

Daniel KOPEĆ, Bronisław ŻÓŁTOGÓRSKI*

PODWODNE NAGŁAŚNIANIE BASENÓW

Podwodne nagłaśnianie basenów jest nowym zagadnieniem w projektowaniu systemów nagłośnieniowych. W pracy przedstawiono historię badań nad słyszeniem przez człowieka zanurzonego pod wodą. Zamieszczono wyniki pomiarów czasu pogłosu basenu jak i rozkładów przestrzennych pola dźwiękowego. Wyprowadzono zmodyfikowany wzór Sabine'a oraz przedyskutowano problem projektowania systemu nagłośnieniowego basenu przez wykorzystanie procedur stosowanych w projektowaniu nagłaśniania pomieszczeń.

1. HISTORIA BADAŃ SŁYSZENIA POD WODĄ

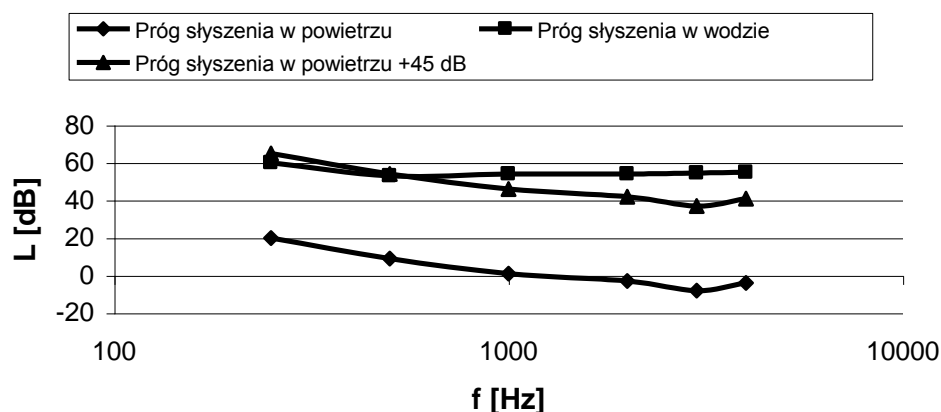
Bodźcem do rozpoczęcia badań dotyczących słyszenia podwodnego było wynalezienie w 1943 roku akwalungu przez Jacques'a Yves'a Cousteau i inżyniera E. Gagnana. Pierwszym badanym zagadnieniem było określenie zdolności do lokalizacji źródeł dźwięku i możliwości komunikacji dźwiękowej w środowisku wodnym. W roku 1947 L. J. Sivian opublikował artykuł „On Hearing In Water vs. Hearing in Air”, [3]. Była to pierwsza praca, w której podjęto próbę wyjaśnienia zjawiska słyszenia pod wodą. Podczas badań uwzględniono takie czynniki jak:

- obniżona czułość błony bębenkowej wywołana nie zrównoważonym ciśnieniem hydrostatycznym,
- obecność pęcherzyków powietrza w kanale usznym,
- maskujący efekt szumu otoczenia i hałasu wywołanego przez aparat oddechowy nurka,
- wpływ ciała zanurzonego słuchacza na pole akustyczne w wodzie,
- przewodnictwo kostne.

Po analizie wszystkich uwarunkowań dr Sivian doszedł do wniosku, że poziom słyszenia przez kanał uszny może być bardzo zbliżony do poziomu uzyskanego poprzez przewodnictwo kostne i będzie wyższy od poziomu słyszenia w powietrzu o 45 do 55 dB plus dodatkowe przesunięcie, ze względu na efekt nie zrównoważenia ciśnienia hydrostatycznego [3].

*Politechnika Wrocławska, Instytut Telekomunikacji i Akustyki

Pomiaru progu słyszenia pod wodą podjął się P.M. Hamilton, [1]. Wyniki badań opublikował w artykule „Underwater Hearing Threshold”. Eksperyment przeprowadzono w jeziorze w miejscu, w którym wpływ fali odbitej był jak najmniejszy. Zanurzono jednocześnie dwie osoby tak, aby ich głowy znajdowały się 4 m pod powierzchnią wody i w odległości 1 m od źródła dźwięku. Sygnał pomiarowy zmniejszano kolejno o 1 dB, aż do momentu, w którym nurek zasygnalizował, że nie słyszy już sygnału.



Rys. 1. Zmierzony próg słyszenia w wodzie według P.M. Hamiltona, [1]

Fig. 1. Underwater hearing threshold by P. M. Hamilton, [1]

Ponieważ podczas większości badań ich uczestnicy zgłaszali kłopoty z lokalizacją źródła dźwięku, próby zbadania tego zjawiska podjęli się Norman, Phelps i Wightman, [2]. Wyniki tych prac zostały umieszczone w pracy „Some Observations on Underwater Hearing”. W celu zmierzenia dokładności, z jaką ludzie są w stanie określić kierunek źródła dźwięku, autorzy eksperymentu skonstruowali siedem podwodnych źródeł dźwięku. Zanurzono je na głębokość 1,2 m i rozmieszczono równomiernie, co 30° względem głowy słuchacza. Eksperyment przeprowadzono dla czterech przypadków: goła głowa, kaptur z otworami na uszy, przepaska na uszach, tylko jedno ucho zasłonięte.

Tab. 1. Dokładność w lokalizacji źródła dźwięku, [2].

Tab. 1. Localization accuracy of sound source, [2].

Warunki	Średni procent poprawnych odpowiedzi	Średnia kątowa odchyłka	Ilość słuchaczy	Liczba pomiarów
Goła głowa	42	21	2	350
Kaptur z otworami na uszy	40	25	2	350
Przepaska na uszy	27	40	2	210

Jedno ucho zakryte	16	49	1	70
Przypadek	14	69	-	-

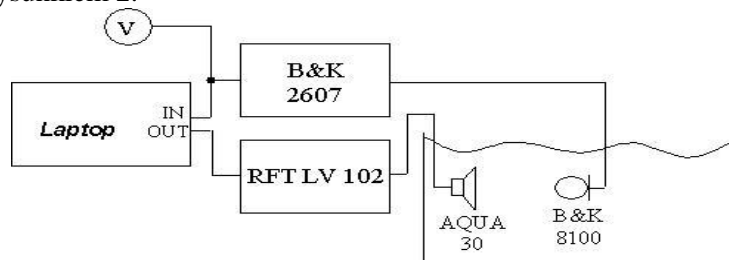
W lokalizacji dźwięków pod wodą przewodnictwo kanałem usznym nie wydaje się mieć dużego znaczenia. Tabela 1 pokazuje, że najgorsze zdolności lokalizacyjne nurkowie wykazywali dla przypadku zasłonięcia uszu przepaską.

Badań dotyczących progu słyszenia pod wodą było znacznie więcej, np. [4]. Powyżej zostały przedstawione tylko wybrane z nich. W latach 50-tych i 60-tych prowadzone były intensywne prace, finansowane głównie przez marynarkę wojenną USA, których celem było zbadanie możliwości wzajemnego porozumiewania się nurków przy wykorzystaniu specjalnie skonstruowanych masek umożliwiających mówienie. Wiele z tych prac nie zostało opublikowanych a badania zakończono gdyż do porozumiewania się wykorzystane zostały systemy ultradźwiękowe z przemian częstotliwości. Również wiele kwestii nie jest zbadanych do dzisiaj np. relacja między słyszeniem kostnym i powietrznym. Doświadczalnie stwierdzono, że obecność poduszki powietrznej w kanale usznym w niezauważalnym stopniu zmienia percypowany poziom. Dokładność wyznaczenia krzywych progowych jest bardzo niewielka a krzywe jednakowej głośności nie były wyznaczane.

2. TECHNIKA PODWODNEGO NAGŁAŚNIANIA BASENÓW

2.1. POMIAR CZASU POGŁOSU POD WODĄ

Próbując odnaleźć analogie pomiędzy nagłaśnianiem podwodnym a powietrznym pomieszczeń należy zacząć od analizy podstawowego (przynajmniej w przypadku instalacji powietrznych) parametru, jakim jest czas pogłosu. Ponieważ nie badano wcześniej tego parametru w odniesieniu do środowiska wodnego, autor tej publikacji zdecydował się zmierzyć go metodą bezpośrednią. Pomiary dokonywane były na basenie o wymiarach 25x16,5x1,7m. Stanowisko pomiarowe zostało skonstruowane zgodnie z rysunkiem 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do pomiaru czasu pogłosu basenu
 Fig. 2. The set-up for measurements of reverberation time of swimming pool

Sygnałem pomiarowym był szum biały generowany przez oprogramowanie zainstalowane na komputerze wykorzystywanym przy pomiarach. Oprócz opcji generowania sygnału oprogramowanie to umożliwiało bieżącą rejestrację wartości, które pojawiały się na wejściu karty muzycznej komputera. Dzięki temu możliwy był ciągły zapis wartości poziomów ciśnienia akustycznego panującego w basenie. Pomiaru dokonano w kilku losowo wybranych punktach basenu. Generowano szum o czasie trwania 5 sekund i następnie przerywano go na taki sam odstęp czasu. Cała procedura była powtarzana 4-5 razy w każdym punkcie basenu. Wartości poziomów ciśnienia akustycznego panującego w basenie podczas emisji szumu jak i ciszy były nieprzerwanie zapisywane w plikach tekstowych komputera. Oprócz tych wartości program zapisywał czas trwania całego pomiaru i interwały czasowe, z jakimi zapamiętywał poziomy sygnał. Umożliwiło to bezpośrednio odczytanie czasu, w którym nastąpił spadek poziomu ciśnienia akustycznego o 30 dB. Mając tę wartość wiadome było ile czasu trwał spadek poziomu o 60 dB. W przypadku basenu, na którym dokonywano pomiarów wartość czasu pogłosu wyniosła 0,4 s.

2.2. WYPROWADZENIE WZORU NA CZAS POGŁOSU POD WODĄ

Autor powyższej pracy podjął próbę wyprowadzenia zależności określającej czas pogłosu pod wodą. Kolejność postępowania i tok rozumowania były następujące.

Ponieważ czas pogłosu jest to czas potrzebny do zmniejszenia energii o 60 dB, zapisuje się to w poniższy sposób

$$\frac{\omega_0}{\omega_t} = 10^6$$

Następnie korzystając z zależności obowiązujących w akustyce architektonicznej można zapisać:

$$\frac{\omega_t}{\omega_0} = 10^{-6} = e^{\frac{c * S * \ln(1-a) * T}{4 * V}}$$

gdzie: ω_t – energia sygnału przed zanikiem

ω_0 – energia sygnału po zaniku o 60 dB

c - prędkość dźwięku w danym ośrodku

S – powierzchnia [m^2]

α – współczynnik pochłaniania danej powierzchni

T - czas trwania zaniku energii o 60 dB [s]

V – objętość pomieszczenia badanego [m^3]

$$\frac{-6 \ln 10}{T} = \frac{c * S * \ln(1-a)}{4 * V}$$

$$T = -\frac{24 * \ln 10 * V}{c * S * \ln(1 - a)}$$

Należy teraz podstawić prędkość dźwięku w wodzie do powyższej zależności.

$$T_{60w} = -\frac{0,036V}{S * \ln(1 - a)} \quad (1)$$

Jeśli założy się, że pochłanianie dźwięku pod wodą przez powierzchnie ścian jest niewielkie (wynika to ze znacznie mniejszej różnicy gęstości ośrodków), to prawdziwa jest zależność:

$$\ln(1 - a) \approx -a.$$

Ostateczna zależność na czas pogłosu pod wodą będzie miała postać:

$$T_{60w} = \frac{0,036V}{A} \quad (2)$$

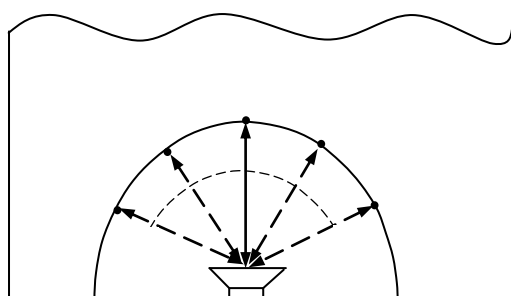
2.3. ANALIZA CZASU POGŁOSU BASENU

We wzorze na czas pogłosu pod wodą (podobnie jak i dla zależności obowiązującej dla powietrza), występują takie wielkości jak objętość i chłonność ścian basenu. O ile współczynniki pochłaniania materiałów dla powietrza są ściśle określone i powszechnie dostępne o tyle wartości tego parametru dla środowiska wodnego są całkowicie nieznanne. Dlatego znając czas pogłosu w wodzie dla basenu o znanych wymiarach i wzór określający ten parametr, możliwe jest wyliczenie wartości współczynnika pochłaniania ścian basenu. Jednak należy pamiętać o tym, iż jedną z powierzchni basenu jest tafla wody (granica pomiędzy wodą a powietrzem). Tę wartość można jednak bez problemu obliczyć, korzystając z parametrów fizycznych wody i powietrza. Do dalszych obliczeń założono wartość współczynnika pochłaniania tafli wody jako 0,001. Dokonano również przeliczeń zakładając niższe wartości tego parametru, lecz obniżanie jego wartości nie wpływało znacząco na pozostałe wielkości. Można założyć, iż podana wyżej wartość jest poprawną. Mając ten parametr wyznaczono współczynnik pochłaniania pozostałych powierzchni basenu. Ściany i podłoga wspomnianego basenu wyłożone były płytkami ceramicznymi, ułożonymi na warstwie betonu. Po wykonaniu obliczeń wartość współczynnika pochłaniania dźwięku dla tych powierzchni wyniosła 0,11. Nie należy jednak zapominać, że wszelkie te rozważania dotyczą pobudzenia powierzchni szumem szerokopasmowym. Tak, więc podana wyżej wartość nie dotyczy jakiejś konkretnej częstotliwości jak to ma z reguły miejsce, lecz wszystkich częstotliwości objętych pasmem szumu pomiarowego i jest wartością uśrednioną.

Warto wspomnieć, że podczas pomiarów zauważone było przenikanie niskich częstotliwości do konstrukcji basenu. Objawiało się to dosyć silnymi drganiami podłogi otaczającej basen. Dźwięki o niskich częstotliwościach są pochłaniane w znacznie większym stopniu niż tony średnich i wysokich częstotliwościach i występuje niespodziewane zwiększone tłumienie na małych częstotliwościach.

2.4. BADANIE ROZKŁADU POZIOMU CIŚNIENIA AKUSTYCZNEGO W BASENIE

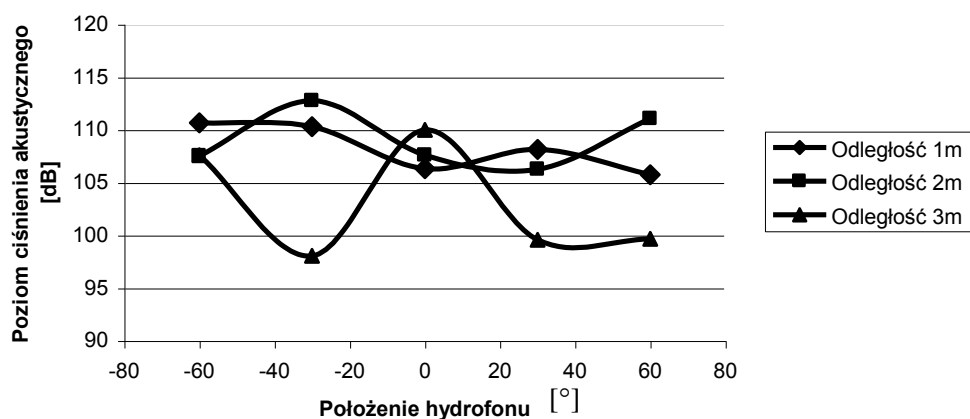
W celu rozpoznania właściwości pola dźwiękowego w basenie wykonano pomiary rozkładu kąтового i w zależności od odległości. Schemat pomiarowy był zgodny z rys.2. Badano wartość poziomu w odległościach od głośnika wynoszących kolejno 1, 2, 3 m w pięciu punktach pomiarowych rozłożonych równomiernie na półokręgu o promieniu równym odległości, o jaką był oddalony hydrofon od głośnika. Ilustruje to rysunek 3. Pomiarów dokonano przy ustawieniu głośnika na środku basenu oraz w jego rogu. Częstotliwościami pomiarowymi były 125, 250, 500 Hz i



Rys.3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych.
Fig. 3. Deployment of measurement points

1, 2, 4, 8 kHz. Możliwe dzięki temu było poznanie zjawisk zachodzących przy emitowaniu dźwięku w basenie. Rysunek 4 obrazuje rozkład pola dla tonu o częstotliwości 4 kHz.

1, 2, 4, 8 kHz. Możliwe dzięki temu było poznanie zjawisk zachodzących przy emitowaniu dźwięku w basenie. Rysunek 4 obrazuje rozkład pola dla tonu o częstotliwości 4 kHz.



Rys. 4. Rozkład pola akustycznego w basenie dla częstotliwości 4 kHz

Fig. 4. Sound field distribution at 4 kHz

Podobnie wyglądały charakterystyki dla innych częstotliwości. Nierównomierność czasem zanikała do zera, czasem przyjmowała wartość 15 dB. Duże nierównomiernośći zauważalne są szczególnie w większej odległości od źródła dźwięku. Z pewnością wpływ na to miały odbicia od ścian basenu. Na podstawie wartości poziomów ciśnienia dla wszystkich punktów pomiarowych ustalono, że wraz ze wzrostem odległości spadek poziomu w wodzie wynosił 5dB wraz na podwojeniu odległości. Fakt mniejszych strat geometrycznych w wodzie w porównaniu z powietrzem może być związany z powstawaniem wielu pozornych źródeł na skutek odbić od ścian basenu (szczególnie przy ustawieniu głośnika w rogu basenu) i granicy woda powietrze.

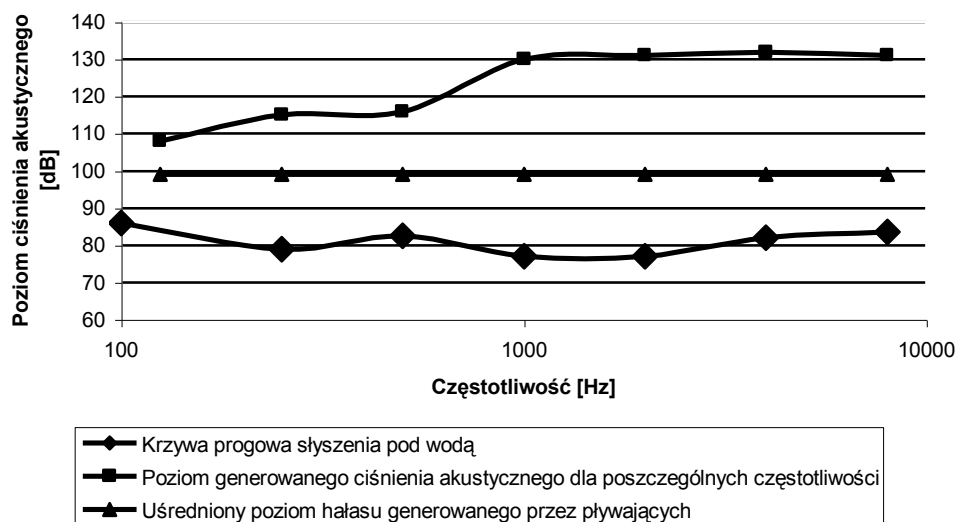
Poziom tła akustycznego ma decydujący wpływ na zrozumienie mowy i wrażenie przy słuchaniu muzyki. Głównym źródłem hałasu są pływające osoby. Zmierzono poziom tego hałasu w zależności od ich liczby w wodzie. Niestety pomiar został dokonany dla maksymalnie 3 osób pływających w jednym czasie w basenie. Jednak już przy tak małej liczbie osób można zauważyć stopniowy wzrost poziomu wraz ze wzrostem liczby osób przebywających w wodzie. Jedna osoba generuje hałas większy od poziomu słyszenia człowieka pod wodą o ok. 17 dB, (por. Rys. 5).

2.5. PODSUMOWANIE

Wyprowadzoną teoretycznie zależność określającą czas pogłosu pod wodą przy czym zmodyfikowane wyrażenie należałoby porównać z wynikami pomiarów różnymi metodami i w różnych obiektach. Ponieważ pomiarów czasu pogłosu dokonywano z użyciem szumu białego szerokopasmowego, dla takiego sygnału został wyliczony współczynnik pochłaniania powierzchni basenu. Należy zwrócić uwagę, że dochodzą tu także takie czynniki jak przenoszenie niskich częstotliwości przez konstrukcję basenu, a w rezultacie ich pochłanianie. Zbadaniu zjawiska pochłaniania dźwięków o różnych częstotliwościach należy poświęcić wiele dodatkowych badań. Dopiero, gdy zbadane w pełni zostanie zjawisko pochłaniania dźwięków pod wodą przez ściany basenu oraz zweryfikowana zostanie prawidłowość podanego wzoru na czas pogłosu pod wodą, możliwe będzie dokładne określenie pozostałych parametrów używanych w projektowaniu systemów nagłośnieniowych, takich jak wskaźnik zrozumiałości mowy, spadek poziomu ciśnienia akustycznego, czy niezbędna moc elektryczna potrzebna do wytworzenia zakładanego poziomu ciśnienia akustycznego. Na chwilę obecną można stwierdzić jednoznacznie, że potrzebna jest dosyć spora liczba urządzeń głośnikowych do nagłośnienia jednego basenu, aby zapewnić należyty poziom szczególnie niskich częstotliwości.

Aby zapewnić należytą jakość dźwięku generowanego przez system elektroakustyczny musi być zachowany spory odstęp poziomu emitowanego sygnału ponad poziom zakłóceń i hałasów panujących w nagłaśnianym obiekcie. Prawidłowość ta obowiązuje również dla nagłośnienia podwodnego. Na rysunku 5 pokazano wartość poziomu generowanego przez pływających w basenie na tle krzywej progowej słysze-

nia pod wodą i charakterystyki częstotliwościowej sygnału wytwarzanego przez głośnik podwodny.



Rys. 5. Porównanie poziomu hałasu generowanego przez pływających z poziomem generowanego ciśnienia akustycznego przez głośnik i krzywą progową słyszenia

Fig. 5. Comparison of frequency characteristics of noise produced by swimmers, by underwater loudspeaker and the hearing threshold curve

SUMMARY

Underwater sound system design. The history of researches on underwater hearing is briefly recalled. The results of measurements of the reverberation time of the 25 m swimming pool are presented and the modified Sabine equation for water environment is derived. The distribution of sound at 1m under the water surface produced by single sound source are shown as well as noise level of swimmers is given. Application of design methods used for sound systems in rooms for design of underwater sound systems is discussed.

LITERATURA

- [1] HAMILTON P. M., *Underwater Hearing Threshold*. (1979) J. Acoustic. Soc. Am., No. 29, 461-463
- [2] NORMAN D. A., PHELPS R., WIGHTMAN F. *Some Observations on Underwater Hearing*. (1970) J. Acoust. Soc. Am., No 50, 544-548
- [3] SIVIAN L. J. *On Hearing in Water vs. Hearing in Air*. (1947) J. Acoustic. Soc. Am., No. 19, 461-463
- [4] DOBRUCKI A., ŻÓŁTOGÓRSKI B., Wyniki badań nad słyszeniem pod wodą. (1998) Materiały XLV Otwartego Seminarium z Akustyki, Poznań-Kiekrz