

# **Symulowanie w tunelu aerodynamicznym wpływu wiatru na rozkład obciążenia śniegiem dachów**

**Grzegorz Kimbar**

*Instytut Techniki Budowlanej, e-mail: g.kimbar@itb.pl*

**Streszczenie:** Referat przedstawia problematykę prognozowania obciążenia śniegiem na dachach, istotności wpływu wiatru na to obciążenie oraz zakresu użycia tuneli aerodynamicznych wraz z bardziej szczegółowym opisem stanowiska badawczego Politechniki Krakowskiej. Autor omawia zakres badań eksperymentalnych i teoretycznych dotyczących modelowania obciążenia śniegiem przeprowadzonych w latach 2004-2012 w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną Laboratorium Inżynierii Wiatrowej PK. Były to trzy badania modelowe dotyczące zadaszania dużych obiektów widowiskowo-sportowych w stadium realizacji, a także jedna praca dotycząca płaskich dachów w ogólności.

**Słowa kluczowe:** obciążenie śniegiem, wiatr, tunel aerodynamiczny, badania modelowe

## **1. Wprowadzenie**

Obciążenie śniegiem jest jednym z podstawowych obciążeń środowiskowych działających na budowlę. Mimo to, wiarygodne przewidywanie poziomu i rozkładu tego obciążenia pozostaje trudne. W Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej z inicjatywy kierownika prof. dr hab. inż. Andrzeja Flagi od 2004 roku prowadzone są prace teoretyczne i eksperymentalne z tego zakresu. Autor był głównym wykonawcą prac w zespole: prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga, mgr inż. Piotr Matys, mgr inż. arch. Łukasz Flaga, mgr inż. Renata Rzeżocka, dr inż. Grzegorz Bosak.

## **2. Problematyka obciążenia śniegiem dachów**

Zjawiska prowadzące do uformowania się pokrywy śnieżnej można podzielić na trzy grupy: 1) tworzenia się w górnych warstwach troposfery dyspersji śnieżnej, a następnie jej opadu 2) przemian fazowych pokrywy śnieżnej 3) mechanicznego przemieszczania się pokrywy śnieżnej pod wpływem różnych czynników. Nastęstwo działania tych czynników podczas zimy prowadzi do gromadzenia się i przemieszczania pokrywy śnieżnej, która głównie poprzez swój ciężar oddziałuje na dachy budowli. Podobne zjawiska zachodzą w stosunku do pokrywy śnieżnej zgromadzonej na gruncie. Ilościowe różnice w zachodzeniu tych zjawisk na gruncie i na dachach są podstawowym zagadnieniem w przewidywaniu obciążenia śniegiem konstrukcji. Dzieje się tak, ponieważ same zjawiska klimatyczne decydujące o ilości śniegu rzadko są przedmiotem modelowania w zagadnieniach budownictwa. Podchodzi się do nich poprzez obróbkę statystyczną danych pochodzących ze stacji meteorologicznych, to jest mierzonego w nich wynikowego obciążenia śniegiem gruntu. Przejście z danych klimatycznych opracowanych pod kątem ryzyka wysokich opadów śniegu na obciążenie śniegiem konkretnej budowli musi uwzględniać specyfikę rozważanego obiektu pod każdym względem, który w istotny sposób różni go od poletka pomiarowego stacji meteorologicznej. Różnice te (mówiąc w uproszczeniu) wyraża współczynnik kształtu dachu  $\mu$ .

Z wyjątkiem wpływu ciepła pochodzącego z wnętrza budynku wszystkie różnice w zachodzeniu zjawisk formowania się obciążenia śniegiem pośrednio wynikają z kształtu dachu i jego otoczenia. Szczególnie wyraźne jest to w przypadku działania wiatru na pokrywę śnieżną. Na poletku meteorologicznym wpływ wiatru jest pomijalny – przypadku dachów budynków okoliczne budowle i inne przeszkody modyfikują

koncentrację dyspersji śnieżnej podczas opadu, a po opadzie tworzą rejonu erozji i akumulacji śniegu w efekcie wywołując znaczne niejednorodności w rozkładzie masy śniegu.

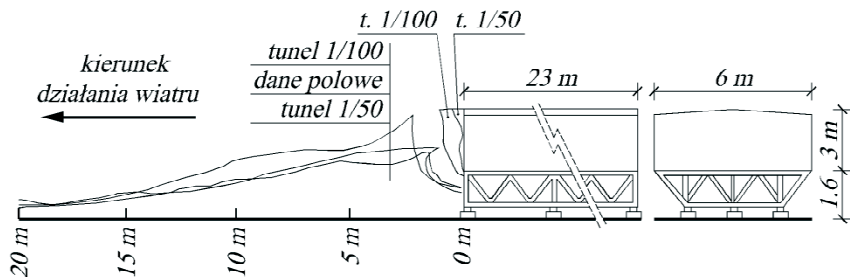
### 3. Tunele aerodynamiczne

Celem przeprowadzania badań nad transportem śniegu wywołanego wiatrem może być zarówno poznanie samego zjawiska jak i określenie rozkładu obciążenia projektowanej budowli. Badania odbywać się mogą w tunelach aerodynamicznych, lecz możliwe jest także przeprowadzanie badań w środowisku zewnętrznym na zmniejszonych modelach [1,2]. Badania na modelach zmniejszonych wymagają ustalenia kryteriów podobieństwa, to jest warunków jakim powinny odpowiadać badania eksperymentalne, aby możliwe było przenoszenie parametrów i wyników pomiędzy sytuacją eksperymentalną (modelu), a obiektu w pełnej skali (prototypu).

W literaturze można spotkać wiele różnorodnych liczb podobieństwa od prostych zależności dotyczących pojedynczych parametrów śniegu takich jak kąt stoku naturalnego, przez liczby podobieństwa będące modyfikacjami klasycznych liczb Reynoldsa i Frouda, aż do skomplikowanych zależności mających na celu całościowe ujęcie zjawisk wpływu przepływu na złożę cząstek [3]. W przedstawionych poniżej badaniach przeprowadzonych w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej stosowano autorskie [4] kryteria podobieństwa bazujące na analizie zagadnień sił działających na cząstki dyspersji i złoża cząstek śniegu i substancji symulującej śnieg.

Za ustaleniem kryteriów podobieństwa idzie przede wszystkim dobór substancji, która odtwarza w warunkach modelowych zachowanie się dyspersji śnieżnej i pokrywy śnieżnej; Z kryteriów tych wynikają także warunki przepływu płynu (powietrza lub wody w tunelach wodnych), który ma wywierać ilościowo podobny skutek jak wiatr na rzeczywisty śnieg.

Kwok [5] poddał badaniu modele budynku stacji arktycznej w skali 1/100 i 1/50 (rys. 1). Jako materiału symulującego śnieg użyto sody oczyszczonej. W pracy rozważano 12 różnych liczb podobieństwa odnoszących się do przedmiotowych zjawisk.



Rys. 1. Badania modelowe formowania się zasy za arktyczną stacją badawczą (na podstawie [5]).

Osłony przeciwnieżne w postaci płotów są jednymi z najlepiej poznanych obiektów w zagadnieniach transportu śniegu. Dlatego są często wybierane jako modele tunelowe przy sprawdzaniu wyników przewidywań teoretycznych. Prace takie prowadzili na przykład Kind i Murray [6].

### 4. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 2) stanowiło rozbudowę istniejącego tunelu aerodynamicznego z warstwą przyścienną znajdującego się w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej [7]. Jest to tunel umożliwiający prowadzenie badań zarówno w obiegu otwartym jak i zamkniętym. Przedstawione niżej badania prowadzono w obiegu zamkniętym, choć ze względu na obecność substancji symulującej śnieg planowano pierwotnie prowadzenie ich przy otwartych czerpni i wyrzutni powietrza, tak aby oczyszczać powietrze. W praktyce jednak takie rozwiązanie okazało się niemożliwe ze względu na występujący wówczas w przestrzeni pomiarowej obieg powietrza wymuszony

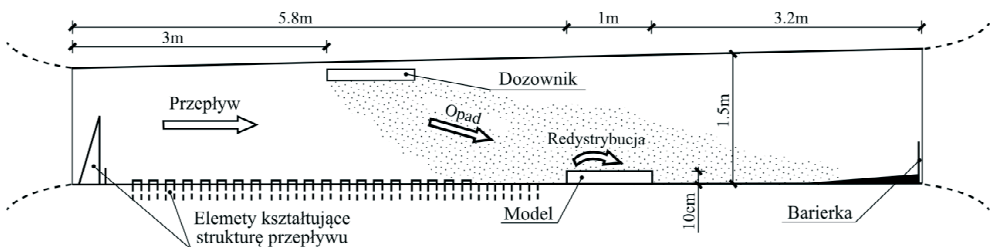
naturalnym wiatrem. Badania prowadzone były przy stosunkowo niewielkiej prędkości napływu (maksymalnie ok. 2,5m/s) i nawet w warunkach prawie bezwietrznej pogody trudne było utrzymanie stabilnych warunków eksperymentu. Tunel aerodynamiczny wyposażono dodatkowo w dozownik substancji symulującej śnieg (jest to sito o wymiarach około 1m×2m o regulowanej prędkości ruchu), a także w różnorodny zestaw elementów zabezpieczających przed rozprzestrzenianiem się tej substancji po wnętrzu laboratorium (ten techniczny aspekt badań okazał się dość trudny i kłopotliwy praktycznie).

Stworzenie tego stanowiska było możliwe głównie dzięki grantowi badawczemu (Nr N506 011 32/1374) przyznanemu przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na wykonanie projektu pt. „Badania eksperymentalne wpływu wiatru na rozkład obciążenia śniegiem na płaskich dachach o dużych rozpiętościach”.

Typowe badanie odbywały się w czterech etapach: 1) wykonanie modelu obiektu oraz modelowanie warstwy przyściennej przepływu w zadanej skali i zgodnie z użytymi kryteriami podobieństwa; 2) modelowanie opadu śniegu; 3) modelowanie przemieszczania się śniegu pod wpływem przepływu; 4) obróbka danych pomiarowych. W każdym z zrealizowanych badań jako substancji symulującej użyto drobno sproszkowanego styropianu. Właściwości tej substancji w najlepszy sposób spełniały proponowane kryteria podobieństwa zarówno w sytuacji modelowania opadu śniegu jak i wywołanego wiatrem przemieszczania pokrywy śnieżnej.

W etapie pierwszym pomiar struktury przepływu warstwy przyściennej wykonywany był zwykle przy pomocy zestawu czujników termooanemometrycznych. Otrzymane z tych pomiarów po wstępnej obróbce parametry prędkości średniej i turbulentnej były używane do wyregulowania elementów tunelu kształtujących warstwę przyścienną tak aby odpowiadały warunkom prototypowym (w pełnej skali).

Etapy drugi i trzeci składały się zwykle z serii eksperymentów różniących się ustawieniem (kierunek wiatru) bądź konfiguracją (kształt) modelu w przestrzeni pomiarowej. Każdy z eksperymentów kończył się pomiarem kształtu modelu. Pomiaru tego dokonywano metodami optycznymi: początkowo urządzeniem fotografometrycznym własnego projektu, ostatecznie skanerem 3D światła białego (rys. 8). Symulację opadu prowadzono do uzyskania warstwy o grubości nadającej się do pomiaru, tym samym zakładając liniowość procesu odkładania się warstwy złoża cząstek i zaniedbując ewentualne sprzężenia śnieg-przepływ (wpływ kształtu pokrywy śnieżnej na ogólny wpływ obiektu). Zwykle oznaczało to użycie kilkudziesięciu litrów substancji symulującej śnieg. Badania przemieszczania się cząstek prowadzono do uzyskania stanu równowagi, to jest do momentu w którym mimo działającego przepływu grubość warstwy nie ulegała już zmianie (zwykle kilkanaście minut).



Rys. 2. Typowa aranżacja przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego LIW-PK podczas badań.

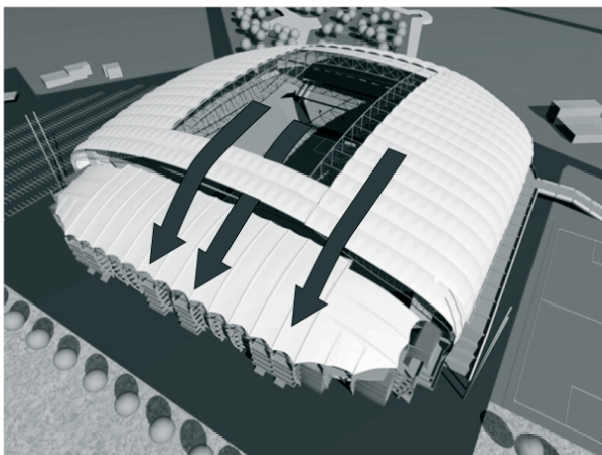
Uzyskane z pomiaru kształtu modelu dane musiały być dalej przetworzone. W szczególności konieczne było wyznaczenie grubości złoża cząstek poprzez porównanie kształtu modelu „zaśnieżonego” i „czystego”, wyznaczenie względnej grubości złoża cząstek (odpowiednika współczynnika  $\mu$ ), uwzględnienia lokalnych warunków wiatrowych w rejonie prototypowego obiektu itd. Wszystkie te operacje miały na celu stworzenie prognozy obciążenia śniegiem na podstawie „surowych” danych pomiarowych z tunelu aerodynamicznego.

## 5. Zrealizowane badania

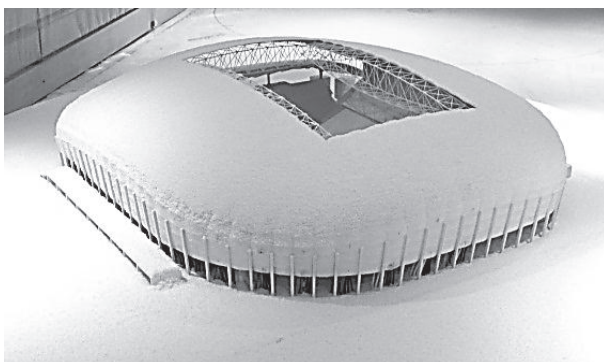
### 5.1. Stadion Miejski w Poznaniu

Badania na modelu Stadionu Miejskiego w Poznaniu zostały zlecone Politechnice Krakowskiej przez firmę projektową Modern Constructions Systems (MCS) na etapie prac obliczeniowo-konstrukcyjnych. W Laboratorium Inżynierii Wiatrowej najpierw zostały wykonane badania dotyczące rozkładu obciążenia wiatrem na dachu stadionu, a następnie przedstawione poniżej badania prognostyczne rozkładu obciążenia śniegiem.

Ze względu na przeprowadzoną rozbudowę dach tego stadionu składa się z dwóch części, przypominając normowy schemat dachu przylegającego do wyższej budowli. Mimo to przepływ wiatru na tym obiekcie może dalece różnić się od spodziewanego na typowym dachu przylegającym (rys. 3). Fakt ten znacząco wpływa również na formowanie się obciążenia śniegiem.



Rys. 3. Spodziewany przepływ powietrza przez dach Stadionu Miejskiego w Poznaniu (na podstawie wizualizacji projektowej MCS).



Rys. 4. Widok modelu w przestrzeni badawczej (archiwum autora).

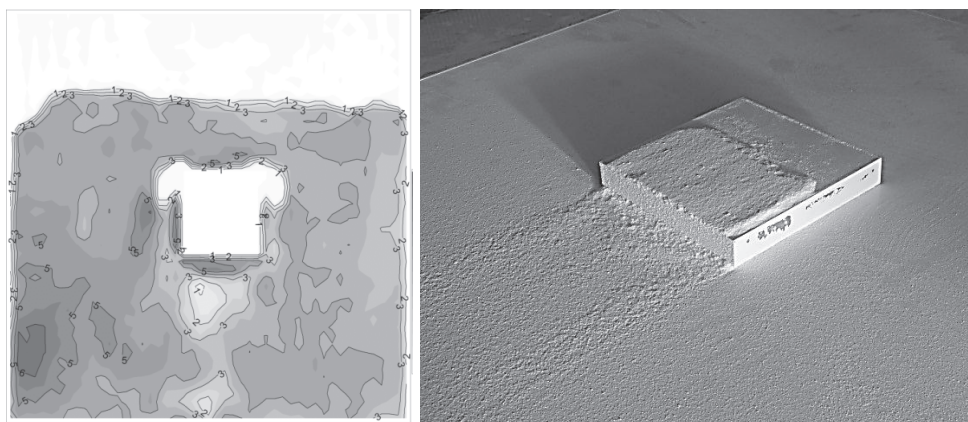
Na zmniejszonym modelu w skali 1:250 (rys. 4) przeprowadzono 5 eksperymentów dla opadu śniegu różniących się kierunkiem napływu wiatru (co  $45^\circ$  dla połowy pełnego koła ze względu na symetrię obiektu), a także 5 analogicznych eksperymentów dla redystrybucji. Podczas symulacji opadu prędkość referencyjna przepływu (na wysokości wierzchołka modelu) wynosiła  $0,9\text{m/s}$  co zgodnie z zaproponowanymi kryteriami podobieństwa odpowiadało prędkości wiatru około  $4,5\text{m/s}$ . Modelowanie redystrybucji

wywołanej wiatrem odbywało się przy prędkości przepływu zwiększonej do 2,5m/s (co odpowiada prędkości wiatru 14,5m/s).

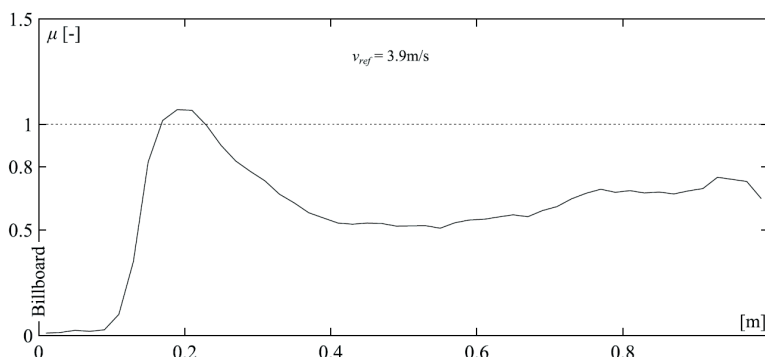
Efektem badań było 9 schematów obciążenia śniegiem: jeden podstawowy (odpowiadający zrównoważonemu procesowi formowania się pokrywy śnieżnej) i 8 dla kolejnych kierunków napływu wiatru ujmujących skrajną modyfikację obciążenia przez działający wiatr.

## 5.2. Płaskie dachy o dużych rozpiętościach

W listopadzie 2009 przeprowadzono badania na modelach płaskich dachów. Badania zostały wykonane w ramach grantu badawczego przyznanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na wykonanie projektu pt. „Badania eksperymentalne wpływu wiatru na rozkład obciążenia śniegiem na płaskich dachach o dużych rozpiętościach”. Wykonano prostopadłościenny model budynku z wymiennymi elementami umożliwiającymi uzyskanie wielu konfiguracji kształtu (odłączane attyki, świetliki, billboard itp.). Wynikiem badań była analiza kryteriów podobieństwa stosowanych w badaniach, oraz jakościowe wnioski dotyczące zachowania się śniegu na dachach budynków o dużych rozpiętościach. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Przykładowa mapa wysokości pokrywy złoża cząstek (w mm) oraz fotografia przedstawiająca zbliżenie świetlika na dachu modelu w przestrzeni pomiarowej (archiwum autora).



Rys. 6. Przekrój przez wysokość złoża cząstek na płaskim dachu z zainstalowanym billboardem.

## 5.3. Hala Widowiskowo-Sportowa Kraków-Czyżyny

W marcu 2012 roku na zlecenie Mostostal Warszawa S.A. przeprowadzono w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej analizę prognozowanego

obciążenia śniegiem na projektowanym dachu Hali Widowiskowo-Sportowej Kraków-Czyżyny. Obiekt ten odznacza się ciekawą pod względem obciążenia śniegiem geometrią – jest połączeniem niskich kopuł w zestaw przypominający dach przylegający do wyższej konstrukcji.

Takie połączenie geometrii (rys. 7) jest szczególnie ciekawe pod względem kształtowania się obciążenia śniegiem pod wpływem wiatru ze względu na możliwość tworzenia się na niższym dachu worków śnieżnych i osuwania się śniegu z dachu wyższego na niższy. Wynikiem badania było oszacowanie ilościowe współczynnika kształtu dachu. Przemieszczenie złoża cząstek następowało również na wyższym dachu powodując głównie gromadzenie się obciążenia na zawietrznych krawędziach.



Rys. 7. Dach modelu niższej hali („treningowej”) kompleksu Hali Widowiskowo-Sportowej Kraków-Czyżyny podczas badania opadu (archiwum autora).

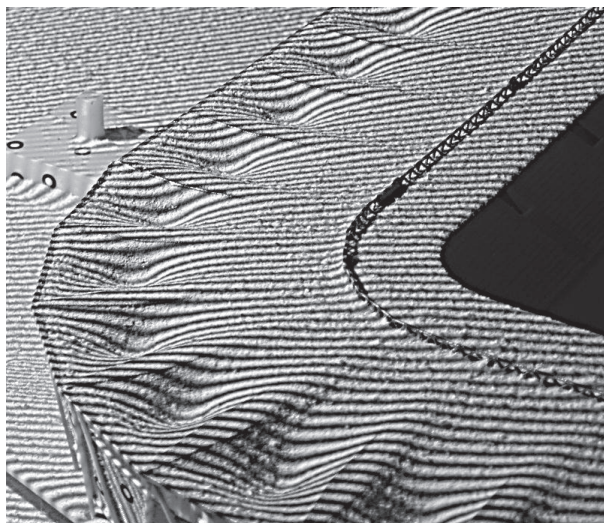
#### 5.4. Stadion Miejski w Łodzi

Badania dotyczące projektowanego zadaszania Stadionu Miejskiego w Łodzi wykonano w Politechnice Krakowskiej we wrześniu 2012 roku na zlecenie Perbo Inwestycje. Podobnie jak w wypadku stadionu Poznańskiego najpierw wykonano pomiary obciążenia wiatrem, a następnie przeprowadzono symulację opadu i przemieszczania się śniegu.

W laboratorium wykonano model stadionu w skali 1:200 dokładnie odwzorowując projektowaną geometrię przekrycia, oraz z mniejszą, ale dostateczną dokładnością, otoczenie budowli w promieniu 200m od centrum obiektu.

Badania opadu prowadzono przy referencyjnej prędkości przepływu 4,7m/s co odpowiada prędkości 3,83m/s na wysokości 10m dla prototypu; natomiast badania przemieszczania się pokrywy śnieżnej przy prędkości 1,48m/s co odpowiada prędkości wiatru około 6,9m/s na wysokości 10m. Tak jak poprzednio zadbano również o zachowanie zbliżonych do prototypowych warunków turbulencji przepływu.

Podczas tych badań po raz pierwszy w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej zastosowano skaner optyczny 3D światła białego GOM ATOS II e. Wynikiem pojedynczego skanowania (rys. 8) był surowy plik w formacie \*.stl. Jest to format pliku zawierający wyłącznie kształt modelu złożony z milionów trójkątów opisanych w karteżjańskim układzie odniesienia. Obróbka tych plików była głównym zadaniem numerycznego przetwarzania danych w tym projekcie.



Rys. 8. Zbliżenie powierzchni modelu stadionu Miejskiego w Łodzi podczas skanowania 3D metodą światła białego (archiwum autora).

Wynikiem badań były schematy obciążenia przekazane do celów projektowych (9 schematów, podobnie jak dla stadionu poznańskiego omówionego wyżej). Tak jak się spodziewano, uwidoczniły się w badaniach obszary zwiększonego obciążenia śniegiem w miejscu zagłębień dachu i w obszarze barierek. Badania umożliwiły jednak również ilościowe oszacowanie tych spiętrzeń obciążenia.

## 6. Podsumowanie

Badania modelowe w tunelach aerodynamicznych są ważną techniką uzupełniającą proces projektowy budowli narażonych na oddziaływanie obciążenia śniegiem. W szczególności dotyczy to dachów o nietypowych kształtach dla których niemożliwe jest bezpośrednie stosowanie zapisów normowych. Do takiej sytuacji odnosi się zapis z przedmowy normy PN-EN 1991-1-3:2005: „Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem”: „Odmienne od zwykłych rodzaje konstrukcji lub zadane w projekcie warunki nie zostały tu uwzględnione, w takich przypadkach wymaga się dodatkowych opinii eksperta” oraz punkt 1.5. tej samej normy stwierdzający: „W pewnych okolicznościach badania oraz sprawdzone i/lub odpowiednio uzasadnione naukowo metody numeryczne mogą być użyte do uzyskania obciążenia śniegiem obiektów inżynierskich”.

Symulowanie zjawisk formowania się pokrywy śnieżnej w zmniejszonej skali w tunelu aerodynamicznym powinno być prowadzone w dwóch niezależnych etapach: symulacji opadu i redystrybucji pokrywy śnieżnej. Zalecenie takie wynika z odmiennego charakteru tych procesów, a w szczególności innych kryteriów podobieństwa je opisujących. Inne zjawiska dotyczące formowania się pokrywy śnieżnej takie jak topnienie i osuwanie się śniegu na dachach muszą być rozpatrywane oddzielnie, ze szczególnym uwzględnieniem spiętrzania się obciążenia na dachach podatnych, na których mogą tworzyć się zagłębienia gromadzące śnieg i lód.

## Literatura

- 1 Tabler R.D. Self-similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling. *Journal of Glaciology*, vol. 26, Issue 94 (1980) 421-434
- 2 Thiis T.K. Experimental validations of numerical simulations of snowdrift around buildings and in terrain. *Narvik Institute of Technology* 2000
- 3 Iversen J.D. Drifting snow similitude. *Journal of the hydraulics division* (1979) 737-753

- 4 Flaga A., Kimbar G., Matys P. A new approach to wind tunnel similarity criteria for snow load prediction with an exemplary application of football stadium roof. Proc. of European-African Conference on Wind Engineering 5 (2009)
- 5 Kwok K.C.S., Kim D.H., Smedley D.J., Rohde H.F. Snowdrift around buildings for antarctic environment. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 41-44 (1992) 2797-2808
- 6 Kind, R.J., Murray S.B. Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrift. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 10 (1981) 89-102
- 7 Kimbar G., Flaga A. Problemy i metody symulacji obciążenia śniegiem w badaniach modelowych w tunelu aerodynamicznym. Inżynieria i Budownictwo 8 (2008) 453-456

## **Wind-tunnel simulations of wind influence on snow load distribution on roofs**

**Grzegorz Kimbar**

*Building Research Institute, e-mail: g.kimbar@itb.pl*

**Abstract:** The paper summarizes the problem of snow load prediction on building roofs, the importance of wind action in context of this load and the scope of wind tunnel applications in such research with more detailed description of experimental stand in Cracow University of Technology. Author reports the scope of experimental and theoretical research on snow load carried out over the years 2004-2012 in the boundary layer wind tunnel located at Wind Engineering Laboratory CUT. The research were conducted in the course of design processes on three models of arena-like buildings with large roofs, and one research on more general flat roof building.

**Keywords:** snow load, wind, wind tunnel, model tests