ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Grzegorz KIMBAR*
Politechnika Krakowska

KRYTERIA PODOBIEŃSTWA W BADANIACH MODELOWYCH ZJAWISK TRANSPORTU I AKUMULACJI ŚNIEGU W TUNELU AERODYNAMICZNYM

Streszczenie. Artykuł przedstawia kryteria podobieństwa wyprowadzone z analizy wymiarowej przydatne przy przeprowadzaniu eksperymentów tunelowych z udziałem fazy rozproszonej, ze szczególnym uwzględnieniem symulacji transportu i akumulacji śniegu.

SIMILARITY CRITERIA FOR MODEL SIMULATION OF SNOW TRANSPORT AND ACCUMULATION IN WIND TUNNEL

Summary. The paper shows similarity criteria derived from dimensional analysis applicable during setting up tunnel experiments involving dispersed phase, with special attention to simulation of snow transport and accumulation.

1. Wstęp

Zachowanie się fazy rozproszonej w ośrodku ciągłym ma duże znaczenie w wielu działach techniki. W budownictwie, w umiarkowanej strefie klimatycznej, jednym z ciekawszych zagadnień związanych z fazą rozproszoną jest przewidywanie rozkładu obciążenia śniegiem na budowlach. Na kształt powierzchni pokrywy śnieżnej ma wpływ wiele czynników środowiskowych, z których najistotniejszy jest wiatr. Może on oddziaływać na trzy podstawowe sposoby: modyfikować transport śniegu podczas opadu, powodować transport i akumulację wcześniej utworzonej pokrywy śnieżnej oraz wpływać na jej właściwości fizyczne. Ostatnie zjawisko dotyczy przemian fizycznych wody, i chociaż jest pośrednio związane z transportem i akumulacją, nie będzie dalej omawiane.

Obecnie stosuje się dwa podejścia do rozwiązywania tego typu zagadnień. Pierwsze, obecne np. w Polskich Normach, to empiryczne zalecenia, oparte na wieloletnim

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Andrzej Flaga

doświadczeniu w realizacji rzeczywistych budowli. Drugie – poszukiwanie związków zarówno ścisłych, jak i empirycznych w ramach *mechaniki przepływów dwufazowych*.

Opis matematyczny zachowania się płynu z fazą rozproszoną jest na tyle skomplikowany, że analityczne, a nawet numeryczne, otrzymanie praktycznych rezultatów jest zwykle niemożliwe. Z tego powodu szczególne znaczenie mają badania w tunelach aerodynamicznych. Dotychczas stosowane zalecenia przeprowadzania badań znacznie różnią się w zależności od zastosowanego podejścia (por. [3] i [4]). Ponadto, praktyczna realizacja takich badań często pokazuje konieczność stosowania dodatkowych zaleceń nie wynikających z rozważań teoretycznych [5]. Celem artykułu jest zastosowanie jednolitej analizy zjawiska i porównanie wyników z istniejącymi zaleceniami, pochodzącymi ze zrealizowanych badań.

Każde badanie tunelowe modelu rzeczywistego obiektu wymaga określenia *kryteriów podobieństwa*, to jest zasad, na podstawie których ustalone zostaną parametry eksperymentu. Klasyczne kryteria podobieństwa dotyczą jedynie fazy ciągłej – powietrza. Aby efektywnie symulować zachowanie się także fazy rozproszonej, konieczne jest ich uzupełnienie. Wspomniana złożoność związków analitycznych opisujących takie zjawiska sprawia, że poddanie ich analizie *teorii podobieństwa* jest trudne. Możliwe jest jednak zastosowanie prostszej *analizy wymiarowej* [6]. Wtedy jedynym problemem staje się wybranie istotnych, opisujących zjawisko, wielkości.

2. Założenia modelowe

Tabela 1 zawiera symbole wielkości stosowanych w dalszej części pracy.

Tabela 1

Użyte oznaczenia

C_D	[-]	–	Wsp. oporu aerodyn.	Fr	[-]	–	Liczba Frouda
Fr_p	[-]	–	Gęst. liczba Frouda	I	[-]	–	Intensywność turbulencji
L	[m]	–	Charakterystyczna długość modelu	Q	[kg m^{-2} s^{-1}]	–	Wydatek transportowy fazy rozproszonej
Q_0	[kg m^{-2} s^{-1}]	–	Intensywność opadu	Q_{salt}	[kg m^{-1} s^{-1}]	–	Wydatek transportowy fazy rozproszonej w procesie saltacji
Re	[-]	–	Liczba Reynoldsa	Re_t	[-]	–	Progowa liczba Reynoldsa
St	[-]	–	Liczba Strouhala	d	[m]	–	Srednica cząstki
G	[m s^{-2}]	–	Przyspieszenie ziemskie	H	[m]	–	Grubość pokrywy
$\vec{k}$	[-]	–	Wersor osi z (wskazuje kierunek pionowy)	m_{salt}	[kg]	–	Masa przetransportowanego śniegu
n	[kg m^{-3}]	–	Koncentracja fazy rozproszonej	s_0	[Pa]	–	Charakterystyczne obciążenie śniegiem gruntu
t	[s]	–	Czas	$u(z)$	[m s^{-1}]	–	Profil pionowy średniej prędkości napływu
u_0	[m s^{-1}]	–	Prędkość napływu $u(z')$	u^*	[m s^{-1}]	–	Prędkość tarcia
u^*_t	[m s^{-1}]	–	Progowa prędkość tarcia	v_f	[m s^{-1}]	–	Prędkość swobodnego spadku

cd. tabeli 1

v_p	[m s^{-1}]	–	Prędkość cząstki	z	[m]	–	Wys. nad poziomem terenu
z'	[m]	–	Char. wysokość	z_0	[m]	–	Chropowatość podłoża
Π	[-]	–	Liczba podobieństwa	α	[-]	–	Parametr prawa potęgowego
δ	[m]	–	Warstwa przyścienna	κ	[-]	–	Stała von Kármána (0.41)
ν	[m^2 s^{-1}]	–	Lepkość ośrodka ciągłego	ρ_c	[kg m^{-3}]	–	Gęstość pokrywy
ρ_f	[kg m^{-3}]	–	Gęstość ośrodka ciągłego	ρ_p	[kg m^{-3}]	–	Gęstość cząstki
τ	[Pa]	–	Naprężenie styczne w płynie	$\vec{\nabla}$	[m^{-1}]	–	Operator Hamiltona [$\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$, $\partial/\partial z$]

Niezbędne uproszczenia modelowe dotyczące fazy ciągłej (powietrza), powszechnie przyjmowane w aerodynamice, to przede wszystkim hipoteza *płynu newtonowskiego* i podział wszystkich wielkości opisujących przepływ na składową *średnią* i *fluktuacyjną*. Zgodnie z tymi założeniami powietrze jako substancję opisują wielkości ρ_f i ν, natomiast sam przepływ: $u(z)$ i I. Prędkość napływu, ze względów praktycznych, charakteryzuje $u_0 = u(z')$, natomiast postać funkcji $u(z)$ przyjmuje się zwykle za *prawem potęgowym:* $u(z) = u_0\,(z/z')^{\alpha}$ bądź *prawem logarytmicznym:* $u(z) = u^*/\kappa \ln(z/z_0)$. Oba prawa wymagają także określenia dodatkowego parametru (α lub z_0) opisującego kształt funkcji $u(z)$, a ich zakresem stosowalności jest w przybliżeniu $z_0<z<0.1\delta$.

Przyjmuje się, że zachowanie się fazy rozproszonej jako całości jest wynikiem zachowania poszczególnych cząstek, traktowanych niezależnie i posiadających uśrednione właściwości. Oznacza to, że ze względu na niską koncentrację (n) nie uwzględnia się wpływu cząstek na siebie nawzajem. Średnie właściwości cząstki są scharakteryzowane przede wszystkim przez parametry d i ρ_p. Wymiar d jest średnicą kuli o gęstości ρ_p, której objętość i masa równa jest objętości i masie przeciętnej cząstki. Specyficzne interakcje pomiędzy cząstką, płynem i podłożem opisuje się różnie w zależności od rodzaju zachodzącego zjawiska, to jest *pełzania*, *saltacji* bądź *zawieszenia*. Pełzanie zachodzi, gdy cząstka nie traci kontaktu z podłożem, a jej transport wywołany jest przez *moment aerodynamiczny*. W przypadku zawieszenia przeciwnie – podłoże nie ma wpływu na ruch cząstki w ośrodku ciągłym. Ponieważ efektywność transportu w procesie pełzania jest nikła, jego analizowanie wydaje się bezcelowe. Saltacja jest zjawiskiem pośrednim i zostanie omówiona osobno.

Uniwersalną wielkością charakteryzującą ruch cząstki w płynie jest prędkość swobodnego spadku v_f. Powinna ona być wyznaczana eksperymentalnie, jednak podczas wstępnych rozważań przydatne mogą być jej teoretyczne przybliżenia. Ponieważ z definicji v_f jest prędkością ruchu jednostajnego, jaką cząstka osiąga w swobodnym spadku, więc można ją wyznaczyć z równowagi sił, przyjmując odpowiednie hipotezy dotyczące ich postaci (zwłaszcza *siły oporu aerodynamicznego*).

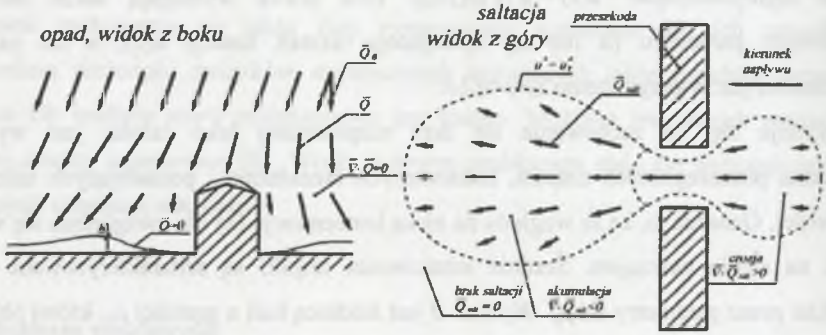
$$\underbrace{\tfrac{1}{6}\pi d^3 \rho_p g}_{\text{ciężar}} - \underbrace{\tfrac{1}{6}\pi d^3 \rho_f g}_{\text{wypór}} - \underbrace{\tfrac{1}{2} C_D \rho_f \tfrac{1}{4}\pi d^2 v_f^{\,2}}_{\text{opór aerodynamiczny}} = 0, \tag{1}$$

stąd:

$$v_f = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{d\left(\rho_p - \rho_f\right)g}{C_D \rho_f}} \tag{2}$$

Cząstki po kontakcie z podłożem tworzą *pokrywę* (np. pokrywę śnieżną). Jej podstawowe właściwości to h, ρ_c i u^*_t. Mimo iż ρ_c i ρ_p wydają się być ze sobą silnie związane, to ρ_c zwykle waha się w znacznych granicach w zależności od *stanu pokrywy*, to jest jej sposobu utworzenia, wieku i historii warunków, na jakie była wystawiona. Wielkość u^*_t ma zastosowanie przy opisie saltacji.

Celem modelowania zjawiska *opadu atmosferycznego* i saltacji jest odtworzenie przedstawionego na rys. 1 *pola transportu* $\vec{Q}$. Akumulacja zachodzi tam, gdzie $\vec{\nabla}\cdot\vec{Q} < 0$.



Rys. 1. Pole transportu dla opadu (zawieszenia) i saltacji
Fig. 1. Transport field for precipitation (suspension) and saltation

3. Transport podczas opadu

Podstawowe obciążenie śniegiem jest efektem pierwotnej akumulacji śniegu pochodzącego z opadu atmosferycznego. Jeżeli opadowi towarzyszy wiatr, to opływ aerodynamiczny budowli może mieć wpływ na rozkład pokrywy śnieżnej. Pole transportu określone jest poprzez $\vec{Q} = n\vec{v}_p$, gdzie $\vec{v}_p$ jest złożeniem prędkości przepływu $\vec{u}$ i pola prędkości względnej cząstki wobec płynu, której charakterystyczną wielkością jest v_f. Ponieważ na znacznej wysokości, na której powstaje dyspersja śnieżna, wpływ ukształtowania terenu jest znikomy, można przyjąć, że n i $\vec{v}_p$, a zatem i $\vec{Q}$ są jednorodne.

Wielkość $Q_0 = \left|\vec{Q}(z > \delta)\cdot\vec{k}\right|$, czyli rzut wydatku transportowego na znacznej wysokości na kierunek pionowy, jest właściwością lokalnego klimatu.

Obrane wielkości charakteryzujące proces (3) podzielono na pięć kategorii. Dobór parametrów opisujących płyn, przepływ i środowisko nie sprawia trudności – są to podstawowe parametry zastosowanych modeli fizycznych. Jako wielkości opisujące pokrywę obrano te, które są łatwo mierzalne i jednocześnie ich wyznaczenie stanowi cel badania. W charakterystyce cząstki występują natomiast wielkości znajdujące się we wzorze (2), opisującym jej zachowanie podczas swobodnego spadku.

$$\underbrace{\rho_f, \nu}_{\text{płyn}}, \underbrace{u_0, z', \alpha}_{\text{przepływ}}, \underbrace{d, \rho_p, C_D, v_f}_{\text{cząstka}}, \underbrace{h, \rho_c, Q_0}_{\text{pokrywa}}, \underbrace{g, t, L}_{\text{środowisko}} \tag{3}$$

Jako bazę wymiarową przyjęto: u_0, L, ρ_c. Dla każdego punktu podłoża zachodzi:

$$h \propto \frac{Q_0 t}{\rho_c}; \qquad s_0 = \rho_c g h \propto Q_0 t g \qquad (4); (5)$$

Zależność (4) zostanie użyta w dalszej analizie, natomiast (5) może być stosowana do opracowania wyników eksperymentu i ustalania wartości ρ_c i Q_0. Analiza wymiarowa, dla kolejnych wielkości z (3), daje następujące liczby podobieństwa:

$$\Pi_{\rho f} = \frac{\rho_c}{\rho_f}, Re = \frac{u_0 L}{\nu}, \Pi_{z'} = \frac{z'}{L}, \alpha, \Pi_d = \frac{d}{L}, \Pi_{\rho p} = \frac{\rho_c}{\rho_p}, C_D,$$

$$\Pi_{vf} = \frac{v_f}{u_0}, Fr_{p1} = \frac{u_0^2}{gd}\frac{C_D \rho_f}{\rho_p - \rho_f}, Fr_{p2} = \frac{u_0^2}{gd}\frac{\rho_f}{\rho_p}, \Pi_h = \frac{Q_0 t}{\rho_c L}, \Pi_{Q0} = \frac{Q_0}{\rho_p v_f}, Fr = \frac{u_0^2}{gL}, St = \frac{L}{u_0 t}$$

Niektóre z nich tworzą istotne dla symulacji kryteria podobieństwa. Wartość *Re* ma silny związek z *I*, jednak jej dokładne zachowanie w badaniu modelowym zwykle nie jest konieczne. Istotne jest jedynie [8], aby utrzymać *Re* na dostatecznie wysokim poziomie (kryterium P1), zapewniającym podobieństwo turbulencji. Poziom ten musi być dobierany indywidualnie do każdego eksperymentu. Kryteria (P2): $\Pi_{z'} = idem$ i (P3): $\alpha = idem$ zapewniają podobieństwo profilu prędkości i ich spełnienie jest konieczne. Podobieństwo pola $\vec{v}_p$ zapewnia warunek (P4): $\Pi_{vf} = idem$, który przy przyjęciu hipotezy (4) przybiera równoważną, wygodną dla rozważań wstępnych, postać (P4a): $Fr_{p1} = idem$. Zawsze jednak, kiedy jest to możliwe, stosowane powinno być kryterium (P4), a (P4a) powinno służyć jedynie do wstępnego określenia rodzaju substancji fazy rozproszonej. Z tego względu często [8] używa się (P4b): $Fr_{p2} = idem$, to jest przy założeniach, że $C_D = idem$ i $\rho_p \gg \rho_f$.

Kryteria (P5): $\Pi_h = idem$ i (P6): $\Pi_{Q0} = idem$ zapewniają odpowiednio podobieństwo kształtu pokrywy i koncentracji (*n*). Jak wspomniano, ze względu na zwykle niską wartość *n*

można uznać, że n i $\vec{v}_p$ są niezależne. Dlatego kryterium (P6) wydaje się mniej istotne. Natomiast (P5) ma wpływ na warunki brzegowe opływu i przy h porównywalnym z L powinno być spełnione.

4. Saltacja

Saltacja jest zjawiskiem „upłynnienia" powierzchni pokrywy zdolnej do erozji pod wpływem przepływu. Cząstki tworzące pokrywę pod działaniem naprężenia stycznego wywołanego przepływem odrywają się od podłoża na niewielką wysokość (*warstwa saltacji*), tak więc jest to właściwie zjawisko dwuwymiarowe. Jeżeli cząstki unoszone są wyżej, na wysokość porównywalną z poziomymi wymiarami zjawiska, mówi się o zawieszeniu. Wielkością opisującą naprężenie styczne wywierane przez płyn na podłoże jest $u^* = \sqrt{\tau / \rho_f}$. Wielkość ta występuje także w prawie logarytmicznym. Saltacja zachodzi na obszarze, na którym u^* przekracza pewną graniczną wielkość (u^*_t) zależną od rodzaju i stanu pokrywy. Można powiedzieć, że u^*_t wyraża wytrzymałość pokrywy na naprężenie styczne, pochodzące od występujących w niej sił spoistości. Ponieważ u^* jest dość dobrym przybliżeniem RMS fluktuacji prędkości przepływu, więc przyjmuje się [3], że przekroczenie przez u^* wartości v_f zmienia charakter transportu w zawieszenie. W takiej sytuacji składowe turbulentne prędkości przepływu są w stanie przezwyciężyć siły ciężkości i unieść cząstkę na znaczną wysokość.

Najważniejszym parametrem opisującym pokrywę śnieżną w procesie saltacji jest u^*_t [2]. Adekwatnie do niego dobrano parametry przepływu. Z właściwości środowiska usunięto czas, ponieważ wstępnie rozpatruje się jedynie stan ustalony procesu. Wielokrotnie zauważono (np. [3]), że szczegółowe właściwości cząstki, takie np. jak jej rozmiar, mają drugorzędne znaczenie podczas saltacji. Natomiast główny wpływ ukazują wielkości opisujące dynamiczne i kinematyczne interakcje cząstki z płynem.

$$\underbrace{\rho_f, \nu}_{\text{płyn}}, \underbrace{u^*, z_0, u_0, z'}_{\text{przepływ}}, \underbrace{\rho_p, v_f}_{\text{cząstka}}, \underbrace{u^*_t}_{\text{pokrywa}}, \underbrace{g, L}_{\text{środowisko}} \tag{6}$$

Jako bazę wymiarową przyjęto: u^*, z_0, ρ_p. Na obszarach zachodzenia saltacji z_0 ulega zwiększeniu – jest to wpływ warstwy saltacji na przepływ ponad nią. Postuluje się [7], że:

$$z_0 \propto \frac{u^{*2}}{2g} \quad \text{dla} \quad u^* > u^*_t \tag{7}$$

Użycie tej zależności w dalszej analizie powoduje zaskakujące zmiany w postaciach liczb podobieństwa (*Fr* i *Re*). Działanie takie wydaje się jednak uzasadnione, ponieważ z_0 jako

wielkość bazowa lepiej oddaje skalę zjawiska saltacji niż, odpowiednia dla całego modelu, długość L. Dla kolejnych wielkości z (6) otrzymuje się następujące liczby podobieństwa:

$$\Pi_{\rho f} = \frac{\rho_p}{\rho_f}, \underbrace{Re = \frac{u^{*3}}{2g\nu} \propto \frac{u^* z_0}{\nu}, Re_t = \frac{u_t^{*3}}{2g\nu}}, \Pi_{u0} = \Pi_{z'} = \frac{z_0}{z'} \propto Fr_{z'} = \frac{u^{*2}}{gz'},$$

$$\Pi^*_{vf} = \frac{u^*}{v_f}, \Pi^*_{ut} = \frac{u^*}{u_t^*}, \underbrace{Fr_L = \frac{u^{*2}}{gL} \propto \frac{z_0}{L}, \Pi_L = \frac{z'}{L}}, Fr = \frac{u^{*2}}{gz_0} = const$$

Za pomocą prostego eksperymentu myślowego [7] można dowieść, że nawet przy $u^* > u^*_t$ naprężenie styczne wywierane bezpośrednio na podłoże (na dnie warstwy saltacji) charakteryzuje stała wielkość u^*_t. Ponieważ turbulencje mają istotny wpływ na unoszenie cząstek z podłoża, więc konieczne jest spełnienie warunku (S1): $Re_t = idem$. Od przepływu wewnątrz warstwy saltacji wymaga się, aby, tak jak w przypadku prototypu, był w pełni turbulentny, co według [4] zachodzi, gdy (S2): $Re > 30$. Absolutnie koniecznymi warunkami, zapewniającymi zajście saltacji, są (S3): $\Pi^*_{vf} < 1$ (S4): $\Pi^*_{ut} > 1$. Aby zapewnić, że zjawisko będzie zachodziło na podobnym do rzeczywistego obszarze, konieczne jest spełnienie (S3a): $\Pi^*_{vf} = idem$ (S4a): $\Pi^*_{ut} = idem$. Warunek (S5): $Fr_{z'} = idem$ odpowiada za wpływ warstwy saltacji na przepływ ponad nią. Jej zachowanie zwykle jest trudne, dlatego postuluje się (np: [3] – chociaż na bazie innej analizy) jawne pogwałcenie warunku $\Pi_L = idem$. Oznacza to konieczność wykonania modelu o zmienionych proporcjach, to jest innej skali wymiarów pionowych niż poziomych. Postępowanie takie wydaje się ryzykowne ze względu na zachowanie podobieństwa przepływu wokół takiego modelu. Ze względu na siły powstające podczas upadku cząstki [5] zaleca (S6): $\Pi_{\rho f} > 600$.

Powyższa analiza jest wystarczająca, jeżeli celem badania jest osiągnięcie stanu równowagi pokrywy ($\vec{\nabla} \cdot \vec{Q} = 0$). Natomiast jeżeli z pewnych względów istotna jest szybkość zachodzenia zjawiska, konieczna jest dalsza analiza wymiarowa wielkości m_{salt}. Tym razem za wielkości bazowe obrano parametry właściwe dla całego modelu: ρ_c i L.

$$m_{salt} = Q_{salt} L t; \quad \Pi_m = Q_{salt} t / \left(\rho_c L^2\right) \qquad (8); (9)$$

Warunek (S7): $\Pi_m = idem$ jest zbieżny z zaproponowanym przez [1], wymaga jednak znajomości wartości Q_{salt} w określonym punkcie zarówno modelu, jak i prototypu. Jej przybliżenia zaczerpnięte odpowiednio z [2] [3] [9] mają postać:

$$Q_{salt} \propto \frac{\rho_f u^{*3}}{g}; \quad Q_{salt} \propto \frac{\rho_f u^{*3}}{g}\left(\frac{v_f}{u_t^*} - \frac{v_f}{u^*}\right); \quad Q_{salt} = 0.68 \frac{\rho_f u_t^*}{g u^*}\left(u^{*2} - u_t^{*2}\right) \qquad (10); (11); (12)$$

Stała 0.68 m s^{-1} w (12) została ustalona statystycznie i odnosi się jedynie do śniegu.

5. Wnioski

Badanie modelowe transportu śniegu powinno uwzględniać rodzaj zachodzącego zjawiska. Podczas badań zawieszenia (opadu) istotne jest precyzyjne odtworzenie przepływu, a dodatkowe kryteria służą jedynie odpowiedniemu doborowi substancji fazy rozproszonej. Dlatego ich spełnienie nie powinno być trudne. Tymczasem, podczas badań zjawiska saltacji należy skupić się przede wszystkim na odtworzeniu warunków ją wywołujących. Jednoczesne utrzymanie podobieństwa przepływu jest trudne, ale wydaje się mniej istotne, jak długo samo zjawisko zachodzi w podobny sposób. W efekcie, eksperyment może nie przypominać wizualnie rzeczywistego procesu, mimo to dając podobne rezultaty w transporcie fazy rozproszonej.

LITERATURA

1. Anno Y.: Requirements for modeling a snowdrift, Cold Regions Science and Technology 8, 1984, 241-252.
2. Bagnold R. A.: The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Chapman and Hall, Londyn 1941.
3. Iversen James D.: Drifting Snow Similitude, Journal of the Hydraulics Division, 1979.
4. Kind R. J.: A critical examination of the requirements for model simulation of wind-induced erosion/deposition phenomena such as snow drifting, Atmospheric Environment 10, 1975.
5. Kind R. J., Murray S. B.: Saltation flow measurements relating to modeling of snowdrifting, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 10, 1982.
6. Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.: Mechanika płynów w inżynierii środowiska, WNT, Warszawa 2001.
7. Owen P. R.: Saltation of uniform grains in air, Journal of Fluid Mechanics 20, 1964.
8. Petersen Ronald L., Hoppe Eric W.: Simulating snow loads on fabric roofs, Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics, and Hydraulics, 1986.
9. Pomeroy J. W., Gray D. M.: Saltation of Snow, Water Resources Research 26, 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Dariusz Gawin