

PROBLEMY USTALANIA OBCIĄŻENIA WIATREM W NIETYPOWYCH KONSTRUKCJACH BUDOWLANYCH

Marcin SZKOBODZIŃSKI*, Czesław MIEDZIAŁOWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule zaprezentowano problematykę ustalania obciążenia wiatrem w przypadku nietypowych konstrukcji budowlanych o złożonych kształtach. Podano główne podejścia obliczeniowe według normy Eurokod oraz Polskiej Normy. Przedstawiono ponadto przegląd metod określania obciążenia wiatrem obejmujący badania w tunelach aerodynamicznych i symulacje komputerowe, ze wskazaniem sposobów realizacji. Na zakończenie podano porównanie wartości charakterystycznych ciśnień prędkości dla stref wiatrowych określonych w normach.

Słowa kluczowe: obciążenie wiatrem, modele normowe, tunel aerodynamiczny, komputerowa mechanika płynów.

1. Wprowadzenie

Wśród wielu czynników środowiskowych oddziałujących na konstrukcje budowlane istotne znaczenie odgrywa obciążenie wiatrem. Problematyka określania rozkładu ciśnienia na poszczególne elementy konstrukcyjne jest zjawiskiem powszechnie znanym w zakresie typowych kształtów analizowanych obiektów. Wytoczne w tym zakresie podaje norma PN-77/B-02011 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem* oraz Eurokod 1 części 1-4. W dobie różnorodnych rozwiązań architektonicznych charakteryzujących się nowoczesną formą określenie obciążenia wiatrem w wielu przypadkach, których nie obejmują normy, może stanowić istotną trudność. Podobna sytuacja dotyczy specyficznych, na przykład zabytkowych, obiektów budowlanych charakteryzujących się długim czasem eksploatacji, w przypadku wykonywania analizy ich nośności. Istotne staje się więc, aby zdefiniować w jak największym stopniu zbliżone do rzeczywistego obciążenie wiatrem. Pozwala to na właściwe określenie wartości sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych. Zagadnienia tego typu wykraczają poza podstawowe schematy obliczeniowe zawarte w normach i wymagają zastosowania odrębnego podejścia polegającego na przeprowadzeniu analiz w tunelu aerodynamicznym lub symulacji za pomocą wyspecjalizowanych programów komputerowych.

W poniższym opracowaniu zaprezentowano przegląd normowych modeli określania obciążenia wiatrem konstrukcji na przełomie lat w Polsce ze wskazaniem sposobów ich adaptacji do konstrukcji nietypowych. Ponadto, przedstawiono problematykę badań w tunelu aerodynamicznym oraz symulacji przepływu powietrza za pomocą programów komputerowych.

2. Ustalanie obciążenia wiatrem według norm projektowych

2.1. Eurokod 1 część 1-4

Norma europejska Eurokod 1 część 1-4 w 2005 roku zastąpiła dotychczas obowiązującą normę polską PN-77/B-02011. Dokonano tym samym procesu standaryzacji wytycznych określania obciążenia wiatrem z innymi krajami europejskimi.

W przedstawionym modelu fundamentalną wielkością definiującą oddziaływanie wiatru jest wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru $v_{b,0}$. Stanowi ona wartość średnią 10-minutową o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,02 co odpowiada średniemu okresowi powrotu 50 lat. Warunki terenowe, w jakich wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru jest określana bezpośrednio z pomiarów, opisano jako teren wiejski, otwarty. Podstawą do prowadzenia obliczeń jest pomiar dokonany na wysokości 10 m, niezależnie od kierunku działania wiatru (Cook, 2007).

Powyższe warunki pomiarowe zdefiniowano jako teren kategorii II i jest to tak zwany teren odniesienia dla pozostałych warunków sytuacyjnych budowli. Uwzględniając kierunek działania wiatru oraz porę roku prędkość bazowa opisana jest wzorem:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (1)$$

gdzie: c_{dir} jest współczynnikiem kierunkowym, a c_{season} jest współczynnikiem sezonowym.

Uogólniając proces określania obciążenia wiatrem budowli w zależności od zastałych warunków sytuacyjnych w normie przedstawiono pięć kategorii

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.szkbodzinski@doktoranci.pb.edu.pl

terenu. Różnorodność czynników wpływających na wzrost wyhamowania powietrza w warstwie przyziemnej (tarciowej troposfery), bezpośrednio wpływająca na prędkość średnią, uwzględniono za pomocą współczynnika chropowatości terenu. Spadek prędkości w stosunku do wartości prędkości wiatru gradientowego jest podyktowany występowaniem przeszkód napotkanych na drodze poruszającego się powietrza. Jest to jak podaje Żurański (1978) efekt zaburzeń wywołanych nie pojedynczą przeszkodą terenową, lecz ich dużą ilością wspólnie wpływającą na zmiany w rozkładzie prędkości.

Współczynnik chropowatości zaproponowano w postaci funkcji logarytmicznej zależnej od wysokości nad poziomem terenu. Jeżeli rozpatrywany problem dotyczy wysokości w zakresie od minimalnej (określonej według tablicy normowej PN-EN 1991-1-4) do maksymalnej równej 200 m, to współczynnik chropowatości opisuje wzór:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

gdzie: k_r jest współczynnikiem terenu, a z_0 jest wymiarem chropowatości przyjętym z tablicy normowej PN-EN 1991-1-4.

Norma wskazuje możliwość wyznaczenia współczynnika chropowatości według załącznika krajowego, w którym szukaną wartość wyrażono jako funkcję potęgową w zależności od wysokości.

Po zlokalizowaniu budowli w planie może dojść do sytuacji, że obiekt będzie narażony na zwiększone oddziaływanie wiatru ze względu na warunki wysokościowe obiektu oraz otaczającego go terenu. Występowanie pojedynczych wzgórz i skarp, mogących wpływać na zwiększanie prędkości wiatru oddziałującego na konstrukcję, zostało sprowadzone do zastosowania współczynnika rzeźby terenu $c_o(z)$. Szczegółową procedurę jego obliczania zamieszczono w załączniku A.3 normy PN-EN podając sposób wyznaczania współczynnika orografii jako funkcji nachylenia stoku nawietrznego Φ oraz współczynnika miejsca s . Jednocześnie zaznaczono, że w przypadku średniego nachylenia terenu nawietrznego (10 wysokości wzniesienia) o wartości mniejszej niż 3° wpływ działania rzeźby terenu może zostać pominięty.

Struktura wiatru wymaga opisu tego zjawiska meteorologicznego za pomocą pewnych uproszczeń związanych z zastosowaniem uśredniania czasowego. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest zdefiniowanie prędkości wiatru za pomocą dwóch składowych: wielkości średniej i fluktuacyjnej inaczej nazywanej również pulsacyjną. Według przedstawianego modelu normowego wartość średnia prędkości jako funkcja wysokości nad poziomem terenu jest opisana zależnością:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (3)$$

gdzie: $c_r(z)$ jest współczynnikiem chropowatości, $c_o(z)$ jest współczynnikiem rzeźby terenu, a v_b jest prędkością bazową wiatru.

Wartości fluktuacyjne działania wiatru na konstrukcję są definiowane za pomocą intensywności turbulencji, która stanowi iloraz średniej wartości kwadratowej fluktuacji (czyli średnie odchylenie standardowe prędkości chwilowej) i prędkości średniej. Ponadto przyjmuje się, że składowe pulsacyjne posiadają średnią wartość równą 0. Intensywność turbulencji jest określona wzorami:

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{dla } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{dla } z < z_{\min} \quad (5)$$

gdzie: k_1 jest współczynnikiem turbulencji, a z_{\min} jest wysokością minimalną przyjętą z tablicy normowej PN-EN 1991-1-4.

Mając wartość średnią prędkości oraz składowe pulsacji możliwe staje się wyznaczenie szczytowego ciśnienia prędkości $q_p(z)$. Jak podają Żurański i Gaczek (2011) jest to ciśnienie odpowiadające prędkości wiatru z uśredniania czasowego 1-3 sekund. Ogólną postać zależności przedstawia wzór:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (6)$$

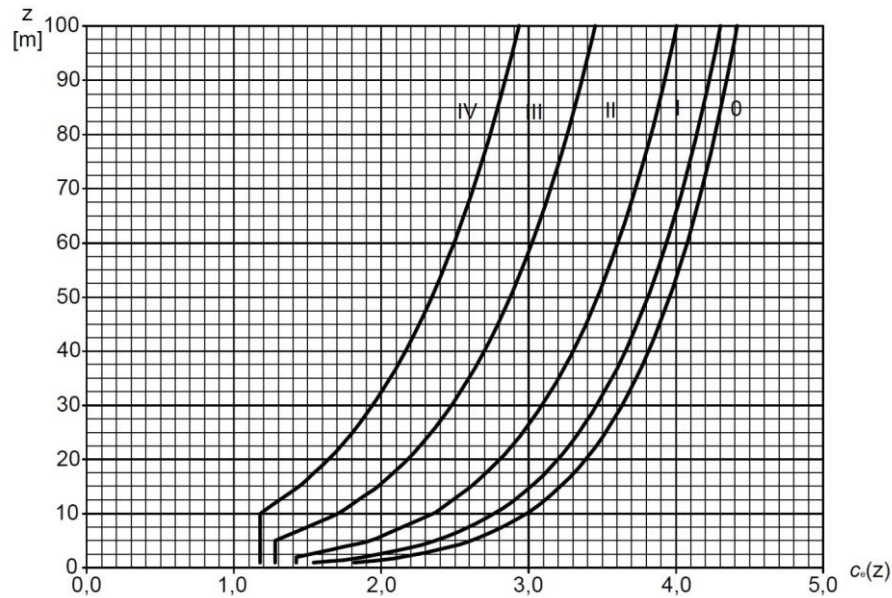
gdzie: $c_e(z)$ jest współczynnikiem ekspozycji, natomiast q_b jest bazowym ciśnieniem prędkości

Współczynnik ekspozycji rozdziela całkowite obciążenie ciśnieniem wiatru na dwie składowe. Pierwsza z nich odpowiada obciążeniu jakie wywiera wiejący wiatr na pewnej odległości przed napotkaną przeszkodą. Druga natomiast definiuje część obciążenia opisującego porywistą naturę wiatru, czyli zwiększanie prędkości w skutek działania krótkotrwałych zmian fluktuacyjnych. Wartość szczytowego ciśnienia prędkości może być więc zapisana jako:

$$\begin{aligned} q_p(z) &= [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = \\ &= \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)}_{\text{ciśnienie średnie}} + \underbrace{7 \cdot I_v(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)}_{\text{ciśnienie wynikające z porywistości}} \end{aligned} \quad (7)$$

Wartość współczynnika ekspozycji może być odczytana bezpośrednio z wykresu zawartego w normie dla $c_o = 1,0$ i $k_1 = 1,0$ (rys. 1).

Gęstość występującą we wzorze (7) zalecono przyjmować jako $1,25 \text{ kg/m}^3$. Jest to wartość, jak podaje Żurański (1978), odpowiadająca temperaturze powietrza 10°C .



Rys. 1. Normowy wykres współczynnika ekspozycji według Eurokodu 1 część 1-4

Określenie wartości ciśnienia działającego na poszczególne powierzchnie konstrukcji zakłada przemnożenie ciśnienia szczytowego prędkości przez współczynniki ciśnienia zewnętrznego lub wewnętrznego. Norma szczegółowo wskazuje sposób definiowania pól obciążenia wiatrem w zależności od wysokości lub wymiaru prostopadłego do kierunku działania wiatru. Charakterystyczne ciśnienie wiatru na powierzchni zewnętrzne lub wewnętrzne można obliczyć według ogólnego wzoru:

$$w_k = q_p(z_k) \cdot c_{pk} \quad (8)$$

gdzie: c_{pk} jest współczynnikiem ciśnienia zewnętrznego c_{pe} albo wewnętrznego c_{pi} , z_k jest wysokością odniesienia dla ciśnienia zewnętrznego z_e albo ciśnienia wewnętrznego z_i .

W przypadku nietypowych konstrukcji powyższe podejście może być zastosowane, gdy istnieje możliwość dokonania racjonalnego podziału obiektu na schematy normowe i analizowania każdej części oddzielnie. Wydzielony segment konstrukcji jest rozpatrywany niezależnie jako schemat prosty według wytycznych zawartych w normie. Całkowity rozkład ciśnienia na powierzchniach budowli otrzymuje się przez połączenie schematów. Takie podejście obliczeniowe pozwala na oszacowanie obciążenia wiatrem, jednak w przypadku niektórych pól ciśnienia znacząco zawyża rezultaty. Szczególnie uwidacznia się to w przypadku miejsc, w których działa znaczne podciśnienie, czyli zazwyczaj w obrębie krawędzi konstrukcji. Nie zawsze też istnieje możliwość adaptacji schematów normowych do zastanej sytuacji projektowej. Skomplikowana forma analizowanego obiektu niekiedy wymaga podziału na kilka takich schematów co z kolei wymaga od projektanta czasochłonnego podejścia obliczeniowego.

W przypadku niektórych konstrukcji wygodniejsze jest obliczenie całkowitej siły wypadkowej lub kilku składowych sił wypadkowych obciążenia wiatrem działających na budowlę. Wartość takiej siły można

obliczyć korzystając ze wzoru:

$$F_w = c_s c_d \sum c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (9)$$

gdzie: c_s jest współczynnikiem rozmiarów, c_d jest współczynnikiem dynamicznym, c_f jest współczynnikiem oporu aerodynamicznego, a A_{ref} jest powierzchnią odniesienia elementu lub segmentu konstrukcji.

Współczynnik rozmiarów umożliwia redukcję szczytowego ciśnienia prędkości z uwagi na jednoczesne niewystąpienie takiej wartości na całej powierzchni A_{ref} konstrukcji. Współczynnik dynamiczny zaś uwzględnia właściwości aeroelastyczne budowli.

Eurokod podaje szereg współczynników oporu aerodynamicznego, które pozwalają wyznaczyć obciążenie wiatrem dla takich przekrojów poprzecznych, jak wielokąty foremne, walce kołowe czy kształty kuli i konstrukcji kratowych. Podobnie jak w przypadku ciśnienia działającego na powierzchnie, obliczenie obciążenia wiatrem konstrukcji o skomplikowanym kształcie sprowadza się do wyznaczenia wartości sił na poszczególne elementy, a następnie ich zsumowanie. Niestety takie podejście do problemu nie pozwala na uwzględnienie interakcji elementów, a dokładniej turbulentnego wzrostu lub spadku ciśnienia, gdy elementy znajdują się blisko siebie. Wprowadzenie wspomnianego uproszczenia może prowadzić do błędnego oszacowania obciążenia wiatrem, szczególnie w przypadku elementów znajdujących się w strefie zawietrznej, gdzie następuje silne zaburzenie poruszającego się powietrza. Niemniej jednak, celowe i bardziej niekorzystne przyłożenie obciążenia do konstrukcji sprawia, że projektant korzystając z tej metody w przypadku nowo projektowanych obiektów jest w stanie bezpiecznie przeprowadzić obliczenia statyczne. Problem niestety komplikuje się, gdy chodzi o budowle istniejące, które wymagają zdefiniowania poziomu wyężenia przekrojów (na przykład obiekty zabytkowe). Znaczące zawyżenie obciążenia jest tutaj zjawiskiem niepożądanym i ustalenie

zbliżonego do rzeczywistości obciążenia wymaga zastosowania innych metod obliczeniowych.

2.2. Polska Norma PN-77/B-02011

Podstawowym założeniem normy PN-77/B-02011 *Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem* było wprowadzenie uśredniania dziesięciominutowego prędkości wiatru. Otrzymana w ten sposób wartość prędkości jest zmienną losową stanowiącą podstawową wielkość podczas obliczania obciążenia wiatrem. Okres podstawowy powrotu wynosi 50 lat. W podobny sposób jak w obowiązującej normie europejskiej dokonywano pomiarów, a mianowicie prędkość mierzono na wysokości 10 m nad poziomem terenu o charakterze otwartym (Żurański i Gaczek, 2011).

Pomiary były prowadzone w 36 stacjach Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW) rozmieszczonych w różnych miejscach Polski. W każdej z nich przez okres 7 lat dokonywano pomiarów średnich dwuminutowych oraz wartości chwilowych, gdy wartość prędkości przekroczyła 5 m/s. Mierzono również kierunek działania wiatru tworząc tak zwane róże wiatrów, dzięki którym wskazano jednoznacznie, że najsilniejsze z nich to wiatry zachodnie i górskie.

Ostatecznie kraj podzielono na trzy strefy ze wskazaniem dwóch dodatkowych podstref w rejonie nadmorskim. Największy obszar Polski zajmuje strefa I obejmując zasięgiem centralną część kraju z pominięciem pasma Łysogór, gdzie obciążenie wiatrem wskazano przyjmować jak dla strefy II nadmorskiej. W części południowej kraju zdefiniowano obciążenie wiatrem jako strefę III, która opisuje w większej części prędkość wiatru halnego występującego okresowo w tych regionach (Żurański, 1978). Charakterystyczną wartość ciśnienia prędkości wiatru w tej strefie należy obliczać korzystając z funkcji liniowej zależnej od wysokości położenia budowli nad poziomem morza.

Charakterystyczna wartość obciążenia wiatrem określona jest wzorem:

$$p_k = q_k \cdot C_e \cdot C \cdot \beta \quad (10)$$

gdzie: q_k jest charakterystycznym ciśnieniem prędkości wiatru, C_e jest współczynnikiem ekspozycji, C jest współczynnikiem aerodynamicznym, a β współczynnikiem działania porywów wiatru.

Charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru opisuje wartość ciśnienia jakie panuje podczas przepływu w stanie niezaburzonym, czyli przed napotkaniem na swojej drodze jakiegokolwiek przeszkody. Według zaleceń wspomniana wartość powinna być przyjmowana według tablicy normowej PN-77/B-02011. Natomiast jeżeli budowla z racji na swój charakter eksploatacyjny jest szczególnie narażona na oddziaływanie wiatru zaleca się, aby korzystać z danych bardziej szczegółowych, zaczerpniętych z IMGiW. Charakterystyczne ciśnienie prędkości wiatru określa wzór:

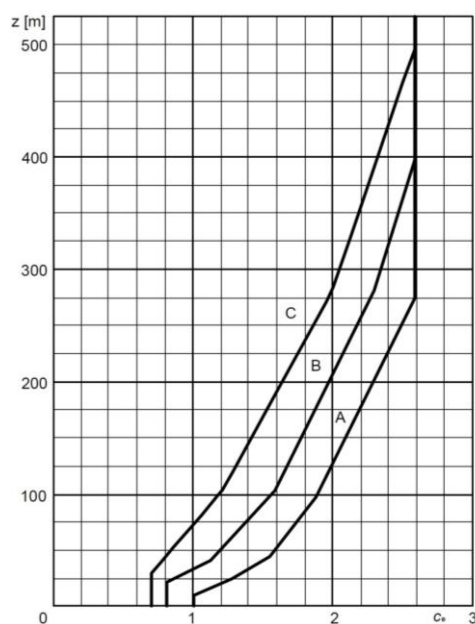
$$q_k = \frac{\rho \cdot V_k^2}{2} \quad (11)$$

gdzie: V_k jest charakterystyczną prędkością wiatru, a ρ jest gęstością powietrza.

Gęstość powietrza w odróżnieniu od obowiązującej normy europejskiej zalecono przyjmować równą $1,23 \text{ kg/m}^3$, a w strefie III różnicować ją w zależności od wysokości nad poziomem morza.

Odmienne podejście w stosunku do Eurokodu 1 jest widoczne w przypadku określania rodzajów terenu definiującego w tym przypadku wraz z wysokością budowli nad terenem współczynnik ekspozycji. W normie PN-77/B-02011 wyróżniono trzy rodzaje terenu A, B i C. Pierwszym z nich jest teren odpowiadający pomiarom wartości prędkości wiatru i nazwany został otwartym z nielicznymi przeszkodami. Teren B opisuje warunki usytuowania budowli w sąsiedztwie zabudowań przy ich wysokości do 10 m lub terenu zalesionego. Ostatni teren C odnosi się do zabudowy o wysokości powyżej 10 m znajdujących się w pobliżu analizowanej budowli. Jednocześnie zaznaczono, że obiekt może być zaliczony do terenu A już wtedy, kiedy w promieniu nie mniejszym niż 30 wysokości budowli nie znajdują się ani zabudowania, ani teren zalesiony. Jeżeli wspomniane przeszkody znajdują się bliżej należy dokonać wyboru terenu B lub C w zależności od sytuacji projektowej.

Współczynnik ekspozycji C_e jest odczytywany z wykresu (rys. 2) lub na podstawie funkcji zależnej od przyjętego rodzaju terenu i wysokości z ponad poziomem gruntu. W przypadku usytuowania budowli na nasypach, skarpach o nachyleniu większym niż 1:3, dodatkowo należy przyjmować umowny poziom gruntu powodujący pozorny wzrost wysokości budowli.



Rys. 2. Normowy wykres współczynnika ekspozycji według PN-77/B-02011

Współczynnik porywów β we wzorze (10) obecnie nie występuje bezpośrednio w Eurokodzie 1. Norma PN-77/B-02011 dokonuje podziału budowli ze względu na odpowiedź dynamiczną na dwie kategorie: podatne

na dynamiczne działanie wiatru oraz niepodatne na dynamiczne działanie wiatru. W przypadku budowli niepodatnych zalecane jest przyjęcie współczynnika β o wartości 1,8 odpowiadającej zamianie ciśnienia prędkości wiatru otrzymanej z uśredniania czasowego 10-minutowego na ciśnienie prędkości z uśredniania z czasu 10-15 s (Żurański, 2010). Odmienne podejście zastosowano do konstrukcji podatnych, gdzie wartość współczynnika należy uzależnić od oddziaływania turbulentnego w zakresie częstotliwości rezonansowych i pozarezonansowych, warunków terenowych oraz częstości drgań własnych budowli.

Współczynnikiem definiującym rozkład ciśnienia na poszczególnych powierzchniach w zależności od rodzaju konstrukcji lub elementu konstrukcyjnego jest współczynnik oporu aerodynamicznego. W załączniku do normy podano wartości tego współczynnika w zależności od rodzaju analizowanej konstrukcji. Pomimo, iż zamieszczono w tym miejscu niezbędne podstawowe informacje projektowe to wytyczne normowe jednoznacznie wskazują, że w przypadku obiektów o dużym znaczeniu lub kształtach wyraźnie odbiegających od podanych schematów należy każdą z takich konstrukcji rozpatrywać indywidualnie. Warunek ten może zostać spełniony poprzez wykonanie badań aerodynamicznych lub bazowanie na wytycznych zaczerpniętych z uznanych źródeł literaturowych.

Określenie rozkładu obciążenia wiatrem według normy polskiej jest niewątpliwie procesem łatwiejszym i bardziej przyjaznym dla projektanta w stosunku do normy europejskiej. Dotyczy to przede wszystkim określania charakterystycznego ciśnienia prędkości z uwzględnieniem, kategorii terenu oraz działania porywów wiatru, odpowiadającego w Eurokodzie szczytowemu ciśnieniu prędkości. Pomimo, iż obecnie wskazane jest korzystanie z wytycznych europejskich ujednolicających proces projektowania w Europie, to norma polska stanowi doskonały środek weryfikacyjny, pozwalający na oszacowanie potencjalnego błędu obliczeniowego.

2.3. Porównanie wartości charakterystycznych ciśnień prędkości dla stref wiatrowych określonych w normach

W celu zobrazowania różnic wartości charakterystycznych ciśnień prędkości dla stref wiatrowych według norm PN-EN 1991-1-4:2008 i PN-77/B-02011 przeprowadzono obliczenia, które przedstawiono w formie tabelarycznej (tab. 1). Kalkulacje wykonano przy założeniu, że obiekt znajduje się na wysokości poniżej 300 m nad poziomem morza, a gęstość powietrza wynosi odpowiednio $1,25 \text{ kg/m}^3$ w przypadku Eurokodu 1 i $1,23 \text{ kg/m}^3$ w przypadku normy PN-77/B-02011.

Tab. 1. Zestawienie wartości charakterystycznego ciśnienia prędkości według przedstawionych norm

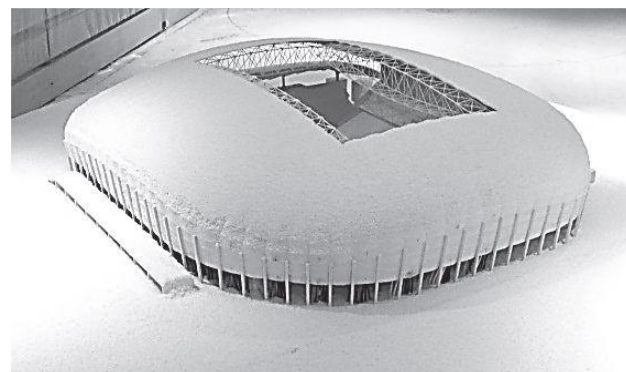
Norma	Strefa wiatrowa		
	I	II	III
	[N/m ²]		
Eurokod 1-1-4:2008	303	423	303
PN-B/77-02011	246	354	354
Różnica [%]	23,0	19,3	-14,6

Uzyskane rezultaty jednoznacznie wskazują, że w strefach I i II obciążenia wiatrem norma Eurokod 1 część 1-4 podaje wyższe wartości charakterystycznego ciśnienia prędkości w stosunku do normy PN-77/B-02011 sięgające 23% (strefa I) i 19,3% (strefa II z wyłączeniem stref IIa i IIb normy PN-B). Odwrotnie sytuacja przedstawia się w strefie III gdzie to norma polska wskazuje wybór wyższej wartości ciśnienia. Z uwagi zaś na specyfikę wiatrów wiejących w tej strefie bardziej istotne staje się analizowanie obiektów położonych powyżej 300 m nad poziomem morza, gdzie w miarę wzrostu wysokości rosną również wartości otrzymane według jednej, jak też drugiej normy.

3. Inne metody ustalania obciążenia wiatrem

3.1. Tunele aerodynamiczne

Rozwój nowoczesnych trendów architektonicznych i związane z nim tworzenie skomplikowanych kształtów budowli oraz lokalizowanie ich w istniejącej zabudowie pociąga za sobą problemy powstające podczas ustalania obciążenia wiatrem. Stosowanie modeli normowych staje się niewystarczające do racjonalnego opisu oddziaływania wiatru na konstrukcję, a niekiedy jest wręcz niemożliwe. Zestawienie współczynników ciśnienia dla typowych schematów obliczeniowych nie pozwala na opisanie obciążenia wiatrem w przypadku budowli unikalnych, nietypowych w swoim rodzaju, przykładowo pokazano na rysunku 3 (Kimbar, 2013).



Rys. 3. Przykład modelu badawczego. Stadion Miejski w Poznaniu (Kimbar, 2013)

Początki analiz w tunelu aerodynamicznym skupiają się wokół konstruowania pierwszych aeroplanów. Uznaje się, że pierwszy tunel aerodynamiczny został zbudowany przez Wenhama i Browninga w 1871 roku. Natomiast pierwszą próbę analizy budynku w tunelu aerodynamicznym jak podaje Holmes (2001) podjął Kernot w 1893 roku. Wykorzystanie tuneli aerodynamicznych do opisu opływu powietrza stało się możliwe po uświadomieniu sobie możliwości wprowadzenia w ruch powietrza przy stacjonarności obiektu badań. Pozwoliło to na łatwiejszą obserwację zjawisk zachodzących wokół modelu niż przy jego poruszaniu względem przestrzeni powietrza (Baals i Corliss, 1981). Pomimo iż początkowo większość działań doświadczalnych była prowadzona w zagadnieniach dotyczących lotnictwa, to w połowie XX wieku podjęto próbę adaptacji badań tunelowych na potrzeby budownictwa i ogólnie zdefiniowanej inżynierii wiatrowej (Flaga, 2008). Obecnie badania aerodynamiczne dotyczą ponadto, między innymi, samochodów, składowych części maszyn, możliwości opływowych strojów sportowych, jak też zagadnień o większej skali, na przykład urbanistycznego planowania zabudowy miast i roślinności oraz ich wzajemnego wpływu na siebie.

Można wyróżnić kilka rodzajów tuneli ze względu na ich sposób użycia. Na potrzeby opisu przepływu powietrza wokół konstrukcji stosuje się tunele aerodynamiczne z warstwą przyścienną, tak zwane *boundary layer wind tunnels*. Tunele tego typu w stosunku do tuneli lotniczych charakteryzują się dłuższą sekcją roboczą pozwalającą na wytworzenie w jak największym stopniu zbliżonej do rzeczywistości warstwy przyściennej. Długość sekcji roboczej zazwyczaj wynosi 20-30 m. Jeden z pierwszych takich tuneli powstał w Kanadzie w 1965 roku gdzie projektantem był Davenport (Dyrbye i Hansen, 1999).

Przeprowadzenie badań w tunelu aerodynamicznym ze względu na znaczące gabaryty konstrukcji uniemożliwia testy na egzemplarzach rzeczywistych, zastępując je modelami. W celu umożliwienia prowadzenia doświadczeń stosuje się kryteria wywodzące się z analizy wymiarowej i teorii podobieństwa. Możliwość odzwierciedlenia zjawiska wiąże się przede wszystkim z zachowaniem podobieństwa geometrycznego. Ponadto zjawiska można uznać za zbliżone do siebie jedynie wtedy, gdy w tym samym punkcie oraz tej samej chwili wartości wielkości charakteryzującej te zjawiska są do siebie proporcjonalne (Walden, 1991). W odniesieniu do analizy ruchu powietrza spełnienie powyższych warunków wiąże się z zachowaniem identycznych wartości, tak zwanych liczb kryterialnych w równaniach Naviera-Stokesa opisujących badane zjawisko. Liczby kryterialne przedstawiono poniżej (Flaga, 2008):

$$St = \frac{L_*}{v_* t_*} = idem \quad (12)$$

$$Fr = \frac{v_*^2}{gL_*} = idem \quad (13)$$

$$Eu = \frac{P_*}{\rho_* v_*^3} = idem \quad (14)$$

$$Re = \frac{v_* L_*}{\nu_*} = idem \quad (15)$$

gdzie: St jest liczbą Strouhala, Fr jest liczbą Froude'a, Eu jest liczbą Eulera, Re jest liczbą Reynoldsa, v_* , L_* , ν_* , ρ_* , t_* , g są wielkościami odniesienia.

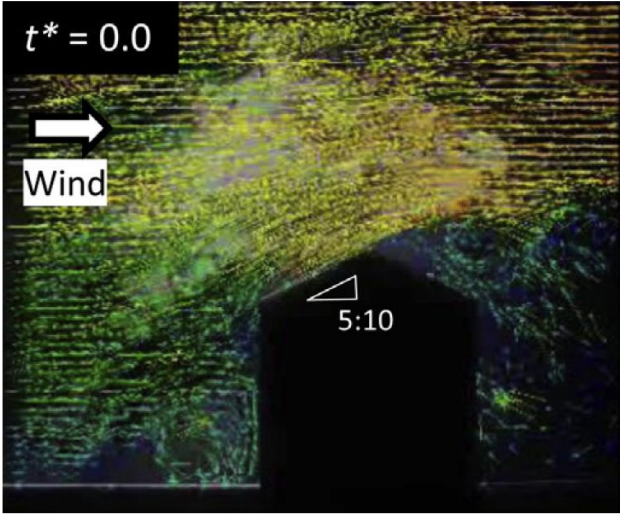
Zapewnienie pełnego podobieństwa przepływów wymaga spełnienia zarówno wzorów (12-15), jak również warunków brzegowych. W rzeczywistości zachowanie wszystkich kryteriów podobieństwa jest niemożliwe, jak też niewymagane, gdyż w zależności od potrzeb badawczych tylko niektóre muszą być spełnione. Wynika to z różnego wagowego wpływu poszczególnych części wzoru Naviera-Stokesa na opis ruchu (Żurański, 1978; Flaga, 2008; Błazik-Borowa, 2008).

Przy realizacji badań w tunelu aerodynamicznym niezwykle trudnym zadaniem jest odwzorowanie profilu działania wiatru w dolnej warstwie troposfery, to znaczy najniższej warstwy atmosfery ziemskiej. Flaga (2008) podaje dwie metody symulacyjne. Pierwszą z nich jest metoda bierna polegająca na odwzorowaniu warstwy przyściennej poprzez zastosowanie różnego rodzaju przeszkód (modele budynków, drzew) oraz wykładzin nadających chropowatość powierzchni. Pozwala to na generację turbulencji przepływu niezwykle istotnej w przypadku takich badań. Ponadto, stworzenie dobrych warunków symulacyjnych wymaga posiadania dłuższej sekcji roboczej, gdyż dopiero wtedy przepływ jest miarodajnie zbliżony do rzeczywistego. Jeżeli długość sekcji roboczej jest niewystarczająca to w celu wytworzenia należynej turbulencji przy wlocie stosuje się przeszkody w postaci siatek, płyt perforowanych lub poprzecznych listew o różnym przekroju. Takie przeszkody są również wykorzystywane w tunelach dłuższych, aby wywołać pulsacje prędkości. Różnica polega na tym, że w tunelach krótszych odczyty pomiarów mogą być niekiedy obciążone znaczącym błędem badawczym. Dobór odpowiednich przeszkód jest indywidualnym problemem każdego tunelu aerodynamicznego (Flaga, 2008).

Druga metoda polega na symulacji warstwy przyściennej za pomocą ruchomych przeszkód na wlocie, które definiują przepływ turbulentny i fluktuacje prędkości. Stosowane są też sposoby tworzenia strumienia powietrza przez kilka niezależnych źródeł sterowanych niezależnie. Jest to metoda rzadko spotykana, a większość badań jest oparta na metodzie biernej. Jednocześnie Flaga (2008) wskazuje na możliwość uzyskania wysokiej jakości rezultatów poprzez zastosowanie metody hybrydowej. Ze względów ekonomicznych metoda hybrydowa nie jest stosowana.

Analiza przepływu powietrza w tunelu aerodynamicznym różni się w zależności od wielkości wymagających zbadania. A mianowicie, przygotowane modele do pomiarów rozkładu ciśnienia, częstości drgań własnych czy rozkładu prędkości wiatru wokół obiektu

będą różniły się między sobą. Wynika to z faktu niemożliwości zapewnienia wszystkich kryteriów podobieństwa modelu. W przypadku pomiarów prędkości wokół obiektu kierunek wiatru może być zobrazowany na przykład za pomocą metody PIV (ang. *Particle Image Velocimetry*). Światło lasera ulegające rozproszeniu na drobnych kropkach substancji przenoszonych przez powietrze tworzy obraz opływu wokół napotkanego ciała, co pokazano na rysunku 4 (Tominaga i in., 2015).



Rys. 4. Przykład zastosowania techniki PIV podczas badań w tunelu aerodynamicznym (Tominaga i in., 2015)

Badania dotyczące zagadnień z zakresu aeroelastyki wymagają natomiast stworzenia modelu wyposażonego w zestaw akcelerometrów badających drgania w jednym, dwóch lub trzech kierunkach przestrzeni w zależności od potrzeb. Ciśnienie wywierane na powierzchnie modelu obecnie może być określane, na przykład za pomocą nowoczesnej metody PSP (ang. *Pressure Sensitive Paint*). Technika wykorzystuje właściwości fluorescencyjne specjalnej powłoki, którą zostaje pokryty badany obiekt. Pod wpływem ciśnienia wywieranego na powierzchnie i oświetleniu ich światłem o określonej długości fali, uzyskiwany jest kolorowy obraz stref bardziej i mniej obciążonych.

Przebieg badań w tunelu aerodynamicznym jest niewątpliwie najdokładniejszym sposobem opisu oddziaływania wiatru na budowlę. Niestety przeprowadzenie testów wymaga dużych nakładów finansowych związanych przede wszystkim z wykonaniem modelu i symulacji w tunelu otoczenia budowli. Wadą jest ponadto słaba dostępność tuneli aerodynamicznych.

3.2. Komputerowa mechanika płynów (CFD)

W dobie ciągle rozwijającego się potencjału sprzętu komputerowego pomysł zaimplementowania metod numerycznych do rozwiązań równań ruchu płynu stał się zagadnieniem realnie możliwym. Komputerowa mechanika płynów jest dziedziną odnoszącą się do wielu dyscyplin technicznych, między innymi, zdobywa uznanie w medycynie czy naukach przyrodniczych.

Opis ruchu dokonywany jest poprzez rozwiązanie

układu równań różniczkowych, czyli równania ciągłości oraz równań Naviera-Stockesa (N-S). Płynem poruszającym się w tym przypadku jest powietrze, które jest traktowane jako ośrodek ciągły. Obliczenie pola prędkości i ciśnienia w analizowanym obszarze obliczeniowym ruchu turbulentnego powietrza wymaga zastosowania hipotezy uśredniania Reynoldsa, polegającej na wprowadzeniu sumy wartości średniej oraz wartości fluktuacyjnych odpowiedniej wielkości fizycznej. Włączenie powyższych założeń do równania ciągłości i równań N-S oraz przyjęcie, że powietrze poruszające się z niskimi prędkościami może być traktowane jako ośrodek nieściśliwy, pozwala zapisać równanie ciągłości w postaci wskaźnikowej (Jamińska, 2012):

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

Równania N-S przyjmują w tym przypadku formę (Jamińska, 2012):

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \rho \bar{f}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_m} (2\mu s_{im} - \rho \overline{u'_i u'_m}) \quad (17)$$

gdzie: u_i jest składową wektora prędkości, x_i są współrzędnymi układu globalnego, ρ jest gęstością powietrza, μ jest dynamiczną lepkością płynu, a_i są składowymi wektora sił zewnętrznych.

Dodatkowy element we wzorze (17) jest nazywany tensorem naprężeń turbulentnych. Dodatkowe naprężenia będące niewiadomymi powodują, że niemożliwe staje się rozwiązanie układu równań różniczkowych ruchu. Z uwagi na symetryczność tensora naprężeń turbulentnych powstaje 6 niewiadomych, które wymagają wyznaczenia za pomocą tak zwanych hipotez zamykających lub inaczej nazywanych modelami turbulencji.

W większości programów komercyjnych do opisu przepływów stosowany jest model $k-\varepsilon$ zaliczany do modeli dwurównaniowych i to jemu dalej poświęcono uwagę. Model pozwala na analizowanie przypadków, w których ośrodek można uznać jako nieściśliwy, poruszający się z niewielkimi prędkościami, co odpowiada badaniu ruchu powietrza w warstwie przyziemnej. Pomimo, iż metoda posiada wiele modyfikacji, przedstawiono wersję standardową, powszechnie występującą w programach komputerowych.

Model turbulencji $k-\varepsilon$ w wersji standardowej oprócz równań ciągłości i N-S dla całkowitego zapisu układu równań różniczkowych przepływu ma również tak zwane równania zamykające transportu energii kinetycznej turbulencji oraz transportu szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji (Jamińska, 2012):

$$\frac{d}{dt}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_m} \right] + 2\mu_t \overline{s_{ij} s_{ij}} - \rho \varepsilon \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_m} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_m} \right] + 2C_{1\varepsilon} \mu_t \overline{s_{ij} s_{ij}} \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (19)$$

gdzie: s_{ij} jest składowymi tensora prędkości odkształcenia liniowego, σ_k jest liczbą Prandtla odpowiadającą energii kinetycznej turbulencji, σ_ϵ jest liczbą Prandtla odpowiadającą dyssypacji energii kinetycznej turbulencji, a $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ są stałymi modelu.

Stałe modelu w wersji $k-\epsilon$ w wersji standard są następujące:

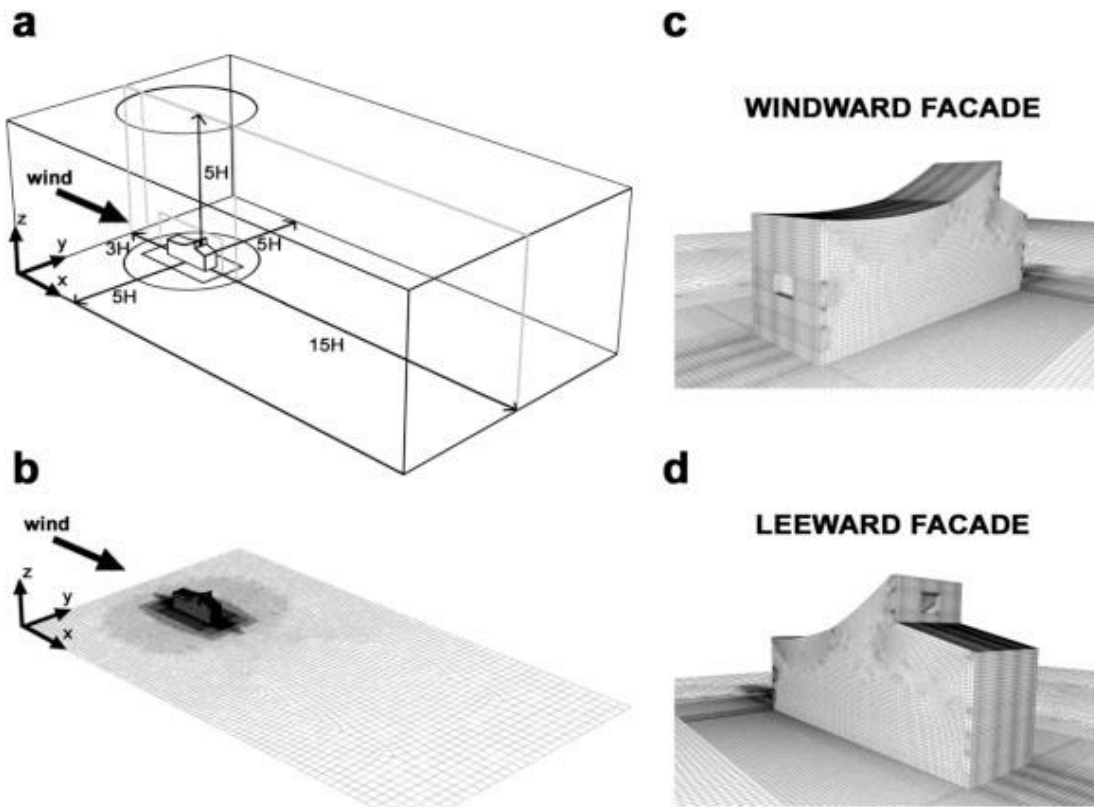
$$C_\mu = 0,09; \sigma_\epsilon = 1,30; \sigma_k = 1,00; C_{1\epsilon} = 1,44; C_{2\epsilon} = 1,92$$

Stała C_μ dotyczy dynamicznego współczynnika lepkości turbulencji μ_t .

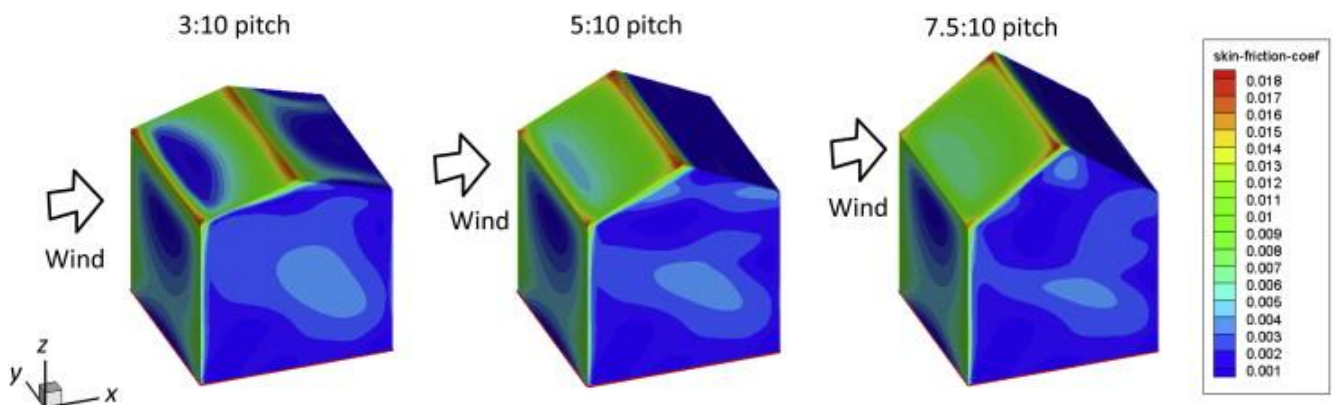
Przeprowadzenie symulacji komputerowej wymaga w pierwszej kolejności wykonania modelu, który zostaje

umieszczony w domenie obliczeniowej pełniącej funkcję poruszającego się otoczenia obiektu, w tym przypadku powietrza. Proces obliczeniowy wymaga ponadto zdefiniowania warunków brzegowych, które obejmują zadanie na wlocie podstawowych profili opisujących działanie wiatru (V , k , ϵ) oraz na wlocie ciśnienia o wartości zerowej. Ponadto, ściany i sufit domeny są opisane warunkiem poślizgu. Przykład przestrzeni obliczeniowej, tak zwanej domeny, pokazano na rysunku 5.

W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej uzyskiwany jest między innymi rozkład ciśnienia na poszczególnych powierzchniach modelu (rys. 6), jak też rozkład prędkości wokół analizowanej konstrukcji.



Rys. 5. Przykładowa domena obliczeniowa z modelem budowli o nietypowym kształcie (Peren i in., 2015)



Rys. 6. Rozkład ciśnienia na powierzchniach przykładowego modelu po przeprowadzeniu symulacji komputerowej (Tominaga i in., 2015)

4. Podsumowanie

Ustalanie obciążenia wiatrem dla konstrukcji nietypowych jest zagadnieniem złożonym i skomplikowanym. Wpływ na wartości ciśnienia na poszczególnych powierzchniach konstrukcji ma wiele czynników o charakterze losowym, które zwiększają poziom złożoności poruszanego problemu. Przyjęcie prawidłowej wartości ciśnienia jest sprawą niezwykle ważną, gdyż bezpośrednio wpływa na przekroje elementów konstrukcyjnych, a to z kolei zapewnia należyte bezpieczeństwo budowli.

Wcześniejsze i obowiązujące normy projektowe obejmują swoim zakresem jedynie typowe kształty konstrukcji, co znacząco ogranicza możliwości ich stosowania w szczególnych przypadkach projektowych. Przeprowadzanie procesu zbierania obciążenia wiatrem z zastosowaniem schematów typowych może być wykorzystywane do opisu złożonych kształtów budowli, jednakże jest obarczone znaczącym błędem obliczeniowym. Powoduje to zawyżenie wyników, co mija się z inżynierskim podejściem do projektowania konstrukcji. W wytycznych normowych znajduje się zapis o możliwości rozpatrywania konstrukcji nietypowych z wykorzystaniem badań w tunelu aerodynamicznym. Jest to podejście najbliższe rzeczywistości określeniu obciążenia wiatrem, jednak wymaga stworzenia specjalnego modelu oraz dostępności tuneli aerodynamicznych, co wiąże się z dużymi nakładami finansowymi. Próba zastąpienia badań eksperymentalnych jest zastosowanie rozwiązań komputerowej mechaniki płynów do analizy przepływu powietrza wokół bryły konstrukcji. Stosowanie tej metody wiąże się z kolei z trudnościami przy opisie struktury wiatru za pomocą odpowiednich warunków brzegowych dla domeny obliczeniowej, jednak znacząco redukuje koszty realizacji badania.

Zagadnienie określania obciążenia wiatrem nietypowych budowli jest procesem trudnym, wymagającym od projektanta posiadania wiedzy wykraczającej poza branżę budownictwa i skupiającą się wokół dziedziny nazywanej inżynierią wiatrową. Nawet w przypadku podstawowych typów konstrukcji, podczas wyznaczania obciążenia wiatrem według różnych modeli normowych, występują znaczące rozbieżności, które w zakresie charakterystycznego ciśnienia prędkości oscylują w granicach około 15 do 23%. W dobie różnorodnych rozwiązań architektonicznych obiektów, jednoznaczne wskazanie bezpiecznej i efektywnej wartości obciążenia wymaga znajomości podstawowych danych o tym zjawisku, a przede wszystkich dostępnych możliwości rozwiązania problemu projektowego.

Literatura

- Baals D. D., Corliss W. R. (1981). Wind tunnels of NASA. *National Aeronautics and space administration*, Waszyngton.
- Błazik-Borowa E. (2008). Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji $k-\epsilon$ do wyznaczania parametrów opływu budynków. *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, Lublin.
- Cook N. (2007). Designers' Guide to EN 1991-1-4 Eurocode 1: Actions on structures, general actions part 1-4. Wind actions. *Thomas Telford Publishing*, Londyn.
- Dyrbye C., Hansen S. O. (1999). Wind loads on structures. *John Wiley & Sons*, Chichester.
- Elsner J.W. (1987). Turbulencja przepływów. *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa.
- Flaga A. (2008). Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania. *Arkady*, Warszawa.
- Holmes J. D. (2001). Wind loading of structures. *Spon Press*, Londyn.
- Jamińska P. (2012). Wpływ sposobu zdefiniowania struktury wiatru w modelu turbulencji $k-\epsilon$ w wersji standard na rozkład współczynnika ciśnienia na powierzchni ścian prostopadłością. *Budownictwo i Architektura*, 10/2012 93-104.
- Kimbar G. (2013). Symulowanie w tunelu aerodynamicznym wpływu wiatru na rozkład obciążenia ściegiem dachów. *Budownictwo i Architektura*, 12(2), 119-126.
- Peren J. I., van Hooff T., Leite B. C. C., Blocken B. (2015). CFD simulation of wind-driven upward cross ventilation and its enhancement in long buildings: Impact of single-span versus double-span leeward sawtooth roof and opening ratio. *Building and Environment*, Vol. 85, 263-266.
- Tominaga Y., Akabayashi S., Kitahara T., Arinami Y. (2015). Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, Vol. 84, 204-213.
- Walden H. (1991). Mechanika płynów. *Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Żurański J. A. (1978). Obciążenia wiatrem budowli i konstrukcji. *Arkady*, Warszawa.
- Żurański J. A., Gaczek M. (2011). Oddziaływania klimatyczne na konstrukcje budowlane według Eurokodu. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Żurański J. A. (2010). Oddziaływania wiatru na konstrukcje budowlane w ujęciu nowej normy PN-EN 1991-1-4:2008. *Inżynieria i Budownictwo*, R. 66, Nr 7, 360-367.

PROBLEMS OF ESTABLISHING WIND LOAD IN UNTYPICAL BUILDING STRUCTURES

Abstract: In times of advanced and modern architectural solutions, prediction of wind load can be a significant problem. This paper presents the issues of establishing wind load affecting untypical building structures. The elaboration includes an overview of methods used in determining the wind load, especially those related to wind tunnel research, computer analysis of the air flow and normative models.