

Prędkość propagacji fali dźwiękowej w pniach olszy czarnej *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. w zależności od temperatury

Temperature dependence of sound wave propagation in as a diagnostic tools for healthy and rotten black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) tree trunks

Michał Orzechowski¹, Piotr Budniak²✉

¹ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Leśny, Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159, bud 34, 02–787 Warszawa; ² Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

Tel. +48227150650; e-mail: P.Budniak@ibles.waw.pl

Abstract. The aim of this study was to determine how thermal conditions affect the speed of sound wave propagation, in trunks of living alder *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. trees. This method in practiced when diagnosing the presence of internal decay in standing trees. Field work was carried out four times at different temperatures (+13°C, +3°C, -7°C and -16°C) using an Impulse Hammer. There was a significant correlation between the thermal conditions and the speed of sound wave propagation. Therefore, temperature must be taken into account to correctly diagnose tree health and timber quality.

Key words: alder, speed of sound wave propagation, temperature, internal decay, impulse hammer

1. Wstęp

Racjonalna gospodarka leśna, obok inwentaryzowanych cyklicznie informacji dotyczących ilościowego stanu zasobów leśnych (wymiarów i liczba drzew, zapas, zasobność, przyrost), wymaga określenia cech jakościowych mówiących m.in. o zdrowotności i stabilności drzewostanów oraz jakości technicznej, w tym o występowaniu zgnilizny wewnętrznej. Ocena stanu zdrowotnego ma znaczenie w przypadku pojedynczych, wartościowych przyrodniczo lub historycznie drzew (np. pomnikowych), ale również w przypadku całych drzewostanów. Wśród cech rozpoznawanych w trakcie oceny stanu zdrowotnego stosunkowo najtrudniejsze jest diagnozowanie występowania zgnilizny pni i systemu korzeniowego. Identyfikację obecności zgnilizny wewnętrznej pni wykonuje się w sposób inwazyjny (np. poprzez nawiercanie świdrem przyrostowym lub wiertłem rezystografu) lub nieinwazyjny (z ang. Nondestructive Evaluation NDE). Prowadzi się próby wykorzysta-

tania dźwięku, ultradźwięków, promieniowania rentgenowskiego itp. Jednym z prostszych, dostępnych na rynku przyrządów przeznaczonych do wykonywania pomiarów nieinwazyjnych jest młotek impulsowy, wykorzystujący pomiar prędkości propagacji fali dźwiękowej w drewnie. Na podstawie otrzymanego wyniku (prędkości w m/s) stwierdza się występowanie zgnilizny wewnątrz pnia drzewa i szacuje jej rozmiar w przekroju poprzecznym. Wybrane do badań urządzenie jest na tyle proste i stosunkowo niedrogi, że istnieje szansa na szersze wykorzystanie nie tylko w zabiegach arborystycznych, lecz również w praktyce leśnej. Niestety brak jest pełnego rozpoznania skali prędkości propagacji fali dźwiękowej w pniach drzew różnych gatunków, o różnym stopniu rozkładu i w różnych warunkach środowiskowych oraz warunkach zewnętrznych pomiaru.

Akustyczne właściwości drewna zależą od wielu czynników natury wewnętrznej (twardości drewna, układu włókien, pęknięć, wilgotności) oraz zewnętrznej (pory roku i związanej z nią aktywności drzewa, tem-

peratury). Badania wskazują na wpływ temperatury na prędkość propagacji fali dźwiękowej w zakresie dodatnim (Sandoz et al. 2000). Inne badania, dotyczące zmian właściwości mechanicznych drewna w temperaturach ujemnych, przeprowadził Silins i inni (2000). W warunkach termicznych poniżej 0°C, autorzy zaobserwowali istotny wzrost wartości dwóch wskaźników: modułu sprężystości (E), zwanego modułem Younga, i modułu wytrzymałości (ang. modulus of rupture MOR). Zmrożone pnie wykazały bowiem zwiększenie modułu sprężystości o 38% oraz modułu wytrzymałości o 52%, względem pomiaru wiosennego. Dowiedziono, że temperatura istotnie wpływa na właściwości mechaniczne drewna (Silins et al. 2000), co może przekładać się również na właściwości przewodzenia fali dźwiękowej.

Inni badacze zauważają, że rozbieżności wyników pomiarów właściwości mechanicznych mogą wynikać także z różnej zawartości wody w drewnie i jej stanu skupienia, w zależności od pory roku. Schmidt i Pomeroy (1990) wykazali, że przy spadku temperatury drewna od 0°C do -12°C siła potrzebna, by wygiąć pień, wzrosła czterokrotnie. Jako przyczynę wzrostu sztywności drewna w temperaturach ujemnych autorzy wskazali formowanie się lodu z wody zalegającej w świetle naczyń. Zmiana właściwości mechanicznych drewna została zaobserwowana również w trakcie poddawania suchej tarcicy wpływowi temperatur dodatnich i ujemnych. Koch (1996) zaobserwował, że największy wzrost wytrzymałości tarcicy nastąpił przy temperaturze poniżej 0°C i wilgotności na poziomie lub powyżej punktu wysycenia włókien. Należy jednak zauważyć, iż żywe drzewo oraz tarcica to ośrodki różniące się między innymi wilgotnością, a porównywanie ich może okazać się błędne.

Celem niniejszej pracy jest określenie zależności pomiędzy warunkami termicznymi otoczenia a wynikami pomiaru prędkości propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy czarnej w okresie występowania niskich temperatur dodatnich i temperatur ujemnych, czyli typowych dla okresu zwiększonego pozyskania drewna w lasach.

2. Metodyka

Metoda pomiaru

Istotą metody pomiaru prędkości propagacji fali dźwiękowej młotkiem impulsowym jest ocena kondycji zdrowotnej drzewa, dokonana na podstawie wyniku prędkości propagacji fali dźwiękowej przepływającej przez drewno, w kierunku prostopadłym do rdzenia. Pomiar zachodzi pomiędzy sondą generującą falę dźwię-

kową (w wyniku uderzenia młotkiem) a sondą odbierającą, wbity w drewno po przeciwległej stronie pnia. Obie sondy (przewodowo sprzężone z rejestratorem) są zagłębione pod korę, w warstwy drewna, dlatego też niewielkie skaleczenia pnia powstałe w wyniku pomiarów zabezpiecza się preparatem grzybobójczym (tzw. maścią sadowniczą) dla zachowania nieinwazyjności metody. Na podstawie odległości dzielącej obie sondy (wartość ręcznie wprowadzana do urządzenia na podstawie pomiaru wykonanego średnicomierzem) oraz czasu przepływu fali, urządzenie wylicza prędkość, będącą podstawą diagnozy, czy wewnątrz pnia występuję zgnilizna.

Wyrażenie wyniku w postaci prędkości (m/s) ma na celu umożliwienie interpretacji i porównania danych, niezależnie od grubości badanych drzew. Podstawę diagnozowania występowania zgnilizny wewnętrznej na podstawie pomiaru prędkości propagacji fali dźwiękowej stanowi czas propagacji i jego zmiany w zależności od kondycji zdrowotnej pnia drzewa. Dźwięk porusza się w najbardziej sztywnym ośrodku, obiegając strefę zgnilizny miękkiej. Występowanie zgnilizny wewnętrznej w centralnej części przekroju poprzecznego pnia skutkuje spadkiem sprężystości drewna strefy przyrdzeniowej, co doprowadza do wydłużenia się drogi (a zarazem i czasu) jaką musi pokonać przechodząca przez drewno fala dźwiękowa (Sandoz et al. 2000). W efekcie wynik prędkości podawany przez urządzenie jest istotnie niższy niż ten spodziewany dla drzewa zdrowego.

Jak podaje Wang i inni (2004) pojedynczy pomiar prędkości propagacji fali dźwiękowej jest w stanie wykazać obecność zgnilizny wewnętrznej pod warunkiem zajmowania przez nią co najmniej 20% powierzchni przekroju poprzecznego pnia. Prawidłowe wykrycie zgnilizny jest wysoce prawdopodobne, wówczas gdy czas propagacji fali dźwiękowej jest dłuższy już o 10% (lub więcej) od wartości oczekiwanej dla drzewa zdrowego (Wang et al. 2004). Identyczne wyniki uzyskali inni autorzy (Hailey et al. 1987; Matheck et al. 1993; Yamamoto et al. 1998), wskazując na podobny rejestrowalny poziom zmian prędkości dźwięku (spadek o ok. 10–15%) jako efekt rozkładu drewna, powodowanego przez grzyby pasożytnicze. Z niepublikowanych badań Orzechowskiego (świerk, olcha) wynika, że przy zgniliznie już około 20% przekroju poprzecznego pnia zlokalizowanej w części przyrdzeniowej drzewa, uzyskuje się nawet o 40% niższe wyniki prędkości propagacji fali dźwiękowej, niż ma to miejsce w przypadku drzew zdrowych.

Według Mańkowskiego i Górskiego (2004) możliwość praktycznego używania opisaną powyżej metody, uwarunkowana jest stosowaniem jej wyłącznie dla drzew odpowiednio grubych (dystans pomiędzy sondami powinien wynosić minimalnie 20 cm). W przy-

padku mniejszych odległości dzielących obie sondy pomiarowe, autorzy uzyskiwali silnie zawyżone odczyty. Ponadto energia wzbudzenia fali dźwiękowej w drzewie kilkunastocentymetrowym potrafi spowodować wypadnięcie przeciwległej sondy pomiarowej (Budniak 2012).

Pomiar prędkości propagacji fali dźwiękowej wymagał zmierzenia odległości pomiędzy sondami. W urządzeniu pomiarowym wybrano opcję drewna twardego (Hard). Sygnał dźwiękowy wysyłany był poprzez wykonanie pojedynczego uderzenia młotkiem (zintegrowanym z urządzeniem pomiarowym) w wierzchnią część sondy. Pomiary wykonywano w każdym z ustawień aż do otrzymania trzech kolejnych, zbliżonych do siebie wyników (różnica 1–2%). Po ich akceptacji urządzenie podawało średnią z trzech ostatnich pomiarów, którą zapisywano jako ostateczny rezultat pomiaru.

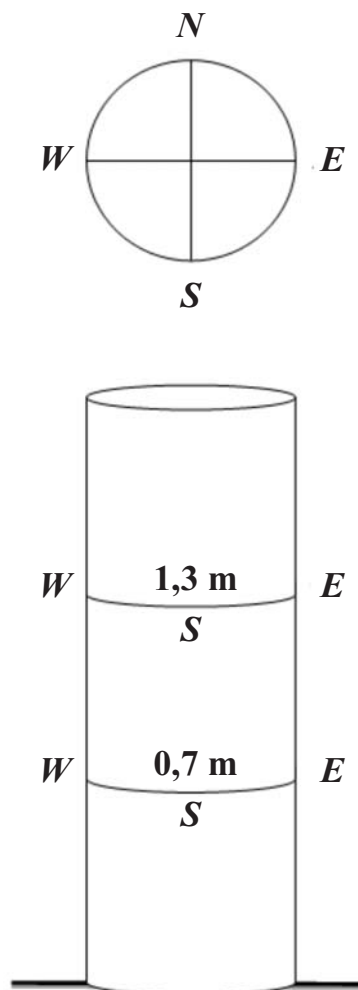
Do określania temperatury wykorzystywano termometr wyskalowany w skali termometrycznej Celsjusza, a do kontroli warunków w dniach poprzedzających pomiar – numeryczny model prognozy pogody UM w siatce 4 km (<http://meteo.pl/>). Wpływ temperatury powietrza na temperaturę wnętrza pnia występuje prawdopodobnie z pewnym opóźnieniem (wymiana ciepła między pniem a powietrzem wymaga czasu). W związku z tym pomiar przeprowadzony dla danej wartości temperatury powietrza musiał być poprzedzony 4–5 dniami o warunkach zbliżonych do dnia pomiaru. Badania wykonywano o jednakowej porze dnia – przed południem, dla wyeliminowania odmiennego rozgrzewania wierzchnich warstw drzewa przez promieniowanie słoneczne. Nie analizowano temperatury wnętrza pnia, jako cechy nieprzydatnej w praktyce stosowania metody w założeniu nieinwazyjnej.

Weryfikacja występowania zgnilizny wewnętrznej została przeprowadzona za pomocą świdra przyrostowego jedynie dla dwóch drzew o skrajnych wynikach pomiaru prędkości.

W celu wykazania wpływu warunków termicznych na prędkość propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy czarnej, posłużono się wnioskowaniem statystycznym mającym na celu falsyfikację hipotezy zerowej, że warunki termiczne nie mają wpływu na wyniki pomiaru prędkości propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych olszy w kierunku promieniowym. Zastosowane metody statystyczne zostały przywołane w opisach wyników badań.

Obiekt badań

Jako obiekt badań wybrana została grupa dziesięciu drzew olszy czarnej, rosnących w niewielkim drzewostanie (ok. 0,5 ha), na siedlisku lasu wilgotnego. Pod względem administracyjnym teren ten położony jest w zasięgu dzielnicy Wilanów miasta stołecznego Warsza-



Rycina 1. Schemat usytuowania punktów pomiarowych na pniach olszy. Sondy umiejscowione były zgodnie z kierunkami geograficznymi.

Figure 1. Diagram of the location of the measurement points on the trunks of alder. The probes were located according to the geographic directions.

wa, w zasięgu Nadleśnictwa Chojnów (RDLP Warszawa). Współrzędne powierzchni badawczej to N 52°8'16.24" i E 21°8'14.01" (wg Geoportal.pl). Wybrano żywe drzewa o zróżnicowanej grubości (od ok. 20 do prawie 50 cm pierśnicy), co pozwala przypuszczać, iż wewnątrz ich pni występuje zgnilizna wewnętrzna. Wybrane drzewa nie stanowią próby całego drzewostanu, lecz jedynie łatwą do odnalezienia grupę próbną dla testowania stosowanej metody. Prace terenowe zostały przeprowadzone w dniach 21.10.2011, 27.01., 02.02. i 17.05.2012.

Każdemu drzewu nadany został numer utrwalony na korze, w celu identyfikacji przy wykonywaniu kolejnych powtórzeń pomiarów. Na każdym drzewie wyznaczono punkty pomiarowe, zlokalizowane w kierunkach

północ, południe, wschód, zachód. Płaszczyzny pomiaru rozlokowano na dwóch wysokościach: 0,7 m oraz 1,3 m (ryc. 1). Dało to łącznie po 4 pomiary na 1 drzewo oraz 40 na całą badaną populację w jednym powtórzeniu. W sumie wykonano 160 pomiarów. Drzewo nr 6 wykluczono z analiz ze względu na duże błędy pomiarowe wynikające z jego niewielkiej grubości (pierśnica 12 cm) i wybijania przeciwniejszej sondy z pnia.

3. Wyniki

Na podstawie statystyki opisowej (tab. 1) można zauważyć, że wyniki otrzymane przy temperaturach ujemnych różnią się nie tylko od wyników uzyskanych przy temperaturach dodatnich, ale są także bardziej zróżnicowane. W sytuacji spadku temperatury poniżej 0°C, wszystkie wyliczone statystyki wykazują istotny wzrost. Przy temperaturze -7°C średnia prędkość dźwięku była o ok. 12% wyższa od prędkości dźwięku przy temperaturach dodatnich oraz o ok. 22% niższa od prędkości dźwięku przy temperaturze -16°C. Średnia prędkość propagacji fali dźwiękowej zmierzona przy najniższej temperaturze -16°C okazała się aż o ok. 44% wyższa niż prędkość propagacji fali dźwiękowej przy temperaturach dodatnich. Prędkość fali dźwiękowej zmierzona w temperaturach 3°C i 13°C była bardzo podobna, a różnica statystycznie nieistotna.

Wyliczone statystyki opisowe każą przypuszczać, iż warunki termiczne istotnie wpływają na prędkość propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy, jednak by mieć pewność co do zachodzenia tego typu prawidłowości, przeprowadzono test istotności różnic.

Ze względu na wykonywanie kolejnych pomiarów na tych samych drzewach (i w tych samych miejscach oraz kierunkach na pniu), ale przy różnej temperaturze, mamy do czynienia ze zbiorem 4 prób zależnych. Do opracowania wyników zastosowano zatem jednoczynnikową analizę wariancji (Bruchwald 1997).

Zbadano normalność rozkładu. Przyjęty poziom istotności w przeprowadzonych analizach statystycznych wynosił 0,05. Na podstawie prawdopodobieństw testowych p stwierdzono brak podstaw do odrzucenia założenia normalności rozkładu dla temperatur 13°C, 3°C oraz -16°C. W przypadku temperatury -7°C test Shapiro-Wilka wykazał $p < 0,05$, zatem należy przyjąć, iż rozkład zmiennej zależnej dla całego zbioru danych nie jest normalny. Wobec tego faktu zastosowano w wykorzystanym oprogramowaniu statystycznym test nieparametryczny Friedmana (tab. 2).

Wartość p (same zera oznaczają, iż wynik p jest tak mały, że nie mieści się w skali stosowanej w programie) otrzymana w teście Friedmana (tab. 2) była niższa niż przyjęty poziom istotności 0,05. Istnieją więc podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej mówiącej, że warunki termicznie nie wpływają istotnie na prędkość propagacji

Tabela 1. Statystyka opisowa dla zbioru prędkości przepływu fali dźwiękowej przez drewno olszy, dla poszczególnych temperatur

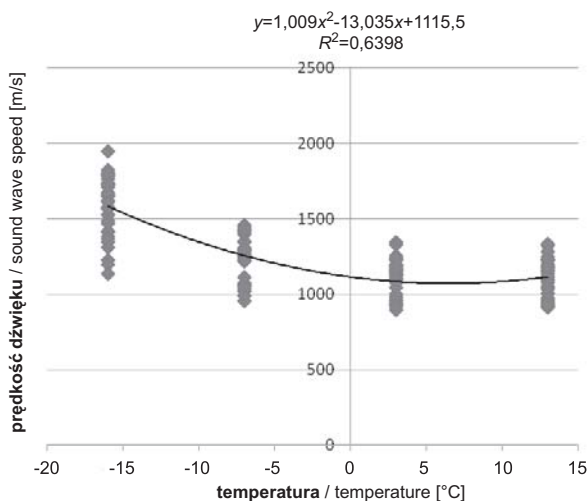
Table 1. Descriptive statistics for speed of sound wave propagation through the alder wood at different temperatures

Zmienna Variable	Statystyki opisowe Descriptive statistic							
	N ważnych N important	średnia average	mediana median	minimum minimum	maksimum maximum	wariancja variance	odch. std std dev.	wsp. zmn. var. coef.
13°C	36	1111	1129	914	1332	15220	123	11,1%
3°C	36	1103	1130	895	1344	14514	120	10,9%
-7°C	36	1238	1258	954	1460	20494	143	11,6%
-16°C	36	1589	1635	1139	1945	38801	197	12,4%

Tabela 2. Wynik testu ANOVA Friedmana

Table 2. The results of Friedman' ANOVA test

ANOVA Friedmana i współczynnik zgodności Kendalla / Friedman's ANOVA and Kendall's coefficient of concordance				
Chi kwad. ANOVA ($N = 36, df 3$) = 89,96667 $p = 0,00000$ / Chi2 ANOVA ($N = 36, df 3$) = 89,96667 $p = 0,00000$				
Współczynnik zgodności = ,83302 r śred. rang = ,82825 / Coefficient of concordance = ,83302 r rank average = ,82825				
Zmienna Variable	Średnia ranga Rank average	Suma rang Rank sum	Średnia Average	Odch. std Std. dev.
13°C	1,6	59	1111	123
3°C	1,4	52	1103	120
-7°C	3,0	107	1238	143
-16°C	3,9	142	1589	197



Rycina 2. Zależność pomiędzy prędkością propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy a temperaturą powietrza (regresja wielomianowa)

Figure 2. The relationship between the speed of sound wave propagation in the trunks of living alder trees and the air temperature (polynomial regression)

fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy czarnej i przyjęcia hipotezy alternatywnej.

W celu wyprowadzenia równania funkcji opisującej zależność prędkości propagacji fali dźwiękowej od warunków termicznych (ryc. 2), dane zostały przeliczone w programie Microsoft Excel 2007.

Współczynnik determinacji $R^2=0,6398$ (współczynnik korelacji ok. 0,8) sugeruje, że opisana zależność jest silna. Należy zaznaczyć, iż wyniki korelacji prawdopodobnie byłyby jeszcze wyższe, gdyby pomiary wykonano dla większej liczby powtórzeń (np. w odstopnieniu temperatur co 5°C).

Analizując wynik testu ANOVA Friedmana (tab. 2) oraz zależność pomiędzy prędkością propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy a temperaturą powietrza (ryc. 2) można wnioskować, iż istotność wpływu temperatury na prędkość fali dźwiękowej warunkowana jest ujemnymi wartościami tego parametru w skali Celsjusza.

4. Dyskusja

Przeprowadzone badania nie weryfikowały kondycji zdrowotnej drzew próbnych a jedynie testowały różnice w wynikach pomiarów młotkiem impulsowym w różnych porach roku i w różnych temperaturach otoczenia. Dlatego nie zdecydowano się na ścinę bądź wiercenie wszystkich drzew w celu określenia występowania zgnilizny. Cztery odwierty próbne (po dwa na dwóch drze-

wach – jednym zdiagnozowanym jako zdrowe, a drugim jak chore) jedynie sprawdzały poprawność funkcjonowania urządzenia, którego skuteczność potwierdziły wcześniejsze prace (Orłowski 2010, Cybulski 2012, Grabowski 2012) wykonane w Katedrze Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW w Warszawie pod opieką Orzechowskiego.

Otrzymany rezultat badań wykazał, że temperatura istotnie wpływa na wynik prędkości propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy czarnej. Wielu badaczy wskazuje właśnie na temperatury ujemne jako przyczynę zmian właściwości mechanicznych drewna (a te przekładają się na właściwości akustyczne). Zimą zamarzanie wody zawartej w drewnie powoduje jego usztywnienie oraz wzrost sprężystości. Warto przeanalizować zatem wzór na prędkość fali dźwiękowej:

$$C^2 = E/\rho \text{ (m/s)}$$

gdzie:

C – prędkość w m/s,

E – moduł sprężystości w $\text{kg/s}^2\text{m}$,

ρ – gęstość ośrodka w kg/m^3 ,

zatem:

$$(d/t)^2 = E/\rho \text{ (m/s)}$$

gdzie:

d – grubość pnia w m,

t – czas przepływu fali w s.

Analizując powyższą zależność, można wnioskować, iż czas przepływu fali (grubość pnia jest stałą dla wszystkich 4 powtórzeń pomiarów w różnych temperaturach) zależy od modułu sprężystości i gęstości. Badania przeprowadzone przez Silinsa i in. (2000) udowodniły, że w temperaturach ujemnych moduł sprężystości jest tym większy im niższa jest temperatura. Z drugiej strony zamarzanie wody i tworzenie się lodu wewnątrz pnia objawia się spadkiem gęstości samej wody, choć nie można tego powiedzieć o zawierającym wodę pniu. Tkanka drzewna reaguje na spadek temperatury skurczeniem się, przez co wzrasta gęstość pnia. W efekcie (porównując powyższe spostrzeżenia z zamieszczonym wzorem) czas przepływu fali dźwiękowej przez drewno w temperaturach ujemnych ulega skróceniu, czyli zwiększa się prędkość propagacji fali dźwiękowej.

Wyliczone równanie ilustrujące zależność prędkości fali dźwiękowej od temperatury, może być stosowane w praktyce pod warunkiem wyznaczenia poprawki ostatecznie rozdzielającej wartości pomiarów dla drzew bez zgnilizny i ze zgnilizną w danych warunkach termicznych. Jednak istnieją sytuacje, w których pomiar badanej cechy jest mylący. Jak pokazują wyniki pomiaru w przypadku drzewa nr 10 (z wyraźną zgnilizną) i nr 1 (zdrowego), przy temperaturze -16°C różnica prędkości propagacji fali dźwiękowej w pniu grubych drzew zdrowych i chorych może ulec zatarciu (tab. 3).

Tabela 3. Wyniki pomiarów dla drzew nr 1 i nr 10

Table 3. The results for the trees No 1 and 10

Nr drzewa Tree number	Nr pomiaru Measurement number	Średnica pomiędzy sondami [cm] DBH between probes [cm]	Prędkość fali dźwiękowej [m/s], przy temperaturze: Speed of sound waves [m/s], at temperature:	
			3°C	-16°C
1	W107N	47 cm	1344	1797
	W107W	40 cm	1328	1730
	W113N	38 cm	1158	1525
	W113W	33 cm	1186	1622
10	W1007N	42 cm	927	1735
	W1007W	42 cm	918	1796
	W1013N	37 cm	1103	1608
	W1013W	36 cm	1178	1670

Zdiagnozowanie drzewa jako chore na podstawie pomiaru przy temperaturze dodatniej (prędkość dźwięku <1000 m/s w obu kierunkach na wysokości 0,7 m wskazuje na niewątpliwe występowanie zgnilizny) różni się od diagnozy przy temperaturze -16°C, gdyż prędkość propagacji fali dźwiękowej jest wtedy typowa dla drzewa zdrowego. Przyczyny takiego stanu rzeczy można upatrywać w powstaniu mostków lodowych tworzonych przez zamarzającą w pniu wodę, w którą obfituje zgniła część pnia. W efekcie wystąpienia takich mostków przewodnictwo akustyczne drzew ze zgnilizną może być takie samo jak przewodnictwo dźwiękowe drzew zdrowych. Oczywiście musi nastąpić zbieżność kierunku mostka z kierunkiem pomiaru. Problem ten wymaga jednak głębszego zbadania poprzez wyznaczenie odpowiedniej próby w sprzyjających warunkach niskich temperatur ujemnych.

5. Wnioski

1. Warunki termiczne istotnie wpływają na prędkość propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy czarnej. Wartość temperatury powietrza (zwłaszcza ujemnej) powinna być zatem uwzględniona przed dokonaniem diagnozy występowania zgnilizny wewnętrznej za pomocą opisywanej metody.

2. Zmiana warunków termicznych w przedziale od 3°C do 13°C nie wpływa istotnie na zmianę otrzymanych wyników. Wykonywanie pomiarów w niskich temperaturach ujemnych (-16°C) jest niezalecane ze względu na:

- możliwość zafałszowania oceny dla drzew ze zgnilizną wewnętrzną dzięki powstającym mostkom lodowym wewnątrz zgnilizny,
- brak możliwości wyznaczenia skutecznej poprawki dla wyprowadzonej funkcji (opisującej zależność prędkości dźwięku od temperatury), wobec powyższego stwierdzenia.

– utrudnioną obsługę urządzenia.

3. Przy temperaturze ujemnej (-7°C – 0°C) możliwe jest stawianie diagnozy o obecności zgnilizny wewnętrznej. Prędkość propagacji fali dźwiękowej w pniu drzew potencjalnie chorych była mniejsza niż w pniu drzew zdrowych w przypadku pomiaru zarówno przy temperaturach dodatnich, jak i ujemnych.

4. Metoda diagnozowania zgnilizny wewnętrznej z wykorzystaniem młotka impulsowego nie nadaje się do badania drzew cienkich (o grubości do 20 cm) ze względu na ryzyko dużego błędu pomiarowego.

Podziękowania

Na niniejsze badania nie otrzymano żadnego dofinansowania.

Literatura

- Bruchwald A. 1997. Statystyka matematyczna dla leśników. Warszawa, Wydawnictwo SGGW. ISBN 9788300030712.
- Budniak P. 2012. Wpływ warunków termicznych na prędkość propagacji fali dźwiękowej w pniach żywych drzew olszy czarnej. Warszawa, Maszynopis w Katedrze Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW.
- Cybulski B. 2012. Ocena deprecjacji drewna żywych drzew olszy czarnej (*Alnus glutinosa*) w Leśnictwie Grudusk Nadleśnictwo Przasnysz. Warszawa, Maszynopis w Katedrze Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW.
- Grabowski T. 2012. Niedestrykcyjna ocena pionowego zasięgu zgnilizny wewnętrznej świerka. Warszawa, Maszynopis w Katedrze Urządzenia Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW.
- Hailey J., Morris P. 1987. Application of scanning and imaging technology to assess decay and wood quality in logs and standing trees. Vancouver BC, Forintek Canada Corporation.

- Koch P. 1996. Lodgepole pine in North America. Madison, Forest Products Society. ISBN 0935018786.
- Mańkowski P., Górski J. 2004. Analysis of measuring length on results of local measurement of ultrasound propagation speed in wood. *Annals of Warsaw Agricultural University Forestry and Wood Technology*, 55: 342-345.
- Mattheck C., Bethge K. 1993. Detection of decay in trees with the Metriguard Stress Wave Timer. *Journal of Arboriculture*, 19 (6): 374-378.
- Orłowski M. 2010. Zastosowanie metody akustycznej w badaniu zgnilizny wewnętrznej modrzewia na uprawie plantacyjnej LZD Rogów. Warszawa, Maszynopis w Katedrze Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW.
- Sandoz J., Benoit Y., Demay L. 2000. Standing tree quality assessment using Acousto Ultrasonic. Proceedings of International Symposium on Plant Health in Urban Horticulture: 172-179. Braunschweig, May, 22.-24. 2000.
- Schmidt R.A., Pomeroy J.W. 1990. Bending of a conifer branch at subfreezing temperatures: implications for snow interception. *Canadian Journal of Forest Research*, 20 (8): 1250-1253.
- Silins U., Lieffers V. J., Bach L. 2000. The effect of temperature on mechanical properties of standing lodgepole pine trees. *Trees*, 14 (8): 424-428.
- Wang X., Divos F., Pilon C., Brashaw B. K., Ross R. J., Pellerin R. F. 2004. Assessment of Decay in Standing Timber Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools. Madison, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report.
- Yamamoto K., Sulaiman O., Hashim R. 1998. Nondestructive detection of heart rot of Acacia mangium trees in Malaysia. *Forest Products Journal*, 48 (3): 83-86.

