

Praca statyczna rusztowania pod działaniem rzeczywistego oraz normowego obciążenia wiatrem

Paulina Jamińska

Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: p.jaminska@pollub.pl

Streszczenie: W niniejszej pracy wykonano obliczenia statyczne konstrukcji rusztowania pod oddziaływaniem wiatru przyjętego według zaleceń normowych oraz na podstawie symulacji komputerowych przepływu powietrza wokół budynku prostopadłościennego z rusztowaniem ustawionym przy jednej ze ścian. Na podstawie obliczeń przeprowadzonych dla rusztowania przy różnych kątach natarcia wiatru zestawiono maksymalne wartości: naprężeń w pionowych elementach ram i w stężeniach; sił osiowych w elementach kotwiących. Ponadto wykonano obliczenia stateczności konstrukcji. Przeprowadzone porównanie, wskazuje że siły pochodzące od rzeczywistego obciążenia wiatrem znacznie różnią się kierunkiem, zwrotem oraz wartością od sił zalecanych w normach. Niedoścignienie obciążenia wiatrem może prowadzić do przekroczenia nośności w elementach rusztowania, a w konsekwencji do katastrofy budowlanej.

Słowa kluczowe: rusztowanie, wiatr, zalecenia normowe, analiza statyczna.

1. Wprowadzenie

Rusztowanie jest to tymczasowa konstrukcja pomocnicza zmontowana z elementów wielokrotnego zastosowania, wykorzystywana przy wznoszeniu budynków, przy pracach obsługowych i naprawczych różnych konstrukcji. Jest przeznaczone do okresowego przenoszenia obciążeń wywołanych przez ludzi, materiały budowlane lub sprzęt. Pomimo tymczasowego charakteru należy docenić wagę prawidłowego zaprojektowania konstrukcji rusztowania, gdyż musi ono zapewniać bezpieczne miejsce pracy na każdym etapie (od wzniesienia do demontażu) i nie może stanowić zagrożenia dla otoczenia (pieszych, pojazdów, budynków).

Przypadki wystąpienia uszkodzenia lub katastrofy budowlanej (niezamierzonego, gwałtownego zniszczenia obiektu budowlanego lub jego części, a także konstrukcyjnych elementów rusztowań [1]) są dość częste. Katastrofa budowlana może nastąpić z powodu: złego stanu elementów rusztowania, niewłaściwej realizacji, błędnego projektu lub przyczyn losowych, takich jak np. uderzenie, działanie porywów wiatru. Bardzo często jest to kombinacja kilku wymienionych przyczyn. W niniejszym artykule zostanie podjęty problem prawidłowego zamodelowania działania wiatru podczas projektowania konstrukcji rusztowania.

Zalecenia normowe, dotyczące modelowania obciążenia wiatrem rusztowań budowlanych, zamieszczone w normach [2] i [3] są właściwie niezgodne z obecnym stanem wiedzy. Kierunki i wartości sił, pochodzących od działania wiatru, nie odpowiadają wiedzy z zakresu inżynierii wiatrowej. Z norm wynika, że przepływ wokół rusztowania, ustawionego przy budynku zależy tylko od kształtu tego budynku. Natomiast rusztowanie ustawione przy budynku znajduje w obszarze zaburzeń, spowodowanych wirami odrywającymi się od

naroży budynku, co powoduje, że zwroty sił, działających na poszczególne elementy nie pokrywają się ani, ze średnim kierunkiem napływu wiatru ani też z kierunkiem prostopadłym do ściany jak to zalecają normy [2] i [3].

Badanie rzeczywistego wpływu działania wiatru na rusztowanie ma również aspekt ekonomiczny. Projektowanie konstrukcji rusztowania na wyższe oddziaływania tak, aby mieć pewność, że nie nastąpi awaria, jest nieuzasadnione z wielu powodów, np. przyjmowanie zbyt dużego obciążenia wiatrem powoduje niepotrzebne niszczenie elewacji w miejscach kotwienia, dodatkowe roboczo-godziny przy montażu rusztowania lub nieprawidłowy wniosek, że w wybranych przypadkach nie należy w ogóle rusztowania montować.

Kolejnym aspektem, związanym z działaniem wiatru, jest kotwienie rusztowania. Łączniki kotew są mocowane do kołków, umieszczonych w różnych rodzajach materiałów i często nie ma pewności czy mocowanie zapewnia planowaną siłę w kotwie. Na budowie można określić nośność kotew, która często okazuje się mniejsza niż planowana. W takich przypadkach wiedza o rzeczywistym oddziaływaniu wiatru pozwoli na dokładniejsze określenie obciążenia i na wyciągnięcie prawidłowego wniosku o możliwości zakotwienia a następnie bezpiecznego użytkowania konstrukcji. Ponadto pozwoli na określenie stanu naprężeń w elementach konstrukcji, spowodowanego siłami, które mogą np. wywoływać skręcanie rusztowania.

Wnioski wyciągnięte z analizy przepływu [4] posłużyły do przyjęcia oddziaływania wiatru na rzeczywistą konstrukcję rusztowania zamodelowaną w MES. Na podstawie analiz statycznych określono rzeczywisty wpływ wiatru na elementy rusztowania i porównano go z zaleceniami normowymi. Badania ograniczono do sytuacji, w której głównym obciążeniem jest wiatr, to znaczy gdy prędkość wiatru jest na tyle duża, że rusztowanie nie może być użytkowane. Podczas obliczeń nie uwzględniono ciężaru własnego konstrukcji oraz obciążeń eksploatacyjnych, aby wykazać różnice pracy statycznej konstrukcji pod oddziaływaniem wiatru dla zaleceń normowych i obciążenia rzeczywistego. Z tego samego powodu w obliczeniach nie uwzględniono imperfekcji. Ponadto rusztowanie nie jest okryte siatką ochronną. Zamontowanie na rusztowaniach siatek ochronnych zmieni charakter i wielkość oddziaływania wiatru zarówno na rusztowanie jak i budynek, jednak ze względu na całkowicie inny sposób oddziaływania wiatru przypadek ten nie jest rozważany w artykule.

2. Zalecenia dotyczące oddziaływania wiatru na rusztowania

Każda konfiguracja rusztowania, która nie jest opisana w instrukcji montażu producenta, jest uznawana za nietypową i wymaga wykonania projektu [3]. Ogólne zasady projektowania rusztowań oraz zalecenia dotyczące sposobu zbierania i przykładania obciążenia wiatrem na konstrukcję rusztowania znajdują się w normie [2].

Obciążenie wiatrem należy obliczać na podstawie ciśnienia dynamicznego na powierzchnię wystawioną na kierunek działania wiatru (powierzchnia odniesienia). Norma [3] zaleca przyjmowanie oddziaływania wiatru oddzielenie dla kierunku wiatru równoległego i prostopadłego do fasady, przy której znajduje się konstrukcja rusztowania.

Wartość charakterystyczną wynikowej siły wiatru należy wyznaczać, zgodnie ze wzorem:

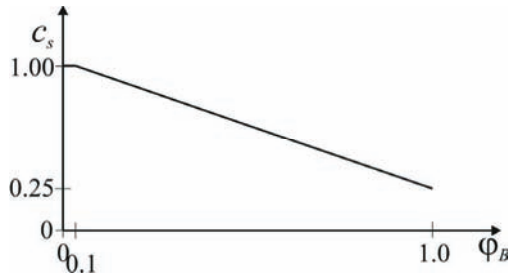
$$F_k = c_s \cdot \sum_i (c_{fi} \cdot A_i \cdot q_i) \quad (1)$$

gdzie: c_s – współczynnik miejsca, c_{fi} – współczynnik siły aerodynamicznej, A_i – pole powierzchni odniesienia, q_i – ciśnienie dynamiczne, i – i -ty element rusztowania.

W przypadku obciążenia wiatrem równoległe do elewacji rusztowania współczynnik miejsca c_s należy przyjmować jako równy 1,0. W przypadku obciążenia prostopadłego, współczynnik c_s można określić na podstawie wykresu z rys.1, w zależności od współczynnika zawartości φ_B , wyrażonego wzorem:

$$\varphi_B = \frac{A_{B,n}}{A_{B,g}} \quad (2)$$

gdzie: $A_{B,n}$ – powierzchnia netto elewacji (po odjęciu otworów), $A_{B,g}$ – całkowita powierzchnia elewacji.



Rys. 1. Współczynnik miejsca c_s dla rusztowań ustawionych przed elewacją i działania wiatru prostopadłego do elewacji [2]

Współczynnik siły aerodynamicznej c_f należy określić odpowiednio dla każdego przekroju elementów rusztowania na podstawie normy [5]. Dla wszystkich projektowanych powierzchni (pomosty, bortnice) wartość c_f należy przyjmować równą 1,3. Jeżeli rusztowanie zakryte jest siatką ochronną, dla wiatru prostopadłego i równoległego do elewacji rusztowania wartość c_f należy przyjmować równą odpowiednio 1,3 i 0,1.

Ciśnienie dynamiczne q_i działające na powierzchnię odniesienia A_i rusztowania wyraża równanie:

$$q_i = c_e \cdot q_b \quad (3)$$

gdzie: c_e – współczynnik ekspozycji (zależny od kategorii terenu i wysokości nad poziomem terenu [5]), q_b – wartość bazowa ciśnienia prędkości, wyrażona wzorem:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2, \quad (4)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza równa $1,225 \text{ kg/m}^3$, v_b – bazowa prędkość wiatru

Bazowe ciśnienie prędkości q_b , nieuwzględniające porywów wiatru można również odczytać z wykresu znajdującego się w normie [3].

W niniejszej pracy przedstawiono porównanie opływu wynikającego z normy i rzeczywistego, dotyczącego rusztowania bez przekrycia, ustawionego przy budynku o prostokątnym przekroju poprzecznym.

3. Obliczenia MES

W programie Autodesk Algor Simulation Professional wykonano model typowego stalowego rusztowania ramowego, składającego się z sześciu pól o wymiarach $2,572 \text{ m} \times 0,732 \text{ m}$. Całkowite wymiary konstrukcji rusztowania wynoszą: $15,432 \text{ m} \times 0,732 \text{ m} \times$

24,4 m i odpowiadają standardowemu systemowi konfiguracyjnemu. Rusztowanie zostało zakotwione zgodnie z normą, według typowego naprzemiennego wzoru zakotwień.

Schemat statyczny konstrukcji składa się z elementów kratowych, które modelują pracę podestów, i elementów prętowych, które modelują takie elementy jak ramy, podstawki i poręcze. Podesty są zamocowane na elementach rusztowania w taki sposób, aby miały możliwość obrotu i nie przenosiły momentów zginających. Ten efekt uzyskano właśnie dzięki zastosowaniu elementów kratowych, których sztywność i ciężar pomostów zostały tak dobrane, aby odpowiadały właściwościom rzeczywistych pomostów.

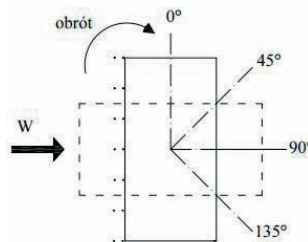
Ustawienie rusztowania na podkładach, ułożonych na gruncie, zostało zamodelowane podporami przegubowymi, które blokują możliwość przesuwu w kierunku pionowym i poziomym. Kotwienie rusztowania do ścian zostało zamodelowane za pomocą podpór, które blokują możliwość przesuwu węzłów w płaszczyźnie poziomej.

4. Obciążenie wiatrem

Model konstrukcji obciążony jest tylko charakterystycznymi siłami skupionymi od działania wiatru, przyłożonymi do węzłów głównych siatki konstrukcyjnej rusztowania na poziomie podestów. Zarówno dla przypadków normowych jak i obliczeń oddziaływania rzeczywistego przyjęto maksymalne obciążenie wiatrem o prędkości bazowej $v_b=22$ m/s oraz kategorię terenu 0, dla której przyjęto odpowiednią funkcję, uzależniającą współczynnik ekspozycji c_e od wysokości powyżej terenu. Ponadto uwzględniono współczynnik statystyczny równy 0,7, który uwzględnia fakt, że rusztowanie jest budowlą tymczasową, a normowa prędkość bazowa jest prędkością, która może wystąpić raz na przestrzeni ostatnich 50 lat.

Obliczenia komputerowe opływu dwuwymiarowego wokół budynku z rusztowaniem ustawionym przy jednej z jego ścian zostały opisane w artykule [4]. Wzdłuż dłuższej ściany budynku ustawiono czternaście słupków w dwóch rzędach przedstawiających sześć pól rusztowania o wymiarach 2,572 m x 0,732 m. Odległość pierwszego rzędu słupków od fasady budynku wynosiła 0,15 m.

Na podstawie wyników przeprowadzonych analiz, dla czterech różnych kątów natarcia wiatru (rys. 2), odczytano wartości sił, wynikających z działania przepływu na poszczególne słupki rusztowania – w dalszej części pracy nazywane obciążeniem rzeczywistym. Kierunki i zwroty tych sił pokazane są na rys. 4 i rys. 5.

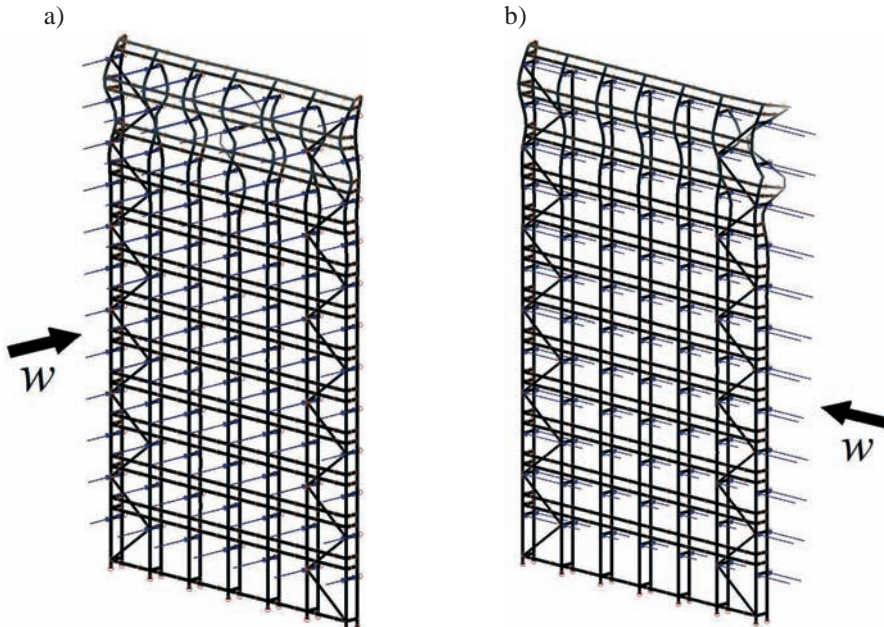


Rys. 2. Schemat ustawienia rusztowania przy budynku oraz kąty natarcia wiatru

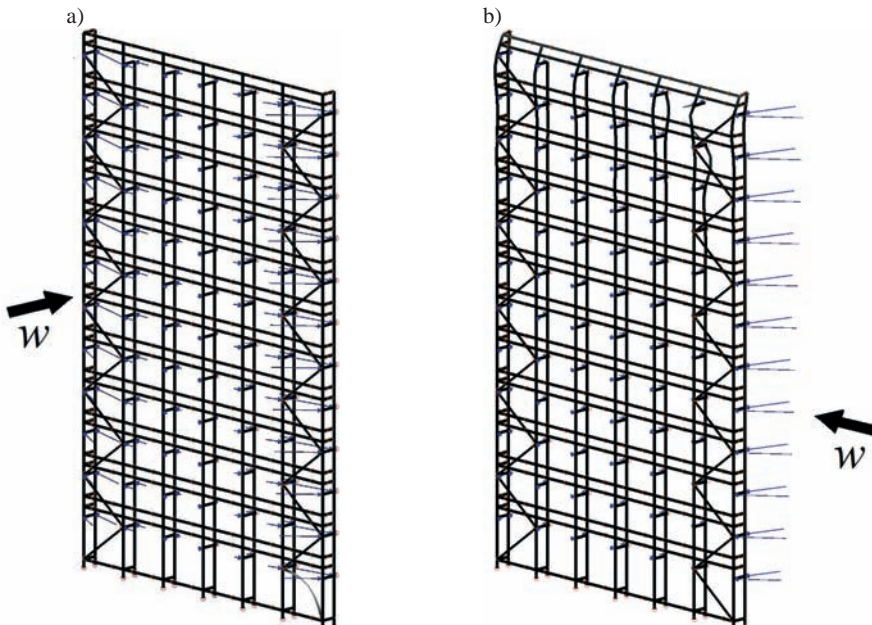
5. Analiza wyników obliczeń

W ramach badań numerycznych wykonano statyczne obliczenia liniowe oraz analizę stateczności konstrukcji. Rys. 3, rys. 4 i rys. 5 przedstawiają kierunki i zwroty charakterystycznych sił od działania wiatru oraz formy wybożenia rusztowania. Siły przyłożone do

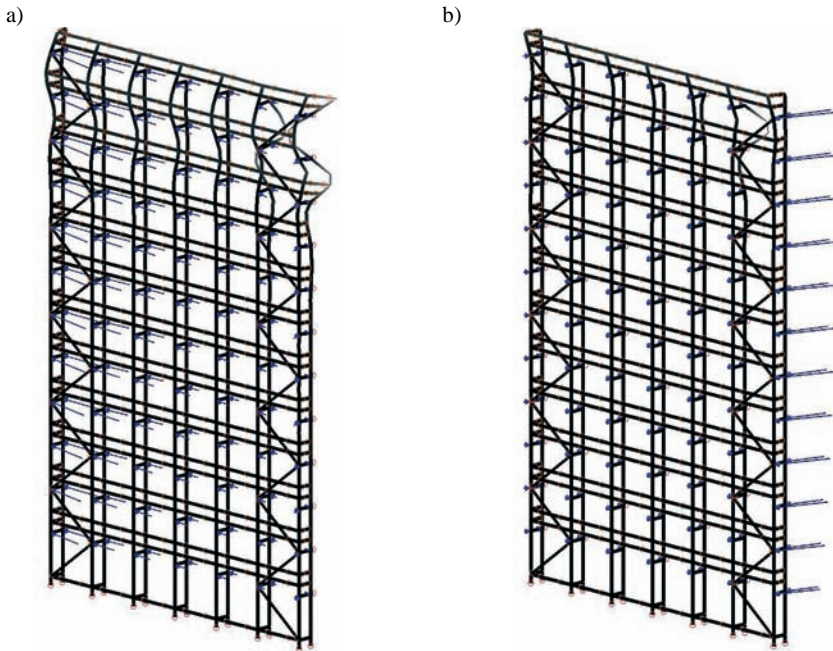
rusztowania odpowiadają profilowi wiatru, którego prędkość rośnie wraz z wysokością nad poziomem terenu. W przypadku obciążenia wiatrem według zaleceń normowych kierunki, zwroty i wartości sił są całkowicie odmienne od tych, wynikających z obciążenia rzeczywistego.



Rys. 3. Normowe obciążenie wiatrem oraz postaci wycofania dla kąta natarcia: a) 0°, b) 90°



Rys. 4. Rzeczywiste obciążenie wiatrem oraz postaci wycofania dla kąta natarcia: a) 0°, b) 90°



Rys. 5. Rzeczywiste obciążenie wiatrem oraz postaci wybożenia dla kąta natarcia: a) 45°, b) 135°

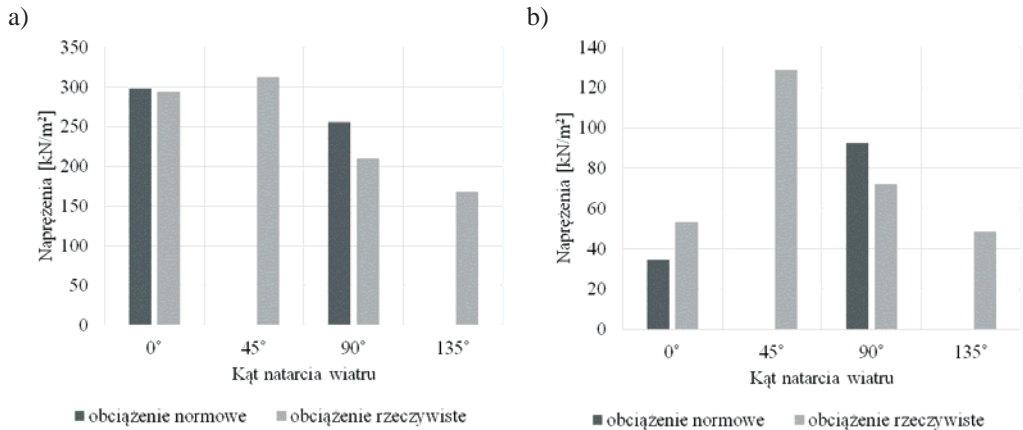
Wartości mnożnika siły krytycznej zestawione w tab. 1 wskazują, że siła krytyczna zostanie najszybciej osiągnięta dla obciążenia rzeczywistego przy kącie natarcia wiatru 90°.

Tabela 1. Mnożnik siły krytycznej

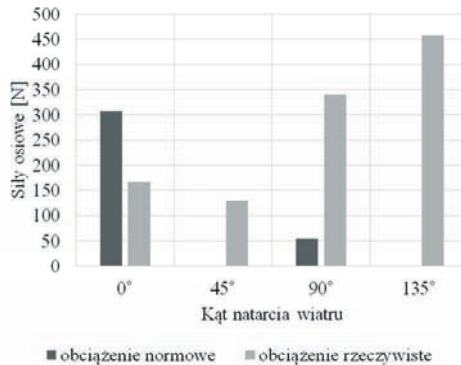
Kąt natarcia wiatru	Obciążenie normowe		Obciążenie rzeczywiste			
	0°	90°	0°	45°	90°	135°
α_{cr}	25	11	753	14	6	8

W wyniku przeprowadzonych obliczeń statycznych uzyskano wartości sił wewnętrznych oraz naprężeń w elementach konstrukcyjnych rusztowania. Rysunek 6 przedstawia porównanie naprężeń maksymalnych w słupkach ram oraz stężeniach. Przy normowym obciążeniu wiatrem wartości maksymalnych naprężeń są większe od wartości uzyskanych przy rzeczywistym obciążeniu wiatrem w słupkach ram rusztowań oraz stężeniach dla kąta natarcia wiatrem 90°, oraz nieznacznie większe w słupkach ram przy kącie napływu równym 0°. Największe czyli najbardziej niekorzystne wartości naprężeń maksymalnych wystąpiły w słupkach ram oraz stężeniach, pracujących pod obciążeniem rzeczywistym wiatrem przy kącie natarcia 45°. Wartości naprężeń przekraczają te uzyskane z przypadków obciążenia normowego, a należy pamiętać, że normy do projektowania rusztowań zalecają jedynie dwa kierunki przykładania sił, pochodzących od ciśnienia dynamicznego wiatru, równoległe i prostopadłe do fasady rusztowania, nie wspominając o innych przypadkach.

Na rys. 7 zestawiono wartości sił osiowych w elementach kotwiących rusztowania. Projektując rusztowanie zgodnie z zaleceniami normowymi i przyjmując najbardziej niekorzystny dla kotew przypadek działania wiatru, tzn. kąt napływu równy 0°, nie doszacujemy wartości sił osiowych, ponieważ dla kąta natarcia wiatru 135° siła ta jest o 50% większa.



Rys. 6. Maksymalne naprężenia w elementach rusztowania: a) słupki ram, b) stężenia



Rys. 7. Wartości maksymalnych sił osiowych w elementach kotwiących rusztowania

6. Podsumowanie

Zalecany przez normy sposób modelowania działania wiatru na budynek wynika z założenia, że kierunek działania wiatru na rusztowanie jest taki sam jak na elewację budynku, przy którym rusztowanie się znajduje. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że rzeczywiste siły wywołane przez wiatr znacznie różnią się kierunkiem, zwrotem oraz wartością od obciążenia zalecanego w normach do projektowania rusztowań. Normowe obciążenie prostopadłe do fasady rusztowania może być prawdziwe tylko w przypadku bardzo dużych otworów w budynku.

Elementy rusztowania, ustawione przy budynku, mogą znajdować się w obszarze zaburzeń, spowodowanych wirami odrywającymi się od naroży budynku, co zmienia rozkład obciążenia elementów rusztowania. Siły, działające na rusztowanie, układają się wzdłuż linii prądu. Oddziaływanie wiatru może spowodować zmianę rozkładu sił wewnętrznych w elementach rusztowania (wzrost wartości sił normalnych w stężeniach, który może doprowadzić do przekroczenia nośności węzłów) lub skręcanie rusztowania.

Biorąc pod uwagę dotychczas przeprowadzone analizy sił, działających na rusztowanie stojące przy budynku, uwzględniające aspekty interferencji aerodynamicznej, oraz nieustalone cechy przepływu, w kolejnym etapie badań zostanie podjęta próba opracowania

reguł, które mogłyby być podstawą do stworzenia zasad przyjmowania prawidłowych obciążeń podczas projektowania rusztowań budowlanych.

Literatura

- 1 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych. Dz.U. 2003 nr 47 poz. 401
- 2 PN-EN 12811-1. Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania.
- 3 PN-EN 12810-2:2010. Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji.
- 4 Jamińska P. Analiza działania wiatru na układ budynek z rusztowaniem. Budownictwo i Architektura 12 (2) (2013) 111-118.
- 5 PN-EN 1991-1-4. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania wiatru.

Static work of scaffolding loaded by actual and standards driven wind forces

Paulina Jamińska

*Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin
University of Technology, e-mail: p.jaminska@pollub.pl*

Abstract: This paper presents static analyzes of scaffolding loaded by wind according to Eurocode recommendations and on the basis of computer simulations of air flow around a rectangular building with a scaffolding assembled at one of the walls. On the basis of calculations performed for the scaffold at different angles of wind attack, the maximum values of the stress in the vertical elements of the framework and in the braces are showed, as well as axial forces in the anchors. In addition, critical buckling load analyses were also performed. The comparison indicates that the forces coming from the actual wind loads differ significantly in direction, sense and magnitude from the forces prescribed in the standards. Underestimated wind load can lead to the state of exceeded capacity in scaffolding elements, and consequently to the construction disaster.

Keywords: scaffolding, wind, static analysis, standards