zasadniczo naprężenia rozciągające. Płaszcze zbiorników pustych albo częściowo wypełnionych są szczególnie narażone na naprężenia ściskające. Działanie wiatru powoduje tego typu naprężenia. W przypadku układów grupowych zbiorników, co należy uznać za normę ich lokalizacji, występuje problem interferencji aerodynamicznej, która może spowodować zwielokrotnienie działania wiatru w wyniku wzajemnego oddziaływania śladów aerodynamicznych poszczególnych zbiorników. Badania aerodynamiczne, których wyniki przedstawiono w niniejszym artykule, przeprowadzono dla układu interferencyjnego

złożonego tylko z dwóch zbiorników dwupłaszczowych. Oszacowanie jakościowe i ilościowe wpływu interferencji aerodynamicznej na działanie wiatru na zbiornik dwupłaszczowy było głównym celem badań w tunelu.

Przedmiotem badań były stalowe cylindryczne zbiorniki dwupłaszczowe o osi pionowej z dachem stałym i pływającym. Układ interferencyjny, jak wspomniano wyżej, składał się z dwóch zbiorników. Przyjęto odległość między osiami zbiorników L opisaną ilorazem L/D_z=1,5, gdzie D_z – średnica płaszcza zewnętrznego. Rozpatrzono trzy położenia dachu pływającego – $0{,}35H_w$, $0{,}5H_w$, $0{,}75H_w$, gdzie H_w – wysokość płaszcza wewnętrznego.

W badaniach w tunelu aerodynamicznym mierzono ciśnienia wiatru na płaszczu zewnętrznym, wewnętrznym oraz na dachu stałym i pływającym.

W pierwszym etapie zbadano model pojedynczego zbiornika przy różnych konfiguracjach dachu, w drugim etapie wprowadzono w przestrzeń pomiarową model sytuacyjny zbiornika w celu wyznaczenia wpływu interferencji aerodynamicznej na rozkład ciśnień wiatru na płaszczach i dachach zbiornika. Na rys.1 przedstawiono przestrzeń pomiarową tunelu aerodynamicznego z badanymi modelami zbiorników w dwóch analizowanych sytuacjach pomiarowych: braku interferencji i w układzie interferencyjnym. Badania wykonano w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.



Rys. 1. Sytuacje pomiarowe: a) brak interferencji, b) układ interferencyjny w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego

Fig. 1. Measurement situations: a) non-interference configuration, b) interference configuration in wind tunnel working section

2. Charakterystyka przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną. Przekrój poprzeczny przestrzeni pomiarowej w kształcie prostokąta ma wymiary: wysokość 1,4 m, szerokość 2,2 m. Pomiary zostały przeprowadzone w następujących warunkach:

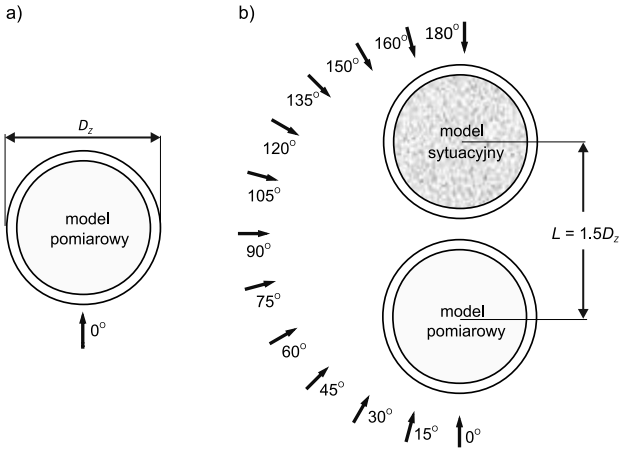
– skala podobieństwa geometrycznego zbiorników 1:50,
– smukłość zbiornika $\lambda \approx 2$ ($\lambda = D_z/H_w$, D_z – średnica płaszcza zewnętrznego (średnica zbiornika), H_w – wysokość płaszcza wewnętrznego (wysokość zbiornika)),
– pionowy profil prędkości wiatru był opisany prawem potęgowym o wykładniku $\alpha = 0{,}2$,

– średnia intensywność turbulencji $I_v = 0{,}2$,
– prędkość referencyjna $V_{ref} = 20$ m/s na wysokości górnej krawędzi płaszcza wewnętrznego zbiornika,
– liczba Reynoldsa Re = $5 \cdot 5 \cdot 10^{5.}$

Na płaszczu zewnętrznym mierzono wypadkowe ciśnienie wiatru, na dachach ciśnienie na powierzchni zewnętrznej, natomiast na płaszczu wewnętrznym było to ciśnienie wypadkowe lub ciśnienie na powierzchni zewnętrznej. Zależało to od rodzaju dachu oraz położenia dachu pływającego.

2.1. Sytuacje pomiarowe

W przypadku pojedynczego zbiornika ze względu na osiową symetrię obiektu pomiar został wykonany tylko przy kierunku napływu wiatru 0° (rys. 2a). W układzie grupowym z modelem sytuacyjnym, w interferencyjnej sytuacji pomiarowej, badania wykonano przy zmienności kierunku napływu wiatru od 0 do 180° co 15° zgodnie z rys. 2b, ze względu na symetrię płaszczyznową układu.



Rys. 2. Sytuacje pomiarowe: a) braku interferencji, b) interferencyjna

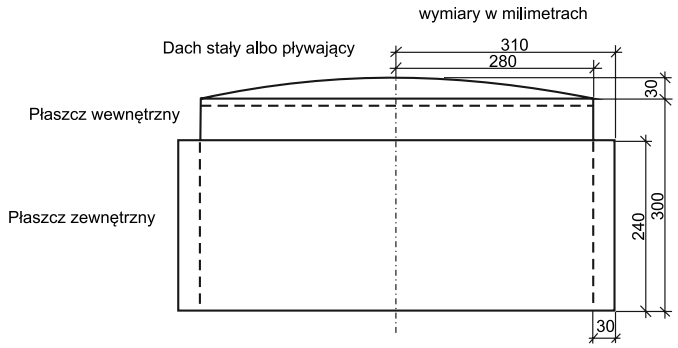
Fig. 2. Measurement situations: a) non-interference configuration, b) interference configuration

Zbiornik pojedynczy oraz układy dwóch zbiorników były badane z różnymi dachami: dachem stałym i dachem pływającym w trzech położeniach. Przyjęto zasadę, że w przypadku sytuacji interferencyjnej konfiguracja dachu modelu pomiarowego i sytuacyjnego jest jednakowa. Podsumowując, zakres badań obejmował 56 przypadków badawczych (4 pojedynczego zbiornika, 52 układu interferencyjnego).

2.2. Modele zbiorników do badań

W celu przeprowadzenia badań zostały wykonane dwa modele cylindrycznych zbiorników dwupłaszczowych o osi pionowej i smukłości $\lambda \approx 2$ ($\lambda = D_z/H_w$, D_z – średnica płaszcza zewnętrznego (średnica zbiornika), H_w – wysokość płaszcza wewnętrznego (wysokość

zbiornika)). Pierwszy z nich nie posiadał żadnego oprzyrządowania pomiarowego, dlatego nazwano go modelem sytuacyjnym (biernym). Drugi model, model pomiarowy (czynny), zaopatrzono w obwodowo rozmieszczone punkty pomiaru ciśnienia wiatru na płaszczu zewnętrznym i wewnętrznym. Schemat modelu zbiornika przedstawia rys. 3.



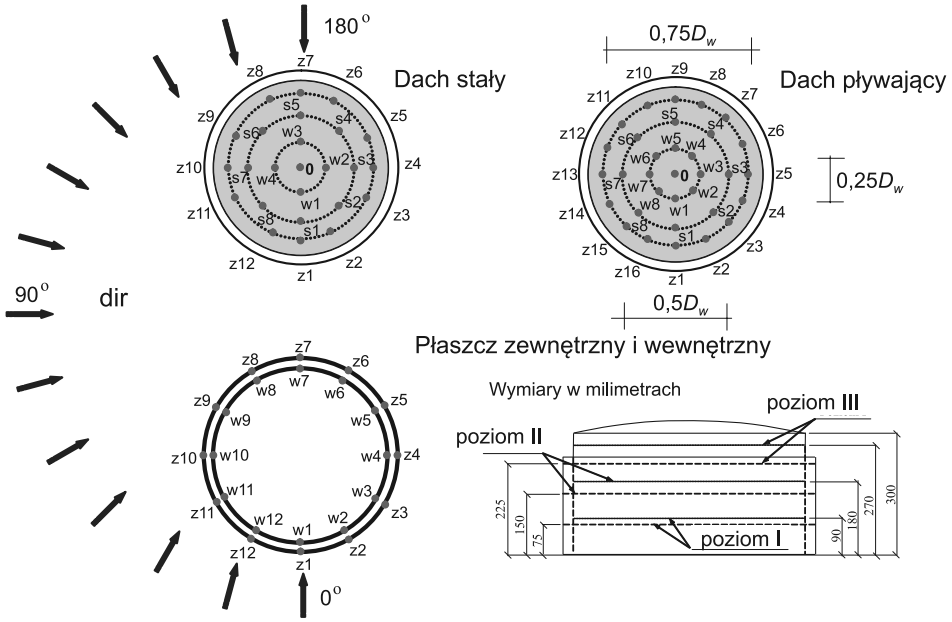
Rys. 3. Schemat modelu zbiornika
Fig. 3. Schematic drawing of the tank model

Pomiar ciśnień wiatru na analizowanych powierzchniach zbiornika odbywał się techniką przekazania ciśnienia z otworu na danej powierzchni modelu kanałami ciśnienia do elektronicznych sensorów skanera ciśnień. Początkowy odcinek kanału ciśnienia od danego punktu pomiarowego stanowi rurka miedziana o średnicy zewnętrznej 3 mm i grubości ścianki 0,5 mm. Rurki te umieszczono w obrębie płaszcza zewnętrznego i wewnętrznego na trzech różnych poziomach w każdym płaszczu. Dalszy odcinek kanału ciśnienia do skanera stanowi rurka silikonowa o średnicy wewnętrznej 2 mm (rys. 4).



Rys. 4. Szczegół punktu pomiarowego na powierzchni płaszcza zbiornika
Fig. 4. Measurement point detail on tank shell surface

Punkty pomiarowe (p.p.) na płaszczu zewnętrznym i wewnętrznym zostały rozmieszczone na trzech poziomach wysokościowych. Na każdym poziomie zainstalowano po 12 p.p. równomiernie co 30° (rys. 5.). Na dachu stałym wprowadzono 25 p.p., a na pływającym 32 p.p. Schematycznie konfigurację punktów pomiaru ciśnienia prezentuje rys. 5.



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiaru ciśnień (p.p.)
Fig. 5. Distribution of pressure taps

2.3. Tor pomiarowy

Rejestracja przebiegów czasowych ciśnień wiatru z punktów pomiarowych oraz ciśnienia referencyjnego była dokonana z częstotliwością próbkowania równą 200 Hz przez okres 30 s. W trakcie pomiarów wykorzystano skaner do pomiaru ciśnień różnicowych typu równoległego bazujący na piezorezystywnych, dwukierunkowych sensorach ciśnienia Motorola MPX2010. Analogowe sygnały napięciowe ze skanera ciśnień zbierano i archiwizowano za pomocą systemu Iotech DaqBook 2005 obsługiwanego przez oprogramowanie DasyLab. Zmierzone przebiegi czasowe chwilowych ciśnień wiatru poddano obróbce numerycznej w celu określenia wymaganych wielkości wykorzystywanych w analizie.

3. Wyniki badań

Wyniki przeprowadzonych badań zostaną przedstawione w sytuacji braku interferencji, a następnie w sytuacji interferencyjnej. Na podstawie badań obliczono współczynniki aerodynamiczne ciśnień, zestawiono ich ekstremalne wartości określając lokalizację ich wystąpienia oraz przygotowano wizualizację rozkładu wartości współczynników w poszczególnych obszarach modelu. W wyniku porównania sytuacji pojedynczego zbiornika i sytuacji interferencyjnej wyznaczono rozkłady współczynnika interferencji. Przeprowadzono ocenę uzyskanych rezultatów.

3.1. Sytuacja braku interferencji – pojedynczy zbiornik

W analizowanych obszarach modelu zbiornika (płaszcz zewnętrzny, płaszcz wewnętrzny, dach stały, dach pływający) obliczono rozkłady współczynników aerodynamicznych ciśnień (ogólnie C_p) w zależności od sposobu pomiaru ciśnienia na poszczególnych powłokach modelu zgodnie z wzorami (1).

$$C_{pe}(x,y,z)=\frac{\overline{p}_e(x,y,z)}{q_{ref}(z)},\quad C_{p,net}(x,y,z)=\frac{\overline{p}_{net}(x,y,z)}{q_{ref}(z)} \tag{1}$$

gdzie:

$C_{pe}(x,y,z)$ – współczynnik aerodynamiczny ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej,
$C_{p,\mathrm{net}}(x,y,z)$ – współczynnik aerodynamiczny wypadkowego ciśnienia wiatru,
$\overline{p}_e(x,y,z)$ – średnia wartość ciśnienia wiatru na powierzchni zewnętrznej,
$\overline{p}_{net}(x,y,z)$ – średnia wartość wypadkowego ciśnienia wiatru,
$q_{ref}(z)$ – ciśnienie referencyjne na poziomie z.

Na dachach zmierzono ciśnienie na powierzchni górnej, w przypadku płaszcza zewnętrznego pomiar dotyczył ciśnienia wypadkowego jako różnicy ciśnienia na powierzchni zewnętrznej i powierzchni wewnętrznej. Sposób pomiaru na płaszczu wewnętrznym zależał od konfiguracji dachu. W przypadku dachu stałego mierzono ciśnienie na powierzchni zewnętrznej. W czasie badań modelu z dachem pływającym, jeżeli punkty pomiarowe danego poziomu (rys. 5) znajdowały się powyżej poziomu dachu, to rejestrowano ciśnienie różnicowe. W przeciwnym przypadku dokonywano pomiaru ciśnienia tylko na powierzchni zewnętrznej.

W tabeli 1 zamieszczono ekstremalne wartości współczynników C_{pe} i $C_{p,net}$ w sytuacji braku interferencji. Podano tam, lokalizację punktu pomiarowego w którym wystąpiła określona wartość. Oznaczenia lokalizacji odnoszą się do rys.5. Oznaczenie typu *Iz4,10* określa, że dana wartość wystąpiła na *I* poziomie pomiarowym płaszcza zewnętrznego w punktach 4 i 10 jednocześnie. Dalej na rys. 6–8 prezentowane są w postaci barwnych map rozkłady współczynników w danych obszarach pomiarowych. Zakres wartości współczynników ujawniony w postaci podziałki jest wspólny dla wszystkich analizowanych przypadków i nie należy go utożsamiać z ekstremalnymi wartościami danej sytuacji pomiarowej.

W przypadku dachu stałego wartości współczynników aerodynamicznych należy uznać za typowe dla dachu płaskiego z krawędziami zaokrąglonymi. Rozkład wartości współczynników na dachu pływającym odzwierciedla sytuację dachu płaskiego z attyką. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami obserwuje się nieznaczne zwiększenie ssania przy obniżaniu dachu pływającego wraz z przesunięciem strefy wystąpienia ekstremalnych wartości od strony nawietrznej do środka dachu (rys. 7). W ocenie tej sytuacji należy wziąć pod uwagę fakt, że ciśnienie referencyjne było określane na poziomie montażu dachu oraz, że średnica okręgu zewnętrznego (rys. 5.) na którym rozmieszczono punkty pomiarowe na dachach wynosiła 0,75 D_w.

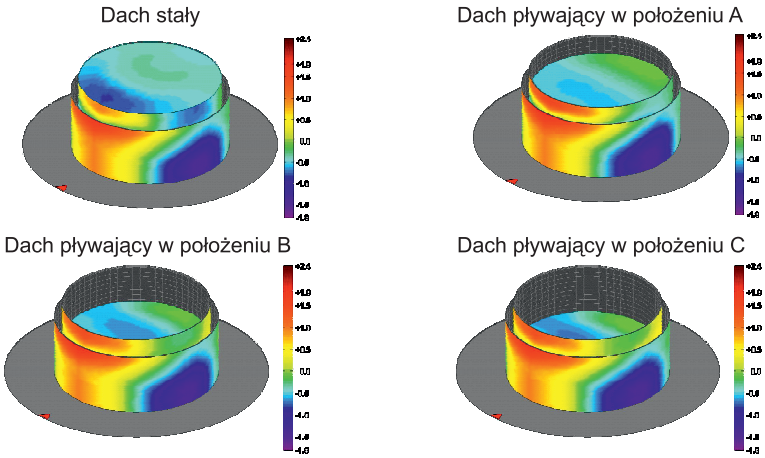
Ekstremalne wypadkowe ciśnienie parcia na płaszcz zewnętrzny, opisane współczynnikiem +1,8, wystąpiło przy górnej krawędzi nawietrznej powłoki. Ekstremalne wypadkowe

ciśnienie ssania o współczynniku –1,4, objęło dolny obszar płaszcza zewnętrznego w strefach bocznych. Na dole powłoki, jest to klasyczny rozkład tak jak na powierzchni walca, przy czym wartość wypadkowego współczynnika ssania, w zakresie analizowanej liczby Reynoldsa, jest niższa niż ciśnienia zewnętrznego na walcu, co jest wynikiem podciśnienia panującego w strefie między płaszczami. W górnej części rozkład ten traci cechy rozkładu na walcu, ze względu na wystąpienie efektów brzegowych. Rozkład współczynnika ciśnienia wypadkowego na płaszczu zewnętrznym nie zależy od konfiguracji dachu.

Tabela 1

Ekstremalne wartości współczynników C_{pe} i $C_{p,net}$ w sytuacji braku interferencji

Wariant dachu	C_p	dach stały		Dach pływający w położeniu A		Dach pływający w położeniu B		Dach pływający w położeniu C	
wartość		max	min	max	min	max	min	max	min
dach	C_{pe}	**–0,3** *0*	**–0,8** *z1*	**0,0** *z9*	**–0,6** *w1,2,8*	**–0,1** *z9*	**–0,67** *w3,7*	**–0,1** *z9*	**–0,74** *w3,7*
płaszcz zewnętrzny	$C_{p,net}$	**1,8** *IIIz1*	**–1,4** *Iz4,10*	**1,8** *IIIz1*	**–1,4** *Iz4,10*	**1,8** *IIIz1*	**–1,4** *Iz4,10*	**1,8** *IIIz1*	**–1,4** *Iz4,10*
płaszcz wewnętrzny	$C_{pe,}$ $C_{p,net}$	**0,95** *IIIw1*	**–0,8** *IIIw4,10*	**1,5** *IIIw1*	**–0,6** *IIw3,11*	**1,4** *IIIw1*	**–0,4** *Iw4,10*	**1,4** *IIIw1*	**–0,4** *Iw4,10*

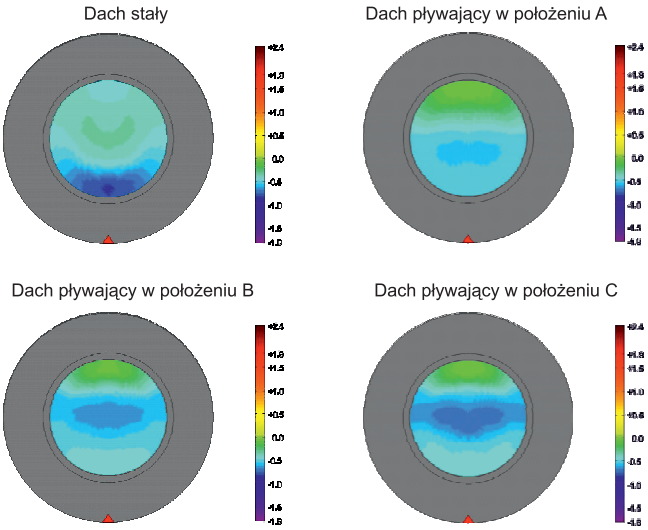


Rys. 6. Rozkłady współczynnika C_{pe} i $C_{p,net}$ w sytuacji braku interferencji

Fig. 6. Distribution of C_{pe} and $C_{p,net}$ coefficients in the non-interference configuration

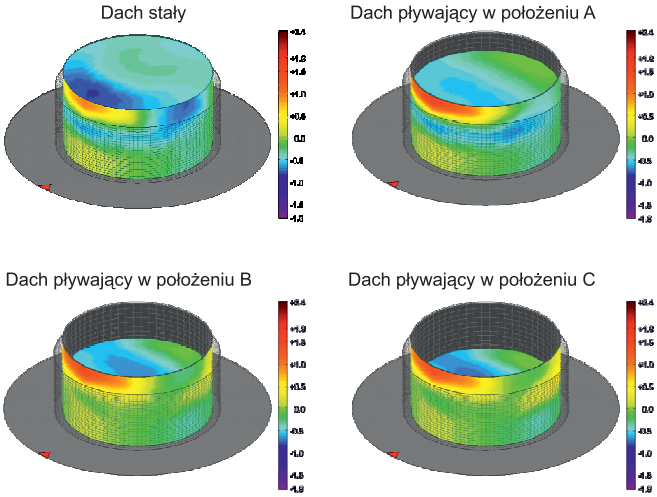
Na płaszczu wewnętrznym przy dachu stałym współczynniki ciśnienia zewnętrznego zmieniają się w zakresie od +0,95 do –0,8. Wystąpienie ekstremalnych wartości zarówno parcia i ssania jest związane z górną strefą, powyżej płaszcza zewnętrznego (rys. 8). Lokalizacja wystąpienia wartości ekstremalnych po obwodzie płaszcza jest analogiczna do loka-

lizacji na płaszczu zewnętrznym. Maksymalny współczynnik parcia należy uznać za typowy, natomiast ssanie charakteryzuje się znacząco mniejszą wartością, co związane jest najprawdopodobniej z silnym zaburzeniem brzegowym związanym z górną krawędzią płaszcza zewnętrznego.



Rys. 7. Rozkłady współczynnika C_{pe} na dachach w sytuacji braku interferencji

Fig. 7. Distribution of C_{pe} coefficient on the roofs in the non-interference configuration



Rys. 8. Rozkłady współczynnika C_{pe} i $C_{p,net}$ w sytuacji braku interferencji na płaszczu wewnętrznym

Fig. 8. Distribution of C_{pe} and $C_{p,net}$ coefficients on the internal shell in the non-interference configuration

W przypadku dachu pływającego, w analizowanych położeniach, wypadkowe ciśnienie parcia przy górnej nawietrznej krawędzi powłoki charakteryzuje współczynnik aerodynamiczny o wartości +1,5. Wartość ta zależy nieznacznie od położenia dachu pływającego (tabela 1). Przy położeniu najwyższym dachu (położenie A) oraz dachu stałym, obserwuje się charakterystyczny pas zwiększonego ssania na powierzchni zewnętrznej płaszcza wewnętrznego od strony nawietrznej poniżej poziomu górnej krawędzi płaszcza zewnętrznego. Wartość ciśnienia ssania w tym pasie opisuje współczynnik aerodynamiczny o wartości –0,6. Przy obniżeniu dachu (położenia B i C) ciśnienie ulega kompensacji z ciśnieniem panującym wewnątrz niecki płaszcza wewnętrznego i ekstremalny współczynnik ciśnienia wypadkowego stabilizuje się na wartości –0,4.

3.2. Sytuacja interferencyjna – dwa zbiorniki

W przypadku dwóch zbiorników, podobnie jak poprzednio, określono rozkłady współczynników aerodynamicznych w poszczególnych obszarach modelu przy analizowanych kierunkach napływu wiatru. Tabela 2 zawiera wartości ekstremalne współczynników aerodynamicznych z podaniem miejsca ich wystąpienia (oznaczenie punktu pomiarowego podobnie jak w sytuacji poprzedniej) oraz kierunku napływu wiatru przy którym ta wartość wystąpiła.

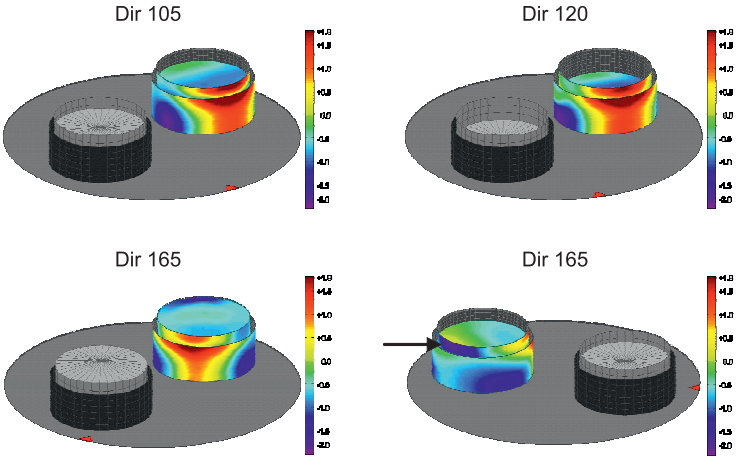
Tabela 2

Ekstremalne wartości współczynników C_{pe} i $C_{p,net}$ w sytuacji interferencji

Wariant dachu	C_p	Dach stały		Dach pływający w położeniu A		Dach pływający w położeniu B		Dach pływający w położeniu C	
wartość		max	min	max	min	max	min	max	min
dach	C_{pe}	**–0,3** 0° *0*	**–1,3** 165° *z3*	**0,2** 165° *z3*	**–0,95** 105° *w6*	**0,0** 165° *z3*	**–1,05** 120° *w8*	**0,0** 165° *z3*	**–1,1** 120° *w6*
płaszcz zewnętrzny	$C_{p,net}$	**2,3** 120° *IIIz9*	**–1,8** 105° *Iz7*	**2,4** 120° *IIIz9*	**–1,8** 105° *Iz7*	**2,4** 120° *IIIz9*	**–1,8** 105° *Iz7*	**2,4** 120° *IIIz9*	**–1,8** 105° *Iz7*
płaszcz wewnętrzny	C_{pe}, $C_{p,net}$	**1,1** 165° *IIIw8*	**–1,6** 165° *IIIw3*	**1,8** 120° *IIIw9*	**–1,8** 165° *IIIw3*	**1,7** 120° *IIIw9*	**–1,6** 165° *IIIw3*	**1,7** 120° *IIIw9*	**–1,8** 165° *IIIw3*

Na rysunku 9 prezentowane są rozkłady współczynników aerodynamicznych w sytuacjach pomiarowych przy kątach napływu wiatru 105°, 120° oraz 165°. Przy tych kierunkach napływu wiatru wystąpiły ekstremalne wartości współczynników aerodynamicznych w sytuacjach interferencji. Przy kącie napływu wiatru równym 165°, zamieszczono widoki z dwóch perspektyw w celu prezentacji obszaru wystąpienia ekstremalnego ssania wypadkowego na płaszczu wewnętrznym (oznaczenie strzałką).

Porównując wartości ekstremalne w sytuacji pojedynczego zbiornika i sytuacjach interferencyjnych, obserwuje się znaczące zwiększenie działania wiatru przy wystąpieniu interferencji.



Rys. 9. Rozkłady współczynnika C_{pe} i $C_{p,net}$ w wybranych sytuacjach interferencji

Fig. 9. Distribution of C_{pe} and $C_{p,net}$ coefficients in the chosen interference configurations

Na dachu stałym w sytuacji interferencji, maksymalne ssanie o współczynniku –1,3 występuje przy kierunku napływu wiatru 165° i jest rejestrowane od strony zawietrznej. Na dachu pływającym również zarejestrowano większe współczynniki ssania, przy czym ich ekstremalne wartości (około –1,0) występują przy kierunkach napływu wiatru 105°–120° od strony nawietrznej dachu.

Na płaszczu zewnętrznym maksymalny współczynnik parcia ciśnienia wypadkowego o wartości +2,4 występuje przy kierunku napływu wiatru 120°. Współczynnik ekstremalnego ssania wypadkowego równa się –1,8 przy kierunku napływu wiatru równym 105°. Nie obserwuje się istotnych zmian w rozkładzie ciśnienia na płaszczu zewnętrznym w zależności od konfiguracji dachu, podobnie jak to miało miejsce w przypadku zbiornika pojedynczego.

Najbardziej istotny wpływ interferencyjny, wyrażony w wartościach ekstremalnych, ujawnia się w przypadku ciśnień ssania na płaszczu wewnętrznym przy kierunku napływu wiatru 165°. Następuje wtedy zwiększenie ssania do wartości charakteryzowanej współczynnikiem –1,8 po stronie zawietrznej zbiornika w przypadku dachu pływającego. W przypadku dachu stałego współczynnik aerodynamiczny ciśnienia na powierzchni zewnętrznej w tym obszarze przyjmuje wartość –1,6. Porównanie tych wartości wskazuje na wystąpienie ciśnienia parcia po stronie wewnętrznej analizowanego płaszcza w sytuacji dachu pływającego. Wartość tego parcia można oszacować współczynnikiem o wielkości +0,2 i jest to współczynnik równy współczynnikowi ciśnienia na dachu pływającym w ty obszarze. Najprawdopodobniej znaczące zwiększenie ssania jest spowodowane dużym wzrostem prędkości przepływu wiatru w strefie między zbiornikami z jednoczesnym zawirowaniem strumienia powietrza w strefie analizowanego obszaru. Należy podkreślić, że zjawisko to, ze względu na wielkość obszaru, ma charakter lokalny.

3.3. Wartości współczynnika interferencji

W celu kompleksowego określenia wpływu interferencji aerodynamicznej na zmianę ciśnienia wiatru na poszczególne obszary zbiornika dwupłaszczowego, wyznaczono wartości współczynnika interferencji I_p^c zgodnie z wzorem (2):

$$I_p^c(x,y,z,dir,typ,obszar) = \frac{\left|C_p^I(x,y,z,dir,obszar) - C_p^S(x,y,z,dir,obszar)\right|_{typ}}{\max\left[\left|C_p^S(x,y,z,dir,obszar)\right|\right]_{obszar}} \quad (2)$$

gdzie:

dir – kierunek napływu wiatru,
x, *y*, *z* – współrzędne położenia danego punktu
I – oznaczenie sytuacji interferencyjnej – dwa zbiorniki,
S – oznaczenie sytuacji braku interferencji – jeden zbiornik,
typ – oznaczenie typu zmiany interferencyjnej ciśnienia zgodnie z tabelą 3,
obszar – dach stały, dach pływający, płaszcz zewnętrzny, płaszcz wewnętrzny.

Tabela 3

Oznaczenie typu zmiany ciśnienia w sytuacji interferencyjnej

Typ	Oznaczenie	Oznaczenie kolorystyczne	C_p^I	C_p^S	$C_p^I - C_p^S$
1	*neg* ↓		$C_p^I < 0$	$C_p^S \le 0$	$C_p^I - C_p^S < 0$
2	*neg* ↑		$C_p^I \le 0$	$C_p^S < 0$	$C_p^I - C_p^S \ge 0$
3	*pos* ↓ *neg*		$C_p^I \le 0$	$C_p^S > 0$	$C_p^I - C_p^S < 0$
4	*neg* ↑ *pos*		$C_p^I \ge 0$	$C_p^S < 0$	$C_p^I - C_p^S > 0$
5	*pos* ↓		$C_p^I \ge 0$	$C_p^S \ge 0$	$C_p^I - C_p^S \le 0$
6	*pos* ↑		$C_p^I > 0$	$C_p^S \ge 0$	$C_p^I - C_p^S > 0$

W liczniku wzoru współczynnika interferencji, występuje wartość bezwzględna z różnicy współczynników aerodynamicznych w sytuacji interferencji i sytuacji pojedynczego zbiornika. Wartość tą wyznaczono w danym punkcie, przy równoczesnym określeniu typu zmiany ciśnienia zgodnie z tabelą 3. Pozwala to na szczegółową ocenę charakteru, intensywności oraz zasięgu danej zmiany wartości ciśnienia w sytuacjach interferencyjnych. Wartość licznika porównuje się z mianownikiem, który stanowi maksymalna bezwzględna wartość współczynnika aerodynamicznego w sytuacji braku interferencji, określona w danym obsza-

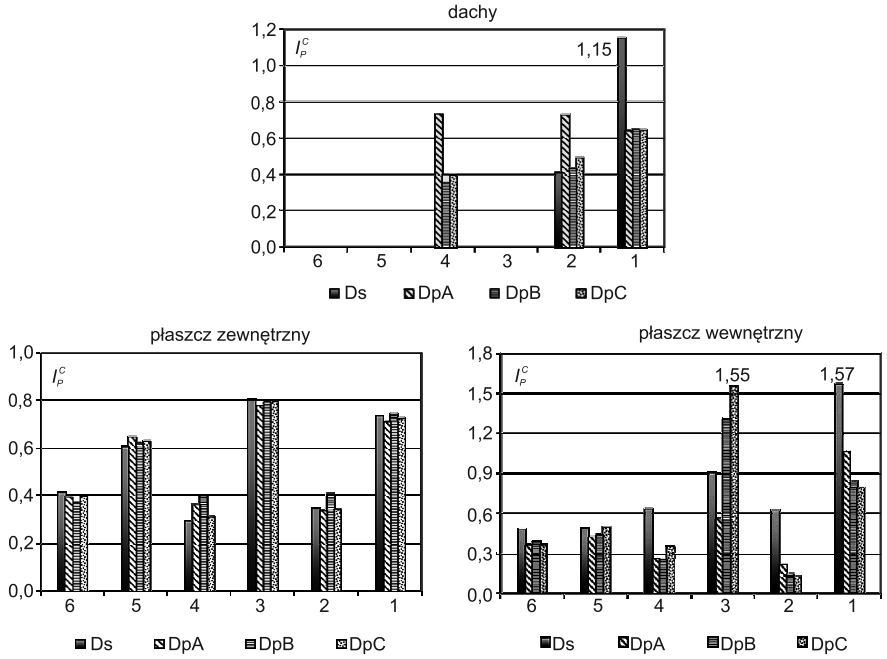
rze modelu (dach stały, dach pływający, płaszcz zewnętrzny, płaszcz wewnętrzny). Oznacza to, że określając daną zmianę np. na dachu stałym, porównujemy ją z maksymalną bezwzględną wartością współczynnika aerodynamicznego wyznaczonego dla dachu stałego w sytuacji braku interferencji. Koncepcja tego typu współczynnika wpisuje się w naturalne pojmowanie zmiany określonej wielkości fizycznej.

Tabela 4

Tablica ekstremalnych wartości współczynnika interferencji I_p^c

wariant dachu- dach stały			
typ	dach	płaszcz zewnętrzny	płaszcz wewnętrzny
6	0,00	0,42	0,48
5	0,00	0,61	0,48
4	0,00	0,30	0,63
3	0,00	0,81	0,91
2	0,41	0,35	0,62
1	1,15	0,74	1,57
wariant dachu- dach pływający w położeniu A			
typ	dach	płaszcz zewnętrzny	płaszcz wewnętrzny
6	0,00	0,40	0,36
5	0,00	0,65	0,42
4	0,73	0,36	0,26
3	0,00	0,78	0,55
2	0,73	0,34	0,21
1	0,64	0,71	1,06
wariant dachu- dach pływający w położeniu B			
typ	dach	płaszcz zewnętrzny	płaszcz wewnętrzny
6	0,00	0,37	0,38
5	0,00	0,62	0,44
4	0,35	0,40	0,24
3	0,00	0,80	1,31
2	0,44	0,41	0,15
1	0,65	0,74	0,83
wariant dachu- dach pływający w położeniu C			
typ	dach	płaszcz zewnętrzny	płaszcz wewnętrzny
6	0,00	0,40	0,36
5	0,00	0,63	0,49
4	0,40	0,31	0,34
3	0,00	0,79	1,55
2	0,49	0,34	0,12
1	0,65	0,73	0,79

Tabela 4 zawiera ekstremalne wartości współczynnika interferencji obliczone w analizowanych sytuacjach pomiarowych zgodnie z wzorem (2). Na rysunku 10 prezentowane są wartości z tabeli 4 z podziałem na obszary modelu (dachy, płaszcz zewnętrzny, płaszcz wewnętrzny) przy uwzględnieniu sześciu typów zmian ciśnienia.



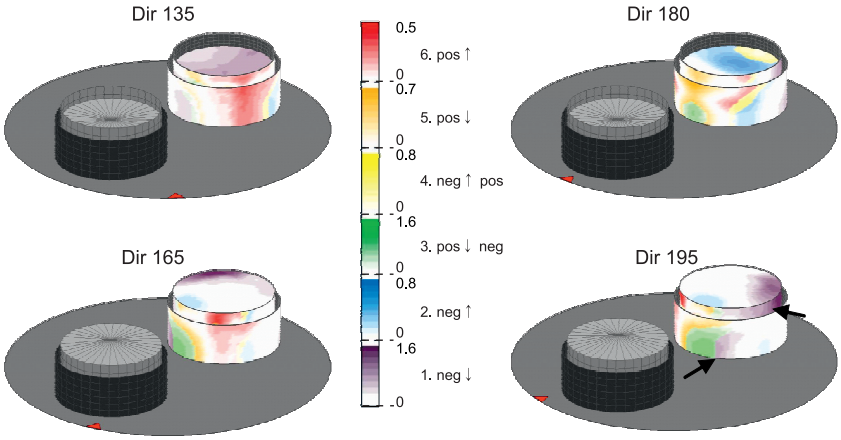
Rys. 10. Maksymalne wartości współczynnika I_p^c w analizowanych obszarach modelu przy uwzględnieniu typów zmian ciśnienia wiatru w sytuacjach interferencyjnych

Fig. 10. Maximum values of I_p^c coefficient in the interference configurations

Rysunek 11 prezentuje barwne mapy rozkładów współczynnika $I_p^c(x, y, z)$ w sytuacjach odpowiadających znaczącym wartościom zmian ciśnienia w sytuacjach interferencyjnych. Kierunki napływu wiatru przy których występują ekstremalne wartości współczynnika interferencji, przy uwzględnieniu typów zmian ciśnienia, zawiera tabela 5.

W przypadku dachów największą wartość współczynnika interferencji określono na dachu stałym. Zmiana polegała na zwiększeniu ciśnienia ssania (typ 1) i wystąpiła przy kierunku napływu wiatru 165° od strony zawietrznej dachu (rys. 10). Na dachu stałym nie zarejestrowano ciśnień parcia w sytuacji interferencyjnej (brak zmiany typu 4). Na dachu pływającym w położeniu A wystąpiły zmiany ciśnienia opisane typami 1, 2 oraz 4. Oznacza to, że rejestrowano zwiększenie ssania (typ 1), redukcję ssania (typ 2) oraz zmianę ciśnienia ssania na ciśnienie parcia (typ 4). Wielkość tych zmian w poszczególnych typach była porównywalna i wyrażona współczynnikiem interferencji o wartości około 0,7. Przy niższych położeniach dachu pływającego zarejestrowano również zmianę ciśnienia ssania na ciśnie-

nie parcia (typ 4), ale wartość współczynnika interferencyjnego opisującego tą zmianę była, w odniesieniu do dachu pływającego w położeniu A, blisko połowę niższa i wyniosła 0,4. Parcie występuje od strony zawietrznej zbiornika na ograniczonym obszarze dachu (rys. 10.).



Rys. 11. Rozkłady współczynnika I_p^c w wybranych sytuacjach interferencji

Fig. 11. Distribution of I_p^c coefficient in the chosen interference configurations

Płaszcz zewnętrzny podlega wszystkim typom zmiany ciśnienia. Wielkość tych zmian w poszczególnych typach nie zależy od konfiguracji dachu (rys. 10). Największa zmiana występuje w typie 3 tzn. ciśnienie parcia zmienia się na ciśnienie ssania. Ma to miejsce przy kierunku napływu wiatru 165° (tabela 5.), gdy strona nawietrzna zbiornika wchodzi w obszar śladu aerodynamicznego sąsiada. Kolejne zjawisko na płaszczu zewnętrznym to znaczące zwiększenie ciśnienia ssania (typ 1) przy kierunku napływu wiatru 165° na dolnej, bocznej powierzchni płaszcza (obszar oznaczony strzałką na rys. 10, Dir195°). Ciekawym zjawiskiem jest zwiększenie wypadkowego ciśnienia parcia przy kierunku napływu wiatru 135° (typ 6). Typ 5 zmiany (obniżenie ciśnienia parcia) jest związany z osłaniającym działaniem sąsiada przy kierunku napływu wiatru 180° i występuje w górnej części strony nawietrznej płaszcza zewnętrznego.

Analiza wpływu interferencji aerodynamicznej na płaszczu wewnętrznym wskazuje na efekt znaczącego zwiększenia ssania (typ 1) w górnej części powłoki od strony zawietrznej (obszar oznaczony strzałką na rys. 10, Dir195°). Istotny wpływ określono także w postaci zmiany ciśnienia parcia na ciśnienie ssania (typ 3).

Przedstawiona analiza wpływu interferencji aerodynamicznej dotyczy tylko procesu ustalenia charakteru i wielkości zmian działania wiatru na poszczególne elementy konstrukcyjne zbiornika dwupłaszczowego. Zagadnienie spełnienia stanów granicznych nośności i użytkowania konstrukcji wymaga analizy statycznej, dynamicznej oraz analizy stateczności. Bazując na rozkładach współczynników aerodynamicznych przedstawionych w tej pracy, analizy tego typu wykazałyby, czy efekty interferencyjne mogą zagrozić bezpieczeństwu konstrukcji.

Tabela 5

Kierunki napływu wiatru przy których występują ekstremalne wartości współczynnika interferencji I_p^c z uwzględnieniem typu zmiany ciśnienia w sytuacji interferencyjnej

Wariant dachu		Dach stały						Dach pływający A						Dach pływający B						Dach pływający C					
obszar/dir		typ						typ						typ						typ					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Dach	0																								
	15																								
	30																								
	45																								
	60																								
	75																								
	90																								
	105																								
	120																								
	135																								
	150																								
	165																								
	180																								
Płaszcz zewnętrzny	0																								
	15																								
	30																								
	45																								
	60																								
	75																								
	90																								
	105																								
	120																								
	135																								
	150																								
	165																								
	180																								
Płaszcz wewnętrzny	0																								
	15																								
	30																								
	45																								
	60																								
	75																								
	90																								
	105																								
	120																								
	135																								
	150																								
	165																								
	180																								

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników sformułowano następujące ogólne wnioski:

- wpływ interferencji aerodynamicznej w analizowanym układzie dwóch zbiorników jest znaczący i powoduje w wielu przypadkach zwiększenie działania wiatru na konstrukcję,
- rozkłady współczynników aerodynamicznych i współczynników interferencji w obszarze płaszcza zewnętrznego nie zależą od konfiguracji dachu,
- w sytuacjach interferencyjnych na płaszczach zbiornika występują wszystkie typy zmiany ciśnienia, opisane jako typy 1 do 6 w treści artykułu,
- dachy konstrukcji podlegają zasadniczo ciśnieniom ssania, zarówno w sytuacjach pojedynczego zbiornika jak i sytuacjach interferencyjnych,
- badania przedstawione w tym artykule należy uznać za pierwszy etap analizy problemu; dalsze rozważania powinny dotyczyć układu interferencyjnego z większą liczbą zbiorników i rozpatrzeniem kilku wariantów samej konstrukcji np. różnej odległości między płaszczami, różnej smukłości konstrukcji,
- równolegle z badaniami aerodynamicznymi powinny zostać przeprowadzone analizy wytężenia i stateczności płaszczy zbiorników w warunkach interferencji aerodynamicznej.

Literatura

[1] Flaga A., Bosak G., *Badania eksperymentalne wpływu interferencji aerodynamicznej na składową statyczną i dynamiczną ciśnienia wiatru na ścianach zewnętrznych, wewnętrznych oraz dachach stalowych zbiorników dwupłaszczowych w układzie grupowym dwóch zbiorników*, grant KBN: Nr 4 T07E 065 29,Warszawa 2007.

[2] Ziółko J., Perliński A., *Badania aerodynamiczne modeli walcowych, pionowych zbiorników dwupłaszczowych*, Materiały Pięćdziesiątej Pierwszej Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB: „Problemy naukowo-badawcze budownictwa – KRYNICA 2005": Gdańsk–Krynica, 12-17 września 2005, Tom 2, Teoria konstrukcji. Konstrukcje metalowe, 235-242.

[3] ESDU80025, *Mean forces, pressures and flow fields velocities for circular cylindrical structures: single cylinder with two-dimensional flow*, ESDU International LTD, London 1987.

[4] Simiu E., Scanlan R.H., *Wind Effects on Structures. Fundamentals and Applications to Design*, J. Wiley, New York 1996.

[5] Koloušek V., Pirner M., Fisher O., Náprstek J., *Wind Effects on Civil Engineering Structures*, Academia-Elsevier, Praha 1983.