

## O niewłaściwym zachowaniu podczas burzy – napięcie krokowe

**Streszczenie.** Przedyskutowano wybrane zalecenia dotyczące zachowania się podczas burzy z piorunami, zwracając uwagę na porady błędne, nieracjonalne lub wręcz niebezpieczne. Dokonano szczegółowej analizy zagrożenia napięciem krokowym w pobliżu miejsca uderzenia pioruna. Posłużono się kryterium Dalziela i obwodowym modelem ciała człowieka.

**Abstract.** Selected recommendations for behavior during a lightning storm have been discussed, paying attention to incorrect, irrational or even dangerous advice. A detailed analysis of the step voltage hazard near the lightning strike point has been made. The Dalziel criterion and the circuit model of the human body have been used. (On improper behavior during lightning storm – step voltage).

**Słowa kluczowe:** piorun, prąd, zagrożenie śmiertelne, napięcie krokowe.

**Keywords:** lightning, current, lethal threat, step voltage.

### Wstęp

W każdym sezonie burzowym zdarzają się informacje medialne o porażeniach ludzi przez wyładowania atmosferyczne. Szczególnie tragiczny był w Polsce dzień 22 sierpnia 2019 r., kiedy na Giewoncie w wyniku uderzeń piorunów zginęły 4 osoby, a 157 zostało rannych.

Aktualny stan wiedzy dotyczący natury wyładowań atmosferycznych pozwala na sformułowanie i znormalizowanie zaleceń prowadzących do skutecznej ochrony odgromowej budynków i urządzeń elektrycznych. Równocześnie, zarówno w przekazach medialnych, jak i przekonaniach społecznych funkcjonują różne, nieraz błędne przekonania i stereotypy o zachowaniu się podczas burzy z piorunami. Niektóre z tych stereotypów utrwaliły się na tyle silnie, że są bezrefleksyjnie powtarzane w poradach zamieszczanych na wielu stronach internetowych, czy w zaleceniach firmowych przez różne organizacje techniczne. Większość rozpowszechnianych zaleceń jest merytorycznie poprawna, jednak zdarzają się też takie, które mogą prowadzić do tragedii (jak np. chronienie się w pobliżu słupa czy masztu), albo takie, które podane bez odpowiedniego komentarza mogą tworzyć nieprawdziwe wrażenie, że po zastosowaniu się do nich będziemy w każdej sytuacji bezpieczni (jak porada stania ze złączonymi stopami czy przyjęcia pozycji kucznej). Można odnieść wrażenie, że w powszechnym obiegu chętnie powtarzane i słuchane są niezbyt racjonalne porady stwarzające pozory poprawności, natomiast zalecenia, których przestrzeganie rzeczywiście zapewnia bezpieczeństwo, bywają słuchane niechętnie lub wręcz lekceważone (np. dostosowanie planu wycieczki do prognozy pogody, schronienie się w budynku podczas burzy czy odwołanie imprezy pod gołym niebem).

Celem niniejszego artykułu nie jest sporządzenie kompletnego wykazu zaleceń dotyczących poprawnego zachowania podczas burzy z piorunami, ale raczej wskazanie zaleceń i zachowań szczególnie niewłaściwych, które są nieracjonalne albo mogą doprowadzić do tragedii.

Typowe zalecenia redagowane dla ogółu ludności mają ze zrozumiętych względów charakter popularnonaukowy. Muszą one być poparte wynikami badań, a szczególnie określeniem kryterium, na podstawie którego można stwierdzić, czy w danej sytuacji ludzkie życie jest lub nie jest zagrożone. Odpowiednim kryterium jest maksymalna wartość prądu rażenia o określonym czasie trwania. Kryterium takie jest powszechnie uznawane dla prądu DC i AC, ale pozostaje dyskusyjne w odniesieniu do prądu udarowego (piorunowego). W niektórych publikacjach podawana jest szacunkowa wartość udarowego napięcia krokowego, np. 25 kV, bez analizy czasu trwania rażenia, co należy uznać za nadmierne uproszczenie zagadnienia.

### Oszacowanie niebezpiecznej wartości udaru

Należy podkreślić, że występują znaczne trudności badań i zrozumiała zmienność osobnicza wyników przy określaniu niebezpiecznej wartości udaru. Podstawową trudnością jest oczywisty fakt, że nie można na ludziach wykonywać eksperymentów z drastycznym skutkiem. Dostępne są wyniki badań na małej grupie ludzi, dotyczące głównie wartości progowych odczuwania bólu i progów samouwolnienia. Większość badań była prowadzona na zwierzętach, z użyciem prądu przemiennego o czasie trwania rażenia znacznie większym od czasu obserwowanego dla krótkotrwałych udarów piorunowych. Często cytowane są publikacje Dalziela i Lee [1, 2], w których jako kryterium zagrożenia życia przyjęto pojawienie się migotania komór sercowych. Do oszacowania wartości progowych Dalziel podał wzór

$$(1) \quad I_{\text{RMS}} \approx K/\sqrt{T}$$

gdzie  $I_{\text{RMS}}$  jest graniczną wartością skuteczną prądu (mA),  $T$  – czasem trwania rażenia (s), a  $K$  – współczynnikiem.

Dalziel wykazał również w przybliżeniu liniową zależność  $I_{\text{RMS}}$  od masy ciała. Dla człowieka o masie 50 kg podał współczynnik  $K = 116 \div 185$  [1, 2]. W tym przedziale wartości 0,5% ludzi dorosłych może doznać migotania komór sercowych, a życie 99,5% ludzi jest zagrożone wtedy, gdy  $K > 185$ . Wartość  $K$  mniejsza od 116 jest uważana za bezpieczną.

Dzieci są znacznie mniej odporne na rażenie prądem. Dalziel i Lee podali przykładowy zakres  $K = \sqrt{3}(30 \div 40)$  dla dzieci o masie ciała ok. 18 kg i wzroście ok. 1 m [2].

Stosowalność wzoru (1) została udokumentowana dla przedziału  $8,3 \text{ ms} \leq T \leq 5 \text{ s}$ , jednak w literaturze wzór ten jest ekstrapolowany, głównie w kierunku krótszych czasów. W literaturze polskiej Szpor [3, 4] zaproponował oszacowanie zagrożenia porażeniem ze skutkiem śmiertelnym, przyjmując  $K = 330$ . Wyniki eksperymentów Dalziela i innych badaczy cytował także Wołkowiński [5].

Dla potrzeb niniejszej pracy przyjęto ekstrapolację wzoru (1) zastosowaną do oszacowania zagrożenia piorunowego przez Andrews [6]. Z treści jego publikacji wynika, że założył on  $K = 116$ , a zamiast wartości skutecznej przyjął wartość maksymalną udaru prądowego:

$$(2) \quad I_{\text{max}} \approx 116/\sqrt{T}$$

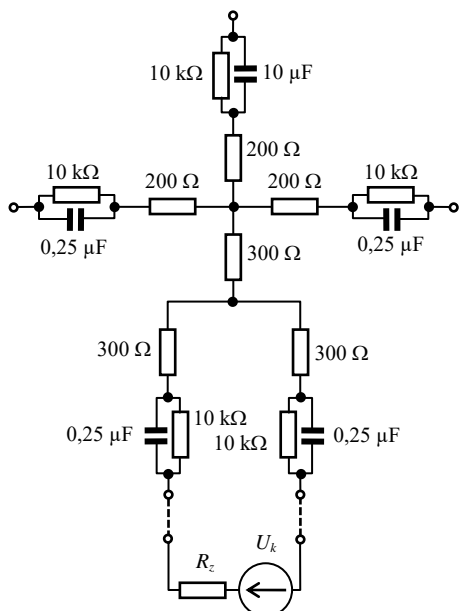
Podkreślimy, że jako wartość bezpieczna określone jest tu natężenie prądu, które nie powoduje powstania migotania komór sercowych, ale nie są brane pod uwagę inne efekty, które mogą doprowadzić do wypadku, jak

reakcja na ból czy niekontrolowane gwałtowne skurcze mięśni.

Przybliżonym odpowiednikiem czasu trwania rażenia  $T$  w odniesieniu do krótkotrwałych udarów piorunowych jest ich czas do półszczytu, którego typowe wartości są rzędu kilkudziesięciu-kilkuset mikrosekund [7, 8].

### Model ciała człowieka

Wiele publikacji dotyczy modelowania impedancji ciała człowieka. Podsumowanie ich w zakresie związanym z tematyką niniejszego artykułu znajduje się m.in. w publikacjach IEC [9-10]. W celu oszacowania zagrożenia powstającego przy porażeniu udarem piorunowym przyjmujemy obwodowy model ciała dorosłego człowieka przedstawiony przez Andrewsa (rys. 1) [6]. Rezystancje  $200\ \Omega$  i  $300\ \Omega$  modelują poszczególne części ciała (głowa, ręce, tułów, nogi), a rezystancje  $10\ k\Omega$  połączone równolegle z pojemnościami modelują parametry skóry głowy, dłoni i stóp. Zakłada się, że po przyłożeniu napięcia przekraczającego  $5\ kV$  pojemności te ulegają przebiciu i stanowią zwarcie. Oszacowaniem rezystancji  $R_z$  pomiędzy stopami a ziemią odniesienia jest  $R_z \approx 3\rho l$ , gdzie  $\rho$  jest rezystywnością gruntu. Na rysunku 1 przedstawiono ten model przy narażeniu napięciem krokowym, które jest uwzględnione za pomocą źródła  $U_k$ .



Rys. 1. Model ciała człowieka do analizy narażenia udarowego [6]

Model ten jest łatwy do zastosowania przy oszacowaniu zagrożenia w postaci napięcia dotykowego, przeskoku iskrowego lub bezpośredniego trafienia pioruna. Natomiast przy ocenie oddziaływania napięcia krokowego uwzględnia się fakt, że pokazane rezystancje są rozłożone w całym ciele, a na pracę mięśnia sercowego ma wpływ mniej niż 30% wartości prądu przepływającego przez nogi [6].

### Chronienie się w sąsiedztwie drzewa lub wysokiego metalowego obiektu

Powszechnie wiadomo, że należy unikać chronienia się przed burzą pod wysokim, odosobnionym drzewem. Podstawowymi zagrożeniami podczas przebywania w pobliżu samotnego drzewa są:

- znaczna powierzchnia zbierania wyładowań, co jest przyczyną większej statystycznie częstości uderzeń pioruna w drzewo niż w otaczające pole;

- napięcie dotykowe;
- przeskoki iskrowe;
- napięcie krokowe (najczęstsza przyczyna porażeń).

Zalecenie, żeby podczas burzy nie dotykać drzewa lub przewodzących elementów konstrukcyjnych jest łatwo zrozumiałe, toteż szczegółowe oszacowanie napięcia dotykowego zostało pominięte.

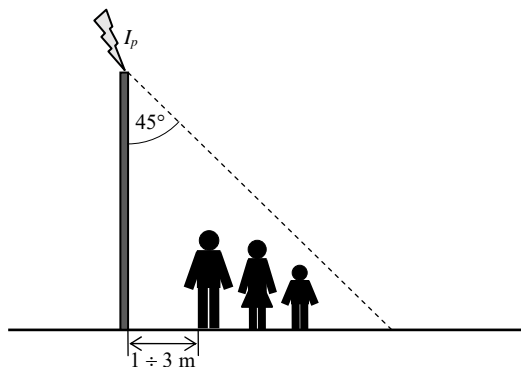
W odczuciu autora, zagrożenie w postaci przeskoków iskrowych jest przez znaczną część społeczeństwa słabo rozumiane, jednak w połączeniu z poradą zachowania bezpiecznej odległości od przewodu, pnia lub gałęzi drzewa, przez które może przepłynąć prąd piorunowy, wydaje się na ogół wystarczająco tłumaczone.

Najmniej zrozumiałe jest zwykle zagrożenie w postaci napięcia krokowego. Przestrzeganie zalecenia stania ze złączonymi stopami sprawia w powszechnym odbiorze złudne wrażenie, że w takiej pozycji człowiek może czuć się bezpiecznie. Z doświadczenia autora wynika, że problem ten bywa niedoceniany także w gronie inżynierów elektryków, toteż poniżej zostanie przedstawione liczbowe oszacowanie zagrożenia w takim wypadku.

W różnych poradnikach, np. w komiksie dla młodzieży [11] można spotkać zalecenie, żeby trzymać się w odległości przynajmniej 10 metrów od drzewa. W bardzo krótkim komiksie dla dzieci [12] zalecane jest zachowanie odległości 5 metrów między sobą. Zalecenia te wydają się racjonalne, nawet bez wykonywania obliczeń szacunkowych, jednakże powstaje wątpliwość, czy dzieci potrafią prawidłowo określić podane odległości, a więc, czy te zalecenia będą stosowane.

Powyższe zalecenie może budzić wątpliwość co do umiejętności oceny odległości przez znaczną część populacji. Natomiast zastosowanie się do zalecenia pokazanego schematycznie na rysunku 2 może być przyczyną tragedii. Zacytowany tu jest ponownie komiks [11], ale takie samo zalecenie jest powtarzane w wielu innych miejscach, w tym na wielu stronach internetowych. Zalecenie chronienia się w pozycji ze złączonymi stopami pod metalowym masztem czy słupem, np. oświetlenia ulicznego, należy stanowczo skrytykować. Tłumaczy się, że taki słup lub maszt tworzy strefę ochronną przed wyładowaniem bezpośrednim, a odległość od 1 do 3 m od słupa podawana jest jako bezpieczna.

Przed przeprowadzeniem analizy ilościowej zauważmy, że bezrefleksyjnie zaleca się stanie na baczność w czasie ulewnego deszczu, może gradu i że na takich rysunkach jest zwykle kilka osób stojących tuż obok siebie. Jeśli są to osoby sobie bliskie, to naturalnym odruchem w chwili zagrożenia będzie trzymanie się za ręce lub przytulanie się, szczególnie z dzieckiem. Spowoduje to znaczne zwiększenie napięcia krokowego. Ponadto pomija się fakt, że jeśli są latarnie uliczne, to w pobliżu są zwykle domy, bramy, zadaszenia, gdzie można szukać schronienia.



Rys. 2. Niebezpieczne zalecenie chronienia się pod słupem

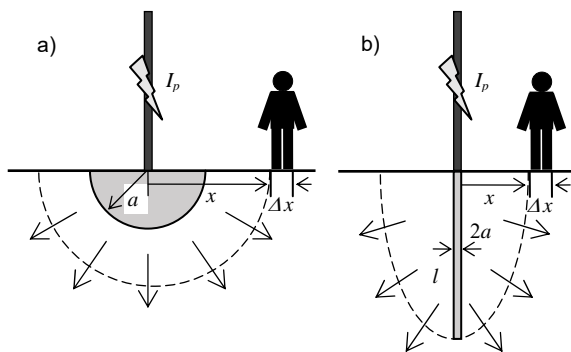
Dziwne, że pomysłodawcy tego zalecenia nie wpadli na to, że stanie pod drzewem również zapewnia ochronę przed wyładowaniem bezpośrednim, a w pobliżu słupa występują wszystkie podstawowe zagrożenia wymienione wyżej dla sytuacji chronienia się pod drzewem. Nadto, jeżeli należy trzymać się w odległości co najmniej 10 m od drzewa, to dla czego ma wystarczyć odległość  $1 \div 3$  m od słupa?

Jeśli tego mało, to użyjmy argumentu drastycznego: dlaczego przebywanie w pobliżu metalowego słupa ma być bezpieczne, a w sąsiedztwie metalowego krzyża na wspomnianym we wstępie Giewoncie – nie? Przecież to są przypadki podobne.

Powyższe komentarze, nawet bez dokonywania obliczeń, powinny budzić poważne wątpliwości co do zalecenia stania pod słupem. Argument ilościowy zostanie dostarczony przez oszacowanie napięcia krokowego.

### Wpływ odległości człowieka od miejsca uderzenia pioruna na napięcie krokowe

Określenie „napięcie krokowe”  $U_k$  może być tu nieco mylące, gdyż z powodu braku innego terminu został on użyty dla człowieka ze złączonymi stopami (rys. 3).



Rys. 3. Człowiek przy uziemiu półkulistym (a) i pionowym (b)

Oszacujmy napięcie  $U_k$  w pobliżu słupa, którego uziemienie ma kształt półkulisty lub pionowy (rys. 3). Uziemienie półkuliste może być uważany m.in. za prosty model uderzenia pioruna bezpośrednio w ziemię. Zakładamy, że grunt jest jednorodny i na powierzchni ziemi nie pojawiają się wyładowania ślizgowe. Rozkład potencjału w odległości  $x$  od środka uziemienia półkulistego wyraża się wzorem [3]:

$$(3) \quad V(x) = \frac{\rho I_p}{2\pi x}, \quad x \geq a$$

gdzie  $I_p$  – prąd pioruna,  $\rho$  – rezystywność gruntu,  $a$  – promień uziemienia. Rozkład potencjału na powierzchni ziemi wokół uziemienia pionowego o długości  $l$  i promieniu  $a$  [3, 13]:

$$(4) \quad V(x) = \frac{\rho I_p}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + x^2} + l}{x}, \quad x \gg a$$

Założmy, że odległość między bocznymi krawędziami złączonych stóp wynosi  $\Delta x = 20$  cm, do uziemienia wpływa prąd piorunowy  $I_p = 31$  kA, rezystywność gruntu wynosi  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ , a długość uziemienia pionowego  $l = 3$  m. Przyjęte tu natężenie prądu  $I_p$  jest medianą wartości maksymalnych krótkotrwałych ujemnych uderzeń piorunowych [7, 8].

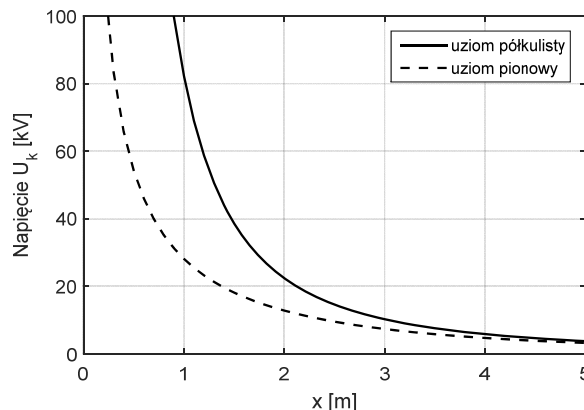
Napięcie krokowe wynosi:

$$(5) \quad U_k(x) = V(x) - V(x + \Delta x)$$

Wykresy zmian  $U_k(x)$ , otrzymane na podstawie wzorów (3)-(5), przedstawiono na rysunku 4. Widać, że bardzo

blisko uziemiu pionowego zagrożenie porażeniem jest wyraźnie mniejsze niż w pobliżu uziemienia półkulistego. Przy okazji – takie wyniki wskazują na celowość stosowania uziemień pionowych.

Przy zwiększaniu odległości od uziemienia wykresy napięcia  $U_k(x)$  zbliżają się do siebie.



Rys. 4. Zmiany napięcia  $U_k(x)$  w pobliżu uziemienia półkulistego i pionowego dla  $I_p = 31$  kA,  $\rho = 100 \Omega\text{m}$  i  $\Delta x = 20$  cm

Obliczone wartości napięcia  $U_k$  dla wybranych  $x$  zebrano w górnej części Tabeli 1. Wykorzystano je następnie do oszacowania prądu  $I_n$  płynącego przez nogi modelu człowieka przedstawionego na rysunku 1. Pojemności w modelach skóry stóp zostaną przebite, gdyż napięcie  $U_k$  znacznie przekracza 5 kV [6]. Rezystancja  $R_z = 3\rho/2 = 150 \Omega$ , a suma tej rezystancji i obu rezystancji reprezentujących nogi wynosi  $750 \Omega$ . Prąd przepływający przez nogi obliczamy jako  $I_n = U_k / 750 \Omega$ . Oszacowaniem wartości maksymalnej prądu przepływającego przez serce jest  $0,3I_n$  [6], co stanowi ostatnią kolumnę Tabeli 1.

Założmy, że czas do półszczytu uderzenia piorunowego wynosi  $T = 50 \mu\text{s}$ , co mieści się w zakresie typowych wartości dla uderzeń krótkotrwałych [7, 8]. Z zależności (2) wynika, że dla takiego czasu trwania rażenia największa wartość prądu, przy której nie zachodzi efekt migotania komórek sercowych u dorosłego człowieka, wynosi  $I_{\text{max}} = 16,4$  A. Taką samą wartość uzyskano w [6]. W odległości 1 m od uziemienia półkulistego wartość ta jest przekroczona dwukrotnie ( $0,3I_n = 32,8$  A), a wynik 11,2 A otrzymany w tej odległości od uziemienia pionowego można uważać za nieznacznie mniejszy od wartości granicznej 16,4 A, która przy innych danych może być łatwo przekroczona.

W odległości 3 m od uziemienia wyznaczone wartości  $0,3I_n$  są kilkakrotnie mniejsze od przyjętej granicy bezpieczeństwa, jednakże nie oznacza to, że jest to odległość bezpieczna dla dowolnego uderzenia, gdyż zakresy rzeczywistych wartości napięć i prądów są szerokie.

Rozważmy drugi przykład dla tych samych uziemień, ale dla prądu piorunowego o wartości maksymalnej  $I_p = 100$  kA i czasie do półszczytu  $T = 200 \mu\text{s}$ . Te parametry występują w przyrodzie rzadziej, ale mieszczą się w zakresach podanych w [7, 8] oraz w normie PN-EN 62305-1 [14].

Tabela 1. Obliczone wartości napięcia  $U_k$  i prądu  $I_n$

Uziemienie	$x$ [m]	$U_k$ [kV]	$I_n$ [A]	$0,3 I_n$ [A]
$I_p = 31$ kA, $T = 50 \mu\text{s}$ ; $I_{\text{max}} = 16,4$ A				
półkulisty	1	82	109	32,8
	3	10,3	13,7	4,1
pionowy	1	28	37,3	11,2
	3	7,4	9,9	3
$I_p = 100$ kA, $T = 200 \mu\text{s}$ ; $I_{\text{max}} = 8,2$ A				
półkulisty	3	33,2	44,3	13,3
	3	23,8	31,7	9,5

Z wzoru (2) otrzymujemy wartość graniczną  $I_{\max} = 8,2$  A. Odpowiednie wyniki, tylko dla  $x = 3$  m, przedstawiono w dolnej części Tabeli 1. Widać, że wartość 8,2 A jest przekroczona w ostatniej kolumnie dla obu uziomów.

Stąd wniosek, że stanie nawet ze złączonymi stopami w odległości rzędu pojedynczych metrów od miejsca uderzenia pioruna nie chroni przed zagrożeniem życia w wyniku niebezpiecznego napięcia krokowego.

Zagrożenie w postaci napięcia krokowego będzie znacznie zwiększone, jeśli pod słupem będzie stać więcej osób i będą trzymać się za ręce lub przytulać w chwili zagrożenia.

### Unikanie innych nieracjonalnych zaleceń

Poradą, która budzi poważne wątpliwości autora, jest zalecenie pozostawania w pozycji kucznej ze złączonymi stopami. Trzeba tu wspomnieć, że Becerra i Cooray [15] wykazali za pomocą obliczeń numerycznych, że człowiek w tej pozycji jest rzeczywiście mniej narażony na rozwój lidera oddolnego niż w pozycji stojącej lub z ręką wyciągniętą do góry. Jednakże oznacza to jedynie zmniejszenie zagrożenia, a nie jego eliminację.

Poważne wątpliwości budzi to, jak długo człowiek jest w stanie wytrwać w pozycji kucznej w zimnym deszczu, może w gradzie, a ponadto jak wytłumaczyć dziecku konieczność długotrwałego kucania w takich warunkach, w odległości co najmniej 5 metrów od rodzica. Każdy może łatwo sam sprawdzić na sucho, jak długo wytrwa w takiej pozycji i czy ten czas jest wystarczający na przeczekaanie burzy trwającej np. godzinę. Ponadto, jeżeli usłyszymy grzmot, to znaczy, że piorun już uderzył, a kucnięcie powinno nastąpić przedtem, jeśli ma zmniejszyć niebezpieczeństwo.

Zalecenie kucnięcia jest zwykle uzupełniane tekstem o znalezieniu na płaskim polu jakiegoś zagłębienia terenu bez refleksji, że w takim zagłębieniu może być woda, co znacząco zwiększy zagrożenie porażeniem.

Trzeba poddać stanowczej krytyce tego rodzaju porady, w których na otwartej przestrzeni ma zawsze znaleźć się jakieś niebezpieczne samotne drzewo i jakiś bezpieczny dołek, a tymczasem należałoby podkreślić prostą i ważną poradę, że kiedy zauważymy oznaki zbliżającej się burzy, to zwykle mamy wystarczająco dużo czasu, szacunkowo 20÷30 minut, żeby nie lekceważyć niebezpieczeństwa i opuścić otwartą przestrzeń, chroniąc się do jakiegoś budynku, samochodu czy choćby do lasu (nie podmokłego), gdzie duża ilość drzew znacząco zmniejsza prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w pobliżu turysty zaskoczonego przez burzę. To samo dotyczy turystów w górach i żeglarzy. Chmury burzowe nad rozległym otwartym terenem czy jeziorem widać z dużej odległości. Przebywanie podczas burzy na wodzie, przy brzegu czy pod mostem, jest niebezpieczne. Żeglarze powinni bezwzględnie schronić się wówczas na brzegu. Ponadto, planując daleką wycieczkę górską czy żeglarską przygodę, należy zapoznać się z prognozą pogody, a jeśli ktoś chce odbyć wycieczkę nawet mimo niezbyt korzystnej prognozy, to można na szczegółowych mapach turystycznych znaleźć zwykle kilka miejsc na potencjalne schronienie i odpowiednio zaplanować trasę marszu.

### Pierwsza pomoc

Niniejszy akapit jest wolnym przekładem fragmentu z [10]. „Przyjmuje się, że ponad 70% porażień ludzi przez pioruny nie kończy się śmiercią. Odpowiednie wiarygodne dane dotyczące zwierząt domowych nie są znane. Występuje znaczne zróżnicowanie liczby ofiar ze względu na różne środowiska, odmienne działania ludzi oraz wiedzę na temat pierwszej pomocy i jakości opieki medycznej.”

Zatem, bardzo ważna dla uratowania życia osoby rażonej piorunem jest pierwsza pomoc, prowadzona w sposób identyczny jak dla osób porażonych prądem elektrycznym.

### Wnioski

Wykazano, że wśród zaleceń dotyczących zachowania się podczas burzy z piorunami znajdują się porady błędne, nieracjonalne czy wręcz niebezpieczne.

Udowodniono w szczególności, że przyjęcie pozycji ze złączonymi stopami, choć ma to racjonalne podstawy, nie eliminuje zagrożenia w postaci niebezpiecznego napięcia krokowego blisko miejsca uderzenia pioruna.

Jako naczelną zasadę postępowania podczas burzy należy wymieniwić hasło z broszury US National Weather Service: „Słyszysz huk gromu, schowaj się w domu!”

Nie omówiono wszystkich znanych zaleceń. Wydaje się pożądanym, żeby zestaw ogólnych porad oraz zasad pierwszej pomocy, zaakceptowanych przez grono specjalistów, stanowił aneks do norm dotyczących ochrony odgromowej. Przykładem może być amerykańska norma NFPA 780 [16].

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr WZ/WE-IA/1/2020 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

**Autor:** dr hab. inż. Karol Aniserowicz, prof. uczelni, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: [k.aniserowicz@pb.edu.pl](mailto:k.aniserowicz@pb.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Dalziel C. F., Lee W. R., Reevaluation of lethal electric currents. *IEEE Trans Ind. Appl.* 4 (1968), 467–476
- [2] Dalziel C. F., Lee W. R., Lethal electric currents, *IEEE Spectrum* 6 (1969), 44–50
- [3] Szpor S., Samuła J., *Ochrona odgromowa*, tom 1, *Wiadomości podstawowe*, WNT, Warszawa (1983)
- [4] Szpor S., *Ochrona odgromowa*, tom 3, *Piorunochrony*, WNT, Warszawa (1978)
- [5] Wołkowiński K., *Uziemienia urządzeń elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa (1967)
- [6] Andrews C., Electrical aspects of lightning strike to humans, in: Cooray V. (Ed.), *The lightning flash*, IEEE Press, London (2003), 548–564
- [7] Working Group C4.407, Lightning parameters for engineering applications, *CIGRE report 549*, (2013)
- [8] Aniserowicz K., Modele matematyczne piorunowych uderzeń prądowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2020), nr 12, 134–139
- [9] IEC 60479, *Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects* (2018), *Part 2: Special aspects* (2019)
- [10] IEC TR 60479-4:2020, *Effects of current on human beings and livestock - Part 4: Effects of lightning strokes* (2020)
- [11] *Donner-Wetter! Wissen für Kids zu Donner & Blitz*, komiks, OVE VDE (2016)
- [12] *Ziggie and Zack: Your lightning heroes*, komiks, COST action P18, The physics of lightning flash and its effects, (2011)
- [13] Kosztaluk R., Wańkowicz L., Analiza właściwości uziemień. Część I. Metoda powierzchni elipsoidalnych, *IX Sympozjum EUI 2003 Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Zakopane, 9-11.10.2003, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, 1 (2003), 142-145
- [14] PN-EN 62305-1, *Ochrona odgromowa – Część 1: Zasady ogólne* (2011)
- [15] Becerra M., Cooray V., On the interaction of lightning upward connecting positive leaders with humans, *IEEE Trans Electromagn. Compat.*, 51 (4) (2009), 1001–1008
- [16] NFPA 780, *Standard for the installation of lightning protection systems, Annex M – Guide for personal safety from lightning* (2020)