

Janina Trepiańska

PIONOWY PROFIL PRĘDKOŚCI WIATRU PRZYZIEMNEGO

W artykule dokonano przeglądu najważniejszych zależności między ruchem powietrza w przypowierzchniowej warstwie powietrza a szorstkością podłoża i stanem równowagi atmosfery. Wyliczone wartości ciśnienia dynamicznego poziomych strumieni powietrza, oddziałujących na obiekty terenowe o danej powierzchni, informują o sile naporu wiatru nazywanej w praktyce inżynierskiej obciążeniem wiatrowym.

Słowa kluczowe: prędkość wiatru, równowaga chwiejna, stała i obojętna, szorstkość podłoża, obciążenie wiatrem

Key words: speed of wind, instability, stability of atmosphere, neutral atmosphere, surface roughness, wind load

WPROWADZENIE

Inspiracją do przypomnienia niszczącej siły wiatru w przyziemnej warstwie powietrza i skutków jego huraganowych prędkości, były ogromne zniszczenia lasów przez wicherę 19 listopada 2004 r. na południowych skłonach Tatr, na Słowacji. Tak silny wiatr, związany z niezwykle dynamiczną sytuacją meteorologiczną, rzadko zdarza się w Europie Środkowej. W obszarach górskich silne wiatry związane są najczęściej ze zjawiskami fenowymi.

Głównym przedmiotem tego opracowania są warunki przemieszczania się strumieni powietrza w przyziemnej warstwie troposfery. Obliczono tzw. dynamiczne obciążenie wiatrem, czyli siłę wiatru działającego na przedmioty terenowe.

WIATR 19 LISTOPADA 2004 ROKU

Wichura, która spowodowała wielkie zniszczenia lasów w Tatrach Słowackich była niespotykana od wielu dziesiątków lat. Prędkość wiatru

w przyziemnej warstwie powietrza dochodziła do $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (oszacowano na $170 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Spowodował to bardzo aktywny, głęboki niż, przemieszczający się z zachodu przez Europę Środkową. Największe wartości poziomego gradientu ciśnienia wystąpiły w tylnej, zachodniej części tego niżu. Z dużą dokładnością czasową (do jednej godziny), synoptycy z krakowskiego Biura Prognoz przewidzieli pojawienie się niezwykle silnego wiatru w Tatrach. W Krakowie w ciągu 18 godzin spadek ciśnienia wyniósł 18 hPa^1 . W słowackim Tatrzańskim Parku Narodowym (TANAP) jego skutki były określone mianem katastrofy przyrodniczej.

Na terenie dwóch powiatów, od podtatrzańskich miejscowości Szczyrb-skie Pleso do Tatrzańskiej Łomnicy całkowite zniszczenie lasów świerkowych objęło około $12\,000 \text{ ha}$, a na dalszych $12\,000 \text{ ha}$ drzewostan został poważnie uszkodzony. Szacunkowo określono straty jako pował około 3 milionów m^3 drewna. Powierzchnia słowackiego Tatrzańskiego Parku Narodowego wynosi $113\,221 \text{ ha}$, a więc zniszczenia objęły $1/5$ powierzchni Parku. Prędkość tej wichury można ocenić na 11–12. stopień w skali Beauforta². Wiatr wyrządził poważne szkody również w południowej Małopolsce, przede wszystkim przez zerwanie dachów budynków i liczne zniszczenia niewielkich obiektów terenowych, jak tablice drogowe i reklamowe.

ZMIANA PRĘDKOŚCI WIATRU W PROFILU PIONOWYM

Za profil wiatru przyjmuje się pionowy model zmian prędkości i kierunku wiatru. Pole wiatru jest polem wektorowym, a więc przy rozpatrywaniu jego ruchu należy wziąć pod uwagę prędkość i kierunek strumieni powietrza (Kopcewicz 1959). Uwzględniana jest prędkość ruchu poziomego i pionowego. W opracowaniu skupiono się na jednej składowej jego ruchu, mianowicie prędkości ruchu poziomego, gdyż ograniczono się wyłącznie do przyziemnej warstwy powietrza. Przy praktycznych rozważaniach możliwości zniszczenia obiektów terenowych należy wziąć pod uwagę przede wszystkim jego prędkość poziomą, jako czynnik niszczący. Zmiana kierunku wiatru zaczyna się na wysokości około 10–20 metrów nad podłożem i tę warstwę można traktować jako przyziemną. Ograniczenie rozważań prędkości przepływu powietrza do 20 metrów nad poziomem gruntu uzasadniają wyniki badań empirycznych i rozważań teoretycznych (Kopcewicz 1959). Powyżej, gdzie można już zaobserwo-

¹ Informacje uzyskane od dr. Rafała Bąkowskiego z Biura Prognoz IMiGW w Krakowie, któremu w tym miejscu wyrażam podziękowanie.

² Informacje uzyskane od dr. Zdzisława Bednarza z Akademii Rolniczej w Krakowie, któremu w tym miejscu przekazuję wyrazy wdzięczności.

wać stopniowy skręt wiatru, następuje nieliniowe przejście do wiatru gradientowego w warstwie tarciowej atmosfery. Zatem, w badaniu pionowego profilu wiatru w warstwie do rozpatrywanej wysokości, kierunek można pominąć. W niezbyt grubej warstwie powietrza, tj. 20 m nad podłożem, dla określania tzw. dynamicznego obciążenia wiatrem, czyli ciśnienia dynamicznego powstającego przez uderzenie strumienia powietrza w przedmioty terenowe, zmiana kierunku wynikającego z poziomego gradientu ciśnienia, również nie jest istotna. Bardzo ważna jest prędkość wiatru, określająca siłę takiego uderzenia i możliwość zniszczenia licznych mało trwałych przedmiotów terenowych, umieszczanych przy drogach. Należą do nich tablice informacyjne niezbędne w ruchu drogowym, a także coraz liczniejsze przy naszych drogach tablice reklamowe (billboardy). Nierzadko, są one przewrócone i zniszczone, najczęściej właśnie wskutek silnego wiatru.

Według licznych danych przytaczanych w literaturze, prędkość wiatru w warstwie przypowierzchniowej nie ulega większym zmianom; szczególnie przy dużych prędkościach strumieni powietrza. Zostają one częściowo wyhamowane lub ulegają zawirowaniom w niewielkiej odległości (centymetrowej) od podłoża, które odznacza się bardzo zróżnicowanym wpływem, określanym przez parametr szorstkości. Prędkość pozioma strumienia powietrza zmniejsza się w kierunku do tej powierzchni, osiągając wartość zerową zależnie od jej parametru szorstkości, np. bardzo blisko gładkiej powierzchni (Linacre 1992; Kędziora 1995). Szorstkość jest uważana za aerodynamiczną cechę podłoża, która decyduje o możliwości wystąpienia mikroturbulencji w przyziemnej warstwie powietrza. Podłoże oddziałuje jako tzw. powierzchnia czynna, powodując powstanie siły tarcia, które w znacznym stopniu może wyhamować prędkość wiatru dolnego. Jest to siła tarcia zewnętrznego. Oprócz tej siły wyzwała się jeszcze inna siła — tarcia wewnętrznego wynikająca z powstających ruchów turbulencyjnych w warstwie przyziemnej powietrza (Kożuchowski 1998; Bac, Rojek 1999). W przypadku szybkich przepływów powietrza można jej nie uwzględniać, z powodu zróżnicowanych, ale raczej niewielkich wartości (Kopcewicz 1959).

Parametr szorstkości zo wyrażany jest liczbowo jako funkcja wysokości elementów podłoża, inaczej: jest to wysokość nad powierzchnią gruntu, na której prędkość wiatru maleje do zera (Linacre 1992; Kędziora 1995). Odgrywa on wielką rolę we wszystkich badaniach prędkości wiatru wewnątrz różnorodnej szaty roślinnej, czy bezpośrednio nad łanem roślin uprawnych (Kędziora 1995; Bac, Rojek 1999). W rozważaniu prędkości przemieszczania się strumieni powietrza na wysokości kilku, kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu metrów nad poziomem gruntu, parametr ten jest bardzo istotny wtedy, gdy rozpatruje się

wiatr nad bardzo zróżnicowaną powierzchnią, np. nad powierzchnią koron drzew luźno rosnących, drzew w sadach, nad powierzchnią dachów zabudowań o różnej wysokości itp. W przypadku uderzeń wiatru na nietrwałe obiekty terenowe, jak tablice drogowe i reklamowe, zakłada się, że są one umieszczane najczęściej na otwartej przestrzeni, przy drogach kołowych, na podłożu trawiastym, a więc parametr szorstkości nie jest duży. Parametr ten jest uwzględniany we wzorach określających przepływ poziomych strumieni powietrza.

Zgodnie z wynikami badań empirycznych i rozważań teoretycznych, prędkość wiatru w warstwie tarciowej atmosfery zależy głównie od trzech czynników: poziomego gradientu ciśnienia, stanu równowagi atmosfery i wspomnianej szorstkości podłoża. Składowa pozioma gradientu ciśnienia nie zależy od wysokości nad poziomem podłoża, na której przepływa strumień powietrza (Kopcewicz 1959) w niższej troposferze. Zależy przede wszystkim od warunków meteorologicznych. Znaczny wpływ na przepływ powietrza wywiera natomiast stan równowagi rozpatrywanej masy powietrza. Przy dużej chwiejności pojawiają się pionowe prądy pochodzenia termicznego lub termiczno-dynamicznego, które wyhamowują poziomy przepływ powietrza. W takich warunkach rośnie tarcie wewnętrzne aktywnej masy powietrza, co również zmniejsza prędkość jej poruszania się (Kozuchowski 1998). Chwiejność atmosfery jest rozumiana ogólnie, jako stan umożliwiający rozwój pionowych ruchów powietrza. Obserwuje się wtedy, oprócz zmniejszenia prędkości strumieni powietrza, wzrost pionowego gradientu temperatury i zmniejszanie się gradientu pionowego prędkości wiatru. W masie powietrza o równowadze chwiejnej nad płaskim terenem rzadziej dochodzi do zawirowań. Zatem w rozpatrywanych przypadkach przepływu strumienia powietrza o dużej prędkości bardziej istotny jest stan równowagi stałej i obojętnej. Pionowe gradienty temperatury powietrza odznaczają się wtedy małymi wartościami. W równowadze obojętnej, przy dużej wartości parametru szorstkości podłoża, a więc dużej sile tarcia zewnętrznego, prędkość wiatru w pobliżu podłoża jest nieduża, ale rośnie dość szybko wraz ze wzrostem wysokości. Wtedy pionowy gradient prędkości wiatru jest duży. Przy małym tarcu, nad gładką powierzchnią podłoża, wartość gradientu prędkości wiatru znacznie maleje. Przy równowadze stałej, ogólnie ujmując — wpływ podłoża ma mniejsze znaczenie, turbulencja jest słaba, a prędkość wiatru rośnie z wysokością. To ostatnie stwierdzenie dotyczy głównie wiatrów słabych. Przy dużych prędkościach wiatru, na wysokości kilku lub kilkunastu metrów nad podłożem, pionowy gradient prędkości wiatru jest mały, co oznacza, że strumień powietrza w przekroju pionowym na tej wysokości przemieszcza się z prawie jednakową prędkością.

Poniżej przedstawiono formuły, według których można obliczyć prędkość strumieni powietrza na danym poziomie powyżej podłoża. W profilu pionowym wiatru rozkład prędkości rozpatruje się zwykle według dwóch formuł (Kopcewicz 1959; Linacre 1992; Lorenc 1996). Obydwie oparte są na badaniach empirycznych. Stosowana jest formuła logarytmiczna (logarithmic equation) lub formuła potęgowa (power-law equation). Nieco częściej używana jest formuła potęgowa. Pierwszą z nich przedstawia równanie (1):

$$uz = us \cdot \frac{\ln \frac{z-d}{zo}}{\ln \frac{zs-d}{zo}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

uz — prędkość o jaką zwiększa się przepływ powietrza na poziomie z nad gruntem,

us — prędkość wiatru na standardowej wysokości zs , zwykle 10 m,

d — stała dla danej powierzchni nazywanej powierzchnią „zerowego przemieszczania”,

\ln — logarytm naturalny.

W tej formule stała d odnosi się do atmosfery w stanie stabilności, czyli z wyłączeniem dużej chwiejności.

Formuła potęgowa, jak już zasygnalizowano — nieco częściej używana, to tzw. prawo Archibalda, stosowane przez Hellmanna już w 1917 r., przekształcone później przez Suttona (Kopcewicz 1959; Linacre 1992). Wyliczenia według tej formuły są silnie związane zarówno z parametrem charakteryzującym stan równowagi atmosfery, jak i z parametrem szorstkości podłoża.

$$uz = us \left(\frac{z}{zs} \right)^\alpha \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

gdzie:

$\alpha = 0,24 + 0,096 \log(zo) + 0,016 (\log zo)^2$,

pozostałe oznaczenia jak przy wzorze (1).

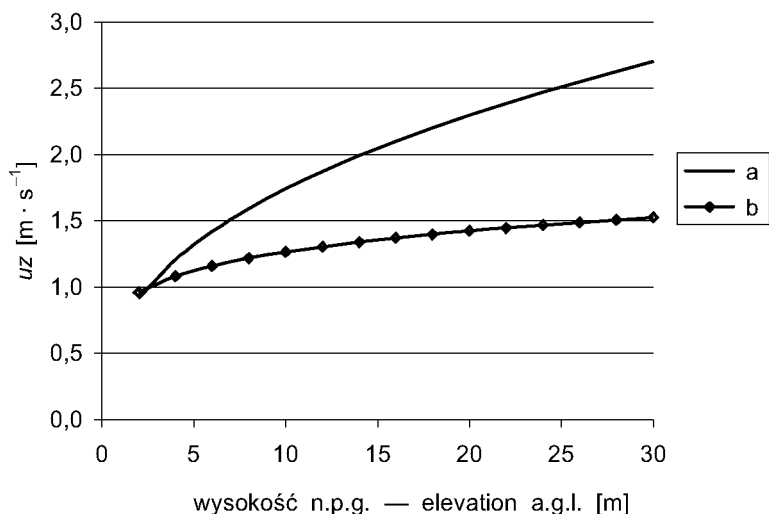
Przy wiatrach ogólnych o prędkości:

poniżej $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, stosuje się wykładnik potęgowy $\alpha = 0,4$,

umiarkowanej, do $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ — $\alpha = 0,17$,

wysokiej, powyżej $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ — $\alpha = 0,14$ (Linacre 1992).

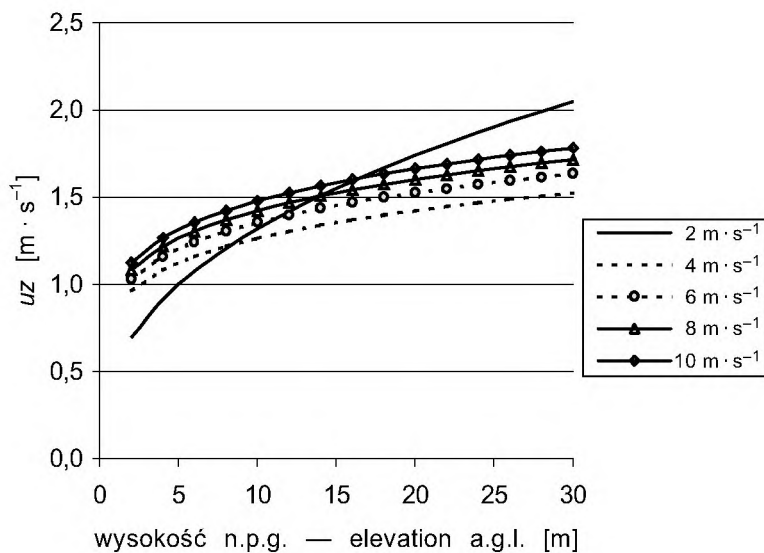
W tym opracowaniu wykorzystano prawo Archibalda (formułę potęgowa). Pewną ilustracją zastosowania różnych liczbowo wykładników potęgowych α jest rycina 1, na której przedstawiono pionowe profile wiatru o prędkości $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na wysokości do 20 m nad podłożem. Zastosowanie odpowiednich wartości wykładników potęgowych α jest ko-



Ryc. 1. Profil wiatru uz na różnej wysokości nad poziomym gruntu, przy prędkości $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z zastosowaniem wykładnika $\alpha = 0,4$ (krzywa a) i wykładnika $\alpha = 0,17$ (krzywa b)

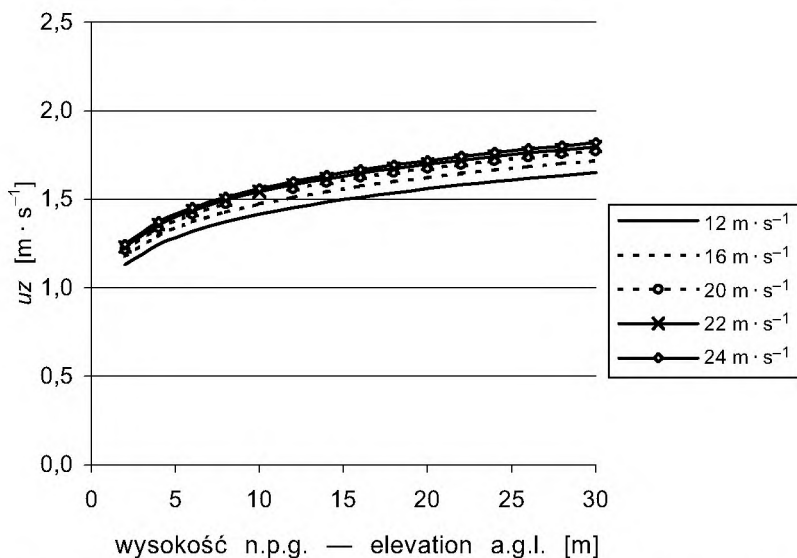
Fig. 1. Profile of wind speed uz at different height above ground level velocity $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the for the exponent $\alpha = 0,4$ (curve a) and the exponent $\alpha = 0,17$ (curve b)

nieczne przy różnych prędkościach wiatru, gdyż różnica między wyliczonymi wartościami prędkości przy zastosowaniu wykładnika α o różnej wartości (ryc. 1), na wysokości 20 m, przy prędkości $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dochodzi do 1 m, a na wysokości 30 m nad poziomym gruntu — przekracza $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Krzywa a została wyznaczona przy użyciu wykładnika $\alpha = 0,4$, krzywa b — przy zastosowaniu wykładnika $\alpha = 0,17$ (ryc. 1). Na danych wysokościach nad poziomym gruntu, na ryc. 1, 2, 3, 4 zaznaczonych na osi poziomej, przy określonej prędkości ogólnej wiatru, prędkość strumienia powietrza wzrasta o wartość uz zaznaczoną na osi pionowej. Z rycin 1 i 2 wynika ponadto, że największa zmiana prędkości strumieni powietrza występuje przy wiatrach słabych, co praktycznie nie ma większego znaczenia przy rozpatrywaniu ewentualnych zniszczeń obiektów terenowych. Przy strumieniach powietrza poruszających się z prędkością już od $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wartości uz zwiększają się dość równomiernie. Wyraźne zmniejszenie się uz , o wartość $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, następuje przy ogólnej prędkości wiatru do $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 2), co uzasadnia przyjęcie prędkości $4\text{--}8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ lub (w różnych opracowaniach) od 4 do $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, jako pewnych progów prędkości wiatru wpływających na zmianę jego struktury i oddziaływania na obiekty terenowe. Przy dużych prędkościach wiatru (ryc. 3, 4) strumienie powietrza biegają równolegle



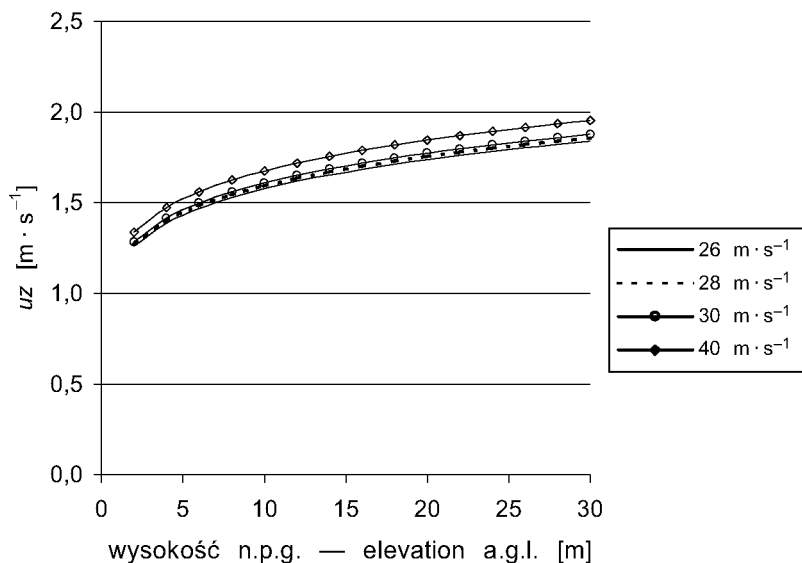
Ryc. 2. Profil wiatru u_z na różnej wysokości nad poziomem gruntu w zależności od prędkości strumieni powietrza [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Fig. 2. Profile of wind speed u_z at different height above ground level according to speed of the air flux [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]



Ryc. 3. Profil wiatru u_z na różnej wysokości nad poziomem gruntu w zależności od prędkości strumieni powietrza [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Fig. 3. Profile of wind speed u_z at different height above ground level according to speed of the air flux [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]



Ryc. 4. Profil wiatru u_z na różnej wysokości nad poziomem gruntu w zależności od prędkości strumienia powietrza [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Fig. 4. Profile of wind speed u_z at different height above ground level according to speed of the air flux [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

do siebie, gradient prędkości wiatru jest mały. Dominującą składową jest prędkość pozioma wiatru.

Jeszcze ogólniejsze założenia odnoszące się do ruchu poziomego powietrza przyjmują, że w warstwie granicznej troposfery (o grubości do 100, nawet do 200 m) prędkość wiatru nie ulega zasadniczej zmianie. Drugim ogólnym założeniem jest stałość pionowych strumieni — prądów konwekcyjnych i dynamicznych. Faktycznie jednak prędkość ruchów powietrza zmienia się, chociaż w bardzo niewielkim zakresie. Zakłada się ponadto, że przemieszczanie poziome strumieni powietrza odbywa się ruchem jednostajnie przyspieszonym. Zależnie od prędkości tego ruchu rośnie ciśnienie poruszających się strumieni powietrza. Wynika z tego możliwość wyliczenia ciśnienia jako siły naporu wiatru działającej na przedmioty terenowe. Siła ta jest określona jako ciśnienie dynamiczne lub obciążenie wiatrem (Linacre, Hobbs 1977; Lorenc 1996). Powoduje ona łamanie drzew, zrywanie dachów, przewracanie płotów i drobniejszych obiektów, takich jak wspomniane tablice drogowe i reklamowe. Oczywiście innym zagadnieniem jest wytrzymałość materiałów i konstrukcji budowli, określona w zależności od energii wiatru (Lorenc 1996).

Poprzednie założenie ruchu jednostajnie przyspieszonego przy poziomym ruchu strumieni powietrza jest pewnym uproszczeniem. W rzeczy-

wistości przemieszczanie się strumieni powietrza przy dużych prędkościach ma cechy przepływu turbulencyjnego. Ruch taki można scharakteryzować przy założeniu, że rozpatrywane są dwie jego składowe, stała i zmienna: pierwsza z nich (stała) to prędkość średnia, druga to prędkość zmienna, wynikająca z pulsacji i nieregularności pojawiających się w przepływie strug powietrza. Średnia prędkość wiatru jest funkcją wysokości poziomą, na którym rozpatruje się jego ruch (Linacre 1992; Lorenc 1996).

OBCIĄŻENIE WIATREM

W praktyce inżynierskiej ciśnienie wywierane przez wiatr, czyli obciążenie dynamiczne lub obciążenie wiatrem, musi być uwzględniane przy obliczeniach wytrzymałościowych każdego budowanego elementu. Wszystkie projekty obiektów budowlanych, konstrukcje wielkich i małych obiektów terenowych, ciężkich i lekkich, muszą stosować się do odpowiednich przepisów i norm. Obciążenie wiatrowe rozpatruje się jako ciśnienie wiatru na jednostkę powierzchni, pomnożone przez współczynnik oporu obiektu. W przypadku obiektów lekkich, jak przykładowe tablice drogowe i reklamowe, współczynnik oporu obiektu jest niewielki i przy dużych prędkościach wiatrów nie odgrywa większej roli. Takie przedmioty zostają przewrócone, zniszczone. Wartość przyjętego obciążenia wiatrem przyjmowana jest jako uśredniona prędkość dla różnych przedziałów czasowych (Lorenc 1996). Duże znaczenie odgrywa czas użytkowania obiektu poddanego obciążeniu wiatrowemu. Norma obciążeniowa wiatru (PN-77/B-02011) dzieli obszar Polski na kilka stref, według wyznaczonych parametrów średniej prędkości wiatru. W Małopolsce obowiązuje norma obciążeniowa 2,5.

W tabeli 1 podano wartości obciążenia dynamicznego wiatrem wyliczone według formuły (3). Za dynamiczne obciążenie wiatrem przyjęto siłę, jaką wywiera ciśnienie p spowodowane przez wiatr:

$$p = \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3)$$

gdzie:

ρ — gęstość powietrza = $1,29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (w warunkach standardowych, tj. na poziomie morza, w temperaturze 0°C), (Sorbian 2001),
 V — prędkość wiatru, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Formuła ta wywodzi się z prostej zależności:

$$P = K \cdot V^2 \quad (4)$$

gdzie:

P — ciśnienie powietrza $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,

K — współczynnik zależny od gęstości powietrza,

V — prędkość wiatru $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Przy prędkości wiatru $V = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $K = 0,125$ ciśnienie (nacisk wiatru) wynosi $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, przy prędkości $V = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nacisk wynosi $150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Ciśnienie wiatru dochodzące do $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ powoduje całkowitą rujnację.

Tabela 1 — Table 1

Wartości siły ciśnienia wiatru na daną powierzchnię (S) w zależności od jego prędkości (V) w tonach

Values of the air pressure force exerted by the speed wind (V) over a particular surface (S) in tonnes

S [m ²]	V [m · s ⁻¹]									
	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
5	0,005	0,021	0,05	0,083	0,13	0,19	0,25	0,33	0,42	0,52
10	0,01	0,04	0,09	0,17	0,26	0,37	0,51	0,66	0,84	1,03
15	0,02	0,06	0,14	0,25	0,39	0,56	0,76	0,99	1,25	1,55
20	0,02	0,08	0,19	0,33	0,52	0,74	1,01	1,32	1,67	2,06
30	0,03	0,12	0,28	0,50	0,77	1,11	1,52	1,98	2,51	3,10
40	0,04	0,17	0,37	0,66	1,03	1,49	2,02	2,64	3,34	4,13
60	0,06	0,25	0,56	0,99	1,55	2,23	3,03	3,96	5,02	6,19
80	0,08	0,33	0,74	1,32	2,06	2,97	4,05	5,28	6,69	8,26
100	0,10	0,41	0,93	1,65	2,58	3,72	5,05	6,60	8,36	10,32
120	0,12	0,50	1,11	1,98	3,10	4,46	6,07	7,93	1,03	12,38
140	0,14	0,58	1,30	2,31	3,61	5,20	7,08	9,25	11,7	14,44
160	0,17	0,66	1,49	2,64	4,13	5,94	8,09	10,57	13,37	16,51
180	0,19	0,75	1,67	3,00	4,64	6,68	9,10	11,89	15,05	18,57
200	0,21	0,83	1,86	3,30	5,20	7,43	10,11	13,21	16,72	20,64

Istotne znaczenie w tym przypadku ma wielkość powierzchni obiektu, na który działa ciśnienie. Tablice reklamowe o powierzchni około 10 m^2 , powinny być tak zbudowane, aby wytrzymały prędkość wiatru, co najmniej $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Powinna to być konstrukcja skratowana, na przestrzennym fundamencie o rozmiarach $4 \times 5 \text{ m}$ w głąb gruntu. Fundament w tym przypadku oznacza głębokość wkopania podstawy konstrukcji. Według norm obciążeniowych wiatrem prędkości wiatru $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w województwie małopolskim odpowiada napór siły wiatru 2,5 tony, a np. w województwie świętokrzyskim, gdzie obowiązuje już inna norma obciąż-

żenia — 2 tony. Normy są opracowane na podstawie średnich wartości prędkości wiatru w wyodrębnionych regionach Polski i oczywiście nie obejmują jednostkowych przypadków, w których wiatr przejawia szczególnie niszczącą siłę. Te ponadnormatywne skutki obserwujemy w postaci fruwających dachów i połamanych tablic drogowych.

Istotne wiadomości dla projektantów o stosowanych parametrach obciążenia wiatrem podaje H. Lorenc (1996).

PORYWY I USKOKI WIATRU

Duże znaczenie przy rozpatrywaniu zniszczeń terenowych mają porywy wiatru. Porywistość jest określona jako chwilowy przyrost prędkości wiatru przewyższający o $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ średnią prędkość 2-minutową (Lorenc 1996). Znane są również inne sposoby liczbowego wyznaczania porywistości, m.in. E. Linacre (1992) podaje wskaźnik porywistości wyliczany jako stosunek chwilowej najwyższej prędkości wiatru do średniej prędkości w dużo dłuższym przedziale czasowym: 5–10, nawet 60 minut. Prędkość chwilowa może być zmierzona nawet w ciągu 3 sekund, co oczywiście wymaga niezwykle dokładnych i wytrzymałych anemografów. Porywistość może być również wyrażana jako różnica między maksymalną i minimalną prędkością wiatru w procentach średniej prędkości w danym czasie (Linacre, Hobbs 1977).

Inni autorzy (np. Jaferník i in. 2000) zwracają uwagę na zjawisko uskoku wiatru, który jest szczególnie niebezpieczny dla statków powietrznych, a rozumiany jest jako nagła zmiana prędkości lub kierunku wiatru w atmosferze. Rozróżnia się pionowy i poziomy uskok wiatru. Pierwszy z nich rozważany jest jako zmiana wiatru w warstwie o grubości 30 m, a drugi — jako zmiana parametrów wiatru w płaszczyźnie poziomej, między dwoma punktami, położonymi w odległości 600 m. Uskoki wiatru mogą pojawiać się przy szybko przemieszczających się układach niskiego ciśnienia, w strefie aktywnych frontów atmosferycznych (Jaferník i in. 2000). Jest wysoce prawdopodobne, że za przewracanie drzew, tablic drogowych i innych mniejszych przedmiotów terenowych odpowiedzialne są właśnie powyżej przedstawione zjawiska i że takie zjawiska towarzyszyły sytuacji meteorologicznej, która spowodowała rozległe zniszczenia w Tatrach Słowackich.

Nagłe porywy wiatru, wraz z chwilową zmianą jego kierunku, także ruchy wirów powietrznych, wyjaśniane są w teorii przepływu turbulencyjnego. Przepływy te są uważane za niezwykle skomplikowane (Kopcewicz 1959; Sorbjan 2001). Do ich charakterystyki stosuje się liczbę Reynoldsa (bezwymiarową), lub liczbę Richardsona (również bez-

wymiarową). Zależy ona od pionowego rozkładu średniej prędkości wiatru, od gęstości powietrza, od pionowego rozkładu gęstości powietrza i wreszcie od siły ciężkości. Turbulencyjność w atmosferze najbardziej widoczna jest przez zmienność kierunku i prędkości wiatru, co doprowadziło do podziału ruchów powietrza na pięć zasadniczych grup. Teoretycy rozróżniają dość wyraźnie ruchy makroturbulencyjne, rozległe przestrzennie i ruchy mikroturbulencyjne, zależne szczególnie od właściwości podłoża. Przy bardziej intensywnej turbulencji zmniejsza się jej poziomy i pionowy zasięg. Nie wdając się w teorie ruchów turbulencyjnych należy stwierdzić, że wyniki teoretycznych i doświadczalnych badań ruchów w atmosferze doprowadziły do modelu pionowego profilu wiatru, także w warstwach powietrza bliskich powierzchni czynnej, który został przedstawiony w tym artykule.

WPLYW WZNIESIEŃ TERENOWYCH NA KIERUNEK WIATRU

Rozpatrywano dotychczas prostopadle uderzenia wiatru w obiekty terenowe. Obiekty powodują jednak zmianę kierunku ruchu, a przy większych nachyleniach „ściany” obiektu powstają zawirowania wskutek silnej turbulencji. W krótkim przeglądzie cech pionowego profilu ruchu powietrza można przytoczyć wyliczone w metrach odległości od obiektu, w których następuje odchylenie do góry od poziomego kierunku ruchu. Odchylenie to jest ściśle zależne od wysokości danej przeszkody dla ruchu powietrza. Do jego wyliczenia można zastosować formułę przytoczoną przez S. Baca i M. Rojka (1999):

$$d = h \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{a}{2} \right)$$

gdzie:

d — odległość pozioma, przy której strugi powietrza zaczynają odchyłać się do góry,

h — wysokość przeszkody,

a — średnie nachylenie przeszkody (dachu, stoku wzniesienia itp.).

Odpowiednie wyliczenia wskazują, że pionowe przeszkody, przyjmujące uderzenia strug powietrza pod kątem 90° nie powodują żadnych odchyień; inaczej mówiąc — pionowe ścianki przyjmują całą siłę uderzenia wiatru. Strome przeszkody terenowe o wysokości 10 m o nachyleniu 40° względem powierzchni poziomej odchylają strugi powietrza w odległości około 28 m przed przeszkodą, a słabo nachylone, pod kątem 5° w odległości około 153 m. Obiekty dwukrotnie wyższe, tj. o wysokości 20 m, nachylone pod takim samym kątem jak w powyższym przykładzie powodują odchylenie w odległości około dwukrotnie większej. Tą prawi-

dłowością można wyjaśnić relatywnie mniejsze zniszczenia przez wiatr niewysokich obiektów terenowych na stokach dowietrznych niż na otwartej płaskiej przestrzeni. Dobry przykład zróżnicowania zniszczenia lasu podczas pojawienia się wiatru fenowego podaje J. Kwiatkowski (1975), który opisał wiatrołomy w Karkonoszach, będące skutkiem silnych zawirowań w ruchach powietrza. Jego artykuł jest bardzo dobrym przykładem opisu reakcji lasu na niezwykle silne ruchy powietrza w zależności od miejsca uderzenia strumieni powietrza. Wyliczenie prawdopodobieństwa miejsc, w których wystąpią szczególnie silne, niszczące ruchy powietrza, zarówno podczas wiatrów związanych z sytuacją meteorologiczną, jak i wiatrów lokalnych, okazuje się niemożliwe.

Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Zakład Klimatologii
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
e-mail: j.trepinska@iphils.uj.edu.pl

LITERATURA

- Bac S., Rojek M., 1999, *Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska*, Wyd. Akad. Roln., Wrocław.
- Jafernik H., Wilczek Z., Ziarko J., 2000, *Meteorologiczna osłona działań lotniczych*, Dom Wyd. Bellona, Warszawa.
- Kędziora A., 1995, *Podstawy agrometeorologii*, PWRiL, Poznań.
- Kopcewicz T., 1959, *Fizyka atmosfery*, t. III, PWN, Warszawa.
- Kożuchowski K., 1998, *Atmosfera klimat ekoklimat*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Kwiatkowski J., 1975, *Rola fenów karkonoskich w gospodarce leśnej Kotliny Jeleniogórskiej*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 162.
- Linacre E., 1992, *Climate Data and Resources*, Routledge, London–New York.
- Linacre E., Hobbs J., 1977, *The Australian Climatic Environment*, John Willey and Sons, Brisbane, New York, Chichester, Toronto.
- Lorenc H., 1996, *Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce*, Materiały badawcze IMGW, ser. Meteorologia 25.
- Sorbjan Z., 2001, *Meteorologia dla każdego*, Wyd. Prószyński i S-ka, Warszawa.

Janina Trepinska

VERTICAL PROFILE OF WIND SPEED AT THE GROUND ELEVATION

Summary

The strong hurricane on November 19, 2004, in the southern part of the Tatra Mts was the inspiration to present the vertical profile of the wind speed problems. The paper reminds the most important connections between an air movement and a surface roughness in term's stability, instability and neutral atmosphere (conditions of stable, unstable

and neutral atmosphere). Two formulas — the logarithmic and the power-law describe the variation of wind speed with the height above the ground. Strong winds and gusts depend on horizontal gradient of air pressure. Wind speed and vertical gradient of it vary with the height above the ground on slopes, walls of buildings, trees and with the shape of the local topography. In practise, the wind load is calculated at the construction of small terrain objects like billboards and notice boards. Values of the wind load are given in Table 1. Figures 1–4 present a differentiation of wind speed and the change of direction of air flux dependence on the height above the ground level.