



Propozycja modernizacji europejskiej normy dotyczącej oddziaływania wiatru na obiekty budowlane

BARTOSZ BAWIEC, LECH SOLARZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii i Geodezji,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, lechsolarz@interia.pl, Lech.Solarz@wat.edu.pl

Streszczenie. Proponujemy zmianę europejskiej normy dotyczącej oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane — z książki na pakiet programów. Zasadnicze punkty propozycji to:

Odejście od mapy prawdopodobnych prędkości wiatru na rzecz pakietu programów obliczających przewidywaną maksymalną prędkość wiatru, przygotowanego i pozostającego w gestii Krajowego Instytutu Meteorologii.

Przeniesienie wyników obliczeń numerycznych przepływu do interfejsu inżyniera poprzez funkcje sklejane i/lub uogólnione szeregi Fouriera.

Ograniczenie roli normy do odwzorowania zjawiska fizycznego opływu, do roli narzędzia odwzorowującego przewidywany wiatr o maksymalnej prędkości w rozkład nacisków na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej obiektu budowlanego zależny od obiektu i kierunku wiatru.

Słowa kluczowe: budownictwo, oddziaływanie wiatru, modelowanie obciążeń w budownictwie

DOI: 10.5604/12345865.1223079

1. Wstęp

Jesteśmy pełni uznania i szacunku dla twórców normy *European Standard EN 1991-1-4 2005, Part 1-4: Wind Actions*, równoważnej z POLSKĄ NORMĄ PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1 *Oddziaływania na konstrukcje, Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*.

Radykalna zmiana możliwości obliczeń komputerowych powoduje potrzebę podążenia za powstałymi perspektywami. Twórcy normy [4] przewidzieli szansę użycia „sprawdzonych i/lub odpowiednio uzasadnionych naukowo metod numerycznych,

z zastosowaniem właściwych modeli konstrukcji i wiatru”. W pracy przedstawiamy propozycję modernizacji normy o zasadniczym charakterze.

- Odejście od tworzenia mapy oczekiwanych prędkości na rzecz użytkownika pakietu programów pozostających w gestii Krajowego Instytutu Meteorologii. Pakiet ten określałby maksymalną prędkość podmuchu wiatru wynikającą z rejestracji w minionym dziesięcioleciu lub dwudziestolecium.
- Odejście od ręcznego obliczania rozkładu ciśnienia wiatru na rzecz komputerowego pakietu liczącego ten rozkład dla oczekiwanej prędkości maksymalnej podmuchu, posługując się wyłącznie fizycznymi relacjami.
- Przenoszenie wyników obliczeń do modułu inżyniera-konstruktora za pomocą techniki funkcji sklepanych i/lub rozwinięć w uogólnione szeregi Fouriera. Moduł ten umożliwi obliczanie sił i momentów sił działających na obiekt budowlany lub element tego obiektu.
- Prędkość wiatru przyjmowana do obliczeń nie powinna w utajony sposób zawierać w sobie współczynnika bezpieczeństwa, jak to ma miejsce w ASCE 7-10. Można uwzględnić występowanie lokalnie mało prawdopodobnego zjawiska silnej wichury lub nie, ale uzależnianie oczekiwanej prędkości wiatru od kategorii budowanego obiektu, jak ASCE 7-10, jest niewłaściwe.

Istotne jest, aby wyliczona relacja maksymalnej prędkości wiatru z wybranego kierunku i rozkładu sił powierzchniowych była relacją bliską do tej fizycznie zachodzącej. Celem publikacji jest otwarcie dyskusji na temat uwspółcześnienia Eurokodu dotyczącego oddziaływania wiatru na obiekty budowlane.

Przedstawiamy kolejno: możliwość pozyskiwania wieloletniej maksymalnej prędkości wiatru w miejscu budowy, możliwość wykorzystania metody funkcji sklepanych i uogólnionych szeregów Fouriera do obliczania sił i momentów powodowanych ciśnieniem wiatru oraz problemy, których rozwiązanie trzeba osiągnąć.

2. Pozyskiwanie informacji o oczekiwanej prędkości maksymalnej wiatru w miejscu budowy

Zalecenie Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO) zawiera wymaganie, aby w uzupełnieniu do wartości średnich z ostatnich dziesięciu minut podawać również maksymalną prędkość wiatru (poryw) z ostatniej godziny (z rozdzielczością co najmniej 0,5 m/s) [5]. Tak więc Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej dysponuje wiedzą o prędkości maksymalnej w wybranych punktach kraju mierzonych na wysokości 10 m nad poziomem gruntu. Podobne instytuty innych krajów europejskich też są zobligowane do zbierania tej informacji. Instytuty meteorologii od początku istnienia sieci pomiarów zmagają się zarówno z problemami pomiarów bardzo istotnie odbiegających od przeciętnych (fałszywe wskazania), jak i aproksymacji wyników z sieci w dowolnie wybranym punkcie w obszarze

pomiarów. Czynią to najlepiej. Jeden raz wykonane oprogramowanie, po testowaniu i walidacji, czerpiące dane o prędkości maksymalnej i ewentualnie kierunku wiatru z istniejącej bazy, powinno dostarczać najbardziej wiarygodną informację. Po przygotowaniu tego pakietu koszty jego użytkowania nie powinny być wysokie. Dane o oczekiwanym maksymalnym 10- czy też 20-letnim wietrze należy pozyskiwać we właściwym instytucie meteorologii, a nie zaszywać na stałe w europejskiej normie. Obserwowana zmiana klimatu czyni informacje z ostatnich lat (np. dziesięciu lub dwudziestu) bardziej istotnymi niż (dodatkowo mniej precyzyjne) obserwacje z większej liczby lat. Prędkość maksymalna podmuchu będzie korygowana informacjami orograficznymi, chropowatością otoczenia i zmienną z wysokością nad poziomem gruntu. Nie będzie istniała potrzeba korekty tej prędkości w zależności od wysokości nad poziomem morza, ponieważ pozyskiwana prędkość maksymalna będzie prędkością właściwą dla miejsca powstawania budowli.

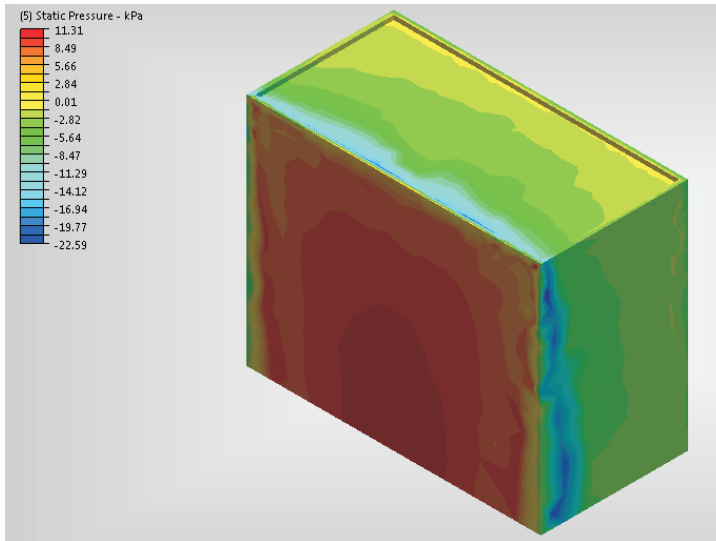
Istnieje również możliwość oszacowania bardzo małego prawdopodobieństwa wystąpienia w miejscu budowy wichury lub silnej wichury (9-10 w skali Beauforta) [9]. Wykorzystanie prędkości wichury lub silnej wichury do obliczania rozkładu gęstości powierzchniowej sił jest powiązane z gotowością i potrzebą ponoszenia bardzo wysokich kosztów budowy.

3. Pakiet programów obliczających oddziaływanie wiatru

Rozwój dwóch dyscyplin naukowych [3] — *High-Performance Computing* (wysokowydajne obliczenia komputerowe) oraz *Computational Fluid Dynamics* (obliczeniowa dynamika płynów) — a także komputerów osobistych pozwala obliczać opływ budowli numerycznie. Do wyboru jest metoda do zastosowania w proponowanej normie. Można dokonać wyboru spośród *Direct Numerical Simulations*, *Large Eddy Simulation*, *Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulations*. Rozkład gęstości powierzchniowej sił byłby obliczany przez zweryfikowany, walidowany pakiet programów. Istnieją takie pakiety, ale wynikiem ich działania są kolorowe ilustracje i zbiory liczb. Przykład znajduje się na rysunku 1.

Należy rozwiązać problem przekazania informacji inżynierowi liczącemu konstrukcję w formie dla niego użytecznej. Wiąże się to z problemem przekazania informacji o kształcie budowli, powierzchniach, otworach do zbioru programów (pakietu) wykonującego obliczenia.

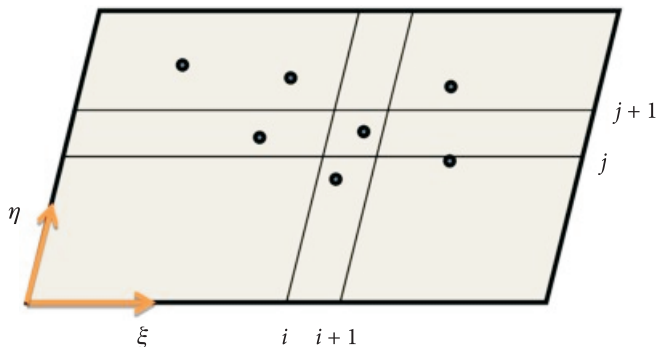
Kształt budowli można przekazać za pomocą zbioru obiektów płaskich i nie-płaskich w kartezjańskim układzie współrzędnych. Obiekty płaskie można przedstawić jako zbiory: trójkątów, prostokątów, kół, części kół. Obiekty niepłaskie to fragmenty pobocznic walca, kuli i inne zadane w postaci jednowartościowej funkcji trzech współrzędnych $F(x, y, z) = C$. Trzeba przekazać informację o chropowatości powierzchni i ewentualnej przepuszczalności. Przedstawimy rozwiązanie problemu



Rys. 1. Wyniki symulacji komputerowej dla wiatru prostopadłego do przedniej ściany o prędkości 62,6 m/s na wysokości 10 m nad gruntem [1, 8]. Widok ściany nawierzchniej

w najprostszej wersji, gdy elementem powierzchni jest prostokąt o normalnej \mathbf{n} . Otrzymujemy informację o gęstości sił powierzchniowych σ_{nk} $k = 1, 2, 3$ w punktach powierzchni P_m $m = 1, 2, 3, \dots, M$. Innymi słowy, znamy ciśnienie i składowe styczne sił działających na jednostkę powierzchni w M punktach powierzchni.

Wprowadzamy lokalny układ współrzędnych ξ, η . Dokonujemy dyskretyzacji powierzchni prostokąta ξ_i, η_j $i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J$. Fragment tego procesu przedstawiamy na rysunku 2.



Rys. 2. Ilustracja procesu tworzenia aproksymacji funkcjami sklejanymi

Na rysunku kropki symbolizują część zbioru punktów, w których znamy σ_{nk} $k = 1, 2, 3$.

Dokonujemy aproksymacji (nie interpolacji) w obu kierunkach metodą funkcji sklepanych ([2, 6] i literatura tam zawarta). Metoda funkcji sklepanych zapewnia najlepszą aproksymację. Współczynniki wielomianu aproksymującego (1) w każdym przedziale zależą od wszystkich wartości σ_{nk} $k = 1, 2, 3$ punktach sąsiadujących z wybranym przekrojem.

$$\sigma_{nk}(\xi_i, \eta_j) = \left[\sum_{m=0}^3 a_{im}(nk) \xi_i^m \right] \left[\sum_{n=0}^3 b_{jn}(nk) \eta_j^n \right]. \quad (1)$$

Proces wyliczania współczynników $a_{im}(nk)$ $b_{jn}(nk)$ wykorzystuje techniki macierzy rzadkich ([6] i literatura tam cytowana). Funkcja powstająca w efekcie aproksymacji funkcjami sklepanymi należy do klasy C^2 . Obliczanie siły sumarycznej, obliczanie siły wypadkowej, obliczanie momentu względem punktu, obliczanie momentu względem wskazanej osi sprowadza się do obliczania całek $(u + w\xi_i) \xi_i^m$ oraz podobnych dla zmiennej η_j przedziale wyznaczonym przez mały prostokąt indeksowany liczbami i oraz j . Nie ma procesu całkowania numerycznego. Jest sumowanie po indeksach i, j . Podobne postępowanie można zrealizować dla powierzchni płaskich trójkątnych. Nie mając lepszej metody, można obszar trójkątny uzupełnić fikcyjnie do prostokątnego, obciążonego tylko w strefie trójkątnej. Dla powierzchni będących kołem właściwe może być połączenie rozwinięcia w szereg Fouriera oraz funkcji sklepanych w zależności od promienia. Dla powierzchni cylindrycznych odpowiednie będzie połączenie szeregu Fouriera z funkcjami sklepanymi w kierunku osi cylindra. Dla powierzchni kulistych współrzędne kuliste pozwolą wykorzystać uogólnione szeregi Fouriera. Użycie całkowania numerycznego jest rozwiązaniem, które również może być stosowane.

W części gdzie otrzymujemy informacje o przeprowadzonych obliczeniach, interfejs programu powinien zapewniać wizualizację obiektu, wizualizację sił powierzchniowych wywoływanych działaniem wiatru dla wybranej powierzchni lub wybranych powierzchni. Interfejs powinien zapewniać obliczenie: siły sumarycznej, siły wypadkowej, momentu sił powierzchniowych względem wskazanego punktu, momentu sił powierzchniowych względem wskazanej osi dla wybranej powierzchni lub wybranych powierzchni.

Dla konstrukcji sztywnych odkształcenia powodowane przez oddziaływanie wiatru nie mają istotnego wpływu na opływ. Umownie przyjęto, że konstrukcje o podstawowej częstotliwości drgań własnych większej od 1 Hz są sztywne. Dla konstrukcji sztywnych obliczone rozkłady gęstości sił powierzchniowych, siły i momenty są częścią obciążeń uwzględnianych w obliczeniach wytrzymałości i stateczności konstrukcji.

4. Problemy do dalszych rozważań

Jeśli konstrukcja jest sztywna, problemem pozostaje uwzględnienie przepuszczalności ścian.

Układ z otworami, ale bez przepływu wewnątrz, pozwala określić ciśnienie wewnątrz z rozważań statycznych. W tym przypadku ciśnienie wewnątrz wynika z ciśnienia w otworze. Natomiast przepływ wewnątrz obiektu lub przez obiekt wymaga badań.

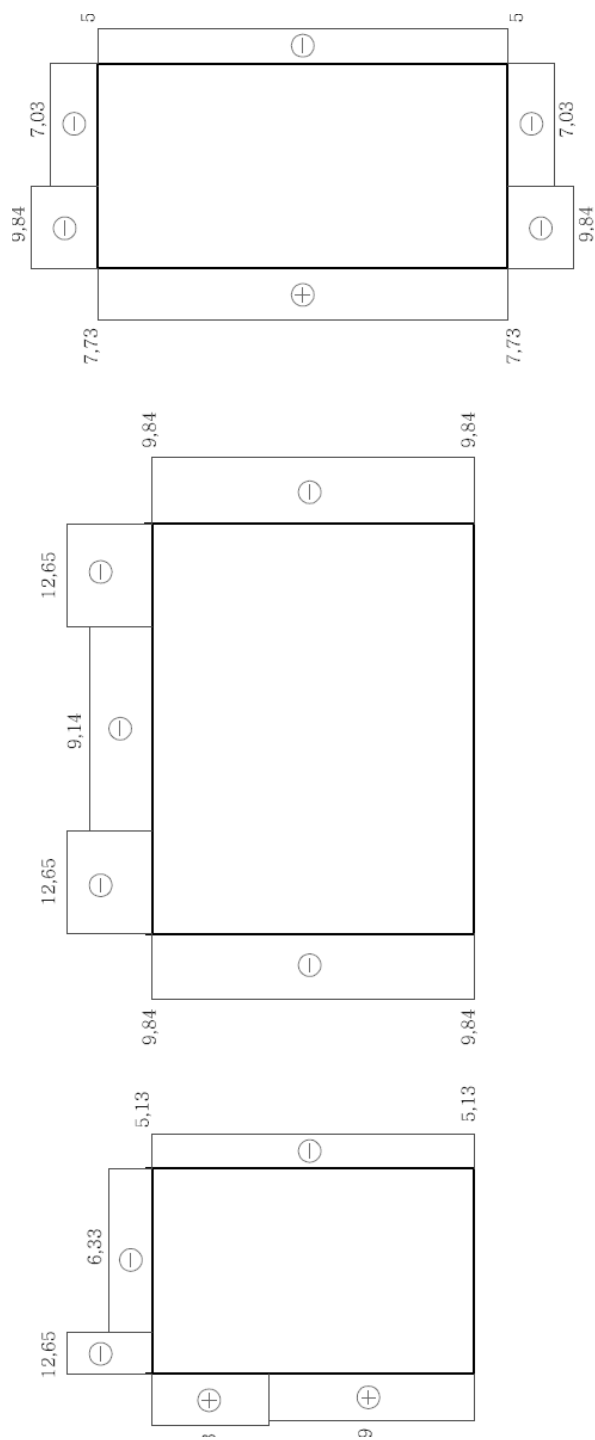
Wiatr powoduje powstawanie sił i/lub momentów sił okresowo lub prawie okresowo zmiennych z czasem. Przyczyną są zarówno wiry Karmana spływające z krawędzi opływanego obiektu, jak i podmuchy oraz turbulencje w warstwie przyściennej. Dla obiektów, które nie mogą być traktowane jako nieodkształcalne, problem wymaga jednoczesnych rozważań zjawisk aerodynamicznych i drgań obiektu. Wyrazem trudności jest niewłączenie w zakres normy [4] obiektów bardzo wysokich. Umowną granicę stanowi budynek o wysokości 200 m. Zagrożenie stanowi zjawisko rezonansu powodujące uwielokrotnione drgania negatywnie wpływające na samopoczucie ludzi znajdujących się w pomieszczeniach budynku, z którego spływają wiry Karmana. Przykładem jest rozwiązanie zastosowane w wieży Taipei 101 [7]. Te same wiry, oddziałując na inny obiekt znajdujący się blisko i na ścieżce wirów, powodują drgania wymuszone tego innego obiektu. Ponownie, jeśli częstotliwość zmian ciśnienia wiatru będzie bliska częstotliwości drgań własnych innego obiektu, powstające bardziej intensywne drgania będą powodowały dyskomfort ludzi poddanych ich działaniu. Interfejs pakietu powinien zawierać opcje umożliwiającą obliczenie średniej amplitudy wahań ciśnienia oraz częstotliwości podstawowej harmonicznej. Inżynier-konstruktor będzie znał wielkość niekorzystnej częstotliwości drgań własnych konstruowanego obiektu.

Przepływ powietrza stanowi zasobnik energii o stałej, dużej wartości średniej. Działając na obiekty elastyczne, może tworzyć układ z dodatnim sprzężeniem zwrotnym i możemy obserwować drgania samowzbudne. Odchodząc od nazw stosowanych w automatyce, istnieje możliwość powstawania flatteru (*Tacoma Narrows Bridge*), trzępotania i galopowania. Programowe ujęcie tych problemów można zrealizować w zakresie zbliżonym do tego rozpatrzonego w [4]. Są to drgania sprzężone, aerosprężyste. Wymagają jednoczesnego połączenia wiedzy o wietrze i konstrukcji.

5. Wnioski

Rozważane normy nie obrazują zjawiska fizycznego — opływu powietrza wokół budowli.

W [1] przeliczono pięć obiektów. Ograniczając się do obiektu przedstawionego na rysunku 1, widzimy, że ciśnienie w środku ściany nawietrznej według obliczeń komputerowych [1, 8] to 113 hPa. Według Eurokodu to około 70 hPa.



Rys. 3. Rozkład ciśnień na ścianie nawietrznej, fragment pierwszy od lewej i ostatni. Kierunek wiatru prostopadły do ściany nawietrznej. Rysunek środkowy przedstawia ciśnienie na ścianach bocznych w strefie, gdzie jest ono największe

Tworzony pakiet powinien dostarczać informacji nieskażonych poprawianiem prędkości (prędkość podmuchu trwającego do 2 s czy średnia 10-minutowa). Przy identycznej prędkości maksymalnej podmuchu wyniki obliczeń i wyniki eksperymentu powinny być bardzo bliskie.

Proponujemy:

1. Pobieranie informacji o oczekiwanej największej prędkości wichru na wysokości 10 m nad poziomem gruntu z instytutu meteorologii.
2. Wytworzenie, na bazie istniejących pakietów komputerowych obliczających przepływy i opływy, pakietu wzorcowego stanowiącego normę lub jej fragment.
3. Przeniesienie wyników obliczeń komputerowych do modułu użytkowanego przez inżyniera-konstruktora w oparciu o metodę funkcji sklepanych (*spline*) i metody rozwinięć w uogólnione szeregi Fouriera.
4. Moduł użytkowany przez inżyniera ma umożliwiać: wizualizacje rozkładu ciśnień wiatru na wskazanym elemencie lub elementach konstrukcji, obliczanie siły sumarycznej, obliczanie siły wypadkowej, obliczanie momentu względem punktu, obliczanie momentu względem wskazanej osi.

Celem pracy jest rozpoczęcie (lub kontynuowanie) dyskusji na temat EUROKODU dotyczącej oddziaływania wiatru w formie zbioru współdziałających programów.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa uczelni.

Artykuł wpłynął do redakcji 13.01.2016 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 14.07.2016 r.

LITERATURA

- [1] BAWIEC B., *Oddziaływanie wiatru na budowlę. Porównanie: provision of ASCE 7-10 oraz PN-EN 1991-1-4*, praca magisterska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2014.
- [2] HERRING J.R., *Using Spline Functions to Represent Distributed Attributes*, Intergraph Corporation Huntsville, Alabama 35894-0001 USA, e-mail: ingr!bl7a!mobius!jrh@uunet.uu.net
- [3] KUCZAJ A.K., *Numerical Experiments in Modulated Turbulence*, Dissertation, University of Twente, Hengelo, 2006.
- [4] *PN-EN 1991-1-4:2008 POLSKA NORMA PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje, Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*, PKN, Warszawa.
- [5] RÓZDŻYŃSKI K., *Miernictwo meteorologiczne*, tom 1, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 1995.
- [6] SOLARZ L., KRAJEWSKI Z., JAROSZEWICZ L.R., *Analysis of seismic rotations detected by two anti-parallel seismometers: spline function approximation of rotation and displacement velocities*, Acta Geophysica Polonica (now: Acta Geophysica), 2004, vol. 52, no. 2.
- [7] TUAN A.Y., SHANG G.Q., *Vibration Control in a 101-Storey Building Using a Tuned Mass Damper*, Journal of Applied Science and Engineering, vol. 17, no. 2, 2014.
- [8] www.windlab.pl, 2016.

- [9] ŻURAŃSKI J.A., GACZEK M., FISZER S., *The Impact of Catastrophic Winds on Buildings in Poland* (in Polish), Construction Overview, no. 11, 2009.

B. BAWIEC, L. SOLARZ

EUROCODE — Wind Action. Suggestions for modernisation

Abstract. The European Standard EN 1991-1-4 2005 Part 1-4 Wind Actions should be modernized. It should be the computer program not the book. The maps of the anticipated wind speed should be replaced by the probable maximal speed of the wind blast calculated by meteorology institutes. The results of flow calculation should be converted into the spline approximated function or generalized Fourier series. The Standard should disclose physical relations wind-structure-pressure. The safety coefficients should not be included in a model of wind action at a being built object. We expect discussion.

Keywords: civil engineering, wind pressure, load modelling in engineering

DOI: 10.5604/12345865.1223079

