

**Przemysław Pozański, Mieczysław Grabowski**

**mgr inż. Przemysław Pozański**  
OBR Centrum Techniki Morskiej S.A.,  
ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia  
e-mail: Przemyslaw.Pozanski@ctm.gdynia.pl

**dr inż. Mieczysław Grabowski**  
OBR Centrum Techniki Morskiej S.A.,  
ul. Dickmana 62, 81-109 Gdynia  
e-mail: Mieczyslaw.Grabowski@ctm.gdynia.pl

**ODDZIAŁYWANIE FAŁ CIŚNIENIOWYCH NA NURKÓW W ASPEKcie  
SYSTEMÓW DETEKcji I PRZECIWDZIAŁANIA ZAGROŻENIOM  
PODWODNYM**

*W artykule przedstawiono analizę oddziaływania fal ciśnieniowych na organizm nurka w zależności od właściwości generowanych zaburzeń. W szczególności analiza obejmuje wpływ takich parametrów jak poziom ciśnienia akustycznego, pasmo częstotliwości generowanych fal oraz czas oddziaływania. Są to główne czynniki determinujące bezpieczeństwo prowadzenia działań podwodnych przy jednoczesnej pracy systemów hydroakustycznych. Wymienione parametry fal ciśnieniowych decydują również o ich skuteczności pod kątem przeciwdziałania zagrożeniom ze strony nurków.*

*Omówiono również metodę badań źródeł fal ciśnieniowych w kontekście oddziaływania na nurków. Przedstawiono wyniki badań własnych dotyczących możliwości wykorzystania w tym celu przetworników hydroakustycznych oraz urządzeń pneumatycznych. Prace obejmowały badania i analizę skuteczności proponowanych rozwiązań w zależności od materiałów stosowanych do produkcji skafandrów nurkowych.*

*Badania prowadzono w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2010 – 2012 jako projekt rozwojowy nr 0R0009811 pt.: "Detekcja i przeciwdziałanie terrorystycznym zagrożeniom ze strony nurków".*

*Przemysław Pozański jest laureatem Stypendium Naukowego im. Antoniego Dębskiego przyznanego w roku 2011 przez Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej.*

**Słowa kluczowe:** detekcja, fale ciśnieniowe, oddziaływanie.

## ANALIZA WPŁYWU FAL CIŚNIENIOWYCH NA NURKÓW W FUNKCJI PARAMETRÓW ICH ŹRÓDEŁ

Na podstawie wyników prowadzonych na świecie prac i badań [1], [3], [7], [8] stwierdzono, że skutki oddziaływania fal ciśnieniowych na organizm człowieka zależą od trzech podstawowych parametrów, charakteryzujących te zaburzenia: poziom ciśnienia akustycznego (SPL), pasmo częstotliwości (BW) oraz czas trwania zaburzenia ( $T_D$ ). Skuteczność oddziaływania oraz możliwe efekty zależą również od wyposażenia nurka, a konkretnie od rodzaju i zestawienia skafandra. Punktem wyjściowym prac prowadzonych nad tym zagadnieniem są analizy zjawisk zachodzących w powietrzu, odnoszących się głównie do zastosowania fal akustycznych, jako czynnika obezwładniającego.

Podstawowy podział zaburzeń ciśnieniowych w aspekcie oddziaływania na organizm ludzki polega na określeniu ich pasma częstotliwości i uporządkowaniu możliwych skutków. Na tej podstawie można wyróżnić następujące zakresy:

- infradźwięki – częstotliwości poniżej pasma słyszalnego ( $< 20$  Hz); sygnały o poziomie od 110 do 130 dB<sup>1</sup> mogą skutkować bólem jelit i ciężkimi mdłościami;
- niskie częstotliwości pasma słyszalnego ( $< 200$  Hz) – przy kilkuminutowej ekspozycji dla poziomów ciśnienia w granicach od 90 do 120 dB obserwowano wysoki poziom rozdrażnienia, rozproszenia i irytacji; dla poziomów od 140 do 150 dB możliwe są silne urazy i uszkodzenia tkanek, a powyżej 170 dB obrażenia są zbliżone jak w przypadku fali uderzeniowej po wybuchu; w tym zakresie występują częstotliwości rezonansowe organów wewnętrznych człowieka; silne pobudzenie do drgań w rezonansie może skutkować ich skurczami lub krwotokami, a w rezultacie trwałym urazem lub śmiercią;
- pasmo słyszalne ( $< 20$  kHz) – w tym zakresie częstotliwości, oprócz trwałych lub tymczasowych uszkodzeń słuchu, można zaobserwować rezonanse jam powietrznych w organizmie skutkujących również podrażnieniami nerwów;
- wysokie częstotliwości pasma słyszalnego i ultradźwięki (5 kHz do 30 kHz) – skutkiem ekspozycji na zaburzenia z tego zakresu częstotliwości mogą być podwyższenie temperatury ciała, poparzenia tkanek, odwodnienie;
- ultradźwięki ( $> 30$  kHz) i krótkie impulsy – możliwe urazy i zmiany patologiczne tkanek.

W porównaniu z innymi technologiami, stosowanymi jako czynnik obezwładniający w systemach broni NLW<sup>2</sup>, w ośrodku wodnym zaburzenia w postaci fal ciśnieniowych charakteryzują korzystne warunki propagacji. To między innymi dzięki tej właściwości systemy hydroakustyczne są bardzo szeroko stosowane w aplikacjach systemów monitorowania i zobrazowania sytuacji podwodnej<sup>3</sup>.

Dotychczasowe badania związane z oddziaływaniem fal ciśnieniowych na organizm nurka dotyczyły przede wszystkim bezpieczeństwa prowadzenia prac podwodnych.

---

<sup>1</sup> Tak jak w przypadku innych zagadnień związanych z akustyką poziom wyrażany w dB dotyczy odniesienia do wartości referencyjnej  $p_{ref}$ . W zależności od przyjętego ośrodka  $p_{ref} = 20 \mu Pa$  (powietrze) lub  $p_{ref} = 1 \mu Pa$  (woda). W tym przypadku rozpatrywane są zaburzenia rozchodzące się w powietrzu.

<sup>2</sup> NLW – ang. Non-Lethal Weapon – broń obezwładniająca, nieśmiertelna

<sup>3</sup> Monitorowanie środowiska, badanie struktur dennych, detekcja nurków i pojazdów podwodnych, poszukiwanie min, łączność podwodna, itp.

## **THE EFFECT OF PRESSURE WAVES ON DIVERS IN THE FUNCTION OF THEIR SOURCE PARAMETERS - ANALYSIS**

The research conducted worldwide [1], [3], [7], [8] has proved that the effects of pressure waves on the human body are dependent on three basic parameters which are characteristic to these duration: sound pressure level (SPL), bandwidth (BW) and disturbance time (TD). The efficiency of interaction and possible effects are also dependent on the diver's equipment, type and arrangement of the diving suit in particular. The starting point for the solution to this issue is the analysis of aerial phenomena which pertain to acoustic waves viewed as an incapacitating factor.

A basic division of pressure disturbances with respect to an interaction with the human body consists in determining their bandwidth and ordering the possible results. On that ground one can distinguish three types of frequency:

- infrasounds - below the low-frequency limit of human hearing (< 20 Hz); sound level of 110-130 dB<sup>1</sup> may result in intestine pains and intense nausea.
- low frequencies of the hearing range (< 200 Hz) - a several-minute exposure to pressure levels between 90 and 120 dB was observed to cause extreme exasperation, distraction and irritation; for levels between 140 and 150 dB - injuries and damage to the tissue were a possibility, whereas over 170 dB the injuries were reminiscent of those inflicted after an explosion shock wave; resonance frequencies of human internal organs occur in this very range; a strong inducement of resonant vibrating may result in the organ contraction, hemorrhage and, in the long run, may cause a permanent injury or death;
- hearing range (< 20 kHz) - except for permanent or temporary hearing impairment, in this frequency range one can observe resonance in air cavities, which may also result in nerve irritation.
- high frequencies of the hearing range and ultrasounds (5 kHz to 30 kHz) - exposure to disturbance in this frequency range may lead to increased body temperature, tissue burns, dehydration;
- ultrasounds (> 30 kHz) and short impulses - possible injuries and pathological changes in the tissue.

Compared with other technologies applied as incapacitating factors in NLW weapon systems<sup>2</sup>, in water environment pressure wave disturbances are characterized by favourable conditions of propagation. It is due to this very property, among others, that hydroacoustic systems are widely applicable in monitoring systems and underwater imaging<sup>3</sup>.

Previous research on the effects of pressure waves on a diver's body pertained primarily to safety measures adopted while performing underwater works. Especially within the hearing range and for typical frequency ranges used in naval underwater locating systems.

---

<sup>1</sup> Like in the case of other acoustics-related issues the levels expressed in dB relate to reference value  $p_{ref}$ . Depending on the assumed medium  $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$  (air) or  $p_{ref} = 1 \mu\text{Pa}$  (water). In this case disturbances dissipated in the air are considered

<sup>2</sup> Non-Lethal Weapon – incapacitating weapon

<sup>3</sup> Monitoring of environment, examination of bottom structures, detection of divers and underwater vehicles, mine detection, underwater communications, etc.

W szczególności w paśmie słyszalnym oraz dla typowych zakresów częstotliwości pracy okrętowych systemów hydrolokacyjnych. Ośrodki naukowe, skupione głównie wokół instytucji wojskowych<sup>4</sup>, podejmowały próby przełożenia zjawisk zachodzących w powietrzu na środowisko podwodne. W najprostszym przypadku rozważano uwzględnienie tylko różnicy w wartościach ciśnienia odniesienia  $p_{ref}$ , co sugerowało wprowadzenie poprawki wartości SPL o ok. 26 dB. Jednak pierwsze eksperymenty pokazały, że sygnał o założonych parametrach nie przyniesie takiego samego efektu w wodzie i w powietrzu<sup>5</sup>. Próg słyszenia zależy od indywidualnych cech nurka oraz od rodzaju skafandra. Kolejna różnica, jaką należy uwzględnić w aspekcie oddziaływania fal akustycznych na organizm nurka, dotyczy impedancji akustycznej.

Zagadnienie impedancji akustycznej (ozn.  $Z$ ) należy rozpatrywać w przypadku granicy dwóch ośrodków, w celu określenia jaka część energii fali jest odbita a jaka przenika przez drugi ośrodek. Dla fal akustycznych  $Z$  jest definiowana jako stosunek ciśnienia akustycznego do prędkości cząstkowej i wyrażana w jednostkach  $\text{kg/m}^2\text{s}$  lub Rayl =  $\text{Pa}\cdot\text{s/m}$ . Impedancja charakterystyczna dla danego medium (ozn.  $Z_0$ ) zależy od średniej gęstości ośrodka  $\rho$  oraz prędkości propagacji fali akustycznej w tym ośrodku [4], [5].

Na podstawie stosunku impedancji dwóch sąsiadujących ośrodków, przez które przenika zaburzenie ciśnieniowe, określana jest skuteczność przekazania energii fali. Jeżeli impedancje mają takie same wartości, mamy do czynienia z dopasowaniem impedancyjnym. Wówczas na granicy ośrodków cała energia powinna zostać przekazana z jednego medium do drugiego bez strat. W przypadku, gdy sąsiednie ośrodki charakteryzuje różna impedancja akustyczna, część energii zostanie odbita.

Cecha ta jest szczególnie istotna z punktu widzenia ekspozycji organizmu nurka na fale ciśnieniowe w ośrodku wodnym, gdyż wartości impedancji akustycznych, charakteryzujących organy wewnętrzne, są zbliżone do impedancji wody. Dla porównania wartość impedancji akustycznej wody morskiej w temperaturze ok. 13°C wynosi ok.  $1,54 \cdot 10^6$  Rayl, dla mózgu jest to wartość  $1,52 \cdot 10^6$  Rayl, wątroba  $1,64 \cdot 10^6$  Rayl<sup>6</sup>.

Korzystne warunki propagacji fal ciśnieniowych<sup>7</sup> sprawiają, że ich źródła pośredniczą w generowaniu dźwięku w znacznym obszarze i objętości wody wokół chronionych obiektów. Rozchodząca się w wodzie fala akustyczna oddziałuje na każdy znajdujący się w zasięgu obiekt.

---

<sup>4</sup> Prace tego typu prowadzono m. in. w Naval Experimental Diving Laboratory oraz Air Force Biomedical Research Laboratory [3].

<sup>5</sup> Dla przykładu próg słyszalności w powietrzu określa się jako wartość poziomu ciśnienia 0 dB re 20  $\mu\text{Pa}$  (ciśnienie akustyczne 20  $\mu\text{Pa}$ ). Natomiast poziom progu słyszenia w wodzie nurka wynosi ok. 65 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  (co odpowiada wartości ok. 39 dB re 20  $\mu\text{Pa}$ , a ciśnienie akustyczne to  $\sim 1880$   $\mu\text{Pa}$ ).

<sup>6</sup> Płuca ze względu na zawartość powietrza mają impedancję akustyczną o wartości ok.  $0,26 \cdot 10^6$  Rayl. W przypadku urządzeń stosowanych przy połowach ryb, głównym czynnikiem umożliwiającym ich wykrycie są odbicia sygnałów sondujących od pęcherzy pławnych. Jest to jedna z głównych cech wykorzystywanych w systemach hydrolokacyjnych o ograniczonej rozdzielczości, służących wykrywaniu nurków. Systemy detekcji o wysokiej rozdzielczości, pracujące na wysokich częstotliwościach i o wąskich wiązках sondujących, umożliwiają skuteczne rozróżnianie kształtów obiektów oraz ich ruch. W przypadku urządzeń stosowanych przy połowach ryb, głównym czynnikiem umożliwiającym ich wykrycie są odbicia sygnałów sondujących od pęcherzy pławnych.

<sup>7</sup> Zarówno w postaci sygnałów hydroakustycznych lub zaburzeń impulsowych.

Research centres concentrated around military institutions<sup>4</sup> have undertaken to translate aerial phenomena into underwater environment. At a basic level, the difference in  $p_{ref}$  pressure values was the only consideration to be taken into account, which suggested an introduction of an SPL value correction of about 26 dB. However, first experiments showed that the signal with given parameters would not bring the same effects in water as in the air<sup>5</sup>. The hearing threshold is dependent on the individual characteristics of a diver and the type dive suit he or she is wearing. Another difference to be taken into account, with respect to the effects of pressure waves on a diver's body, regards the acoustic impedance. The phenomenon of acoustic impedance ( $Z$ ) needs to be considered in the case of two mediums in order to establish what amount of wave energy is reflected and how much of the energy propagates through the other medium. For sound waves,  $Z$  is defined as a ratio of sound pressure to the particle velocity expressed in  $kg/m^2s$  or Rayl =  $Pa \cdot s/m$ . Impedance characteristic of a given medium ( $Z_0$ ) depends on the average density of the medium  $\rho$  and the velocity of the wave propagation within the given medium [4], [5]. The effectiveness of the wave energy transfer is defined on the basis of the impedance relation of the two neighbouring mediums through which the pressure disturbance permeates. If the impedances have the same values, a phenomenon known by the name of impedance matching, then, on the boundary of the mediums, the entire energy ought to be transferred from one medium to the other with no losses. In the case when neighbouring mediums have different acoustic impedances, some of the energy becomes reflected. This feature is absolutely crucial from the standpoint of the exposure of a diver's body to pressure waves in water because the values of acoustic impedances which are typical for internal organs are similar to the impedance of water. To compare - the acoustic impedance of sea water at a temperature of about 13°C is about  $1.54 \cdot 10^6$  Rayl, for the brain the value is  $1.52 \cdot 10^6$  Rayl, and for the liver -  $1.64 \cdot 10^6$  Rayl<sup>7</sup>.

Conditions which are favourable to the propagation of pressure waves<sup>6</sup> cause their sources to mediate in generating the sound over a vast area and volume of water around the protected objects. The acoustic wave which propagates in water affects every object within range. Moreover, signal damping depends on the distance, therefore the effectiveness of interaction increases with the intruder approaching the projector<sup>8</sup>. These features render equipment expenditure cuts possible.

Initially, research conducted at military research centres (among others, the Naval Experimental Diving Laboratory and Air Force Biomedical Research Laboratory [3]), concerned threats which pertained chiefly to divers' hearing in conditions of excessive noise levels. Potential permanent or temporary hearing impairments were considered.

---

<sup>4</sup> Research of this type was carried out, among others, at the Naval Experimental Diving Laboratory and Air Force Biomedical Research Laboratory [3].

<sup>5</sup> For example, the hearing threshold in the air is defined as the value of pressure level 0 dB re 20  $\mu Pa$  (sound pressure 20  $\mu Pa$ ). However, the hearing threshold of a diver in water is about 65 dB re 1  $\mu Pa$  (which corresponds to 39 dB re 20  $\mu Pa$ , while sound pressure is  $\sim 1880 \mu Pa$ ).

<sup>7</sup> On account of their air content, lungs have the acoustic impedance of  $0.26 \cdot 10^6$  Rayl.

In the case of devices which are employed for fishing, probing signals reflected from air swim bladders are the chief factor allowing their detection.

It is one of the features employed in underwater locating systems with limited resolution, used for detecting divers.

High-resolution detecting systems with narrow probe beams which operate on high frequencies enable effective shape and movement recognition.

<sup>6</sup> Taking the form of both hydroacoustic signals or impulse disturbances.

<sup>8</sup> A transmitting transducer, the actuator - source of pressure waves.



Ponadto tłumienie sygnału zależy od odległości, w związku z czym, skuteczność oddziaływania rośnie wraz ze zbliżaniem się intruza do projektora<sup>9</sup>. Dzięki tym cechom możliwe jest ograniczenie wymagań i nakładów na sprzęt.

Początkowo, badania prowadzone w militarnych ośrodkach naukowych (m.in. Naval Experimental Diving Laboratory oraz Air Force Biomedical Research Laboratory [3]), dotyczyły zagrożeń związanych głównie ze słuchem nurków pracujących w warunkach nadmiernego natężenia hałasu. Rozważano możliwość występowania trwałych lub tymczasowych ubytków słuchu. Jednak z punktu widzenia obezwładniania nurka, uszkodzenie słuchu, tymczasowe lub trwałe, nie musi oznaczać zaprzestania prowadzenia dalszych działań dywersyjnych.

Dlatego też element podwodnego systemu przeciwdziałania, związany z pasmem akustycznym słyszalnym, można ewentualnie ograniczyć do rozgłaszania ostrzeżeń werbalnych lub instrukcji postępowania, nawołujących do zaprzestania akcji, poddania się lub opuszczenia danego rejonu.

Zaobserwowano również, że w zakresie częstotliwości poniżej ok. 500 Hz bodźce akustyczne mogą być słabo odbierane przez narządy słuchu. Jednak ekspozycja o odpowiednio wysokim poziomie ciśnienia (powyżej 160 dB re 1  $\mu$ Pa) wywołuje subiektywne reakcje związane z drganiami narządów wewnętrznych.

Skutkami takiego oddziaływania fal ciśnieniowych mogą być: bóle związane z centralnym systemem nerwowym, zaburzenia oddechowe, zawroty głowy, nudności, mdłości, dezorientacja i dyskomfort. W zależności od doświadczenia nurka objawy te mogą być interpretowane jako problemy z uchem środkowym, zator w układzie oddechowym czy też choroba dekompresyjna.

Przytoczone badania były nakierowane głównie na bezpieczeństwo prowadzenia prac podwodnych w otoczeniu źródeł silnych sygnałów hydroakustycznych jakimi są na przykład okrętowe systemy hydrolokacyjne. Na ich podstawie powstały między innymi instrukcje dla nurków Marynarki Stanów Zjednoczonych odnośnie dopuszczalnych warunków ekspozycji na oddziaływanie sonarów okrętowych [9]. Dla przykładu, instrukcja ta zakłada, że nurek pracujący w pobliżu jednego z sonarów, generującego sygnały sondujące o częstotliwościach poniżej 5 kHz (np. niskoczęstotliwościowe sonary do poszukiwania okrętów podwodnych) zależnie od wyposażenia, może znajdować się w obszarze od ok. 10 do 2000 metrów od sonaru nie dłużej niż 10 minut w ciągu doby. Instrukcja reguluje również dopuszczalne warunki ekspozycji dla sonarów o wyższych częstotliwościach pracy.

Ze względu na charakter i właściwości osobno należy rozważyć oddziaływanie zaburzeń impulsowych i fal uderzeniowych. Są to zakłócenia powstałe np. w wyniku eksplozji ładunków wybuchowych, granatów hukowych czy też działek pneumatycznych (ang. Air Gun). W zależności od źródła, generowaną podczas wybuchu lub rozprężania powietrza, falę ciśnieniową będą różnić podstawowe zależności widmowe i czasowo-energetyczne.

Większość badań skupiała się na potencjalnie śmiertelnych efektach wybuchów, a ich celem było przede wszystkim określenie bezpiecznych odległości pływania. Niektóre wcześniejsze próby opisanie bioefektów występujących w wodzie opierały się o badania prowadzone w powietrzu. Podwodna fala uderzeniowa zmienia się i kształtuje z odległością inaczej niż sygnał fali ciągłej, skutkiem czego są dwa podstawowe typy zaburzeń. Blisko źródła występuje bardzo szybko narastający front fali o wysokim ciśnieniu. W większych odległościach pod względem właściwości powstałe zaburzenie coraz bardziej zbliża się (może być aproksymowane) do niskoczęstotliwościowej fali ciągłej.

---

<sup>9</sup> Przetwornik nadawczy, element wykonawczy – źródło fal ciśnieniowych.

However, as far as diver's incapacitation is concerned, hearing impairment, permanent or temporary, does not necessarily equate with the cessation of an intended sabotage. Therefore, the element of underwater countermeasure system, related to the hearing range, may possibly be reduced to the dissemination of verbal threats or procedural instructions that would urge a potential intruder to abort the sabotage, surrender, or leave a given area. It was observed that within the frequency range below 500Hz sound stimuli may be but faintly picked out by the hearing system. However, an exposure in high enough pressure levels (over 160 dB re 1  $\mu$ Pa) induces subjective reactions related to the vibration of internal organs. The effects of such interactions of pressure waves may include aches related to central nervous system, respiratory disorders, dizziness, nausea, queasiness, misorientation and discomfort. Depending on diver's experience, the symptoms may be interpreted as middle ear related problems, pulmonary embolism or decompression sickness.

The research referred to was aimed at ensuring safety of underwater works when surrounded by sources of strong hydroacoustic signals such as naval underwater locating systems. This research became the source for instructions given to U.S. Navy divers as regards acceptable conditions of exposure to naval sonars [9]. For instance, the instructions assume that a diver who works near one of the sonars which generate probing signals with frequencies below 5kHz (e.g. low-frequency sonars used for submarine detection), depending on the equipment, cannot stay within 10 to 2000 metres of the sonar longer than 10 minutes in 24 hours. The instructions also regulate acceptable exposure conditions for high-frequency sonars.

On account of their nature and properties, impulse disturbances and shock waves ought to be considered separately. Disturbances of this type are created as a result of a blast from explosive devices, stun grenades or air guns. Depending on the source, the compression wave generated during the blast or air expansion will be differentiated by basic spectral and time-energy interrelations.

Most of the research focused on potentially lethal effects of explosion and their aim was principally to define safe swimming distances. Some of the earlier attempts to characterise bioeffects that occur in water were based on research carried out in the air. An underwater shock wave changes and takes shape within a distance in a different manner from a continuous wave, which results in two basic types of disturbances. Towards the wave source a high pressured wave front builds up with high velocity. Over larger distances, in terms of properties, the disturbance nears (may be approximated) to a low-frequency continuous wave.

For explorations of bottom structures, where it is necessary to generate strong impulse disturbances, in addition to explosive devices, controllable sources such as air guns are employed. The working principle of different AG types is similar. Compressed air stored in a storage tank is abruptly released into water causing an air bubble. Rapid oscillation of air bubbles repetitively creates an acoustic signal which is proportional to the size of changes in the bubble volume. The shape of the created wave may be described as a decayed sine curve. Basic frequency of the wave largely depends on the maximum volume of the bubbles and the surrounding pressure. The level of the signal will chiefly depend on the energy contained in the compressed air prior to expansion, hence the emphasis on increasing the pressure and the volume of the initial gas charge.

The above-mentioned information enables an ordering of hydroacoustic systems<sup>9</sup> as far as the interaction with a diver's body is concerned. Generally speaking, the intended use and employment of given devices is inextricably connected with their technical characteristics.

---

<sup>9</sup> On account of the phenomena described, the term hydroacoustic systems will only apply to active systems which generate probing signal as modulated or impulse signals.

Do badań struktur dennych, gdzie konieczne jest generowanie silnych zaburzeń impulsowych, oprócz ładunków wybuchowych stosuje się kontrolowane źródła w postaci działek pneumatycznych AG (ang. Air Gun). Zasada działania różnych typów AG jest podobna. Zbiornik powietrza wysokiego ciśnienia jest raptownie opróżniany do otaczającej wody, wytwarzając pęcherz powietrza. Szybkie pulsowanie pęcherzyków powietrza kilkakrotnie wytwarza sygnał akustyczny, proporcjonalny do wielkości zmian objętości pęcherzy. Kształt fali zwykle można określić jako tłumioną sinusoidę. Częstotliwość podstawowa fali zależy przede wszystkim od maksymalnej objętości pęcherzy i otaczającego ciśnienia. Poziom, jaki może osiągnąć sygnał zależy głównie od energii zawartej w skompresowanym powietrzu poprzedzającym rozładowanie, stąd duży nacisk kładziono na zwiększenie ciśnienia i objętości inicjacyjnego ładunku gazu.

Powyższe informacje pozwalają na pewne uporządkowanie systemów hydroakustycznych<sup>9</sup> pod kątem oddziaływania na organizm nurka. Ogólnie rzecz ujmując, przeznaczenie i stosowanie poszczególnych urządzeń jest ściśle związane z ich parametrami technicznymi. W związku z czym parametry techniczne, a w szczególności pasmo częstotliwości pracy oraz poziom generowanego ciśnienia akustycznego, będą stanowiły klucz dla ich usystematyzowania.

a) Sonary do wykrywania nurków (DDS) pracują w paśmie wysokich częstotliwości (przykładowo powyżej 400 kHz). W tym zakresie w ośrodku wodnym następuje bardzo silne tłumienie sygnałów sondujących, co wpływa na ograniczenie zasięgu tych systemów. Oddziaływanie fal jest zwykle niezauważalne/nieodczuwalne dla nurków przebywających w pobliżu tego typu urządzeń.

b) Sonary średniego zasięgu pracujące w paśmie ultradźwięków (>30 kHz) – skutkiem ekspozycji na zaburzenia z tego zakresu częstotliwości mogą być podwyższenie temperatury ciała, zwiększenie ciśnienia krwi, poparzenia tkanek, odwodnienie, możliwe są również urazy i zmiany patologiczne tkanek. Systemy te również charakteryzuje stosunkowo ograniczony zasięg.

c) Sonary dalekiego zasięgu pracujące w paśmie < 20 kHz – wykorzystywane do poszukiwania jednostek oraz obiektów pływających na znacznych odległościach (do kilku km). Charakteryzują się wysokim poziomem ciśnienia akustycznego. Ich oddziaływanie może skutkować uszkodzeniem tkanek oraz naczyń krwionośnych, podrażnieniem nerwów oraz zaburzenia równowagi. Instrukcje dotyczące bezpieczeństwa prowadzenia prac podwodnych zalecają ścisłe ograniczenie ekspozycji na sygnały, których poziom przekracza 190 dB re 1 μPa.

d) Niskoczęstotliwościowe sonary aktywne – systemy te wykorzystywane są do poszukiwania okrętów podwodnych na odległościach powyżej kilku Mm. Tego typu urządzenia są również stosowane w badaniach struktur dna morskiego. W tych przypadkach generowane są impulsy o dużej energii, a co za tym idzie o stosunkowo wysokim poziomie ciśnienia akustycznego oraz długim czasie trwania. Możliwe do zaobserwowania bioefekty obejmują zakres od rozdrażnienia, niepokoju, poprzez skurcze i krwotoki, a na trwałych uszkodzeniach tkanek kończąc. Efekty i obrażenia powstałe w wyniku oddziaływania fal w tym zakresie o poziomie powyżej 160 dB mogą być podobne jak w przypadku fali uderzeniowej.

e) Źródła impulsowe, działka pneumatyczne – systemy te przeznaczone są przede wszystkim do badań hydrogeologicznych. Dodatkowo, ze względu na skutki oddziaływania oraz możliwość kontroli generowanych zaburzeń spełniają oczekiwania stawiane broni obezwładniającej.

---

<sup>9</sup> Ze względu na analizowane zjawiska pojęcie systemów hydroakustycznych w tym artykule będzie dotyczyć tylko systemów aktywnych, generujących sygnał sondujący np. w postaci sygnałów modulowanych lub impulsowych.



Therefore, it is the technical characteristics, and particularly the frequency band and the level of generated sound pressure, that will be the key to their systematisation.

a) Diver detection sonars (DDS) work in the high frequency band (e.g. over 400kHz). In water, probing signals in such frequencies are intensely dampened, which affects the coverage of these systems. Wave interactions are typically imperceptible to divers who work near such devices.

b) Medium-range sonars working in the ultrasound band (>30 kHz) - exposure to such frequencies may cause body temperature and blood pressure to increase, burning tissue, dehydration, injury and pathological changes in the tissues are a common occurrence. The systems are also characterised by a limited range.

c) Long-distance sonars working in the band of <20 kHz - used to conduct a search for floating objects and units at a considerable distance (up to several kilometres). They are characterized by a high sound pressure level. Interaction may result in damaged tissue and blood vessels, nerve irritation or balance disorders. Safety regulations for underwater works recommend severe restrictions as regards exposures with levels exceeding 190 dB re 1  $\mu$ Pa.

d) Low-frequency active sonars - systems used to detect submarines over the distances of several leagues. This type of device is also used to scan sea bottom structures. Generated impulses have considerable energy levels which entails high levels of sound pressure and longevity. The observable bioeffects might range from irritation and anxiety, through contractions and hemorrhage, to permanent tissue injuries. The effects and injuries inflicted as a consequence of the interaction of waves in this frequency with the level of over 160 dB, may be similar to those which are typical for shock waves.

e) Impulse sources, air guns - these systems are intended principally for hydrogeological research. Additionally, on account of the results of the impact and the ability to control generated disturbances, they meet the criteria for incapacitating weapons. The organ which is particularly sensitive from the point of view of pressure/shock wave hazard is the lung with the upper respiratory tract. The occurrence of the so-called petachiae, i.e. small red or purple spots caused by minuscule bleeding from damaged capillaries of the respiratory tract (for pressure of several dozens of kPa, ~180 dB) is assumed to be a marker of hazardous pressure levels. For higher pressure levels, not only did bleeding occur in the trachea, but also in lungs, the like of which can be encountered in the event of contusions. The rupture of tissues may lead to profuse bleeding and pulmonary edema.

In consideration of the above, on the path to generating strong pressure disturbances (hydroacoustic), NLW conducive impact effects on an intruder's body may be expected: pains related to the central nervous system, respiratory disorders, dizziness, nausea, queasiness, misorientation and discomfort. The impact of a pressure wave may lead to injuries of internal organs and eventually to death.

The analysed literature and current knowledge on the subject of low frequencies and impulse disturbances anticipates the following levels of pressure wave impacts:

- $AT_{H(\text{earing})} = 65 \div 80$  [dB re 1  $\mu$ Pa] – hearing threshold;
- $AT_{V(\text{ibration})} = 130 \div 140$  [dB re 1  $\mu$ Pa] – threshold of sensing vibrations with internal organs;
- $AT_{P(\text{ain})} = 160 \div 170$  [dB re 1  $\mu$ Pa] – pain threshold;
- $AT_{I(\text{njury})} = 180 \div 190$  [dB re 1  $\mu$ Pa] – internal organs injury;
- $AT_{D(\text{eath})} > 195$  [dB re 1  $\mu$ Pa] – death.

Bearing in mind these parameters, it was put to consideration to construct dedicated devices that make use of hydroacoustic and pneumatic transducers and pyrotechnics employed in hazard countermeasure systems for divers.

Organem szczególnie wrażliwym z punktu widzenia narażeń na fale ciśnieniową/uderzeniową są płuca z górną częścią przewodu oddechowego (ang. *lung with the upper respiratory tract*). Jako znacznik niebezpiecznego poziomu ciśnienia przyjmuje się wystąpienie tzw. wybroczyn (*łac. petechiae*), czyli małych czerwonych lub fioletowych plamek, spowodowanych niewielkimi krwawieniami z uszkodzonych naczyń kapilarnych traktu oddechowego (dla ciśnienia rzędu dziesiątek kPa, ~180 dB). Przy wyższych poziomach obserwowano krwawienie nie tylko tchawicy, ale także w płucach, spotykane przy stłuczeniach. Przerwanie tkanek może prowadzić do silnego krwawienia oraz obrzęku płuc.

Na podstawie powyższych informacji można stwierdzić, że na drodze generowania silnych zaburzeń ciśnieniowych (hydroakustycznych) można spodziewać się pożądaných z punktu widzenia NLW efektów oddziaływania na organizm intruza, takich jak: bóle związane z centralnym systemem nerwowym, zaburzenia oddechowe, zawroty głowy, nudności, mdłości, dezorientacja i dyskomfort. Oddziaływanie fali ciśnieniowej może doprowadzić do urazów organów wewnętrznych a ostatecznie do śmierci.

Na podstawie analizy literatury oraz dostępnej wiedzy, w zakresie niskich częstotliwości oraz zaburzeń impulsowych, zakłada się następujące poziomy oddziaływania fali ciśnieniowej:

- $AT_{H(\text{earing})} = 65 \div 80$  [dB re 1  $\mu\text{Pa}$ ] – próg słyszenia;
- $AT_{V(\text{vibration})} = 130 \div 140$  [dB re 1  $\mu\text{Pa}$ ] – próg odczuwania wibracji organami wewnętrznymi;
- $AT_{P(\text{ain})} = 160 \div 170$  [dB re 1  $\mu\text{Pa}$ ] – próg bólu;
- $AT_{I(\text{njury})} = 180 \div 190$  [dB re 1  $\mu\text{Pa}$ ] – uszkodzenia organów wewnętrznych;
- $AT_{D(\text{eath})} > 195$  [dB re 1  $\mu\text{Pa}$ ] – śmierć.

Na tej podstawie rozważano możliwości skonstruowania dedykowanych urządzeń z wykorzystaniem przetworników hydroakustycznych, pneumatycznych oraz pirotechnicznych, przeznaczonych do pracy w systemach przeciwdziałania zagrożeniom ze strony nurków.

#### **PROPONOWANE MODELE TECHNICZNE SYSTEMÓW DO OBEZWŁADNIANIA NURKÓW**

W ramach realizowanych projektów prowadzono badania własne nad możliwością wykorzystania jako element broni NLW typowych przetworników hydroakustycznych, źródeł pneumatycznych (AG) oraz ładunków pirotechnicznych.

Przetworniki piezoceramiczne charakteryzują zwykle dobre właściwości kierunkowe (wąska wiązka), jednak istotnym ograniczeniem jest pasmo częstotliwości pracy, przekładające się na wymiary elementów przetwornika. W prowadzonych rozważaniach analizowano możliwość wykorzystania tych rozwiązań w trzech wariantach:

- Praca w dedykowanym zakresie częstotliwości – zgodnie z przedstawionymi powyżej informacjami dotyczącymi oddziaływania fal ciśnieniowych w określonych pasmach można założyć, że użytecznym zakresem częstotliwości może być pasmo poniżej 30 kHz. Jednak ze względu na skutki oddziaływania (zawroty głowy, podwyższona temperatura i ciśnienie krwi, itp.) oraz właściwości propagacyjne (tłumienie przekładające się na zasięg) skuteczność takich rozwiązań może być niewystarczająca. Szczególnie istotny jest fakt tłumienia przez materiały stosowane na skafandry nurkowe (w dalszej części wyniki takich badań). Konstrukcja urządzenia wymaga doprowadzenia znacznej energii, przekładającej się na osiągnięcie odpowiednio wysokich poziomów ciśnienia.

### **SUGGESTED MODELS OF TECHNICAL SYSTEMS FOR INCAPACITATING DIVERS**

Within the framework of implemented projects, our own research was carried out to determine whether typical hydroacoustic transducers, pneumatic sources (AG) and pyrotechnics may be employed as elements of NLW.

Piezoceramic transducers are usually characterized by good directional properties (narrow beam), but their major limitation is the frequency band which has a direct influence on the size of the component elements of the transducer. The possibility of implementation of these solutions was considered in three versions.

- Running in the dedicated frequency range - in accordance with the aforementioned information on pressure waves interacting in given bandwidths, it may be assumed that the range below 30 kHz is a viable option. However, on account of the effects of the interaction (dizziness, increased temperature and blood pressure, etc.) and the propagation properties (the effect of damping over distance) their effectiveness may not be sufficient. A particular consideration needs to be given to the damping effect caused by the material used for making diving suits (the results of the research will be discussed shortly). The design of the device requires a considerable amount of energy to be converted to appropriate pressure levels.

- Nonlinear phenomena - hydroacoustic transducers may be differently applied using a method employed in parametric echosounders, which makes use of the nonlinearity of the medium. In the method, while two signals of similar frequencies  $f_1$  and  $f_2$  are being simultaneously generated, summation and differential components are created, which derive from these frequencies. Frequencies are so selected that the transducer runs at full capacity. On account of the damping effect, the summation component ( $f_1 + f_2$ ) is effectively dampened, whereas the differential component ( $f_1 - f_2$ ) is used to penetrate bottom structures. Appropriately selected difference between  $f_1$  and  $f_2$  makes the generation of low-frequency disturbances possible. However, energy consumption is a glaring drawback of the method. According to literature, a differential signal is characterised by a level which is 40 dB lower than the one which is generated in the initial frequency. In practice, this level is significantly lower. Our own research showed that with differential frequencies of  $< 1$  kHz their level was 60 dB lower than the initial signal.

- Electroacoustic transducers - for the record, the employment of underwater electroacoustic transducers was also taken into consideration. The disadvantage of such a solution was its low efficiency (on account of the electromechanical conversion - electrical signal converted into a membrane movement) and the frequency band is limited only to the human hearing bandwidth. As a countermeasure, their sole suitability might consist in spreading verbal warnings.

During the research on the capability of cumulative airflow to act as an incapacitating agent, three structural concepts were considered. Firstly, a high pressure tank was filled with air via a compressor, an electromagnetic valve being used to control the flow. Each opening of the valve resulted in a portion of high pressure air being sent through a hose to the nozzle. Cyclic functioning of the valve ensured a recurrence of the generated impulses. Switching frequency was reflected in the spectrum components of the forming disturbance. However, in order to maximise the effectiveness of compressed air it is crucial to shorten the hose which conveys the air to the nozzle and introduce valves operable underwater which could directly control the air spurted by the AG nozzles. In the second concept, the effectiveness of the gun was to be improved through the application of an air battery. Compressed air was conveyed to a tank which had been fixed directly beside the nozzle. Instead of a control valve, a spring which was compressed by air from the battery was used. A spring deflection resulted in the opening of the nozzle and the generation of an impulse.

- Zjawiska nieliniowe – innym sposobem zastosowania przetworników hydroakustycznych może być metoda stosowana w echosondach parametrycznych, wykorzystująca nieliniowość ośrodka. W metodzie tej podczas jednoczesnego generowania dwóch sygnałów o zbliżonych częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$  powstają składowe sumacyjne i różnicowe, pochodne od tych częstotliwości. Częstotliwości są dobierane tak, aby przetwornik pracował w optymalnych warunkach skuteczności. Ze względu na tłumienie składowa sumacyjna ( $f_1 + f_2$ ) jest skutecznie tłumiona, natomiast składowa różnicowa ( $f_1 - f_2$ ) jest wykorzystywana do penetracji struktur dennych. Odpowiednie dobranie różnicy pomiędzy  $f_1$  i  $f_2$  umożliwi wygenerowanie zaburzenia o niskich częstotliwościach. Wadą tej metody są wymagania energetyczne. Literatura podaje, że sygnał różnicowy charakteryzuje poziom o ok. 40 dB niższy niż generowany na częstotliwości pierwotnej. W praktyce ten poziom jest dużo niższy. Podczas badań własnych, co zostanie przytoczone w dalszej części, przy częstotliwościach różnicowych < 1 kHz poziom był o ok. 60 dB niższy niż sygnału pierwotnego.

- Przetworniki elektroakustyczne – dla porządku, rozważano wykorzystanie podwodnych przetworników elektroakustycznych. Wadą tego rozwiązania jest niska sprawność (ze względu na zamianę elektromechaniczną – sygnał elektryczny zamieniany na ruch membrany) oraz ograniczone pasmo do zakresu akustycznego pasma słyszalnego. Jako element systemu przeciwdziałania mogą być wykorzystywane jedynie do rozgłaszania pod wodą ostrzeżeń werbalnych.

Podczas badań nad możliwościami wykorzystania jako czynnika obezwładniającego skumulowanego strumienia powietrza rozważano trzy koncepcje konstrukcyjne. W pierwszej z nich do sterowania strumieniem powietrza zastosowano zawór elektromagnetyczny. Do zbiornika wysokiego ciśnienia dostarczano powietrze ze sprężarki. Każdorazowe otwarcie zaworu skutkowało przesłaniem porcji powietrza poprzez wąż wysokociśnieniowy do dyszy wylotowej. Cykliczna praca zaworu zapewniała powtarzalność generowanych impulsów.

Częstotliwość przełączania miała również swoje odwzorowanie w składowych widma powstającego zaburzenia. Jednak w rozwiązaniu tym, w celu poprawy efektywności wykorzystania sprężonego powietrza, konieczne jest ograniczenie długości węża doprowadzającego powietrze do dyszy wylotowej oraz zastosowanie szybkich zaworów pracujących pod wodą – bezpośrednio sterujących powietrzem „wyrzucanym” przez dysze AG.

W drugim rozwiązaniu próbowano poprawić efektywność działka poprzez zastosowanie akumulatora powietrza. Do zbiornika znajdującego się bezpośrednio przy dyszy wylotowej doprowadzano sprężone powietrze. Zamiast zaworu sterującego do otwierania dyszy wykorzystano sprężynę, ściskaną pod wpływem oddziałującego ciśnienia powietrza w akumulatorze. Ugięcie sprężyny skutkowało otwarciem dyszy a tym samym wygenerowaniem impulsu.

W tym rozwiązaniu wykazano zależności czasowe i energetyczne (poziom ciśnienia generowanego zaburzenia) nie tylko od poziomu ciśnienia roboczego dostarczanego powietrza, ale przede wszystkim od właściwości samego układu sprężyny. Generowane impulsy wykazywały stosunkowo długi czas narastania, co może ograniczyć spodziewany efekt oddziaływania na nurka. Potwierdzono natomiast słuszność założenia, że korzystne jest sterowanie jak najbliżej dyszy wylotowej.

Ostatnią z analizowanych koncepcji działka pneumatycznego oparto o zasadę różnicy ciśnienia powietrza w dwóch sąsiadujących ze sobą komorach. Do jednej z nich (wykonawczej) jest ładowana porcja powietrza, jakie będzie uwalniane do otoczenia. Powietrze w drugiej komorze (sterującej) oddziałuje na tłok uszczelniający komorę wykonawczą, umożliwiając tym samym dostarczenie odpowiednio wysokiego poziomu ciśnienia. Zwolnienie zaworu komory sterującej skutkuje przesunięciem tłoka i gwałtownym rozprężeniem powietrza z komory wykonawczej.

This solution revealed time and energy interrelations (pressure level of generated disturbance) not only with the level of working pressure delivered to the tank, but also, more importantly, with the properties of the spring structure. The generated impulses were characterised by prolonged escalation which may slow down the expected effect on the diver. However, the assumption that it was more advantageous to locate the control valve as close to the nozzle as possible was confirmed.

The last of the analysed concepts of the air gun was based on the difference in air pressure in two adjacent chambers. One of the chambers (executive) is filled with an air portion that is meant to be released. The air in the other chamber (controlling) interacts with the piston that seals the executive chamber, making it possible to deliver an appropriate amount of pressure. The release of the control chamber valve results in the piston's shift in position and a violent decompression of air in the executive chamber. This solution has brought an overall improvement in the gun's effectiveness by achieving a much higher level of peak pressure with shorter (when compared with the previous project) escalation time. The issues of disturbance properties occurring during operation of the air gun will be presented in the remainder of this article.

In the framework of conducted work, a research on disturbances caused by detonation of small pyrotechnical charge was carried out. It opened the gate for a comparison of basic parameters and the interrelations which characterize the forming shock wave and the reference to the solutions presented earlier.

#### ASSUMPTION OF THE RESEARCH METHOD

The starting point of the research was the assumption that the pressure wave, which was created while disturbances were being generated, became the incapacitating agent. Therefore, the research and analyses typical for hydroacoustic waves were assumed. Accordingly, the following measuring scheme was applied to the method.

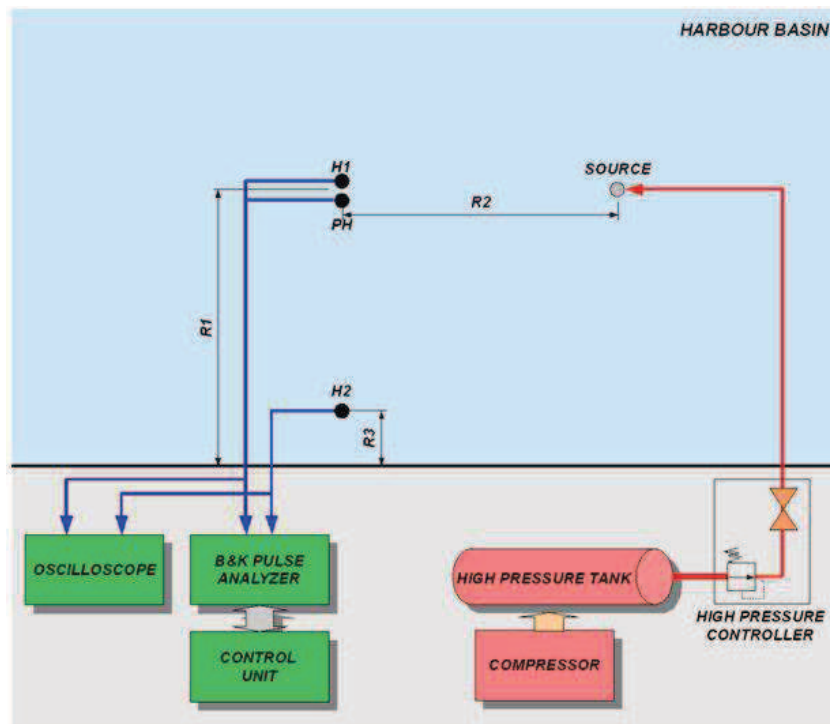


Fig. 1. Scheme of a measuring method for an air gun (H1, H2 - hydrophones, PH - phantom, R - distances in [m]).

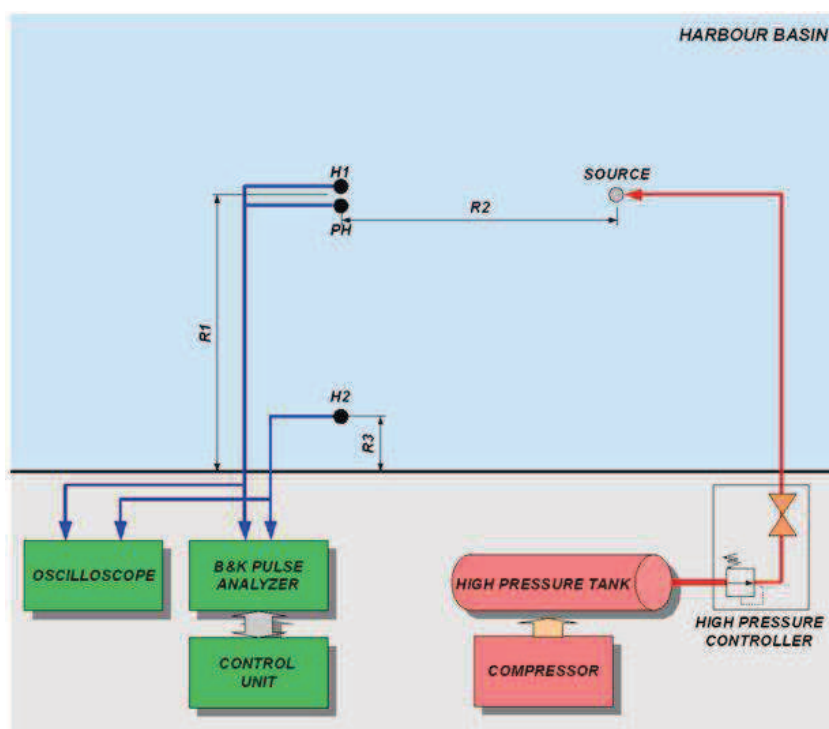


Dzięki takiemu rozwiązaniu została poprawiona efektywność działka, poprzez uzyskanie dużo wyższej wartości ciśnienia szczytowego przy krótszym niż w poprzednim projekcie, czasie narastania. W dalszej części tej pracy zostaną przedstawione właściwości zaburzeń powstających podczas pracy Air Gun'a.

W ramach prowadzonych prac wykonano także badania nad właściwościami zaburzeń powstałych wskutek detonacji niewielkich ładunków pirotechnicznych. Pozwoliło to na porównanie podstawowych parametrów i zależności charakteryzujących powstającą falę uderzeniową oraz na odniesienie do wcześniej przytoczonych rozwiązań.

### ZAŁOŻENIE METODY BADAŃ

Punktem wyjściowym dla prowadzonych badań było założenie, że czynnikiem obezwładniającym jest powstająca podczas generowania zaburzeń fala ciśnieniowa. Dlatego też założono badania i analizę jako fali hydroakustycznej. W związku z czym, w metodzie zaproponowano następujący schemat pomiarowy.



Rys. 1. Schemat metody pomiarowej dla działka pneumatycznego AG (H1, H2 – hydrofony pomiarowe, PH – fantom, R – odległości w [m]).

Ze względu na charakter mierzonych parametrów w metodzie tej jako przetworniki pomiarowe zaproponowano hydrofony. Metoda pomiaru parametrów impulsowych zaburzeń ciśnieniowych, również tych związanych z ładunkami pirotechnicznymi, była szeroko opisywana między innymi w [11], gdzie metodą porównawczą weryfikowano poprawność uzyskanych wyników przy pomiarach znanych źródeł fali ciśnieniowej.

On account of the specificity of measured parameters, hydrophones were used as measuring transducers. The method of measuring the parameters of impulse pressure disturbances, also those which were related to pyrotechnics, was extensively discussed in [11] where the comparative method was used to verify the veracity of all results obtained from the measurements of pressure wave sources. In the case of the air gun, it was important to keep the value of working pressure under control as it was being conveyed to the executive elements, in order to analyse the interrelation of the parameters in the formed disturbance with the value of the pressure. Hydrophone signals were recorded independently on the oscilloscope and the B&K Pulse analyser. Subsequently, regarding the influence of the medium properties<sup>10</sup>, time-amplitude and frequency analyses of the obtained records were made. The use of the electromagnetic control valve helped to analyse the possibility of modulating the airflow through cyclic functioning of the valve. Following some consideration, the potential for generating low-frequency components (single Hz) was made possible via subsequent releases of air.

In the case of hydroacoustic transducers and their impact on the diver's body, two approaches were considered. On one hand, the possibility of generating and taking advantage of the waves with differential frequencies formed due to the nonlinear quality of the medium. The method is used, among others, in parametric hydroacoustic systems. It allows the generation of low-frequency signals with the transmitting transducer maintaining an acceptable physical size. However, our own research proved theoretical deliberations on considerable energy loss, which greatly hinders the effectiveness of these devices. On the other hand, another analysis was conducted where damping properties of diving suits were tested in confrontation with the impact of ultrasound transducers working in their nominal resonating frequencies of probing signals. For this purpose a phantom, that compared different diving suit materials, was designed.

Pyrotechnic tests were conducted on a naval testing range. In this case, the levels of pressure generated in the wake of the forming shock wave were compared in the function of charge size and the distance from the object. The received values were confronted with theoretical assumptions. The results will facilitate the preparation of technical and tactical assumptions to be used in the countermeasure system.

In the course of the project implementation, the influence of a diving suit on the effectiveness of particular solutions was considered. With that goal in mind, a phantom with the ability to test samples from typical diving suits (one wetsuit, and two dry-suits) was prepared. For dry-suits, diver's underwear was regarded as one of the layers. The damping efficacy of the pressure wave was examined through the comparison of signals received from the inside of the phantom with the conditions in its immediate surroundings. Typical modules of hydroacoustic systems which generated ultrasonic probing signals served as a stimulation. Other features to be analysed were the dampening effectiveness of AG generated disturbances and pyrotechnic actuators.

---

<sup>10</sup> The damping related to the propagation of the generated pressure wave was assessed; reflections from elements of infrastructure and the possible interference consequent on these reflections were taken into consideration.

W przypadku działka pneumatycznego (AG) kontrolowano wartość ciśnienia roboczego, dostarczanego do elementów wykonawczych, w celu analizy zależności parametrów powstałego zaburzenia od wartości tego ciśnienia. Sygnały z hydrofonów rejestrowano niezależnie na oscyloskopie oraz na analizatorze B&K Pulse. Następnie, uwzględniając wpływ właściwości ośrodka<sup>10</sup>, wykonano analizy amplitudowo-czasowe i częstotliwościowe uzyskanych rejestracji. Dzięki zastosowaniu elektromagnetycznego zaworu sterującego analizowano możliwość wykorzystania modulowania strumienia powietrza poprzez cykliczną pracę tego zaworu. Rozważano w ten sposób możliwość generowania składowych o bardzo niskich częstotliwościach (pojedyncze Hz), wynikających z kolejnego wyzwania porcji powietrza do otoczenia.

W przypadku przetworników hydroakustycznych rozważano dwa podejścia do sprawy oddziaływania na organizm nurka. Z jednej strony analizowano możliwość generowania i wykorzystania fal o częstotliwościach różnicowych, powstałych w wyniku nieliniowości ośrodka. Metoda ta jest wykorzystywana między innymi w parametrycznych systemach hydroakustycznych. Pozwala na generowanie sygnałów o niskich częstotliwościach przy zachowaniu rozsądnych wymiarów przetworników nadawczych.

Badania własne potwierdziły jednak rozważania teoretyczne dotyczące znacznych strat energii, co ogranicza efektywność tych rozwiązań. Z drugiej strony analizowano właściwości tłumiące skafandrów nurka na oddziaływanie przetworników ultradźwiękowych, pracujących na swoich znamionowych częstotliwościach rezonansowych sygnałów sondujących. Do tego celu zaprojektowano i wykonano fantom, dzięki któremu możliwe było porównanie właściwości różnych typów materiałów wykorzystywanych w produkcji skafandrów.

Badania pirotechnicznych efektorów prowadzono na poligonie morskim.

W tym przypadku porównywano poziomy ciśnienia generowanego w wyniku powstającej fali uderzeniowej w funkcji wielkości ładunku i odległości od obiektu. Uzyskane wartości porównywano z założeniami teoretycznymi. Wyniki umożliwią opracowanie założeń technicznych i taktycznych do wykorzystania docelowego systemu przeciwdziałania/efektorów.

W trakcie realizacji projektu rozważano wpływ skafandra, w jaki może być wyposażony nurek, na efektywność poszczególnych rozwiązań. Do tego celu opracowano fantom, umożliwiający badania próbek typowych skafandrów nurkowych (jeden mokry, dwa suche). W przypadku skafandrów suchych, jako jedną z warstw, uwzględniono również stosowaną białiznę nurkową. Badanie skuteczności tłumienia fali ciśnieniowej prowadzono poprzez porównanie sygnałów odbieranych wewnątrz fantoma, z warunkami panującymi w jego bezpośrednim otoczeniu. Jako pobudzenie zastosowano typowe moduły systemów hydroakustycznych, generujących ultradźwiękowe sygnały sondujące. Analizowano również efektywność tłumienia zaburzeń pochodzących od AG oraz efektorów pirotechnicznych.

## **WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH**

### **Przetworniki hydroakustyczne**

Badania nad oddziaływaniem na organizm nurka sygnałów sondujących, generowanych przez systemy hydroakustyczne, skupiają się przede wszystkim na bezpieczeństwie prowadzenia prac podwodnych w obszarze ich działania.

---

<sup>10</sup> M.in. oszacowano tłumienie związane z propagacją generowanej fali ciśnieniowej, uwzględniono odbicia od stałych elementów infrastruktury oraz możliwość wystąpienia interferencji w związku z tymi odbiciami.

## RESULTS OF OWN RESEARCH

### Hydroacoustic transducers

Research on the effects of probing signals generated by hydroacoustic systems, on a diver's body, focus mainly on safety measures while discharging their duties on a given area. Working in ultrasonic frequencies determines limited bioeffects. It is related to the damping of signals in a medium which intensifies as the frequency increases. In this case, the nonlinear properties of the medium used in parametric systems were focused on. This technology was referred to on account of the diving suit properties which will be described in the remainder of the article. The parametric method was taken into consideration for yet another reason - its ability to generate low-frequency signals similar to resonating frequencies of internal organs. However, research results have proved that the parametric method requires a supply of considerable amounts of energy to the actuators. Theoretical considerations assume the damping formed as a consequence of the nonlinearity of the medium to be at about 40 dB. In practice, the damping may even come up to as much as 60 dB and increase as the space between initial frequencies decreases.



Fig. 2. Exemplary transmitter module for model studies.

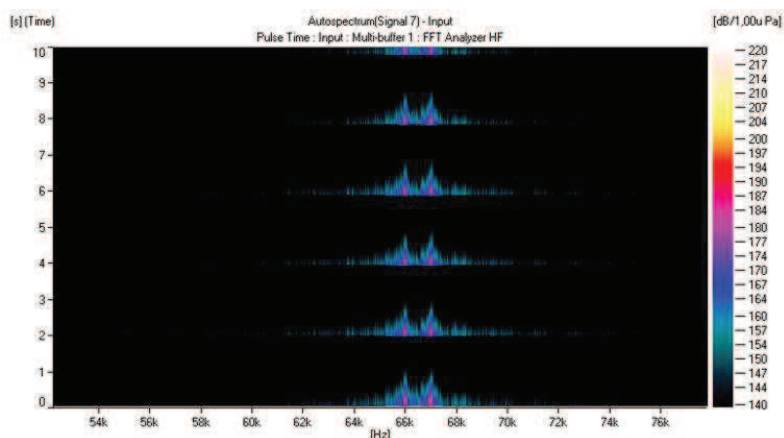


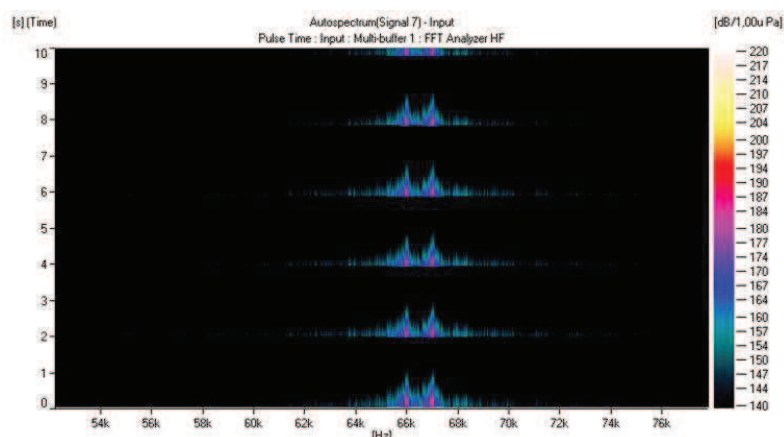
Fig. 3. A contour chart of the FFT analysis for transmitted signals with initial frequencies of 66kHz and 67 kHz (dual-sine).

Praca w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych determinuje ograniczone bioefekty. Jest to związane m.in. z zależnością tłumienia sygnałów w ośrodku, które rośnie ze wzrostem częstotliwości. W tym przypadku skupiono się na możliwości wykorzystania właściwości nieliniowych ośrodka, jakie wykorzystywane są w systemach parametrycznych. Technologia ta została również przytoczona ze względu na właściwości skafandrów nurka, o których będzie mowa w dalszej części tego artykułu. Metodę parametryczną rozważano ze względu na możliwość generowania sygnałów o bardzo niskich częstotliwościach, zbliżonych do częstotliwości rezonansowych organów wewnętrznych. Jednak jak pokazały wyniki badań, metoda parametryczna wymaga dostarczenia znacznej energii do elementów wykonawczych.

Rozważania teoretyczne szacują tłumienie powstającej w wyniku nieliniowości ośrodka fali różnicowej na poziomie ok. 40 dB. W praktyce tłumienie to jest znacznie większe, dochodzące nawet do 60 dB i może rosnąć wraz ze zmniejszaniem odstępów pomiędzy częstotliwościami pierwotnymi.



Rys. 2. Przykładowy pojedynczy moduł nadawczy do badań modelowych.



Rys. 3. Wykres konturowy analizy FFT dla nadawanych sygnałów o częstotliwościach pierwotnych 66 kHz i 67 kHz (dual-sine).



### Air gun

The first air gun model operated at a low working pressure (not higher than 6 atm). In this case, the analysis of spectral interrelations in forming signals was of primary importance. The main components of the spectrum were concentrated in the band below 3kHz. The content of the components was greatly influenced by the noise formed as a consequence of bursting air bubbles. The tests were held in a rather small laboratory tank where water aeration after several shots became the major factor distorting the measurement. More, the occurrence of components related to the frequency of the control valve was authenticated. However, their amount was not satisfactory from the point of view of a diver's incapacitation.

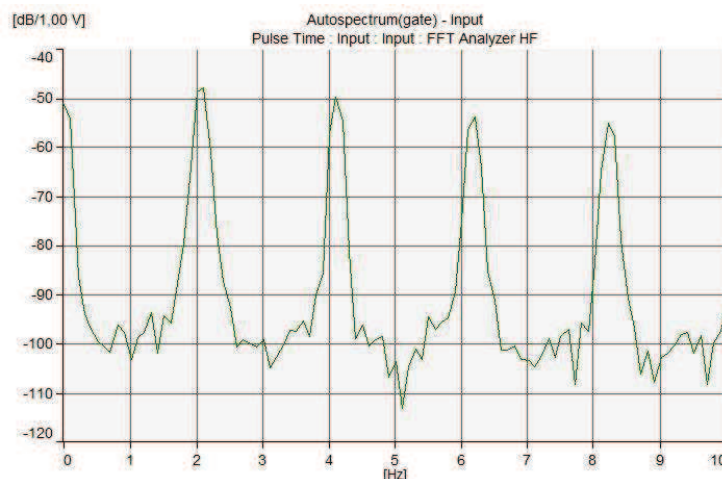


Fig. 4. Harmonic components of valve switching frequency.

The construction of the second air gun model allowed air to be fed at up to 50 atm. The gun was additionally equipped with an air battery and the release was initiated when the thrust on the background was greater than the force of the spring that depressed the piston. The research here focused on interrelations of the pressure levels in the generated wave with working pressure, nozzle diameter and the volume of the battery.

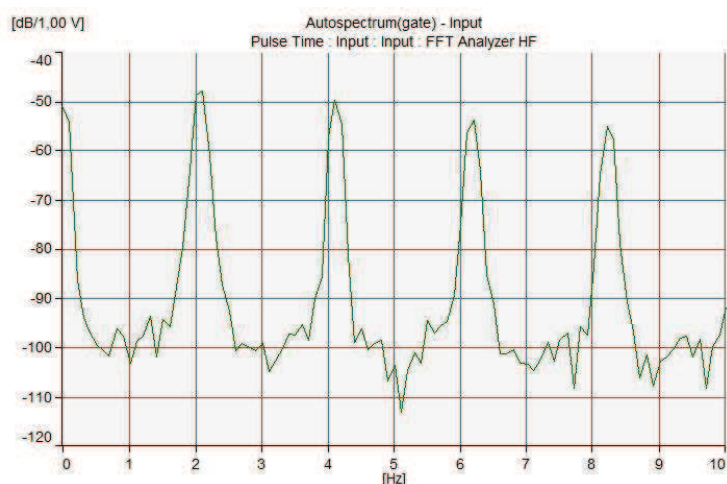


Fig. 5. Air gun model with a spring and a battery.

### Działko pneumatyczne

Pierwszy model działka pneumatycznego pracował przy niskim ciśnieniu roboczym, nieprzekraczającym 6 atm. W tym przypadku chodziło przede wszystkim o analizę zależności widmowych powstających sygnałów.

Główne składowe widma skupiały się w paśmie poniżej 3 kHz. Duży wpływ na zawartość składowych miał szum powstający w wyniku pęknięcia pęcherzyków powietrza. Próby te prowadzono w niedużym zbiorniku laboratoryjnym, gdzie po kilku strzałach napowietrzenie wody było czynnikiem dominującym, zniekształcającym pomiar. Potwierdzono także występowanie składowych, związanych z częstotliwością pracy zaworu sterującego. Jednak ich poziom nie był efektywny z punktu widzenia obezwładniania nurka.



Rys. 4. Harmoniczne składowych częstotliwości przełączania zaworu.

Konstrukcja drugiego modelu działka umożliwiła zasilanie powietrzem o ciśnieniu maksymalnym 50 atm. Dodatkowo działko wyposażono w akumulator powietrza, a wyzwalenie następowało w chwili, gdy siła naporu na tło przewyższała siłę sprężyny dociskającej tłok. W tym przypadku poszukiwano zależności uzyskiwanych poziomów ciśnienia generowanej fali od ciśnienia roboczego, średnicy dyszy wylotowej oraz objętości akumulatora.



Rys. 5. Model działka pneumatycznego ze sprężyną i akumulatorem.

Spectral analyses of the registered signals revealed that a fair portion of acoustic energy is concentrated in the bandwidth below 1kHz, and spectral lines with the highest amplitudes are below 300 Hz. Measured at 20 metres from the source, sound pressure levels did not exceed 170 dB re 1  $\mu$ Pa (in the distance of 1m), which may not be sufficient considering the desired incapacitating effect on the diver – the failings of this system being its relatively low operating pressure. However, following changes in design, a new improved model was built. This time the construction allowed working pressure levels of more than 50 atm. As described in section 3, impulses of considerably shorter escalation time and higher peak pressure were obtained.

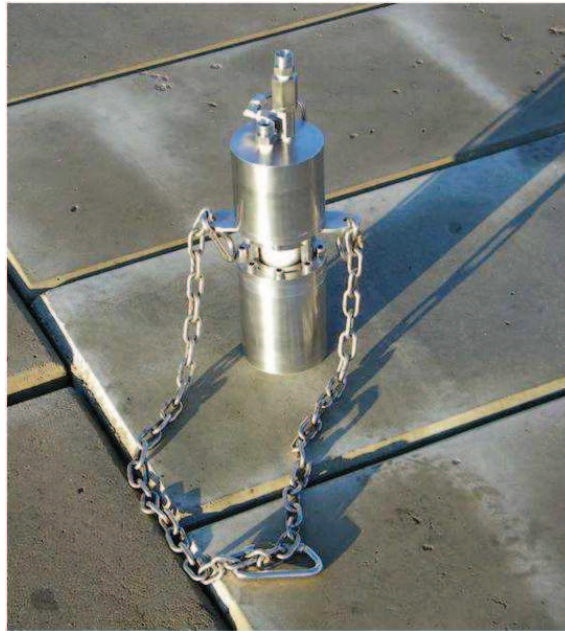


Fig. 6. Air gun prototype working at up to 200 atm.

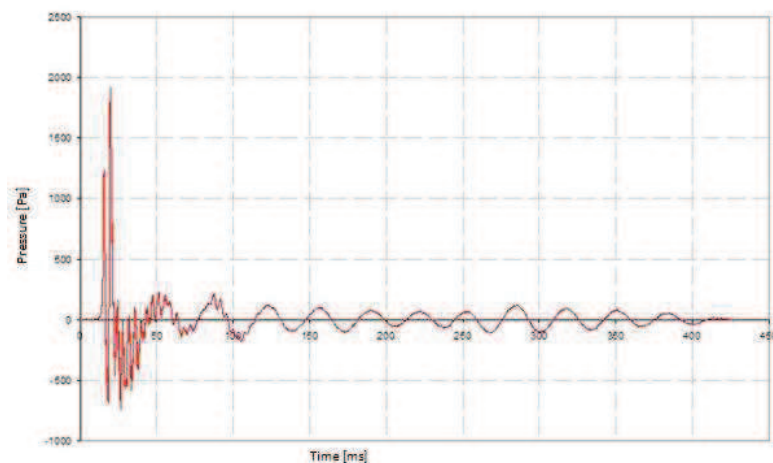


Fig. 7. Impulse generated by an air gun at the working pressure of 50 atm.

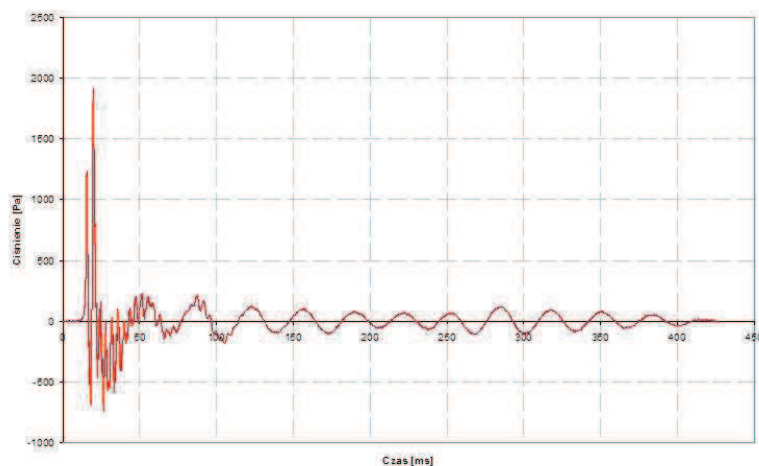


Na podstawie analiz widmowych rejestrowanych sygnałów stwierdzono, że główna część energii akustycznej skupiona jest w paśmie częstotliwości poniżej 1 kHz, a prążki o najwyższych amplitudach znajdują się poniżej częstotliwości 300 Hz. Zmierzone w odległości 20 metrów od źródła poziomy ciśnienia akustycznego nie przekraczały wartości 170 dB re 1  $\mu$ Pa (w odległości 1 m), co z punktu widzenia możliwości obezwładniania nurka, może być poziomem niewystarczającym.

Wynika to między innymi z małej wartości ciśnienia zasilającego układ działka pneumatycznego. Wypracowano jednak propozycje zmian konstrukcyjnych, które wykorzystano przy budowie kolejnego modelu. Tym razem konstrukcja umożliwiła pracę przy ciśnieniu roboczym powyżej 50 atm. Dzięki opisanej w pkt. 3 zasadzie działania uzyskano impulsy o zdecydowanie krótszym czasie narastania i trwania przy znacznie wyższych poziomach ciśnienia szczytowego.



Rys. 6. Prototyp działka pneumatycznego pracującego przy ciśnieniu do 200 atm.



Rys. 7. Impuls generowany przez działko pneumatyczne przy ciśnieniu roboczym 50 atm.

While analysing the disturbances it was observed that apart from high-frequency components, related to the properties of the impulse (e.g. escalation time), there were found components of several dozens Hz. They are the consequence of a relaxation in the medium and last longer than the impulse itself. The escalation time of such an impulse ranges from 2 to 3 ms. Time of the impulse is not longer than 6ms. The disturbance thereby formed may be approximated with a fading sine curve with the frequency dependent on the pressure level and the amount of released air. The study proved that there were interrelations between peak pressure of the forming disturbances and working pressure. Thus, for the working pressure exceeding 120 atm. the obtained peak pressure levels exceed 195 dB in the distance of 1 m.

### Pyrotechnic actuators

For the record, the results of pyrotechnic detonation need to be presented to provide material for a comparison of the sources with air gun properties. In the described phenomenon, the generated pressure wave is characterized by a much shorter escalation time of the impulse and a much higher level of peak pressure. For instance, for a charge weighing 0.1 kg at the distance of 30 m pressure level amounted to 3.7 atm, whereas escalation time was about 4  $\mu$ s. These interrelations were imaged on the signal spectrum and were characterized by much broader bandwidth than in the case of the air gun.

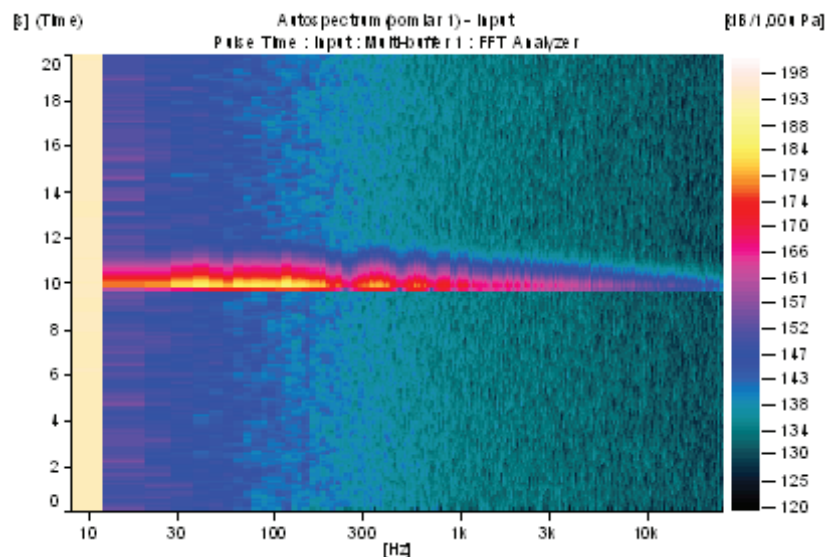


Fig. 8. A contour chart of spectral analysis for pyrotechnic charge.

The study of safe pressure levels estimations shows that with the pressure value of  $(2 \div 4) \cdot 10^4$  Pa, the diver may feel the wave with the same intensity as he would feel electrocution. An impulse wave with the pressure value of  $(1 \div 1,5) \cdot 10^6$  Pa that impacts a submerged diver, head and all, causes him to sustain heavy injuries, including death.

### Phantom

As previously noted, for the purpose of the experiment, three models of standard diving suits had been prepared. First tests were carried out in a lab pool in laboratory conditions. A transmitter module with a hydroacoustic transducer, the like of which is usually employed in echo sounders or acoustic barriers, was deployed as a source.

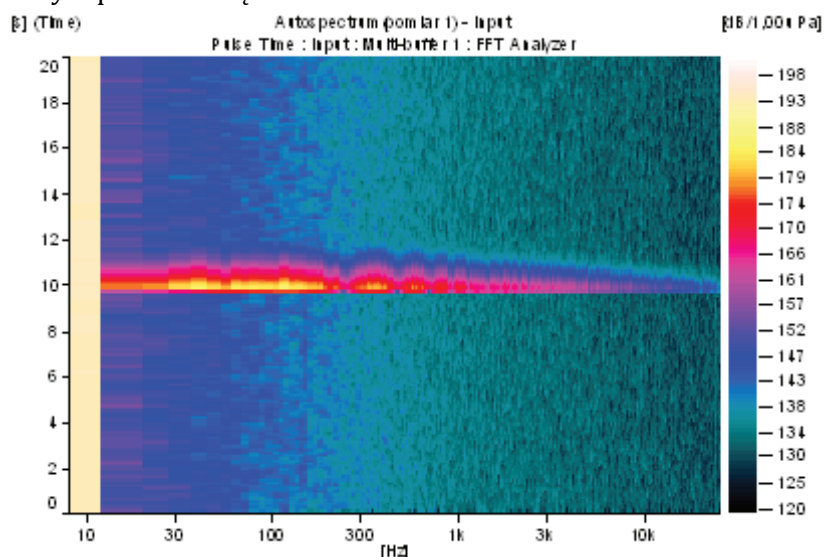


W trakcie analiz zaburzeń zaobserwowano, że oprócz składowych o wysokich częstotliwościach, związanych z właściwościami impulsu (m.in. czas narastania), w ośrodku występują składowe o częstotliwościach kilkudziesięciu Hz. Są one wynikiem relaksacji w ośrodku i trwają znacznie dłużej niż sam impuls. Czas narastania takiego impulsu kształtuje się w przedziale od 2 do 3 ms. Czas trwania impulsu nie przekracza 6 ms. Powstałe zaburzenie można aproksymować wygaszaną sinusoidą o częstotliwości zależnej od poziomu ciśnienia oraz porcji wyzwalanego powietrza. Badania potwierdziły zależności ciśnienia szczytowego powstających zaburzeń od ciśnienia roboczego.

I tak dla ciśnienia roboczego przekraczającego 120 atm uzyskiwane poziomy ciśnienia szczytowego przewyższają 195 dB w odległości 1 m.

### Efekty pirotechniczne

Dla porządku należy przedstawić wyniki związane z detonacją ładunków pirotechnicznych, co umożliwi porównanie właściwości tych źródeł z właściwościami działek pneumatycznych. W tym przypadku generowana fala uderzeniowa charakteryzuje się znacznie krótszym czasem narastania impulsu i dużo wyższym poziomem ciśnienia szczytowego. Dla przykładu dla ładunku o masie 0,1 kg w odległości 30 m zmierzono poziom ciśnienia 3,7 atm, a czas narastania wynosił ok. 4  $\mu$ s. Te zależności czasowe zostały odwzorowane na widmie sygnału, charakteryzując się znacznie szerszym pasmem częstotliwości niż dla Air Gun'a.



Rys. 8. Wykres konturowy analizy widmowej dla ładunku pirotechnicznego.

Z badań dotyczących szacowania bezpiecznych wartości ciśnienia wynika, że przy wartości ciśnienia  $(2 \div 4) \cdot 10^4$  Pa nurek odczuwa działanie fali podobne do porażenia prądem elektrycznym. Fala udarowa o wartości ciśnienia  $(1 \div 1,5) \cdot 10^6$  Pa działając na nurka (człowieka) zanurzonego w wodzie, łącznie z głową, powoduje jego bardzo poważne obrażenia włącznie ze śmiercią [12].

### Fantom

Jak już wspomniano wcześniej, na potrzeby badań wykonano modele trzech typowych zestawów skafandrów nurkowych. Pierwsze próby wykonano w warunkach laboratoryjnych, w basenie pomiarowym. Jako źródło zastosowano moduł nadajnika z przetwornikiem hydroakustycznym, wykorzystywany zwykle w echosondach czy też barierach akustycznych.

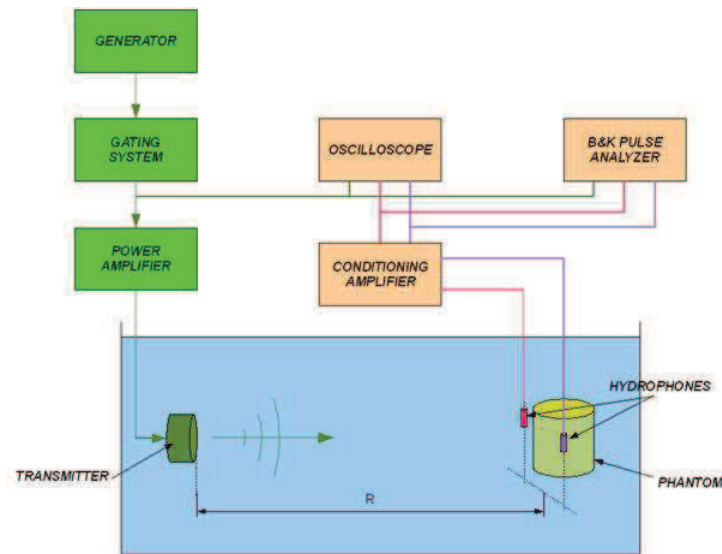
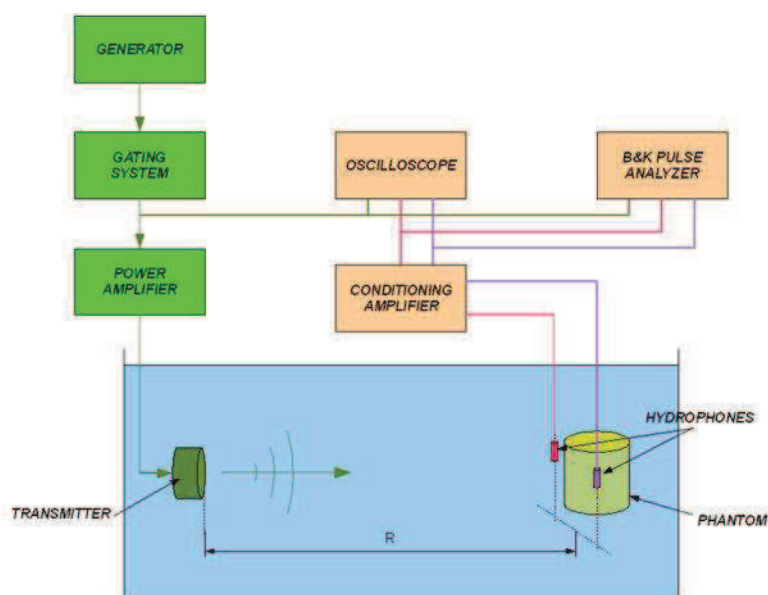


Fig. 9. Scheme of phantom examination method in a lab pool.

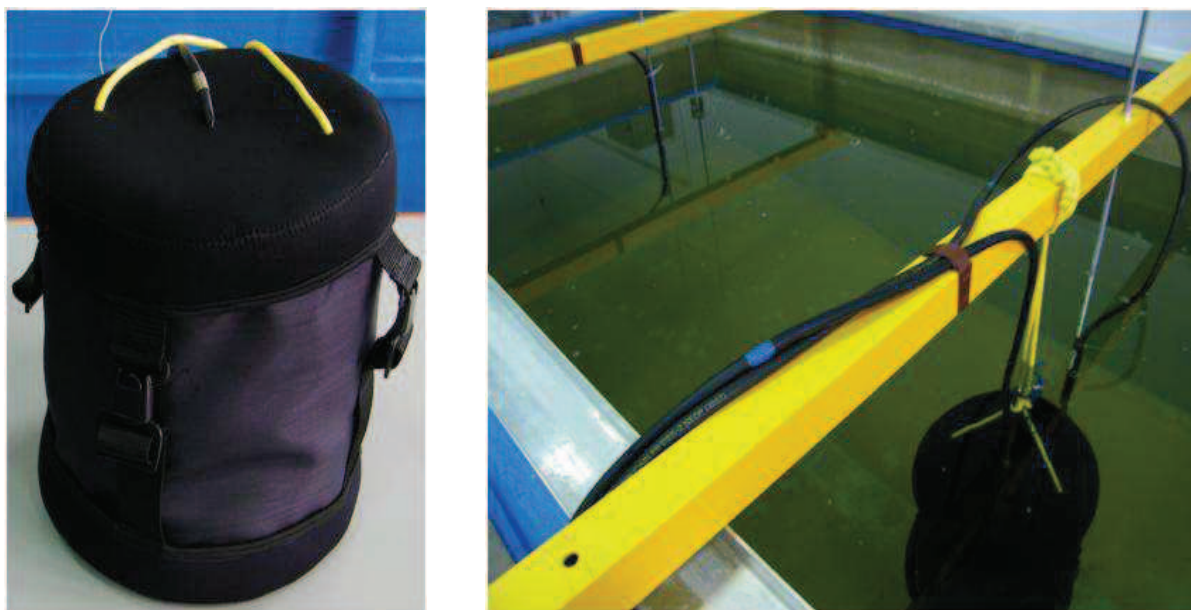


Fig. 10. Phantom on a test bench.

The obtained results proved that in the case of dry diving suits the pressure wave that impacts within the ultrasound bandwidth is heavily dampened in relation to sound pressure inside the medium. Depending on the frequency, for wet suits the damping may reach 30 dB, for dry suits it exceeds 70 dB. One of the reasons for which the phenomenon occurs is the presence of an insulation layer between the suit fabric and the diver's body. The insulations contain air. Consistent with the predictions, pressure wave damping of a wet diving suit is much weaker than that of a dry one. It is important to note that in cold waters a diver most frequently wears a hood made of 5 ÷ 7mm neoprene, therefore the impact of the waves on the head will be much stronger than on other parts of a diver's body clad in a dry diving suit.



Rys. 9. Schemat metody badań fantomu w basenie pomiarowym.



Rys. 10. Fantom na stanowisku badawczym.

Na podstawie otrzymanych wyników badań stwierdzono, że w przypadku skafandrów suchych padająca fala ciśnieniowa w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych, ulega silnemu tłumieniu w odniesieniu do ciśnienia akustycznego panującego w ośrodku.

W zależności od częstotliwości, w przypadku skafandrów mokrych może to być tłumienie rzędu 30 dB, dla suchych tłumienie przekracza 70 dB. Jedną z przyczyn tego zjawiska jest fakt stosowania w suchych skafandrach ociepliny pomiędzy tkaniną skafandra a ciałem nurka, w której znajduje się powietrze. Zgodnie z przewidywaniami zaobserwowano znacznie słabsze tłumienie fal ciśnieniowych przez materiał skafandra mokrego w porównaniu ze skafandrami suchymi.

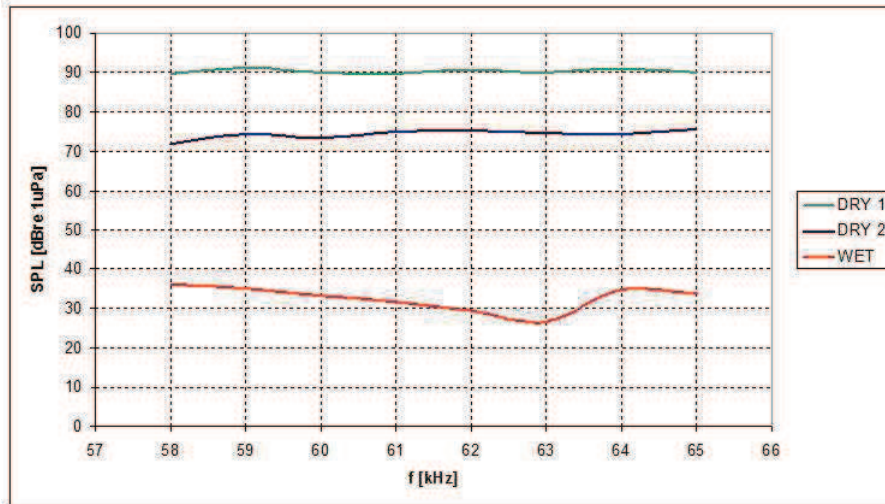


Fig. 11. Damping materials used in diving suits.

When an air gun or a pyrotechnic actuator were the sources of disturbances, the diving suit proved to be an effective mechanical low-pass filter that intensely dampened the components of over 500 Hz while passing over the components of lower frequencies with no damping.

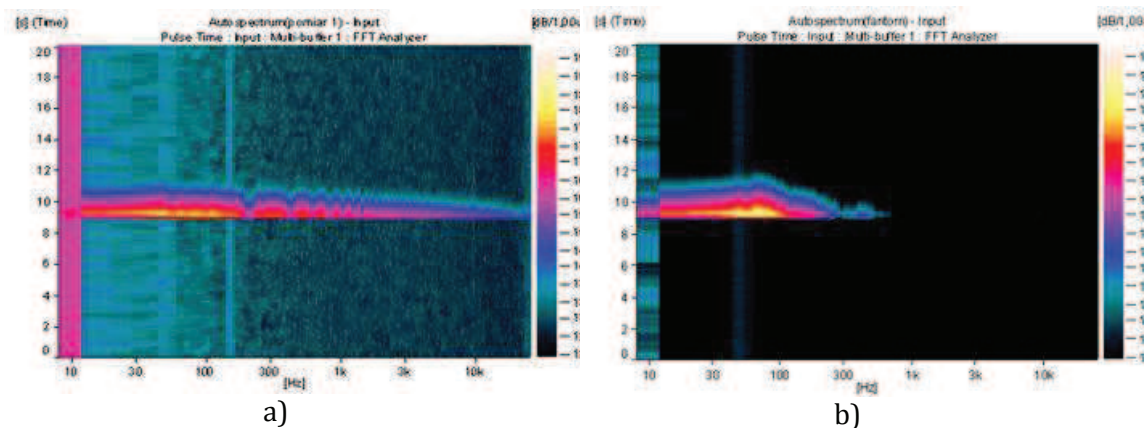


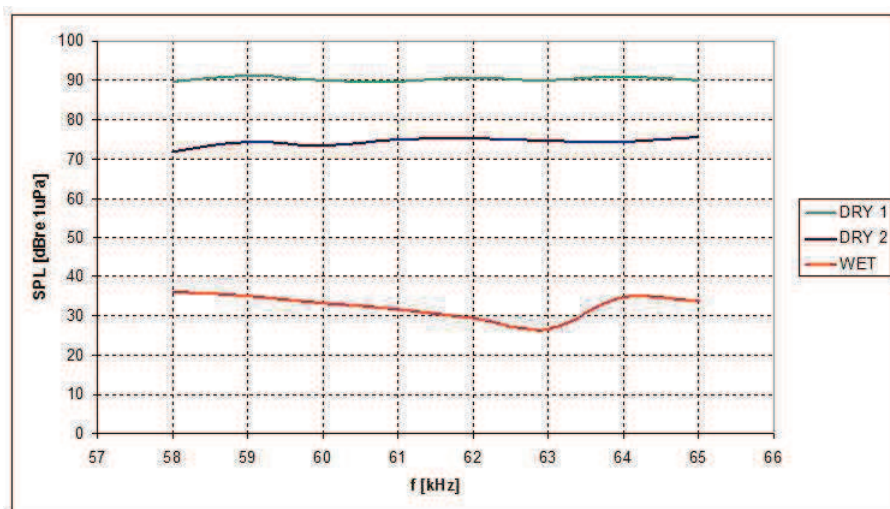
Fig. 12. Juxtaposition of contour charts of disturbance spectrum measured outside (a) and inside the phantom (b).

### CONCLUSION

In the framework of conducted research, the effects of pressure waves on a diver's body have been analysed. Different sources of these disturbances have been considered, particularly with respect to a possible deployment in countermeasure systems - NLW. On account of strong damping properties, both as a result of propagations in the medium and the kind of diving suit used, the ultrasound bandwidth, typical for hydroacoustic sonar systems, proves to be insufficiently effective. The deployment of such countermeasure systems calls for substantial increase of power in generated signals. Safety measures in operation during underwater works in a close proximity of sonar systems suggest restrictions in exposure or even avoidance of pressure levels exceeding 195 dB re 1 μPa.

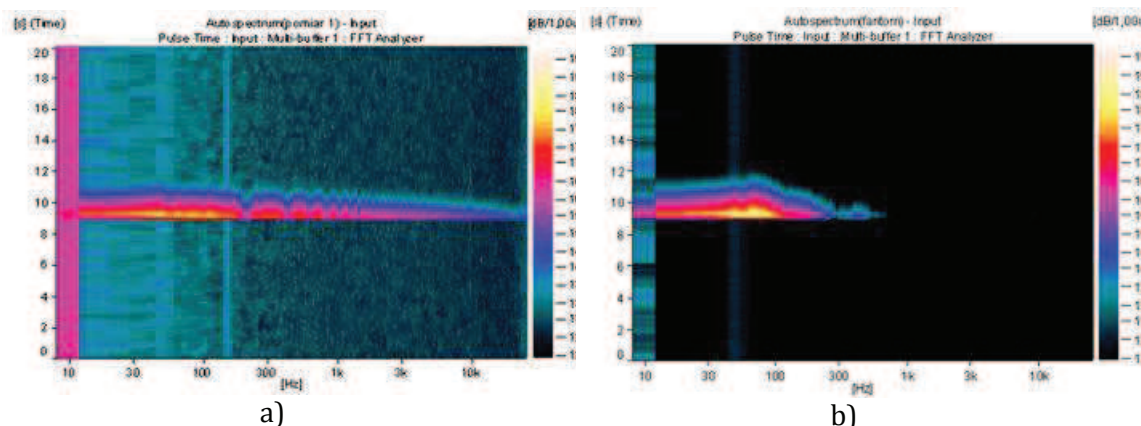


Należy zaznaczyć, że na głowie nurka (wody zimne) jest najczęściej kaptur z 5 ÷ 7 mm neoprenu i oddziaływanie fal na głowę będzie znacznie silniejsze niż na pozostałe części ciała nurka ubranego w suchy skafander.



Rys. 11. Wykres tłumienia materiałów stosowanych w skafandrach nurkowych.

W przypadku, gdy źródłem zaburzenia było działko pneumatyczne lub efektor pirotechniczny, zaobserwowano, iż skafander stanowi skuteczny, mechaniczny filtr dolnoprzepustowy, silnie tłumiący składowe powyżej 500 Hz, a przenosząc praktycznie bez tłumienia składowe o niższych częstotliwościach.



Rys. 12. Zestawienie wykresów konturowych widma zaburzenia zmierzonego w otoczeniu (a) oraz wewnątrz fantoma (b).

### PODSUMOWANIE

W ramach prowadzonych prac analizowano wpływ fal ciśnieniowych na organizm nurka. Rozważano różne źródła tych zaburzeń, szczególnie w aspekcie możliwości ich wykorzystania jako systemu przeciwdziałania – NLW. Ze względu na silne tłumienie, zarówno w wyniku propagacji w ośrodku oraz w zależności od stosowanych skafandrow, zakres częstotliwości ultradźwiękowych, typowy dla sonarowych systemów hydroakustycznych, wydaje się być mało efektywny.



Consistent with the predictions, study of pyrotechnic actuators revealed significantly higher pressure levels in the generated disturbances as compared to air guns. The shock wave that formed in the wake of a detonation is characterized by a shorter escalation time and higher energy as compared to piezoelectric transducers and AG. On account of these properties it is capable of covering a much wider area than AG. What remains to be taken into consideration is the control over such actuators, which is made possible only through an appropriate selection of charges. A detonation in the vicinity of protected structures also needs a consideration of their resilience to a generated impulse. AG is characterised by a lower pressure level and therefore a shorter range (depending on the construction - a few dozen metres), but it allows to control the pressure wave and limit the anticipated effects with the sole purpose of incapacitating intruders.

Próby stosowania takich systemów przeciwdziałania wymaga znacznych nakładów na zwiększenie mocy generowanych sygnałów. Instrukcje związane z bezpieczeństwem prowadzenia prac podwodnych w obszarze działania systemów sonarowych, sugerują, aby ograniczać lub wręcz unikać poziomów ciśnienia przekraczających 195 dB re 1  $\mu$ Pa. Tak jak się spodziewano, badania prowadzone nad efektorami pirotechnicznymi wykazały znacznie wyższe poziomy ciśnienia generowanych zaburzeń w porównaniu z działkami pneumatycznymi.

Powstała w wyniku detonacji fala uderzeniowa charakteryzuje się znacznie krótszym czasem narastania i większą energią w porównaniu do przetworników piezoelektrycznych i AG. Dzięki temu zapewnia skuteczne pokrycie znacznie większego obszaru niż AG. Pozostaje jednak kwestia kontrolowania tego typu efektorów, możliwa głównie poprzez odpowiedni dobór wielkości ładunku.

Detonacja w pobliżu chronionych elementów wymaga także rozważenia ich odporności udarowej na generowany impuls. W przypadku AG zaburzenia charakteryzuje się niższym poziomem ciśnienia, a tym samym mniejszym zasięgiem (w zależności od konstrukcji rzędu kilkudziesięciu metrów), ale umożliwia kontrolowanie generowanej fali ciśnieniowej i ograniczenie spodziewanych efektów do obezwładniania intruzów.

#### LITERATURA/ BIBLIOGRAPHY

1. Altmann, J., *Acoustic Weapons – A prospective Assessment*, Science & Global Security, Volume 9, str. 165 – 234, Taylor and Francis, 2001;
2. Cempel, Cz., *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989;
3. *Non-Lethal Swimmer Neutralization Study*, Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, San Diego, 2002;
4. Rossing, T., D., *Springer Handbook of Acoustics*, Springer Science+Business Media, New York, 2007;
5. Jagodziński, Z., *Przetworniki ultradźwiękowe*, WKŁ, Warszawa, 1997;
6. Padee, L., *Aparatura Ultrasonograficzna. Wykład 2 jednostki.*, <http://www.ire.pw.edu.pl>
7. Parvin, S., *Limits for underwater noise exposure of human divers and swimmers*, <http://www.subacoustech.com>;
8. Cudahy, E., Parvin, S., *The Effects of Underwater Blast on Divers*, Naval Submarine Medical Research Laboratory, Report 1218, 2001r;
9. US Navy Diving Manual (Rev. 6): *Safe diving distances from transmitting sonar (Appendix 1A)*. Naval Sea Systems Command, Washington DC 2008;
10. Altmann, J., *Acoustic Weapons – A prospective Assesment: Sources, Propagation, and Effects of Strong Sound*, Cornell University, Ithaca, 1999;
11. *Introduction to Underwater Acoustics. Hydrophones – their characteristics and applications. Calibration Technique*. Bruel & Kjaer, Naerum, Denmark;
12. Kilian, A., Chodkiewicz, H., Grabowski, M., Pozański, P., Szarkowski, F., *Efektory w systemach ochrony infrastruktury morskiej przed podwodnymi zagrożeniami terrorystycznymi*, V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Technologie morskie dla obronności i bezpieczeństwa” NATCon, Gdańsk, 2012 r;
13. Pozański, P., Grabowski, M., *Effects of pressure waves on divers in aspect of underwater threat countermeasure*, MAST Europe, Malmo, 2012 r.

## **EFFECTS OF PRESSURE WAVES ON DIVERS WITH RESPECT TO DETECTION SYSTEMS AND UNDERWATER HAZARD COUNTERMEASURES**

*The article presents the effects of pressure waves on a diver's body with regard to the properties of generated disturbances. In particular, the analysis encompasses the influence of such parameters as sound pressure level, bandwidth of generated waves and the duration of interaction. These are the main factors which determine the safety of underwater operations with the concurrent work of hydroacoustic systems. The aforementioned pressure wave parameters determine their effectiveness as regards countermeasures against hazards from other divers.*

*Furthermore, a methodology of research on pressure wave sources with respect to their impact on divers has been discussed. The paper also presents the results of our own research with regard to practical applications of hydroacoustic transducers and pneumatic devices. The works encompassed the research and analysis of the efficacy of suggested implementations depending on the materials used for the production of different types of diving suits.*

*The research was conducted as part of scientific work financed by the science funds in the years 2010-2012 as a development project no. 0R00009811 entitled: "Detection and countermeasures against the terrorist threat from divers".*

*Przemysław Pozański is the recipient of Antoni Dębski Scholarship awarded by the Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society in 2011.*

**Keywords:** *detection, pressure waves, impact, effect, interaction.*

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ НА ДАЙВЕРОВ В УСЛОВИЯХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ПОДВОДНЫМ УГРОЗАМ**

*В статье представлен анализ влияния волн давления на тело дайвера в зависимости от свойств генерируемых расстройств. В частности, анализ включает в себя влияние таких параметров, как уровень звукового давления, частоты и продолжительности волн, возникающих в результате воздействия. Это основные факторы, определяющие безопасность подводных операций при одновременной работе гидроакустической системы. Эти параметры волн давления определяют их эффективность с точки зрения противодействия угрозам со стороны дайверов.*

*В статье также обсуждается метода исследования источников волн давления в контексте влияния на дайверов. Представлены результаты собственного исследования, касающегося использования для этой цели гидроакустических преобразователей и пневматического оборудования. Работа включала в себя исследование и анализ эффективности предлагаемых решений, в зависимости от материалов, используемых для производства водолазных костюмов.*

*Исследование было проведено в рамках научно-исследовательской работы финансируемой из Фондов на науке в годы 2010 - 2012 в качестве развития проекта*

№ 0R00009811, tytuł: " Обнаружение и предотвращение террористических угроз со стороны дайверов".

Пшемислав Позаньский является победителем Научного Стипендия им. Антония Дебскего, признанным в 2011 году Польским Обществом Медицины и Гипербарической Техники.

**Ключевые слова:** обнаружение, волны давления, воздействия.