

ЕТАЛОН ОДИНИЦІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТИСКУ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

THE STANDARD OF UNIT OF ULTRASONIC PRESSURE IN AQUEOUS MEDIUM

*Дувіряк Д. В., Шпак О. В., Паракуда В. В., канд. техн. наук, доц.
ДП НДІ “Система”, Україна, e-mail: dardar2410@gmail.com*

*Dariia Duviriak, Oleksandr Shpak, Vasyl Parakuda, PhD, Ass.-Prof.
SE R&DI “Systema”, Ukraine*

<https://doi.org/10.23939/istcm2019.03.058>

Анотація. Проаналізовано актуальність створення в Україні первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі в діапазоні частот від 0,5 МГц до 10 МГц, зумовлену необхідністю метрологічного забезпечення чинного ультразвукового медичного обладнання та проведення процедур оцінки відповідності вимогам технічного регламенту щодо медичних виробів для введення їх в експлуатацію. Перелік параметрів акустичного виходу ультразвукового медичного обладнання стандартизований Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), зокрема параметри ультразвукового діагностичного обладнання нормують відповідно до IEC 61157, а параметри фізіотерапевтичного обладнання – IEC 61689.

У статті проаналізовано методи відтворення ультразвукового тиску у водному середовищі в діапазоні частот від 0,5 МГц до 10 МГц, вибрано метод для створення первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі – метод взаємності із двома перетворювачами. Наведено математичну модель методу відтворення одиниці ультразвукового тиску, функціональну схему еталона з описом роботи основних елементів та подано загальний вигляд створеного первинного еталона. Окремо вказано основні вимоги до допоміжного ультразвукового перетворювача, який застосовують відповідно до вибраного методу. Також наведено вимоги до вимірювального середовища – води. Описано експериментальні дослідження метрологічних властивостей еталона та наведено порівняння отриманих метрологічних характеристик створеного еталона з характеристиками відповідних зарубіжних еталонів.

Ключові слова: ультразвук, ультразвуковий тиск, простежуваність, непевність вимірювання, первинний еталон.

Abstract. The article analyzes the topicality of the primary standard creation of the ultrasonic pressure unit in water for the frequency range of 0.5–10.0 MHz in Ukraine. Its creation is predetermined by the necessity of the exploited ultrasound medical equipment metrological maintenance as well as for the assessment of compliance with the requirements of the technical regulations for medical products to be exploited. The list of ultrasound medical equipment acoustic output parameters is standardized by the International Electrotechnical Commission, in particular, ultrasound diagnostic equipment parameters are standardized in accordance with IEC 61157, and physical therapy equipment parameters are standardized in accordance with IEC 61689.

The article analyzes the methods of reproducing ultrasonic pressure in the aqueous medium in the frequency range from 0.5 MHz to 10 MHz, the method for creating the primary standard unit of ultrasonic pressure in the aqueous medium that is the method of reciprocity with two transducers. The mathematical model of the method of reproduction of the unit of ultrasonic pressure is presented, the functional scheme of the standard with the description of work of the basic elements and the general view of the created primary standard are given.

The basic requirements for the auxiliary ultrasonic transducer, applied according to the chosen method, are specified separately. The requirements for measuring medium – water – are also given. Experimental studies of the metrological properties of the standard are described and a comparison of the obtained characteristics with the characteristics of the corresponding foreign standards is conducted.

Key words: Ultrasound, Ultrasonic pressure, Traceability, Uncertainty, Primary standard.

Вступ

Практично в усіх галузях економіки, науки і техніки широко використовують машини, апарати й обладнання, в яких застосовують ультразвук. Активне застосування ультразвукових технологій у медицині привело до створення складного ультразвукового медичного обладнання (УМО), зокрема діагностичного, терапевтичного та хірургічного. УМО повинно бути безпечним для пацієнта й обслуговуючого медичного персоналу та забезпечувати ефективність під час діагностування і лікування. Під час використання ультразвуку в медицині необхідно враховувати фізичні ефекти, які виникають у тканинах людського організму та впливають на

безпеку. Це такі ефекти, як нагрівання та руйнування тканин людини, які виникають під час використання високих рівнів ультразвукового тиску.

Параметри акустичного виходу УМО треба контролювати як на етапі введення його в експлуатацію під час проведення процедур оцінки відповідності вимогам технічного регламенту щодо медичних виробів, так і під час його експлуатації, оскільки вони визначають ефективність та безпечність його застосування.

Перелік параметрів акустичного виходу УМО стандартизований Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), зокрема параметри ультразвукового діагностичного обладнання нормують відповідно до IEC 61157 [1], а параметри терапевтичного обладнання – IEC 61689 [2].

В основу вимірювання параметрів УМО покладено вимірювання ультразвукового тиску в промені випромінювача (перетворювача) у водному середовищі [1, 2]. Вимірявши ультразвуковий тиск, можна визначити інші параметри ультразвукового випромінювання, зокрема, його інтенсивність та потужність. Для вимірювання ультразвукового тиску використовують голкові та мембранні гідрофони.

Недоліки

Неодмінною умовою ефективного використання ультразвуку є достатній рівень точності вимірювання його параметрів та простежуваність, відповідність результатів вимірювання до еталонів одиниць системи SI. До 2017 р. в Україні не було ні первинного, ні вторинних еталонів одиниці ультразвукового тиску, що не давало змоги забезпечити простежуваність вимірювання параметрів акустичного виходу УМО.

Мета роботи

Мета роботи – створення державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі в діапазоні частот від 0,5 МГц до 10 МГц та дослідження його метрологічних характеристик.

1. Метод відтворення одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі

Відтворення ультразвукового тиску у водному середовищі здійснюють, визначаючи чутливість гідрофона (коефіцієнта перетворення ультразвукового тиску на напругу). Розглянуто та проаналізовано відомі абсолютні методи калібрування гідрофонів, зокрема такі, як класичний метод взаємності та всі його модифікації, метод оптичної інтерференції, метод, що використовує явище спотворення форми звукової хвилі під час її поширення у воді, метод планарного сканування поперечного перерізу ультразвукового променя випромінювача з відомою акустичною потужністю [3, 4]. За результатами проведеного аналізу вибрано один із методів, які рекомендовано для калібрування гідрофонів в ультразвуковому діапазоні частот стандартом ДСТУ ІЕС 62127-2 [3] – метод взаємності із двома перетворювачами.

Метод взаємності з двома перетворювачами полягає у тому, що гідрофон калібрують у відомому акустичному полі, створеному допоміжним взаємним ультразвуковим перетворювачем.

Допоміжний ультразвуковий перетворювач повинен мати плоску круглу активну поверхню і бути здатним створити акустичне поле, яке за властивостями дуже близьке до поля, теоретично розрахованого для плоского поршневого джерела.

Крім того, допоміжний перетворювач повинен бути взаємним, тобто лінійним, пасивним і оберненим [4]. Обернений перетворювач може працювати як гідрофон і як випромінювач ультразвукового акустичного сигналу. Основною характеристикою гідрофона є його чутливість у вільному полі – відношення напруги холостого ходу гідрофона до звукового тиску у вільному полі плоскої хвилі [5]. Основною характеристикою випромінювача є його передавальна характеристика “за струмом” – відношення звукового тиску в звуковій хвилі до струму на вході випромінювача. Для будь-якої системи, в якій взаємний перетворювач працює як гідрофон і як випромінювач, відношення його чутливості у вільному полі до його передавальної характеристики “за струмом” дорівнює коефіцієнту взаємності. Коефіцієнт взаємності для плоских звукових хвиль є функцією ефективної площі поверхні допоміжного перетворювача та акустичного опору середовища (води) [6].

Визначення чутливості гідрофона методом взаємності з двома перетворювачами відбувається у два етапи.

На першому етапі (див. рис. 1) методом само-взаємності визначають передавальну характеристику допоміжного ультразвукового перетворювача УП. Випромінений допоміжним ультразвуковим перетворювачем акустичний сигнал відбивається від рефлектора Р, встановленого перпендикулярно до осі випромінювання перетворювача, і потрапляє на УП, що тепер працює у режимі приймання акустичного сигналу. На виході допоміжного перетворювача вимірюють напругу U_1 , що виникає під дією відбитого ультразвукового сигналу, та струм I_1 , який протікає через перетворювач під час випромінювання.

На другому етапі вимірювання гідрофон розміщують в акустичному полі допоміжного перетворювача УП (див. рис. 1). Струм збудження УП на першому і на другому етапах вимірювання залишається незмінним і дорівнює I_1 . Вимірюють напругу U_2 , що виникає на виході гідрофона під дією створених допоміжним перетворювачем ультразвукових коливань.

Під час вимірювань гідрофон повинен перебувати у вільному полі, тобто в звуковому полі, де вплив відбитих сигналів нехтовно малий. Гідрофон повинен бути розміщений на такій вимірвальній відстані від поверхні допоміжного перетворювача, яка в три рази перевищує протяжність ближнього поля допоміжного перетворювача. Вимірвальну відстань d між допоміжним перетворювачем та гідрофоном розраховують для кожної частоти вимірювання за формулою:

$$d = 3 \cdot N = 3 \cdot \frac{a^2}{\lambda}, \quad (1)$$

де N – протяжність ближнього поля допоміжного перетворювача, м; λ – довжина звукової хвилі у воді на частоті вимірювання, м; a – ефективний радіус допоміжного перетворювача на частоті вимірювання, м.

Відстань, яку проходить ультразвуковий пучок на першому і на другому етапах, має бути однаковою, тому геометрична відстань між УП та рефлектором на першому етапі вимірювання повинна становити $\frac{1}{2}$ розрахованого значення вимірювальної відстані d , для того, щоб довжина шляху, який проходить ультразвуковий пучок від УП до рефлектора і назад, дорівнювала d . Вимірювальну відстань контролюють, вимірюючи час затримки прийнятого ультразвукового сигналу відносно випроміненого сигналу.

Чутливість гідрофона визначають за формулою:

$$M = \frac{U_2}{\sqrt{U_1 k_{U1} I_1}} \cdot \sqrt{\frac{2\pi a^2 G_1}{\rho c r}} \cdot \frac{e^{ad}}{G_2}, \quad (2)$$

де U_1 – напруга на виході допоміжного перетворювача УП у режимі приймання, В; U_2 – напруга на виході гідрофона, В; I_1 – струм, що протікає через допоміжний перетворювач УП у режимі випромінювання, А; k_{U1} – множник для напруги U_1 , що приводить її до еквівалентної напруги розімкненого кола (холостого ходу); G_1 – поправка, яка враховує дифракційні втрати під час випромінювання і приймання відбитого сигналу під час визначення передавальної характеристики УП методом самовзаємності; G_2 – поправка, яка враховує дифракційні втрати під час визначення чутливості гідрофона, що

міститься в полі УП; α – коефіцієнт згасання амплітуди ультразвуку в чистій дегазованій воді (залежить від температури води та частоти сигналу), 1/м; f – частота, Гц; d – вимірювальна відстань (довжина акустичного шляху між УП та гідрофоном), м; r – коефіцієнт відбивання для границі рефлектор-вода, дорівнює 0,9681 [4]; a – радіус допоміжного перетворювача, м; ρ – густина води, кг/м³; c – швидкість звуку у воді, м/с.

Усі вимірювання електричних сигналів U_1 , U_2 , I_1 виконують у імпульсному режимі за допомогою цифрового осцилографа, укомплектованого струмовим пробником. Мінімальну кількість періодів синусоїдального сигналу в імпульсі розраховують за формулою:

$$n = \frac{D}{\lambda}, \quad (3)$$

де D – діаметр допоміжного перетворювача, м.

Вимірювання необхідно виконувати за умови суміщення акустичних осей випромінювача та гідрофона, виявивши максимум напруги сигналу на виході гідрофона. Напругу на виході УП, створену відбитим від рефлектора сигналом, треба вимірювати, встановивши випромінювальну поверхню УП паралельно до поверхні рефлектора.

2. Склад еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі

Для реалізації вибраного методу відтворення одиниці ультразвукового тиску розроблено функціональну схему еталона, подану на рис. 2.

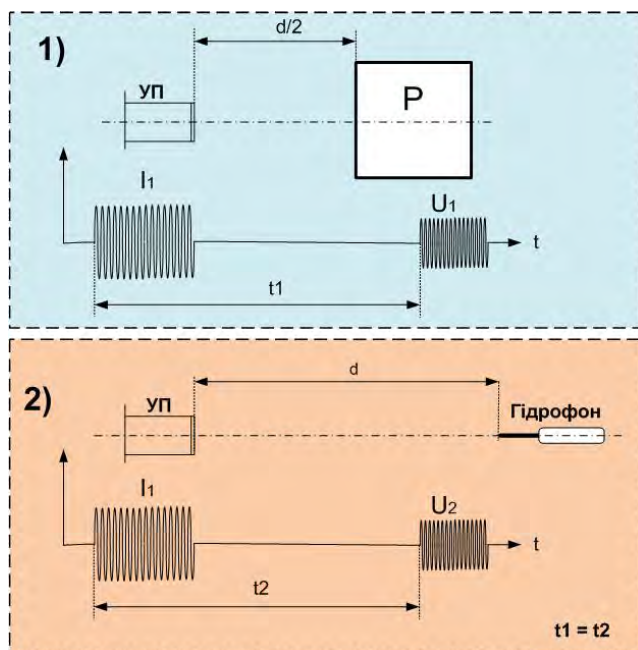


Рис. 1. Визначення чутливості гідрофона методом взаємності із двома перетворювачами: Р – рефлектор, УП – допоміжний перетворювач, t_1 , t_2 – час між випроміненим і прийнятим сигналом на першому і другому етапі вимірювання, який пропорційний до вимірювальної відстані d

Fig. 1. Determination of the hydrophone sensitivity by the method of reciprocity with two transducers: P is the reflector, UP is an auxiliary converter; t_1 , t_2 are the durations between the emitted and received signal at the first and the second measurement stages, proportional to the measuring distance d

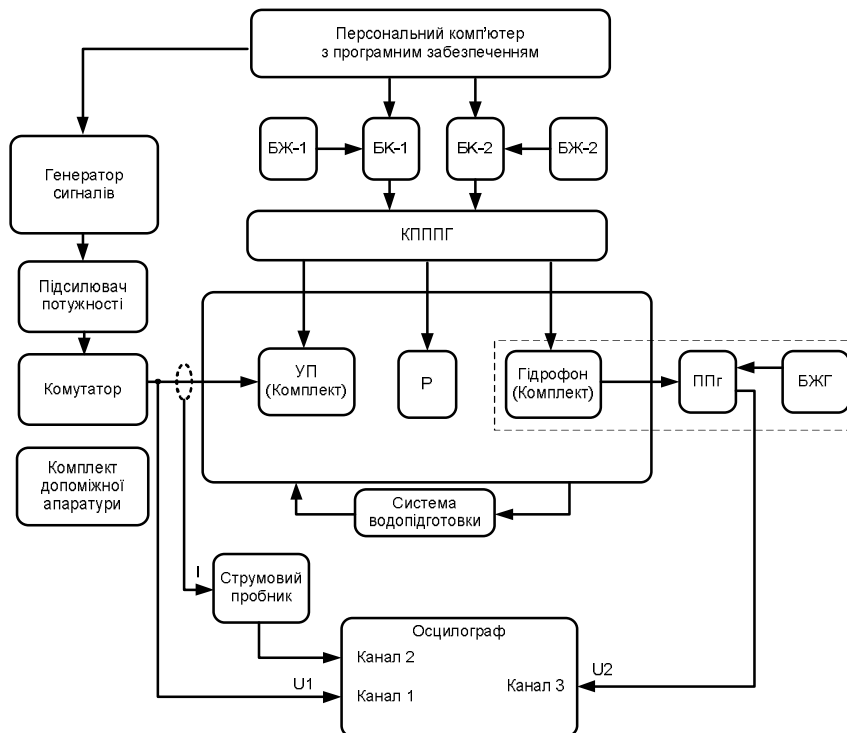


Рис. 2. Функціональна схема еталона: КППГГ – координатно-поворотний пристрій позиціонування гідрофонів; БЖ-1, БЖ-2 – блоки живлення; БК-1 та БК-2 – блоки керування; БЖГ – блок живлення гідрофона; ППг – попередній підсилювач гідрофона; УП – ультразвуковий перетворювач; Р – рефлектор

Fig. 2. Functional scheme of the standard: КППГГ is the coordinate-rotary device of positioning of hydrophones; БЖ-1, БЖ-2 are the power supplies; БК-1 and БК-2 are the control units; БЖГ is the hydrophone power supply; ППг is the pre-amplifier of the hydrophone; УП is the ultrasonic transducer; Р is the reflector



Рис. 3. Державний первинний еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі

Fig. 3. State primary standard of the unit of ultrasonic pressure in the aqueous medium

Основними елементами еталона є:

- координатно-поворотний пристрій позиціонування гідрофонів КПППГ, який забезпечує розміщення гідрофона, допоміжного ультразвукового перетворювача та рефлектора на заданих відстанях один від одного у вимірювальному середовищі та взаємне орієнтування перетворювача і гідрофона з метою суміщення акустичних осей під час вимірювання,

- випромінювальний тракт, який складається із генератора сигналів, підсилювача потужності та допоміжного ультразвукового перетворювача;

- вимірювальний тракт, основними складовими якого є гідрофон з попереднім підсилювачем та цифровим осцилографом зі струмовим пробником;

- рефлектор для калібрування допоміжного перетворювача методом самовзаємності;

- персональний комп'ютер зі спеціальним програмним забезпеченням для керування КПППГ та розрахунку дифракційних поправок G_2 та G_1 .

Загальний вигляд державного первинного еталона одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі подано на рис. 3.

Для вимірювання ультразвукового тиску у водному середовищі необхідно використовувати спеціально підготовлену воду, яка повинна мати такі параметри: вміст кисню у воді не повинен перевищувати 4 мг/л, провідність води має бути на рівні 5 мкСм/см. Тому створено систему підготовки води, яка дає змогу отримати воду із зазначеними параметрами за рахунок її очищення та вакуумування. Система підготовки води входить до складу еталона.

3. Метрологічні властивості еталона

Експериментальні дослідження еталона виконано відповідно до розробленої методики. Під час дослідження визначали чутливість голкових гідрофонів, що входять до складу еталона. Безпосередньо вимірювали електричні параметри (див. формулу (2)), зокрема напругу на виході допоміжного перетворювача УП у режимі приймання U_1 , напругу на виході гідрофона U_2 та струм, що протікає через допоміжний перетворювач УП в режимі випромінювання I_1 . За допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми розраховували поправки на

дифракційні втрати G_1 і G_2 та коефіцієнт загасання ультразвуку. Інші величини, що входять до формули розрахунку чутливості гідрофона, взято з довідників та стандартів. Під час вимірювання контролювали умови довкілля та параметри вимірювального середовища – температуру води, вміст кисню у воді та провідність води. Характеристики непевності (невизначеності) визначено відповідно до [7].

За результатами дослідження встановлено, що державний первинний еталон одиниці ультразвукового тиску має такі характеристики:

- робочий діапазон частот від 0,5 МГц до 10 МГц;

- діапазон значень тиску, в якому відтворюється одиниця ультразвукового тиску, становить від 10 кПа до 100 кПа;

- розширена непевність U не перевищує 18,0 % (за коефіцієнта охоплення $k = 2$ та довірчої ймовірності $P=0,95$), зокрема стандартна непевність за типом А: $u_A=5,8$ %; за типом В: $u_B=6,6$ %; сумарна стандартна непевність: $u_c= 8,8$ %.

Порівняння метрологічних характеристик створеного еталона з аналогічними національними еталонами інших країн, які розміщені на сайті Міжнародного бюро мір та ваг www.bipm.org (див. таблицю) показує, що державний первинний еталон ультразвукового тиску у водному середовищі відповідає рівню національних еталонів інших країн.

Висновок

У 2015–2017 рр. створено державний первинний еталон одиниці ультразвукового тиску у водному середовищі, що дає змогу забезпечити в Україні єдність та простежуваність вимірювань ультразвукового тиску у водному середовищі до одиниць SI, та досліджено його метрологічні характеристики.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу науково-дослідного відділу методів та засобів еталонних вимірювань ДП НДІ “Система” за плідну працю та відданість справі під час розроблення, виготовлення та дослідження характеристик еталона.

Порівняння метрологічних характеристик еталона з аналогічними національними еталонами інших країн

Comparison of metrological characteristics of the standard with similar national standards of other countries

Країна	Національний метрологічний інститут	Діапазон частот, МГц	Розширена непевність, % $U (k = 2)$
Німеччина	PTB	від 0,5 до 15	10
Великобританія	NPL	від 1,0 до 20	11
Росія	ВНПФТРІ	від 0,5 до 10	20
Україна	ДП НДІ “Система”	від 0,5 до 10	18

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність будь-якого фінансового або іншого можливого конфлікту, що стосується роботи.

Список літератури

[1] IEC 61157:2007 Типові засоби для забезпечення акустичного виходу медичного діагностичного ультразвукового обладнання, Київ, Україна, 2007. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/4621>

[2] ДСТУ ІЕС 61689:2018 Ультразвук. Фізіотерапевтичні системи. Характеристики вихідного поля та методи вимірювання в діапазоні частот від 0,5 МГц до 5 МГц (ІЕС 61689:2013, ІДТ). Київ, Україна, 2018 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79972

[3] ДСТУ ІЕС 62127-2:2009 Ультразвук. Гідрофони. Частина 2. Калібрування для ультразвукових полів частотою до 40 МГц включно [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://document.ua/ultrazvuk_gidrofoni_chastina-2_kalibruvannja-dlja-ultrazv-std8871.html

[4] ГОСТ 8.555-91 (ІЕС 866-87) Характеристики и градуировка гидрофонов для работы в частотном диапазоне от 0,5 до 15 МГц. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://docs.cntd.ru/document/1200014699>

[5] ДСТУ ІЕС 62127-1:2009 Ультразвук. Гідрофони. Частина 1. Вимірювання і характеристики ультразвукових полів у медицині частотою до 40 МГц (ІЕС 62127-1:2007, ІДТ). [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=78989

[6] R. Bober, Underwater Electroacoustic Measurements. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.amazon.com/Underwater-Electroacoustic-Measurements-R-Bobber/dp/0932146198>

[7] ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування “Руководства по выражению неопределенности измерений: (РМГ 43:2001 ІДТ). [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77097

References

[1] IEC 61157 :2007 Standard means for the reporting of the acoustic output of medical diagnostic ultrasonic equipment. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/4621>

[2] IEC 61689:2013 Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/5722>

[3] IEC 62127-2:2009 Ultrasonics – Hydrophones – Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz. [Online]. Available: https://infostore.saiglobal.com/en-gb/Standards/IEC-62127-2-1-2-564956_SAIG_IEC_IEC_1288934/

[4] GOST 8.555-91 (IEC 866-87) Characteristics and graduation of hydrophones for operation in the frequency range from 0.5 to 15 MHz. [Online]. Available: <http://docs.cntd.ru/document/1200014699>

[5] DSTU IEC 62127-1:2009 Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz (IEC 62127-1:2007, IDT). [Online]. Available: https://infostore.saiglobal.com/en-gb/Standards/IEC-62127-1-1-1-564955_SAIG_IEC_IEC_1288931/

[6] R. Bober, Underwater Electroacoustic Measurements. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Underwater-Electroacoustic-Measurements-R-Bobber/dp/0932146198>

[7] DSTU-N RMG 43:2006 Metrology. Application of the “Uncertainty Measurement Guidelines” (RMG 43:2001 IDT). [Online]. Available: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77097