



Prof. dr hab. inż. Andrzej FLAGA  
Politechnika Krakowska i Lubelska

## ANALIZA WPLYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA OBCIĄŻENIE ŚNIEGIEM DACHÓW

### ANALYSIS OF INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON SNOW LOADS ON ROOFS

**Streszczenie** W pracy przedstawiono analizę wpływu różnych ważnych czynników na obciążenie śniegiem dachów. Specjalną uwagę położono na fizyczne aspekty zjawisk wpływających na formowanie się pokrywy śnieżnej i na jej redystrybucję. Ponadto opisano podstawowe zagadnienia związane z badaniami obciążenia śniegiem dachów w tunelach aerodynamicznych.

**Abstract** In the paper, analysis of influence of different important factors on snow loads on roofs has been presented. Special attention has been paid on physical aspects of phenomena influencing forming of snow cover and its redistribution. Moreover, basic problems concerning wind tunnel experiments on snow loads on roofs has been also described.

### 1. Wstęp

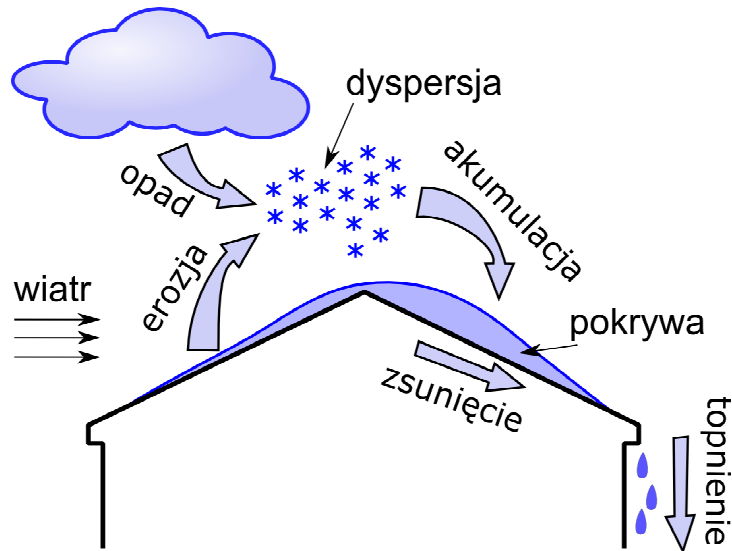
Istnieje szereg zjawisk prowadzących do ostatecznego uformowania się pokrywy śnieżnej na dachach i wynikających z niej obciążenia śniegiem dachów. Najważniejsze z nich to:

- Opad dyspersji śnieżnej w warunkach wiejącego wiatru lub bez wiatru;
- Tworzenie się pokrywy śnieżnej na gruncie i na dachach przy opadzie dyspersji śnieżnej;
- Redystrybucja pokrywy śnieżnej przy wiejącym wietrze;
- Zmiany własności fizycznych pokrywy śnieżnej w wyniku oddziaływania różnych pól fizycznych.

W rzeczywistości wszystkie te zjawiska mogą występować równocześnie, albo też niektóre z nich mogą występować równocześnie. Jeśli pokrywa śnieżna będzie się tworzyła w warunkach opadu śniegu przy słabym wietrze lub bez wiatru będziemy mówili o akumulacji pierwotnej śniegu. Gdy zaś występuje redystrybucja pokrywy śnieżnej spowodowana wiatrem ale bez opadu śniegu, wówczas w miejscach wymiatania śniegu będziemy mówili o erozji śniegu, a w miejscach dodatkowego odkładania się śniegu – o akumulacji wtórnej śniegu.

W przypadku opadu śniegu przy silnym wietrze występuje zarówno akumulacja pierwotna, jak i redystrybucja powiązana z erozją oraz akumulacją wtórną śniegu.

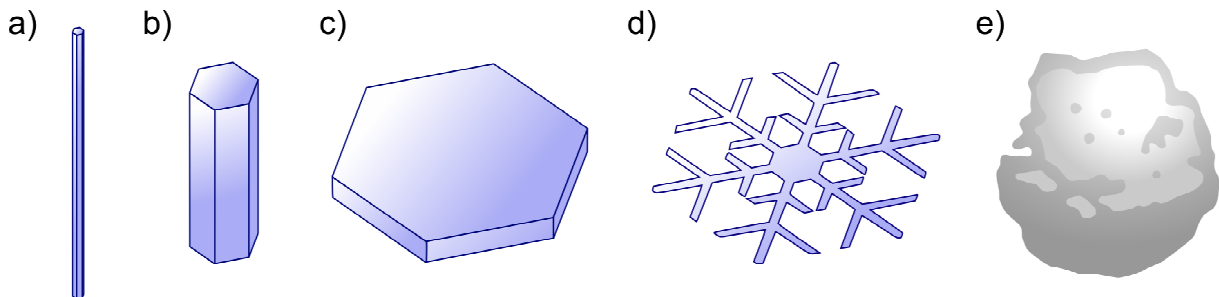
Zjawiska wyszczególnione powyżej przedstawiono schematycznie na rys. 1 oraz omówiono szerzej w dalszym ciągu rozważań niniejszej pracy. Więcej na ten temat można znaleźć w pracach [1, 2, 3, 4].



Rys.1. Zjawiska wpływające na kształt pokrywy śnieżnej [2,3]

## 2. Tworzenie się pokrywy pierwotnej

Chmura śniegowa jest zbiorowiskiem kryształków lodu o bardzo różnych formach: od najbardziej znanych dendrytów, po płytki i igły. Wyróżniono w [5] aż ponad 80 różnych kształtów kryształów śniegu (rys. 2). Tym samym różne są także ich wielkości: od około 0.1 mm do 4 mm. Dodatkowo wskutek wzajemnych zderzeń może dochodzić do sklejania się kryształów w większe płyty.



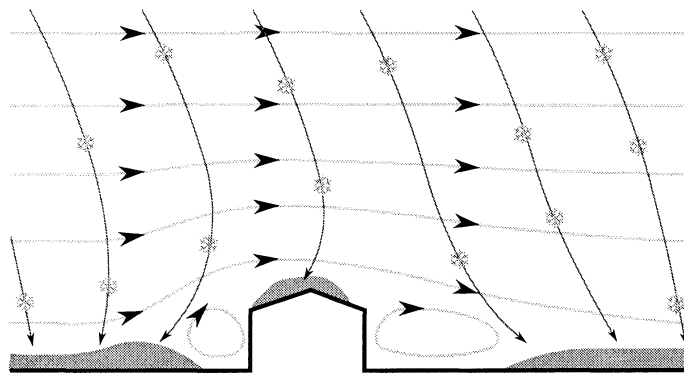
Rys.2. Przykładowe postaci kryształków śniegu: a) igła; c) płytki; d) dendryt; e) krupa [3]

Cząstki lodowe kierowane siłami ciężkości i siłami aerodynamicznymi wynikającymi z ich ruchu względem powietrza kierują się ku podłożu. Ruch wielkiej ilości cząstek opisuje się najczęściej jako ruch *dyspersji*, charakteryzowanej przez uśrednione własności ruchu cząstek składowych. Jedną z takich własności jest *koncentracja* dyspersji, czyli stosunek masy rozproszonych cząstek w pewnej objętości do tej objętości. Na znacznej wysokości pole prędkości wiatru można uznać za jednorodne, a tym samym jednorodne są warunki na jakie wystawione są cząstki dyspersji. Koncentracja zatem jest także jednorodna – wszelkie zagęszczenia, czy też rozrzedzenia zostaną szybko zniwelowane ze względu na pewną chaotyczność w ruchu cząstek. Oczywistym jest, że w warunkach idealnie bezwietrznych śnieg osadza się wszędzie równomiernie w odniesieniu do powierzchni rzutu poziomego obszaru. Wiatr może w istotny sposób zmieniać akumulację pierwotną śniegu. Ruch powietrza wpływa bowiem na trajektorie cząstek tworzących dyspersję. Na dużych

wysokościach dyspersja zachowuje się w sposób jednorodny, ponieważ jednorodne są warunki atmosferyczne na jakie jest wystawiona. Jednak w pobliżu gruntu, przepływ powietrza jest zaburzony z powodu istnienia na gruncie przeszkód (budynków, drzew, wzniesień itp.). Ta niejednorodność przepływu przenosi się także na niejednorodność ruchu dyspersji, a ostatecznie skutkuje niejednorodnością akumulacji pierwotnej (rys. 3). W miejscach w których koncentracja została zwiększona warstwa pokrywy śnieżnej będzie tworzyła się szybciej, niż w miejscach o zmniejszonej koncentracji. Oznacza to, że już na etapie opadu śniegu może dojść do różnic w jego ilości w zależności od położenia, jeżeli opad ten zachodzi w warunkach wiatru.

Za charakterystyczne zmiany intensywności akumulacji pierwotnej pod wpływem obecności przeszkody i wiatru można uznać:

- Spiętrzenie – zwiększenie akumulacji tuż „przed” przeszkodą
- Osłanianie – zmniejszenie akumulacji tuż „za” przeszkodą
- Płuzenie – zwiększenie akumulacji po bokach „za” przeszkodą
- Nierównomierność akumulacji po samej przeszkodzie (połać nawietrzna i zawietrzna przeszkody - dachu)



Rys. 3. Wpływ budynku na rozkład pokrywy śnieżnej na gruncie i na dachu.

Każdy z aktów opadu śniegu powoduje powstanie *pierwotnej pokrywy śnieżnej* – nowej warstwy świeżego śniegu. Spąg pokrywy śnieżnej może składać się z kilku warstw pochodzących z różnych opadów.

### 3. Przemiany fizyczne pokrywy śnieżnej

Pokrywa śnieżna jest porowatą substancją złożoną z lodu. Podczas długotrwałego zalegania śniegu na gruncie lub dachu dochodzi do zmian jego własności. Zmiany te związane są głównie z przemianami fazowymi wody. Czynnikiem wywołującym te zmiany są głównie: wiatr, wilgotność i temperatura powietrza. Najbardziej charakterystycznym zjawiskiem jest ciągłe zwiększanie się gęstości pokrywy śnieżnej w czasie (Tab. 1). Wynika to oczywiście ze stałego zmniejszania się porowatości struktury śniegu. Ciężar wyżej położonych warstw pokrywy śnieżnej, a także wpływ parcia wiatru powodują mechaniczne sprasowanie śniegu. Znaczenie mają także subtelne przemiany struktury śniegu oparte na ciągłej sublimacji i resublimacji kryształów lodu. Powodują one zarówno zwiększenie gęstości jak i powstanie wiązań pomiędzy, wcześniej luźno ułożonymi, cząstkami lodu. Cząstki śniegu po utworzeniu pierwotnej pokrywy śnieżnej są ze sobą słabo związane. Z czasem następuje ich *konsolidacja*.

Tab. 1: Gęstość śniegu w zależności od jego rodzaju [6]

Rodzaj śniegu	Gęstość pokrywy śnieżnej [kg m <sup>-3</sup> ]
„dziki śnieg” (świeży śnieg w niskiej temperaturze)	10 – 30
świeży śnieg	50 – 70
wilgotny świeży śnieg	100 – 200
ustabilizowany śnieg	200 – 300
głęboka zmarzlina	200 – 300
śnieg zagęszczony działaniem wiatru	350 – 400
firn	400 – 850
mokry śnieg lub firn	700 – 800
lodowiec	850 – 910

Naturalnie zwiększenie temperatury powyżej 0°C powoduje stopnienie części lub całości pokrywy śnieżnej i pojawienie się wody w stanie ciekłym. To także powoduje zwiększenie gęstości śniegu, a po ponownym obniżeniu temperatury – powstanie lodu. Podwyższenie temperatury może wynikać z ocieplenia się powietrza na skutek zjawisk pogodowych, ale także pod wpływem ciepła płynącego z wnętrza budynku. Ta druga sytuacja ma miejsce szczególnie na dachach słabo ocieplonych i charakteryzuje się także wystąpieniem w warstwie śniegu znacznego gradientu temperatury. Oznacza to, że stopieniu może ulec wtedy tylko spodnia warstwa, ponieważ temperatura w warstwach wierzchnich będzie w zimie na ogół ujemna.

Same przemiany pokrywy śnieżnej nie powodują zmiany obciążenia śniegiem, ponieważ masa nie jest transportowana, a zwiększeniu gęstości towarzyszy zmniejszenie grubości pokrywy. Warstwy w spągu pokrywy mogą występować w bardzo szerokim zakresie postaci: od lekkiego puchu, przez śnieg gęsty, wilgotny, zwartą skorupę, aż do lodu i wody. Każda z tych postaci jest w innym stopniu podatna na późniejszą redystrybucję i to stanowi o istotności tych procesów przy przewidywaniu rozkładu obciążenia śniegiem.

#### 4. Redystrybucja pokrywy śnieżnej

Jednym z przypadków przemieszczania się masy pokrywy śnieżnej jest sytuacja, w której zostanie ona częściowo lub w całości stopiona. Jeżeli podłoże na którym jest zgromadzona jest chłonne (w szczególności chodzi o grunt), to woda powstała na spodzie warstwy śniegu przesączy się w głąb tego podłoża. W pozostałych przypadkach (czyli na przykład na dachach) woda będzie w przybliżeniu zachowywać się tak jak woda deszczowa, choć oczywiście warstwy jeszcze nieroztopionego śniegu będą stawiały jej opór.

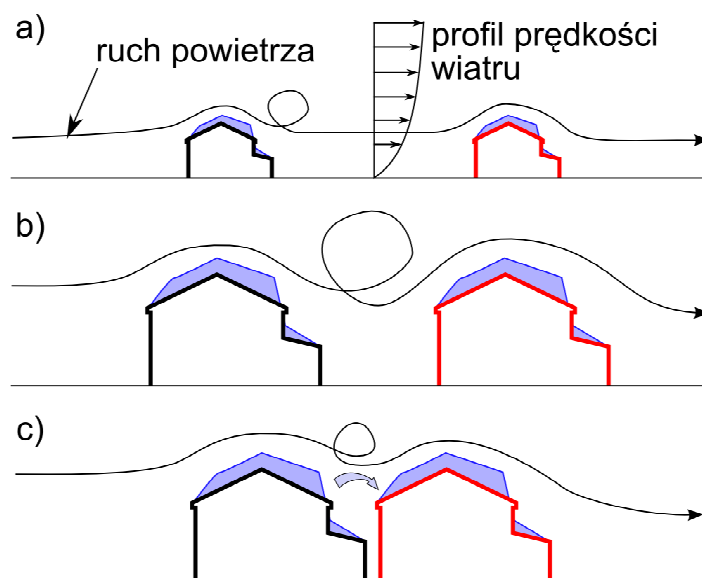
Pokrywa śnieżna na powierzchniach nachylonych może ulec zsunięciu pod wpływem własnego ciężaru (rys. 1). Zjawisko to podobne do lawiny, choć zachodzące w mniejszej skali, powstaje gdy siły spoiwości w warstwie śniegu, bądź siły tarcia na styku śniegu i podłoża, zostaną przezwyciężone przez siły ciężkości. Ponieważ wspomniane siły spoiwości są trudne do określenia, zjawisko zachodzi niespodziewanie. Jest wręcz niemożliwe przewidzenie czy nastąpi, a tym samym najczęściej konieczne jest zakładanie najbardziej niekorzystnej sytuacji. Ponieważ odspojenie części pokrywy powoduje nagłe, dalsze przemieszczanie się śniegu, zjawisko to powinno być rozpatrywane jako zachodzące dynamicznie, to jest z uwzględnieniem dynamicznej reakcji konstrukcji. Takie zalecenie zawiera między innymi [7].

Długotrwałym procesem przemieszczającym masy śniegu jest przenoszenie śniegu przez wiatr. Jak wspomniano wcześniej, cząstki tworzące pokrywę śnieżną są ze sobą powiązane. Jednak przy dostatecznie silnym oddziaływaniu wiatru wiązania te mogą ulec rozerwaniu. Oswobodzone cząstki powtórnie tworzą dyspersję śnieżną i podobnie jak podczas opadu są transportowane przy udziale wiatru. Dokument [7] zaleca przyjmowanie średniej prędkości wiatru podczas zimy równej 4m/s. Wpływ ma tu jeszcze otoczenie budowli.

W najprostszym przypadku obiekty otoczenia położone są na tyle daleko, że wpływają na rozpatrywany obiekt tylko przez zmianę profilu prędkości średniej wiatru (rys. 4a). Jest to efekt tak zwanej *ekspozycji*, którą wyraża się ją zwykle przez kategorię terenu (np.: teren miejski – kategoria „B”). Jej wpływ na redystrybucję śniegu uwzględniają na przykład normy [7, 8, 9]. Bliżej położone obiekty mogą wpływać na rozpatrywany obiekt poprzez zmianę chwilowych prędkości wiatru. Dochodzi wtedy do *interferencji wiatrowej* (

Rys. 4b) – rozpatrywany budynek znajduje się w cieniu aerodynamicznym przeszkody i jest wystawiony na wywoływane przezeń turbulencje, co ma wpływ na redystrybucję śniegu. Jeżeli sąsiednia budowla położona jest dostatecznie blisko, to oprócz wspomnianego wyżej zjawiska może dojść do przedostawania się śniegu z jednego obiektu na drugi, czyli *interferencji wiatrowo-śniegowej* (

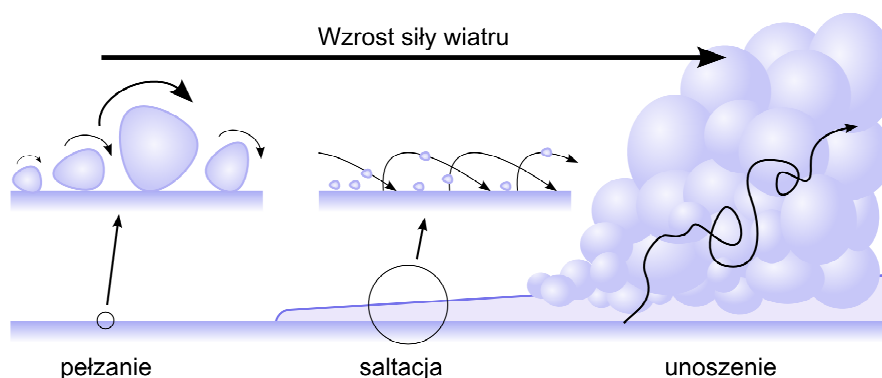
Rys. 4c). W takim wypadku należałoby właściwie rozpatrywać oba budynki łącznie – jako jeden obiekt. Należy tu zwrócić uwagę na dwie rzeczy: asymetrię interferencji (budynki wpływają na siebie nawzajem w różny sposób) i kolejność realizacji budynków. Nowoprojektowany obiekt (jeżeli jest umiejscowiony dostatecznie blisko) będzie wpływał na już istniejące budynki, tym samym unieważniając wcześniej poczynione dla nich przewidywania rozkładu obciążenia śniegiem. O ile w przypadku ekspozycji musi zajść istotna zmiana (na przykład przekształcenie się obszaru podmiejskiego w centrum miasta), to w przypadku interferencji obu typów już jeden obiekt sąsiadujący może znacząco wpłynąć na rozkład obciążenia śniegiem. Interferencję uwzględnia w bardzo uproszczony sposób na przykład norma [9].



Rys. 4. Wpływ otoczenia na redystrybucję śniegu (dokładny opis w tekście): a) ekspozycja; b) interferencja wiatrowa; c) interferencja wiatrowo-śniegowa [3].

Szczególny udział w zjawisku transportu śniegu przez wiatr ma podłoże, które jest naturalną granicą jego zachodzenia. Właśnie ze względu na to w jakim stopniu podłoże (i tym samym pokrywa śnieżna) uczestniczy w transporcie śniegu indukowanym wiatrem

wprowadzono w [10] tradycyjny podział jakościowy, odnoszący się pierwotnie do sposobu formowania się wydm piaskowych (rys. 5). Przy najniższym, ale już wywołującym transport, działaniu wiatru dochodzi do *pełzania* (ang.: *creep*). Siły pochodzące od wiatru podczas zachodzenia tego zjawiska są w stanie przewyciężyć siły spistości pokrywy, ale nie są w stanie przewyciężyć siły ciężkości oderwanych cząstek. Z tego powodu dyspersja nie powstaje, a cały transport odbywa się na zasadzie „przetaczania się” cząstek po podłożu. Zatem podłoże uczestniczy w tym zjawisku w znacznym stopniu. Skrajnie odległą sytuacją jest taka, w której nie występuje jakikolwiek bezpośredni wpływ podłoża na poruszającą się dyspersję. Mówi się wtedy o *unoszeniu* (ang.: *suspension*) – transport dyspersji kierowany jest wyłącznie przez ruch ośrodka ciągłego (powietrza) i siły ciężkości, choć oczywiście ostatecznie dochodzi do uformowania pokrywy śnieżnej na podłożu. Istnieje także specyficzne zjawisko pośrednie: *saltacja* (gr.: *saltare* – skakać, ang.: *saltation*). Siły działające na pokrywę pochodzące od wiatru są w stanie oddzielić od niej poszczególne cząstki, a nawet nadać im pewną prędkość pionową. Prędkość ta jest jednak na tyle niewielka, że cząstki po krótkim czasie powracają na pokrywę, skąd mogą być ponownie uniesione. W efekcie pojawia się *warstwa saltacji* położona blisko podłoża (kilkanaście centymetrów), rejon wypełniony dyspersją w ruchu, która jednak nie przechodzi w stan zawieszenia z racji zbyt małej energii jaka jest jej dostarczana przez wiatr.



Rys. 5. Redystrybucja pokrywy śnieżnej wywołana wiatrem na płaskim podłożu [3].

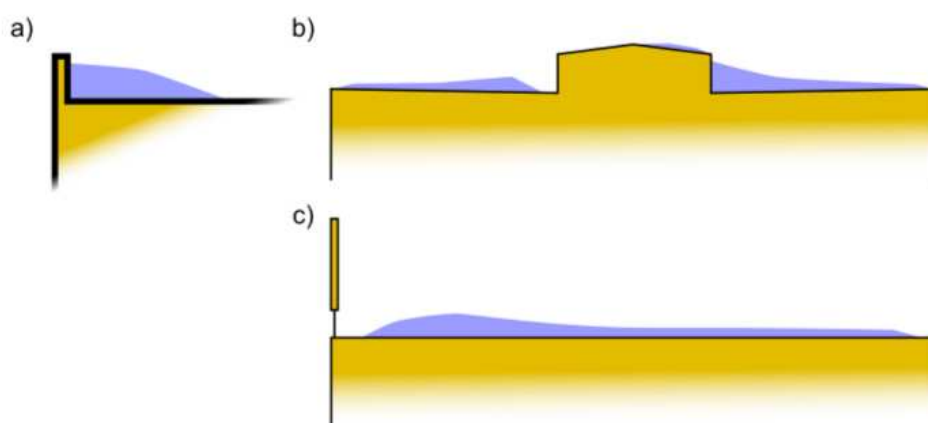
Zjawisko pełzania ma małe znaczenie praktyczne, ponieważ masa śniegu która może być przetransportowana w ten sposób jest niewielka. Do unoszenia dyspersji dochodzi podczas opadu śniegu, a także podczas na tyle silnego wiatru, że cząstki oderwane od podłoża unoszone są mimo sił ciężkości na znaczne wysokości i tracą z podłożem jakikolwiek kontakt. Za przemieszczanie się istniejącej pokrywy śnieżnej odpowiedzialna jest głównie długotrwała saltacja.

W przypadku ogólnym na powierzchni pokrywy śnieżnej dochodzi do dwóch przeciwstawnych procesów: unoszenia i osadzania się cząstek. Jeżeli w jakimś obszarze unoszenie przeważa nad osadzaniem mówi się, że w tym miejscu następuje *erozja*, czyli wywołany oddziaływaniem wiatru ciągły ubytek pokrywy. Jeżeli osadzanie cząstek przeważa nad unoszeniem ma miejsce *akumulacja wtórna* (rys.1). W uproszczeniu można powiedzieć, że do erozji dochodzi w rejonach wystawionych na bezpośrednie oddziaływanie wiatru, natomiast do akumulacji wtórnej w miejscach osłoniętych – w cieniu aerodynamicznym przeszkody. Stąd, często pojawiające się *worki śnieżne* (rys.6 i 7), czyli wysokie warstwy śniegu po zawietrznych stronach przeszkód (nadbudówek, attyk) i większe obciążenie połaci zawietrznej na dachach dwuspadowych.



Rys.6. Worki śnieżne na dachu. (za [www.familyisp.com](http://www.familyisp.com))

Bardziej precyzyjnie - intensywność erozji/akumulacji zależy od sił, które wywierane są na pokrywę śnieżną przy przepływie powietrza ponad nią.



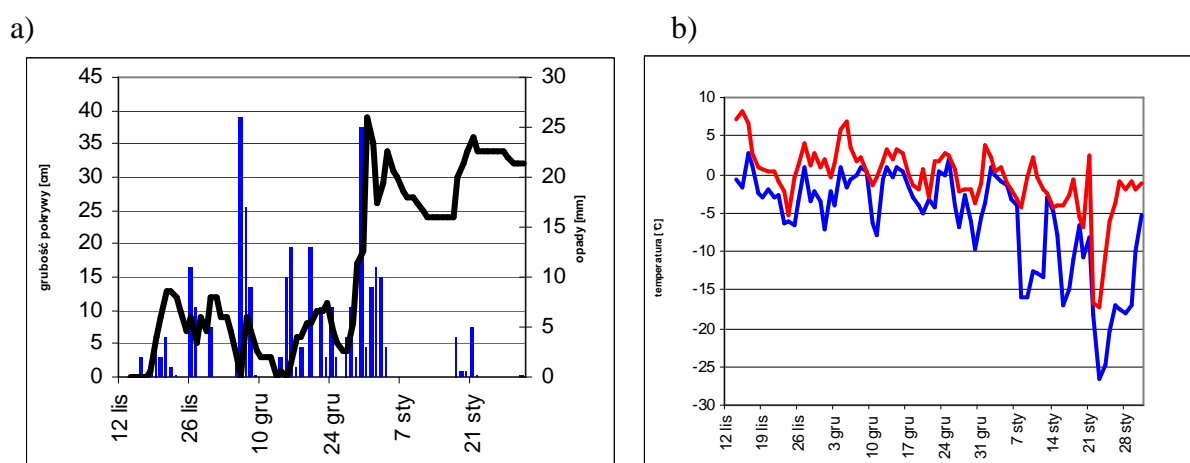
Rys.7. Tworzenie się worków śnieżnych na zawietrznych stronach przeszkód (attyk, świetlików, billboardów itp.)

Możliwy jest na przykład następujący scenariusz: dochodzi do opadu śniegu i wkrótce po tym do ocieplenia. W wyniku tego w pokrywie śnieżnej pojawia się woda. Po ponownym obniżeniu temperatury woda zamarza, a pokrywa śnieżna przybiera postać twardej, skonsolidowanej skorupy lodowej. W efekcie tego później oddziaływający, nawet silny, wiatr może nie być w stanie doprowadzić do przemieszczenia się pokrywy i będzie ona zalegać w niezmienionej postaci. Jeżeli nie doszłoby do ocieplenia tuż po opadzie, struktura śniegu byłaby inna i pokrywa śnieżna byłaby podatna na redystrybucję wywołaną oddziaływaniem wiatru. Doszłoby do utworzenia worków śnieżnych.

## 5. Obciążenie śniegiem gruntu, a obciążenie śniegiem dachu

Obciążenie śniegiem dachu i gruntu oczywiście nie są jednakowe. Różnice wynikają z tego, że zjawiska redystrybucji zachodzą inaczej na dachach i w pobliżu budynków i przeszkód na gruncie, aniżeli w miejscu pomiaru na gruncie na stacji meteorologicznej w terenie płaskim, otwartym. Przede wszystkim na wielkość obciążenia śniegiem na gruncie w terenie płaskim, otwartym nie ma wpływu wiatr – nawet jeżeli dochodzi do przemieszczania się mas śniegu, to jest to proces jednorodny. Zatem wszędzie erozja równoważona jest przez akumulację. Topnienie śniegu na gruncie wynika jedynie z ciepła pochodzenia naturalnego – na dachu może mieć dodatkowy wpływ ciepło pochodzące z budynku. Na przykład PN-80/B-02010 [11] nakazuje dla dachów płaskich przyjmowanie obciążenia śniegiem o wartości 80% obciążenia gruntu. Ta redukcja wynika prawdopodobnie z uwzględnienia pozytywnego wpływu ciepła płynącego z budynku, ponieważ inny zapis nakazuje zwiększenie o 20% obciążenia w przypadku dachów na budynkach nieogrzewanych. Oznacza to, że takie dachy obliczane są na  $120\% \cdot 80\% = 96\%$  obciążenia gruntu, a więc na niemal równe temu obciążeniu. Tymczasem podobne warunki cieplne występują na dachach dobrze izolowanych, nawet nad ogrzewanymi budynkami, ponieważ „skok” temperatury nastąpi na nich raczej w materiale izolacyjnym, a nie w warstwie śniegu. W wyniku tego temperatura spodniej warstwy śniegu może pozostać ujemna i do topnienia nie dojdzie. W takim wypadku redukcja obciążenia do 80% wydaje się nieuzasadniona. Znacznie bardziej szczegółowe wytyczne daje tu norma [8]. Zawiera ona współczynnik  $C_t$ , który ustala się w zależności od warunków termicznych dachu. Zgodnie z tymi zapisami redukcja obciążenia wywołana ciepłem płynącym z budynku może być założona tylko wtedy, gdy spełnione są określone warunki – typowo zaś takiej redukcji się nie uwzględnia.

Powstająca z roztopienia śniegu woda jest wchłaniana przez grunt (rys.8) – inaczej niż na dachu, gdzie spływa podobnie jak deszczówka. Może mieć to szczególne znaczenie w przypadku, gdy spadki dachu nie zostaną poprawnie wykształcone lub wadliwie działa system odprowadzenia wody. Wtedy nie można zakładać pozytywnego wpływu topnienia śniegu, to jest wynikającą z niego redukcję obciążenia, bowiem wpływ topnienia śniegu będzie miał skutek odwrotny! W najniższych miejscach dachu dojdzie do gromadzenia się wody, która może później zamarznąć i utworzyć warstwę lodu.



Rys. 8. Dłobowe sumy opadu atmosferycznego oraz wysokość pokrywy śnieżnej (a) i przebieg temperatury minimalnej i maksymalnej powietrza (b) na stacji meteorologicznej w Katowicach w okresie 17.11.2005r. – 05.02.2006r. [<http://www.weatheronline.co.uk>].



## **6. Istniejący stan wiedzy w zakresie ustalania i prognozowania obciążenia śniegiem dachów**

Obecnie większość zaleceń dotyczących przewidywania rozkładu śniegu na dachach pochodzi z doświadczenia w eksploatacji istniejących budynków. Takie zalecenia dokumentują jedynie fakt występowania obciążenia śniegiem w określonej konfiguracji w przeszłości. Dają wiarygodne wyniki jedynie wtedy, gdy nowoprojektowany obiekt daje się dopasować do jednego z istniejących schematów. Nie można na ich podstawie określić obciążenia dla konstrukcji nietypowych, projektowanych po raz pierwszy. Zalecenia te zawarte są w większości w normach przedmiotowych (np. [7,8,9,11,12]), a także w publikacjach naukowych (np. [13-18]).

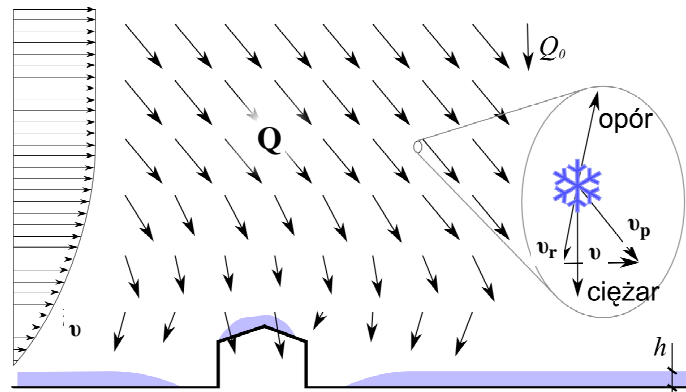
Badania modelowe prowadzone są albo w zakresie badań podstawowych (teoretyczne modelowanie zjawiska), albo podczas realizacji konkretnych obiektów budowlanych (np. [19-20]). Te pierwsze skupiają się na stworzeniu wiarygodnego modelu zjawiska przenoszenia śniegu (lub szerzej: dowolnej dyspersji) wywołanego ruchem powietrza (pływu). W literaturze proponowane są modele o bardzo różnych postaciach. Ważnym podejściem z punktu widzenia proponowanych badań jest zastosowanie tuneli aerodynamicznych do budowy modeli transportu dyspersji (np. [21-24]). Mimo istnienia takich modeli w literaturze do ich praktycznego zastosowania wiedzie daleka droga. Wiąże się to z koniecznością każdorazowego przystosowania ich do możliwości i cech placówki badawczej. Obserwuje się także zjawisko transportu śniegu w warunkach naturalnych w celu zrozumienia jego mechanizmów (np. [25-28]). Prace te oferują podstawową wiedzę konieczną w odtwarzaniu zjawisk transportu śniegu w warunkach eksperymentalnych.

Prowadzi się także rozważania teoretyczne w zakresie teorii dyspersji (np. [29-32]). Prace takie owocują dokonaniem na polu CFD (komputerowej mechaniki płynów) (np. [33-35]), oraz głębszym zrozumieniem zjawisk, których dotyczą. Modele CFD pomimo szerokiego stosowania w mechanice płynów są dalekie od ukończenia. Tym bardziej dotyczy to mechaniki przepływów dwufazowych i teorii dyspersji. Wymagają one weryfikacji eksperymentalnej – głównie w tunelach aerodynamicznych.

## **7. Analiza wymiarowa i kryteria podobieństwa opadu atmosferycznego śniegu przy wiejącym wietrze**

Zgodnie z tym co powiedziano wcześniej, za formowanie się pokrywy śnieżnej na dachu odpowiedzialnych jest szereg, dość różnorodnych, zjawisk. W uproszczeniu można przyjąć, że najpierw dochodzi do opadu i tym samym utworzenia pierwotnej pokrywy śnieżnej, a następnie do redystrybucji tej pokrywy. Aby poprawnie przewidzieć ostateczny rozkład obciążenia śniegiem konieczne jest symulowanie obu tych zjawisk. Poniżej przeprowadzono analizę wymiarową tylko opadu atmosferycznego śniegu przy wiejącym wietrze i związanego z nim tworzenia się pierwotnej pokrywy śnieżnej. Zagadnienia redystrybucji tej pokrywy są o wiele bardziej skomplikowane i wymagają oddzielnego omówienia. Przeanalizowano je szerzej w pracy [4].

Dyspersja śnieżna podczas opadu znajduje się w stanie zawieszenia, to jest na jej ruch wpływ mają tylko siły ciężkości i siły aerodynamiczne wynikające z opływu cząstek dyspersji przez powietrze (rys.10).



Rys.9. Warunki panujące podczas opadu śniegu.

Charakterystyczną wielkością opisującą cząstki w takim stanie, a tym samym i złożoną z nich dyspersję, jest prędkość swobodnego spadku  $v_f$ . Prędkość ta opisuje w sposób ilościowy charakter interakcji pomiędzy cząstkami dyspersji, a otaczającym je powietrzem. Jest to wielkość wygodna z dwóch powodów: jest łatwo mierzalna i pozwala pominąć niełatwe rozważania dotyczące dynamiki ruchu cząstek, sprowadzając je do kinematyki.

Podczas opadu cząstki śniegu formują się na znacznej wysokości ponad gruntem. Jest to obszar ponad warstwą przyziemną przepływu, można zatem zakładać, że w skali odpowiedniej dla zjawisk opadu śniegu, warunki na jakie wystawiona jest dyspersja śnieżna są jednorodne. Jednorodna jest zatem w tym obszarze także koncentracja dyspersji w powietrzu, czyli stosunek jej masy do objętości w jakiej jest zgromadzona. Wielkość tę oznaczono przez  $k_0$ . Przyjmując, że cząstki dyspersji poruszają się na znacznej wysokości ze średnią prędkością swobodnego spadku ( $v_f$ ), można określić wielkość:

$$Q_0 = k_0 v_f \quad (1)$$

Jest to ilość masy śniegu transportowana w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię. Należy zauważyć, że wielkość ta nie zależy od prędkości wiatru gradientowego (wiejącego na znacznej wysokości), a jedynie od „wydajności” zjawisk pogodowych skutkujących opadem śniegu.

Na niższych wysokościach – tam gdzie bliskość powierzchni ziemi (a zwłaszcza elementów chropowatych) zaczyna mieć znaczenie - nie można już mówić o jednorodnych warunkach, na które wystawiona jest dyspersja. Zamiast tego można określić dla dowolnego punktu, strumień masy dyspersji  $Q$ :

$$Q = k v_p \quad (2)$$

gdzie:  $k$  – koncentracja dyspersji śnieżnej,  $v_p$  – prędkość dyspersji. Pod wpływem zaburzeń w polu prędkości wiatru wywołanych obecnością na powierzchni ziemi różnych obiektów (drzew, budynków, wzniesień), żadna z tych wielkości tj.  $Q$  i  $k$  nie musi być jednorodna. W szczególności można się spodziewać, że koncentracja dyspersji będzie większa na stronach zawietrznych obiektów, niż na stronach nawietrznych. Również niejednorodnie zmieniać się będzie prędkość dyspersji  $v_p$ , którą można wyrazić wzorem:

$$v_p = v + v_r \quad (3)$$

gdzie:  $\mathbf{v}$  – prędkość wiatru,  $\mathbf{v}_r$  – średnia prędkość względna pomiędzy cząstkami dyspersji, a powietrzem. Należy się spodziewać, że wraz ze zmianami  $\mathbf{v}$  zmianom ulegać będzie w podobny sposób  $\mathbf{v}_r$ , ponieważ wartość bezwzględna prędkości względnej  $\mathbf{v}_r$  będzie oscylować wokół prędkości swobodnego spadku  $v_f$  ze zwrotem oscylującym wokół kierunku pionowego w dół. Dzieje się tak dlatego, ponieważ każda cząstka w naturalny sposób „dąży” do stanu równowagi, którym jest stan swobodnego spadku względem ruchomego powietrza. Nie osiąga jej natychmiast tylko z powodu własnej, niewielkiej bezwładności.

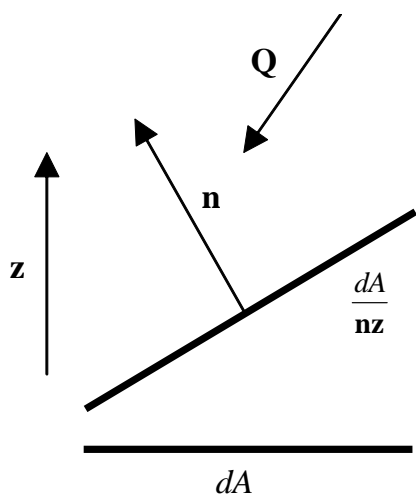
Niejednorodność strumienia masy dyspersji zaczyna mieć znaczenie w bezpośredniej bliskości miejsc akumulacji śniegu, na których tworzy się pokrywa śnieżna (a więc gruntu bądź dachu). Przez  $Q_s$  oznacza się stosunek strumienia masy opadającej na pewną powierzchnię obiektu do poziomego rzutu tej powierzchni. Wynika to z tradycyjnego sposobu opisywania obciążenia śniegiem jako ciężaru rozłożonego na rzut poziomy powierzchni. Zatem przyrost obciążenia  $ds$  w czasie elementarnym  $dt$  wynosi:

$$ds = Q_s g dt \quad (4)$$

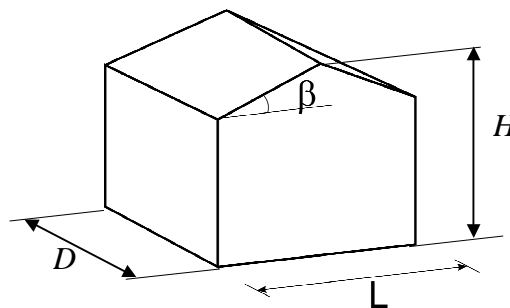
Jeżeli przez  $dA$  oznaczy się poziomy rzut pewnej elementarnej powierzchni, przez  $\mathbf{n}$  wektor normalny do niej, a przez  $\mathbf{z}$  wektor skierowany pionowo w górę, to powierzchnia ta ma miarę (rys.11)  $dA/(\mathbf{n}\mathbf{z})$ , zatem:

zatem:

$$Q_s = -\mathbf{Q} \cdot \left( \mathbf{n} \frac{dA}{\mathbf{n}\mathbf{z}} \right) \frac{1}{dA} = -\frac{\mathbf{Q}\mathbf{n}}{\mathbf{n}\mathbf{z}} \quad (5)$$



Rys.11. Relacje geometryczne – opis w tekście.



Rys.12. Cechy geometryczne przykładowego modelu, zbiór (G).

Grubość pokrywy śnieżnej  $h$  mierzy się jako jej miąższość w kierunku pionowym. Ponieważ obciążenie śniegiem dachu  $s$  (lub ogólniej: dowolnej powierzchni, w tym także położonej w sąsiedztwie budynku powierzchni gruntu) można wyrazić przez iloczyn wysokości pokrywy śnieżnej, jej gęstości objętościowej  $\rho_c$  i przyspieszenia ziemskiego  $g$ , to:

$$ds = \rho_c g dh = Q_s g dt \quad (6)$$

Zatem:

$$Q_s = \rho_c \frac{dh}{dt} \quad (7)$$

gdzie:  $dh$  – przyrost grubości tej pokrywy. Można zatem interpretować  $Q_s$  jako miarę tempa przyrostu grubości pokrywy śnieżnej. Przy założeniu, że warunki opadu i oddziaływania wiatru są przez cały czas opadu jednakowe (ewentualnie przyjmując za  $Q_s$  wartość średnią), można przejść na wielkości skończone:

$$s = Q_s g t \quad (8)$$

gdzie:  $t$  – całkowity czas utworzenia pokrywy.

Podobieństwo zjawiska tworzenia się pokrywy śnieżnej będzie zachowane, jeżeli możliwe będzie odtworzenie podczas eksperymentu w tunelu aerodynamicznym wielkości  $Q_s$  w każdym punkcie powierzchni modelu. Ponieważ jest to wielkość wywiedziona z  $Q$  kształtują ją te same czynniki, to jest: warunki opadu na znacznej wysokości, pole wiatru (włączając wpływ ekspozycji), kształt (rodzaj geometrii) przedmiotowego obiektu i jego charakterystyczne wymiary. Można to zapisać jako:

$$s = g t Q_s(k_o, v_f, v_g, z_g, \alpha, I_v, (G)); (G) = (H, B, D, \beta, \dots) \quad (9)$$

gdzie:  $k_o, v_f$  – własności opadu;  $v_g, z_g, \alpha, I_v$  – charakterystyka profilu prędkości wiatru,  $(G)$  – zbiór cech geometrycznych obiektu (rys.12). Obierając za bazę wymiarową wielkości  $k_o, v_f$  i  $H$  otrzymuje się:

$$\frac{Q_s}{k_o v_f} = \frac{Q_s}{Q_0} = \Pi_s \left( \frac{v_g}{v_f}, \frac{z_g}{H}, \alpha, I_v, (G) \right) \quad (10)$$

Liczba  $\Pi_s$  wyraża zatem niejednorodność rozkładu strumienia masy dyspersji śnieżnej w bezpośredniej bliskości powierzchni. Przekształcając powyższe otrzymuje się:

$$s = g t Q_0 \Pi_s \left( \frac{v_g}{v_f}, \frac{z_g}{H}, \alpha, I_v, (G) \right) \quad (11)$$

W terenie otwartym ( $A$ ) nie występują żadne niejednorodności w strumieniu masy dyspersji, ponieważ nie istnieją prawie żadne obiekty, które mogłyby taką niejednorodność wywoływać. Podobna sytuacja ma miejsce w obszarach całkowicie bezwietrznych. Zachodzi tam zatem  $\Pi_{sA}=1,0$  i tym samym:

$$s_A = g t Q_0 \quad (12)$$

Dzieląc stronami powyższe wyrażenia otrzymuje się:

$$s = s_A \Pi_s \left( \frac{v_g}{v_f}, \frac{z_g}{H}, \alpha, I_v, (G) \right) \quad (13)$$

gdzie  $s_A$  – obciążenie śniegiem w terenie otwartym (lub bezwietrznym), zwane powszechnie obciążeniem śniegiem gruntu. W ten sposób otrzymuje się kryteria podobieństwa wymagane podczas projektowania symulacji opadu śniegu w tunelu aerodynamicznym:

$$\frac{v_g}{v_f} = idem, \frac{z_g}{L} = idem, \alpha = idem, I_v = idem, (G) = idem \quad (14)$$

Powyższe rozważania prowadzone były przy założeniu, że koncentracja dyspersji i jej prędkość ruchu są wielkościami niezależnymi. Sytuacja taka ma miejsce w tak zwanych przepływach rzadkich. Charakteryzują się one tym, że ruch płynu (powietrza) ma bezpośredni wpływ na ruch dyspersji, natomiast wpływ przeciwny zaniedbuje się. Innymi słowy – koncentracja dyspersji jest na tyle mała, że jej obecność nie wpływa na ruch ośrodka ciągłego.

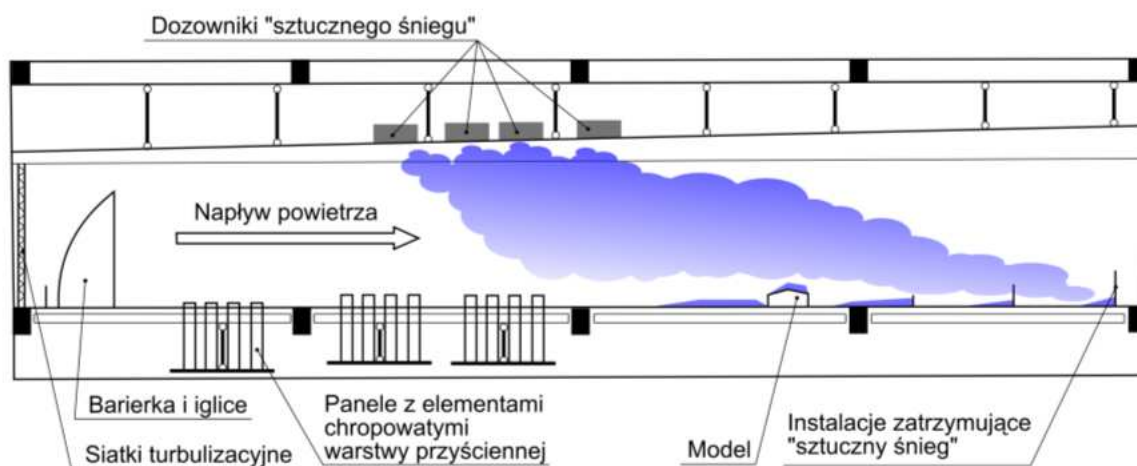
## 8. Planowanie eksperymentu w tunelu aerodynamicznym

Podstawowym celem badań modelowych w tunelu aerodynamicznym jest określenie rozkładu obciążenia śniegiem na powierzchniach granicznych (np. dachach, gruncie itp.) w dwóch sytuacjach: 1. Opadu atmosferycznego przy wiejącym wietrze; 2. Redystrybucji pokrywy śnieżnej przy wiejącym wietrze. Pierwszym etapem badań powinno być ustalenie kryteriów umożliwiających prowadzenie badań tunelowych, w tym także pozwalających na dobór substancji symulującej śnieg. Można rozważyć użycie np. trzech substancji symulujących śnieg: trociny (o różnym uziarnieniu, gatunku drewna, wilgotności), soda oczyszczona, piasek (o różnym uziarnieniu).

Ekspertyzy z tego zakresu można zrealizować w istniejącym tunelu aerodynamicznym Politechniki Krakowskiej (rys.13 i 14). Jest to, jedyny w Polsce, tunel z warstwą przyścienną. Umożliwia to, konieczne w takich badaniach, symulowanie profilu prędkości napływu powietrza oraz turbulencji atmosferycznej. Przestrzeń pomiarowa tego tunelu ma wymiary (długość  $\times$  szerokość  $\times$  wysokość): 10 m  $\times$  2,2 m  $\times$  1,4 m – 1,6 m i jest podzielona na cztery segmenty (po 2,5 m każdy). W pierwszych dwóch dochodzi do uformowania profilu prędkości i turbulencji przy pomocy odpowiednich barier, iglic i klocków umieszczonych w podłożu o regulowanej automatycznie wysokości. Trzeci segment jest właściwym obszarem pomiarowym, w którym umieszcza się badany model i gdzie dozowany jest „sztuczny śnieg”. W ostatnim segmencie umieszcza się instalacje wyłapujące substancję symulującą śnieg, tak aby nie dostał się on dalej – do wentylatora. Modele umieszcza się na obrotowym stole pomiarowym, umożliwiającym zmianę ustawienia modelu względem napływającego powietrza. Segmenty 2–4 mają ściany ażurowe (w odległości 2,2 m) w celu zmniejszenia tak zwanego *efektu blokowania przepływu*, oraz ściany pełne z oknami w rozstawie 3,4 m.



Rys.13. Wnętrze tunelu aerodynamicznego Politechniki Krakowskiej. Widoczne klocki i iglice służące do modelowania warstwy przyściennej. Po bokach ściany ażurowe.



Rys.14. Aranżacja eksperymentu w tunelu aerodynamicznym.

## 10.Wnioski

- Pod wpływem wiatru już podczas opadu śniegu dochodzi do nierównomiernego rozłożenia pokrywy śnieżnej;
- Wielotygodniowe wystawienie pokrywy śnieżnej na działanie czynników atmosferycznych powoduje zmiany jej własności. W szczególności zwiększeniu ulega gęstość śniegu. Tym samym wnioskowanie o obciążeniu śniegiem na podstawie grubości pokrywy śnieżnej może być złudne;
- Pokrywa śnieżna podatna jest na redystrybucję pod wpływem wiatru, choć w bardzo różnym stopniu, w zależności od swojej postaci;
- Wiatr powoduje ubytki pokrywy śnieżnej w pewnych rejonach i jej przyrosty w innych. W szczególności powoduje powstanie worków śnieżnych za przeszkodami;
- Otoczenie budynku może wpływać na rozkład obciążenia śniegiem na nim (ekspozycja i interferencja);
- Należy pamiętać o różnicach w zachodzeniu zjawisk redystrybucji w warunkach połowych i na dachu, porównując obciążenia śniegiem dachu i gruntu;
- Niepoprawne odprowadzenie wody z dachu może powodować gromadzenie się warstwy lodu i w efekcie zwiększenia obciążenia śniegiem dachu;
- Dokumenty normalizacyjne nie pozwalają na przewidywanie rozkładu obciążenia śniegiem na dachach o nietypowych kształtach;
- Najważniejsze zjawiska kształtujące rozkład pokrywy śnieżnej mogą być symulowane w tunelu aerodynamicznym;
- Uzupełnieniem badań tunelowych powinno być rozważenie wpływu topnienia i zsuńnięcia (ześlizgu) śniegu na dachu.

## Literatura

1. Flaga A., Kimbar G.: *Porównanie norm obciążenia śniegiem*; Przegląd Budowlany, Nr 1, 2006
2. Kimbar G.: *Kryteria podobieństwa w badaniach modelowych zjawisk transportu i akumulacji śniegu w tunelu aerodynamicznym*; Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1695
3. Flaga A., Kimbar G.: *Zjawiska kształtujące obciążenie śniegiem*; Przegląd Budowlany, Nr 1, 2007
4. Kimbar G., Flaga A.: *A New Approach to the Similarity Criteria for Predicting a Snow Load in Wind-tunnel Experiments*, Proc. of the 12<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, Cairns, Australia 2007
5. Magono, C.; Lee, C.W.: *Meteorological Classification of Natural Snow Crystals*, J. Fac. Sci. 1966, Hokkaido University, Sec. 1, No. 3, strony 33-40.
6. Seligman, G.: *Snow Structures and Ski Fields*, Macmillan, Londyn 1936.
7. ISO – 4355 (1988), *Bases for Design of Structures – Determination of Snow Load on Roofs (Working draft)*.
8. EN 1991-1-3: *Eurocode 1 – Actions on Structures, Part 1.3: Snow Loads*.
9. ASCE 7-95: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
10. Bagnold, R.A.: *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Chapman and Hall, Londyn 1941.
11. PN-80/B-02010: *Obciążenie śniegiem*.
12. Строительные Нормы и Правила СНиП 2.01.07-85, Нагрузки и воздействия
13. M. O'Rourke, C. De Angelis: *Snow Drifts at Windward Roof Steps*; Journal of Structural Engineering, 2002
14. M. O'Rourke, M. Auren: *Snow Loads on Gable Roofs*; Journal of Structural Engineering, 1999
15. T.K. Thiis, Y. Gjessing: *Large-scale Measurements of Snowdrifts around Flat-roofed and Single-pitch-roofed Buildings*; Cold Regions Science and Technology 30, 1999
16. M. Tsuchiya, T. Tomabechi, T.Hongo, H. Ueda: *Wind Effects on Snowdrift on Stepped Flat Roofs*; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, 2002
17. H. Mitsuhashi: *Measurements of Snowdrifts and Wind Profiles around the Huts at Syowa Station in Antarctica*; Antarctic Record 75, 1982
18. S. Sakurai, O. Joh, T. Shibata: *Wind Effect on the Distribution of Snow Depth on a Large Dome*
19. R.L. Petersen, E.W. Hoppe: *Simulating Snow Loads on Fabric Roofs*; Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics, and Hydraulics, 1986
20. P.A. Irwin, S.L. Gamble: *Prediction of Snow Loading on the Toronto Skydome*; Proceedings of First International Conference on Snow Engineering, Santa Barbara, 1988
21. J.D. Iversen: *Drifting Snow Similtude*; Journal of the Hydraulics Division, 1979
22. R.J. Kind: *A Critical Examination of the Requirements for Model Simulation of Wind-induced Erosion/Deposition Phenomena Such as Snow Drifting*; Atmosphere Environment 10, 1976
23. F. Da Matha Saant'anna, D.A. Taylor: *Snow Drifts on Flat Roofs: Wind Tunnel Test and Field Measurements*; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 34, 1990
24. R.D. Tabler: *Self-similarity of Wind Profiles in Blowing Snow Allows Outdoor Modeling*; Journal of Glaciology 26, 1980
25. J.W. Pomeroy, D.M. Gray: *Saltation of Snow*; Water Resources Research 26, 1990

26. W.F. Budd: *The Drifting of Nonuniform Snow Particles*; Studies in Antarctic Meteorology, Antarctic Research Series, 1966
27. R.B. Haehnel, J.H. Lever: *Field Measurements of Snowdrifts*; Proceedings of ASCE/ISSW Workshop on the Physical Modeling of Wind Transport of Snow and Sand, Snowbird, UT, 1994
28. D. Kobayashi: *Studies of Snow Transport in Low-level Drifting Snow*; Institute of Low Temperature Science, Sapporo, 1972
29. J.S. Shirolkar, C.F.M. Coimbra, M.Q. McQuay: *Fundamental Aspects of Modeling Turbulent Particle Dispersion in Dilute Flows*; Progress in Energy and Combustion Science 22, 1996
30. G. Gouesbet, A. Berlemont: *Eulerian and Lagrangian Approaches for Predicting the Behaviour of Discrete Particles in Turbulent Flows*; Progress in Energy and Combustion Science 25, 1999
31. J. Pozorski, J.P. Minier: *On the Lagrangian Turbulent Dispersion Models Based on the Langevin Equation*; International Journal of Multiphase Flow 24, 1998
32. D.I. Graham, P.W. James: *Turbulent Dispersion of Particles Using Eddy Interaction Models*; International Journal of Multiphase Flow 22, 1996
33. P.A. Sundsbø: *Numerical Simulations of Wind Deflection Fins to Control Snow Accumulation in Building Steps*; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74, 1998
34. G.E. Liston, R.L. Brown, J.D. Dent: *A Two-dimensional Computational Model of Turbulent Atmospheric Surface Flows with Drifting Snow*; Annals of Glaciology 18, 1993
35. A. Soldati: *Particles Turbulence Interactions in Boundary Layers*; Z. Angew. Math. Mech. 85, 2005