

УДК 534.6:534-8

**ЭТАПОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МОЩНОСТИ
УЛЬТРАЗВУКА В ВОДЕ ЭИМУ-3****С.И. Кузнецов***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
sergantex@vniiftri.ru*

Аннотация. В рамках проведения работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169 был разработан и введён в эксплуатацию эталонный измеритель мощности ультразвука в воде ЭИМУ-3, использующий гравитационный метод уравнивания радиационной силы ультразвуковой волны, падающей на поглощающую ультразвук мишень, подвешенную к прецизионным электронным весам и находящуюся в воде. Применение этого метода измерений позволило снизить границу динамического диапазона воспроизведения и передачи единицы мощности ультразвука с 5 до 1 мВт, а также расширить частотный диапазон воспроизведения и передачи с 12 до 20 МГц. Приведены метрологические характеристики измерителя и обоснован бюджет неопределённостей измерений.

Ключевые слова: мощность ультразвука, неисключённая систематическая погрешность, неопределённость измерений, поглощающая мишень, радиационная сила, среднеквадратическое отклонение, ультразвуковой пучок.

**REFERENCE POWER METER
FOR ULTRASOUND BEAM IN WATER EIMU-3****S.I. Kuznetsov***FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
sergantex@vniiftri.ru*

Abstract. As part of the work to improve the state primary standard of an ultrasonic power unit in water GET 169 a reference meter of ultrasound power in water EIMU-3 was developed and put into operation, using the gravitational method of balancing the radiation force of the ultrasonic wave incident on the absorbing ultrasound target, suspended from precision electronic balance and located in the water. The application of this measurement method was allowed to reduce the dynamic range of reproduction and transmission unit of ultrasound power from 5 to 1 mW, as well as to expand the frequency range of reproduction and transmission from 12 to 20 MHz. Metrological characteristics of the meter are given and the budget of measurement uncertainties is justified.

Keywords: ultrasound power, non-exceptional systematic measurement error, measurement uncertainty, absorbing target, radiating force, standard deviation, ultrasound beam.

Обоснование необходимости совершенствования эталона ГЭТ 169-2005

Ультразвуковые воздействия находят всё более широкое применение в здравоохранении — для диагностики и лечения. По данным Международного бюро по мерам и весам [1] в мире используются около 250 000 приборов ультразвуковой диагностики и ежегодно проводятся около 250 миллионов

обследований. Развитие новых высокоэффективных методов формирования акустического отображения привело к расширению спектра ультразвуковых диагностических сигналов в сторону высоких частот (до 20 МГц и более) при одновременном снижении дозы облучения пациента. Для оценки эффективности и безопасности применения ультразвуковых воздействий необходим контроль параметров акустического выхода используемого ультразвукового медицинского оборудования, основными измеряемыми величинами которого являются ультразвуковая мощность и акустическое давление.

В стратегических планах [2] Консультативного комитета по акустике, ультразвуку и вибрациям (ССАUV) Международного комитета по мерам и весам запланированы очередные сличения в области измерений мощности ультразвука с возможным увеличением сличаемых её значений до 200–300 Вт (2023 г.) и калибровок гидрофонов в диапазоне частот до 20 (или даже до 40) МГц (2024 г.), что свидетельствует о постоянном интересе их участников в подтверждении своих измерительных и калибровочных возможностей.

Оценивая эти планы, невозможно ошибиться в тренде развития такого важного для здравоохранения вида измерений, как измерение полной мощности ультразвукового пучка, которая в диагностических применениях может составлять единицы милливатт на частотах до 20 МГц и выше, а в современной терапии сфокусированным ультразвуком — сотни ватт в диапазоне частот от 0,5 до 5 МГц. Именно на эти ориентиры было обращено внимание при составлении технического задания на совершенствование Государственного первичного эталона единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2005, обеспечивающего воспроизведение единицы мощности в интервале от 5 мВт до 12 Вт и диапазоне частот от 0,5 до 12 МГц [3]. На этом эталоне, созданном 15 лет назад, были получены хорошие результаты в последних ключевых сличениях [4], но условиям будущих сличений, планируемых Международным комитетом по мерам и весам, он, вероятно, не будет соответствовать.

Особенности конструкции эталонного измерителя мощности ультразвука в воде ЭИМУ-3

Из этих соображений в состав усовершенствованного эталона был включён эталонный измеритель мощности ультразвука ЭИМУ-3, позволивший существенно снизить нижнюю границу динамического диапазона воспроизведения единицы мощности (с 5 до 1 мВт) и раздвинуть частотный диапазон её воспроизведения с 12 до 20 МГц.

В ЭИМУ-3 применён метод гравитационного уравнивания радиационной силы ультразвукового пучка с помощью прецизионных электронных весов и поглощающей ультразвук мишени, рекомендованный стандартом Международной электротехнической комиссии [5] и нашим национальным

стандартом [6]. В этих стандартах предложены 7 вариантов компоновки устройства для измерения радиационной силы с помощью весов. Анализ преимуществ и недостатков каждого из этих вариантов позволил выбрать наиболее приемлемый из них для реализации в совершенствуемом государственном эталоне — вариант Е с верхним расположением весов и подвешенной к ним поглощающей мишени (рис. 1). При этом измеряемый преобразователь погружён в воду над поглощающей мишенью.

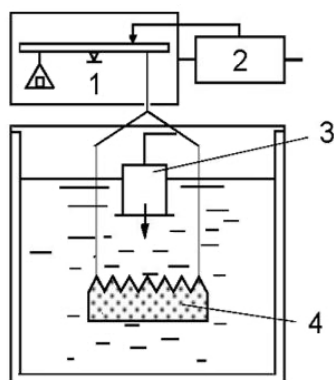


Рис. 1. Компоновка Е-измерителя мощности ультразвука с поглощающей мишенью (ГОСТ Р МЭК 61161): 1 — весы; 2 — пульт управления весами; 3 — преобразователь; 4 — мишень

Одним из существенных преимуществ использования поглощающей мишени в выбранной компоновке является возможность измерения полной мощности ультразвукового поля не только в коллимированных, но и в расходящихся или сфокусированных пучках, что подробно рассмотрено в указанных выше стандартах. Поперечный размер мишени должен быть достаточно большим, чтобы перекрыть всю значимую часть поля, а именно чтобы измеряемая радиационная сила была не меньше 98 % (рекомендации стандартов [5] и [6]) радиационной силы F , воздействующей на мишень бесконечных поперечных размеров и пропорциональной полной мощности P ультразвукового пучка:

$$P = c \cdot F, \quad (1)$$

где c — скорость звука в воде.

Учитывая допускаемую близость (5 мм и менее) расположения мишени к измеряемому преобразователю и его типичные размеры (диаметр не более 40 мм), предполагается достаточным, чтобы диаметр мишени был не менее 70 мм.

Конструкция измерителя представляет из себя жёсткий сварной каркас из стальных труб, обеспечивающий устойчивость конструкции. В качестве опоры для весового модуля была выбрана гранитная плита толщиной 10 см. Каменное основание — достаточно распространённое решение нивелирования ферромагнитного влияния на показания полумикровесов, кроме того, оно имеет

существенную массу, увеличивая виброзащищённость конструкции. Между каркасом и каменным основанием проложена демпферная виброизоляционная лента из полимера Vibroflex. Через отверстие в каменной плите к подвесному крюку весового модуля измерителя подвешивается поглощающая мишень. Измерительный бак установлен под весовым модулем так, чтобы мишень была погружена в него на 70–80 мм. Основание под баком также выполнено из сварного стального каркаса и каменной плиты с виброизоляцией. Для точной юстировки излучателя измеритель оснащён 3-координатным позиционером. Схематичное и реальное изображения измерителя приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

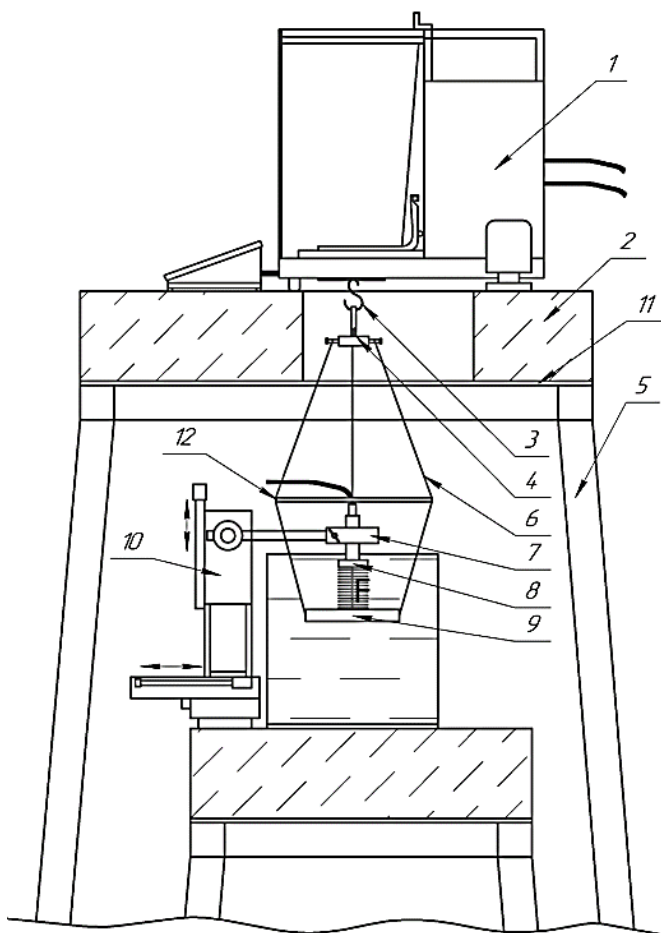


Рис. 2. Эталонный измеритель мощности ультразвука в воде ЭИМУ-3:
1 — аналитические весы Mettler Toledo XS105 DU; 2 — гранитная плита;
3 — подвесной крюк; 4 — регулятор глубины погружения мишени; 5 — стойка;
6 — нейлоновая леска; 7 — держатель; 8 — излучатель; 9 — мишень;
10 — позиционер; 11 — поглотитель вибраций; 12 — алюминиевый обруч



Рис. 3. Эталонный измеритель мощности ультразвука в воде ЭИМУ-3

О расширении динамического диапазона воспроизведения и передачи размера единицы мощности

Потенциальные возможности весов (разрешение 0,01 мг, что по формуле (1) соответствует мощности ультразвукового излучения 0,146 мВт) допускают снижение границы динамического диапазона воспроизведения единицы мощности ультразвука, по крайней мере, до 1 мВт, но при этом необходимо удостовериться в линейности отклика весов на такие малые воздействия. В связи с тем, что минимальная масса эталонных гирь составляет 1 мг [7], воспользоваться стандартными процедурами проверки линейности отклика весов с их помощью невозможно. При этом в качестве гирь использованы никелевые проволоочки диаметром 0,1 мм и длиной $(1 \pm 0,011)$ мм. Масса каждой из них составляла $(0,070 \pm 0,00075)$ мг, что соответствует мощности ультразвука около 1 мВт. Такие «контрольные» гири, конечно, не соответствуют жёстким требованиям стандарта [7], но пригодны для относительных измерений с целью оценки линейности отклика весов в самой нижней части их динамического диапазона. Пошаговое нагружение чашки весов «контрольными» гирями (от 1 до 15), повторённое 5 раз, подтвердило линейность показаний весов от количества нагруженных гирь (проволочек) в диапазоне от 1 до 15 мВт со средним квадратическим отклонением от коэффициента линейности, не превышающим 3 %. Однако многократное ($n = 5$) нагружение весов одной, двумя или тремя гирьками, т.е. повторные измерения одной и той же массы в пределах от 0,07 до 0,21 мг, сопровождается существенно большим СКО (от 8 до 4 %), что приводит к выводу о нецелесообразности «прямых» измерений мощности в диапазоне нескольких милливатт. Для обеспечения требуемой точности измерений с $\text{СКО} \leq 3 \%$ следует проводить измерения мощности не при

одном значении напряжения излучателя, а для нескольких его значений, соответствующих диапазону мощностей от 1 до 15–20 мВт, аппроксимируя полученные результаты квадратичной зависимостью измеряемой мощности от квадрата напряжения излучателя и приписывая ему значения выходной мощности при каждом заданном напряжении. Такая процедура актуальна как при воспроизведении, так и при передаче единицы величины с применением эталонных преобразователей, калибруемых по излучательной способности (отношение выходной мощности ультразвука к квадрату эффективного значения возбуждающего электрического напряжения) на заданной частоте.

При мощности воздействующего на мишень ультразвукового излучения свыше 10 Вт в процессе измерений могут возникать некоторые трудности. Так, при малейшем нарушении соосности мишени и излучателя такое воздействие может начать крутить мишень в горизонтальной плоскости, что приведёт к касанию лески и держателя излучателя. Даже если касания этих деталей не происходит, периодические движения мишени, вызванные акустическими течениями, сильно влияют на показания весов. На рис. 4 (а) изображена целая мишень измерителя, а на рис. 4 (б) — мишень после поглощения воздействия излучения высокой интенсивности (свыше 5 Вт на см²), что привело к её частичному разрушению.



Рис. 4. Фото мишеней из поглощающего материала НАМ-А:
целая мишень измерителя (а); повреждённая мишень измерителя (б)

Основной проблемой для измерителей с поглощающими мишенями является нагрев среды распространения ультразвукового пучка, вследствие чего поглощающий материал может быть частично или полностью разрушен. Поэтому при измерениях высокоинтенсивных излучений следует ограничивать выходную мощность исследуемых излучателей.

О расширении частотного диапазона воспроизведения и передачи размера единицы мощности

Основной проблемой при создании эталонного измерителя ЭИМУ-3 был выбор материала мишени, которая в соответствии с [6] должна поглощать не менее 99 % проникающей в неё ультразвуковой энергии при коэффициенте отражения (по амплитуде давления) не более 3,5 %. Наиболее соответствующим этим требованиям оказался полиуретановый (с наполнителем из пластиковых микросфер) материал НАМ А, разработанный в Национальной физической лаборатории (Великобритания) [8] и выпускаемый фирмой Precision Acoustics Ltd (Великобритания). Уникальность акустических свойств этого материала оценили и использовали в своих первичных эталонах единицы мощности многие национальные метрологические институты зарубежных стран [4]. На рис. 5 и 6 с данными производителя [8] показаны частотные характеристики амплитудных потерь ультразвуковой волны при её отражении ER от материала НАМ А и при её прохождении IL через лист НАМ А толщиной 14 мм, представленных как:

$$ER = -20 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right), \quad IL = -20 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_i} \right),$$

где P_r , P_t и P_i — амплитуды акустического давления в отражённой, прошедшей через материал и падающей на него ультразвуковой волны соответственно. Частотная зависимость доли энергии ультразвукового пучка, прошедшей через НАМ А (толщиной 14 мм), с учётом потерь на её отражение, рассчитанная как:

$$FPD = 1 - \left(\frac{P_r}{P_i} \right)^2 - \left(\frac{P_t}{P_i} \right)^2,$$

представлена на рис. 7. Результаты сравнительных измерений, проведённых нами методом растрового сканирования поля акустических давлений ультразвукового преобразователя на частотах 0,5–3 МГц за поглотителем НАМ А и в его отсутствии с использованием автоматизированной установки УИИ, подтвердили акустические характеристики поглощающего материала НАМ А, заявленные его изготовителем [8] и представленные на рис. 5 и 6.

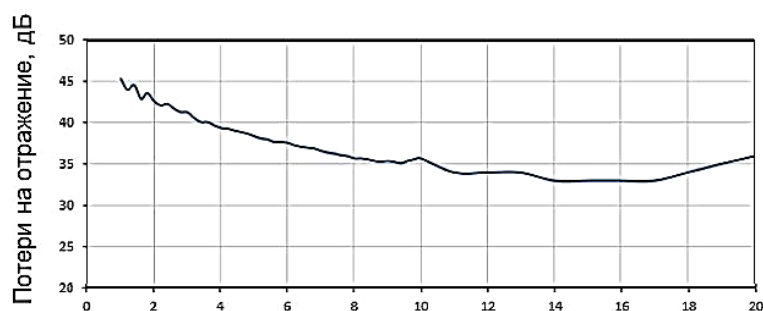


Рис. 5. Частотная зависимость потерь на отражение материала НАМ А

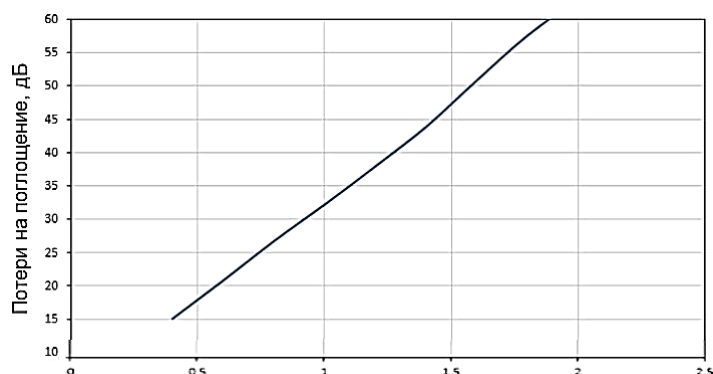


Рис. 6. Частотная зависимость потерь на поглощение материала НАМ А

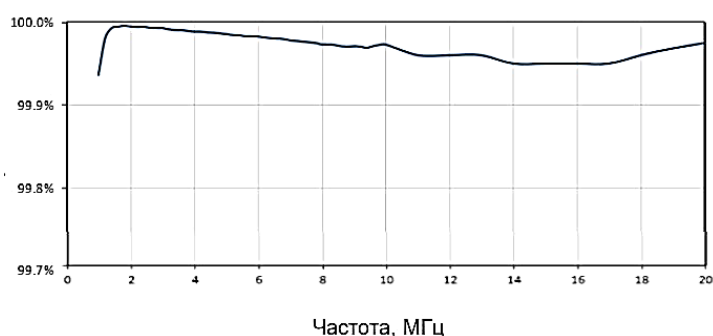


Рис. 7. Частотная зависимость доли энергии, прошедшей через НАМ А (толщиной 14 мм), с учётом потерь на её отражение

Таким образом, использование мишени из поглощающего материала НАМ А обеспечило высокую точность воспроизведения на ЭИМУ-3 единицы мощности ультразвука в диапазоне частот от 1 до 20 МГц. Измерения на частотах от 0,5 до 1 МГц требуют введения поправки на несовершенство поглощающей мишени и её учёта в качестве дополнительного источника неопределённости. Однако измерения в этом поддиапазоне целесообразно проводить на эталонных измерителях ЭИМУ-1 и/или ЭИМУ-2 с отражающей мишенью, где такую поправку вводить не нужно.

Результаты сравнительных измерений, проведённых методом растрового сканирования поля акустических давлений ультразвукового преобразователя на частотах 0,5–3 МГц за поглотителем НАМ А и в его отсутствии, а также при сканировании отражённого от поглотителя сигнала с использованием автоматизированной установки УИИ и высокочастотного (0,5–20 МГц) гидрофона зондового типа, уточнили акустические характеристики поглощающего материала НАМ А. На рис. 8 показаны частотные зависимости доли энергии (в процентах), поглощённой материалом НАМ А, с учётом отражений ультразвуковой волны и её прохождения через материал, измеренной во ВНИИФТРИ

(пунктирная линия) и сообщаемой производителем (РА — сплошная линия) [8]. Как видно из рисунка, доля неучтённой энергии даже на частоте 0,5 МГц не превышает 1,5 %.

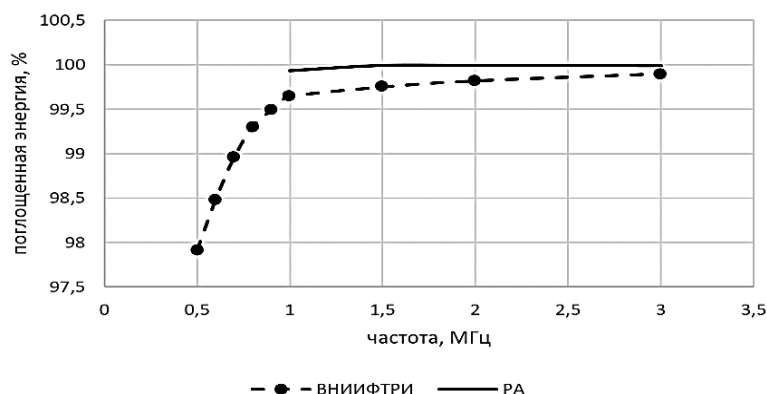


Рис. 8. Частотные зависимости доли поглощённой НАМ А энергии ультразвукового пучка, измеренной ВНИИФТРИ и сообщаемой производителем (РА)

Метрологические характеристики измерителя и бюджет неопределённости измерений

Проведённые исследования метрологических характеристик эталона при воспроизведении единицы мощности ультразвука в воде и результаты его аттестации свидетельствуют о соответствии полученных результатов требованиям, установленным в техническом задании на совершенствование эталона. Государственный первичный эталон единицы мощности ультразвука в воде имеет следующие метрологические характеристики.

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы мощности ультразвука со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим 3 % при 10 независимых измерениях.

Границы неисклѳченной систематической погрешности измерений при воспроизведении единицы мощности ультразвука в воде (при доверительной вероятности $P = 0,99$) эталонного измерителя ЭИМУ-3 не превышают:

$$\pm [0,05 + (0,5/P)] \times 100 \%,$$

где P — измеренное значение мощности, мВт.

Стандартная неопределѳнность измерений при воспроизведении мощности ультразвука:

- оценѳнная по типу А составляет от 0,5 до 1,5 %;
- оценѳнная по типу В составляет от 1 до 3,5 %.

Суммарная стандартная неопределѳнность измерений при воспроизведении мощности ультразвука составляет от 1,7 до 3,9 %.

Расширенная неопределённость измерений при воспроизведении мощности ультразвука составляет от 3,5 до 7,9 % при коэффициенте охвата $k = 2$.

В процессе исследования измерителя ЭИМУ-3 были определены основные источники неопределённости измерений (по типу В) при передаче единицы мощности ультразвука:

1. Неопределённость измерения массы мишени весами — Θ_1 .
2. Неопределённость отсчёта весов из-за инерционности их отклика на включение измеряемого сигнала — Θ_2 .
3. Несовершенство материала поглощающей мишени — Θ_3 .
4. Влияние поперечных размеров мишени — Θ_4 .
5. Влияние неточности установки преобразователя — Θ_5 .
6. Влияние температуры на скорость звука в воде — Θ_6 .
7. Влияние затухания ультразвуковой волны в воде — Θ_7 .
8. Влияние акустических течений — Θ_8 .
9. Влияние отклонений структуры ультразвукового поля от плосковолнового приближения — Θ_9 .

Для каждого источника неопределённости была определена степень его влияния на результат измерений.

Весовой модуль измерителя мощности ультразвука является важнейшим компонентом установки. Заявленная производителем нелинейность измерений не превышает 0,2 мг [9], но в результате исследований выяснилось, что действительная нелинейность измерений в диапазоне измерений от 10 мг до 1 г не превышает 0,02 мг, а основной вклад в среднее значение нелинейности вносят измерения этого показателя при взвешивании гирь массой менее 10 мг. Таким образом, при измерениях мощности прямым методом от 20 мВт до 10 Вт вклад нелинейности весов в суммарную неопределённость измерений не превышает 0,5%.

Неопределённость отсчёта весов из-за инерционности их отклика на включение измеряемого сигнала возникает из-за того, что весы не способны определить действительную массу мишени мгновенно. При использовании компьютерной программы для сбора измерительных данных с весов и математической обработки этих данных можно вычислить действующее значение массы мишени на момент включения акустического преобразователя. Для измерения мощности от 30 до 5000 мВт неопределённость, связанная с инерционностью весов, не превышает 0,1 %, а для диапазона от 5000 до 10000 мВт это значение не превышает 0,2 %.

В результате исследований было выяснено, что неопределённость, связанная с несовершенством мишени, не превышает 1,5 % на частотах от 500 кГц до 2 МГц и не превышает 0,2 % на частотах выше 2 МГц.

Влияние поперечных размеров мишени связано с тем, что поле, излучаемое преобразователем, может иметь паразитные акустические лепестки, из-за которых мишень может не улавливать весь акустический сигнал излучателей. Так как мишень располагают относительно близко (обычно около 5–10 мм) от

ультразвукового преобразователя, то достаточно выполнить рекомендацию [3] (диаметр мишени должен составлять не менее 1,5 диаметров измеряемого преобразователя), чтобы связанная с этим источником неопределённость не превышала 1 %. Экспериментально источник этой неопределённости проверяли детальным сканированием ультразвукового поля в поперечном сечении ультразвукового пучка высокочастотным гидрофоном на автоматизированной установке по [10]. Было подтверждено, что для эталонных преобразователей вклад неучтённой доли ультразвукового пучка не превышает 0,1 %.

Влияние неточности установки преобразователя проявляется следующим образом. Если преобразователь круглый (что, как правило, имеет место для эталонных измерений), то идеальной является такая его установка над круглой мишенью, когда оси преобразователя и мишени совпадают. Поперечное смещение преобразователя относительно поглощающей мишени (т.е. их оси остаются параллельными), радиус которой больше радиуса преобразователя, не сказывается на результатах измерений радиационной силы. Наклон преобразователя относительно мишени уменьшает проекцию радиационной силы пропорционально косинусу угла α между осями, что для реально достижимых $\alpha \leq 5^\circ$ уменьшает радиационную силу не более чем на 0,4 %.

Влияние температуры на скорость звука в воде. Учёт температурной зависимости скорости звука в воде, непосредственно входящей в уравнение измерений, является неременным условием проведения точных измерений ультразвуковой мощности. При этом важно знать не только температуру воды перед началом измерений, но и в процессе их проведения, так как мощность более 1 Вт может привести к существенному нагреванию воды. Измерение температуры воды с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$ и введение поправки на скорость звука, найденной, например, из [11], приводит к неопределённости измерения мощности, не превышающей $\pm 0,2\%$.

Влияние затухания ультразвуковой волны в воде связано с тем обстоятельством, что значение мощности, вычисленное по результатам измерений радиационной силы, относится к положению мишени на определённом осевом расстоянии от ультразвукового преобразователя. Однако для эталонного преобразователя необходимо определить его излучающую способность G как отношение мощности ультразвукового пучка, приведённой к поверхности ультразвукового преобразователя, к квадрату электрического напряжения на его входе. Но для такого пересчёта необходимо оценить влияние затухания ультразвуковой волны в воде и акустических течений вдоль пути её свободного распространения к фронтальной стороне мишени. Для учёта затухания делают поправку в виде экспоненциального коэффициента $\exp(2 \cdot \alpha \cdot z)$, где z — расстояние между мишенью и ультразвуковым преобразователем, а α — амплитудный коэффициент затухания плоских волн. Значение α в мегагерцовом диапазоне частот пропорционально квадрату частоты f^2 и выражается, например, как [3]:

$$\alpha/f^2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ МГц}^{-2} \cdot \text{см}^{-1} \text{ для чистой воды при } 23^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Эта формула предполагает отсутствие нелинейных искажений, а также добавочных сил на мишень, вызванных акустическими течениями. Для поглощающей мишени при известных идеальных условиях эффекты затухания и акустического течения компенсируют друг друга, а значит, и не нужно вводить поправку [6]. Поведение реальных мишеней лежит где-то между этими двумя базовыми моделями [6]. Поэтому рекомендуется рассматривать размах неопределённостей равным разнице между некорректированным значением измеренной мощности и её значением, учитывающим затухание. Этот вклад в погрешность зависит от расстояния до мишени и доминирует, когда измерения проводят в диапазоне высоких мегагерцовых частот. Альтернативный метод оценки заключается в измерении мощности как функции расстояния до мишени и экстраполяции результатов к нулевой дистанции посредством алгоритма регрессии, базирующегося на линейной или экспоненциальной зависимости от расстояния. Измеренные значения будут соответствовать этой зависимости с неопределённостью, не превышающей 1 %.

Влияние акустических течений представляют дополнительную прибавку к воздействию радиационной силы. С учётом их частичной или полной компенсации за счёт снижения радиационной силы из-за затухания ультразвуковой волны при её распространении влияние этого источника неопределённости не должно превышать 1 %.

Влияние отклонений структуры ультразвукового поля от плосковолнового приближения, для которого только и корректна формула измерения (1), следует оценивать для каждого преобразователя, подлежащего измерениям мощности методом уравнивания радиационной силы. В [6] утверждается, что структура реального ультразвукового поля круглого несфокусированного преобразователя соответствует чему-то среднему между полем плоских волн и полем, создаваемым круглым плоским поршневым источником. В случае абсолютно поглощающей мишени с бесконечным размером поперечного сечения верны отношения:

— для поля плоских волн

$$\frac{P}{c \cdot F} = 1; \quad (3)$$

— для поля от круглого плоского источника поршневого типа

$$\frac{P}{cF} = \frac{1 - J_1(2ka) / ka}{1 - J_0^2(ka) - J_1^2(ka)}, \quad (4)$$

где k — волновое число; a — радиус преобразователя; J — функция Бесселя.

Плавная кривая, соединяющая максимумы осциллирующей линии, соответствующей выражению (3), описывается выражением:

$$\frac{P}{c \cdot F} = f(k \cdot \alpha) = 1 + \frac{0,6531}{k \cdot \alpha} \left(1 + \frac{1,407}{(k \cdot \alpha)^{\frac{2}{3}}} \right). \quad (5)$$

Таким образом, в соответствии с [9] в результаты вычисления мощности по выражению (4) можно ввести поправочный коэффициент $K = [1 + f \cdot (k \cdot \alpha)] / 2$, нивелирующий эффекты отклонений от плосковолнового приближения. Половина разницы между значениями мощности, полученными из выражений (3) и (4), и будет оценкой этого источника неопределённости, не превышающей, как правило, 1 %.

Перечисленные выше источники неопределённости учитывались при оценке границ неисключённой систематической погрешности воспроизведения единицы мощности, рассчитываемой по формуле:

$$\Theta(P) = \pm 1,4 \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2 + \Theta_3^2 + \Theta_4^2 + \Theta_5^2 + \Theta_6^2 + \Theta_7^2 + \Theta_8^2 + \Theta_9^2}. \quad (6)$$

Оценённые значения границ НСП воспроизведения единицы мощности эталонным измерителем ЭИМУ-3 показаны в таблице.

Таблица

Значения НСП (в %) воспроизведения единицы мощности
эталонным измерителем ЭИМУ-3

Частота, $P_{\text{ном}},$ МГц мВт	1	2	5	10	20
1	5,29	5,2	5,0	5,0	5,0
5	3,34	3,25	3,05	3,05	3,05
10	3,26	3,15	3,0	3,0	3,0
100	3,23	3,1	2,9	2,9	2,9
1000	3,23	3,1	2,9	2,9	2,9
10000	3,23	3,1	2,9	2,9	2,9

Оценённые значения СКО (при $n = 10$) лежат в пределах от 1 до 3 %.

Заключение

Разработка и введение в эксплуатацию в составе усовершенствованного первичного эталона единицы мощности ультразвука в воде новых эталонных измерителей позволили отодвинуть верхнюю границу частотного диапазона воспроизводимых значений мощности до 20 МГц и существенно расширить их динамический диапазон: от 1 мВт до 200 Вт. Расширение частотного диапазона повышает достоверность оценки параметров акустических сигналов, генерируемых современными медицинскими приборами ультразвуковой диагностики (ультразвуковыми сканерами, импульсными доплеровскими системами и др.), а снижение нижнего порога измеряемых значений мощности обеспечивают техническую возможность проведения сертификации ультразвуковых приборов с малой интенсивностью выходного сигнала, таких, например, как датчики частоты сердечных сокращений плода матери (т.н. фетальных

мониторов). Высокий уровень воспроизводимых значений мощности позволит обеспечить единство измерений при испытаниях ультразвуковых аппаратов с фокусированным ультразвуковым полем высокой интенсивности (НІТУ) — чрезвычайно важного направления современной медицины для лечения онкологических заболеваний.

Список литературы

1. Strategy Document for Rolling Program Development for 2013 to 2023. The Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration.
2. Strategy 2017 to 2027 Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound, and Vibration (CCAUV).
3. Еняков А.М. Государственный специальный эталон единицы мощности ультразвука в воде // Измерительная техника. — 2006. — № 3. — С. 3–7.
4. Еняков А.М. Международные ключевые сличения в области измерений мощности ультразвука в воде // Измерительная техника. — 2012. — № 7. — С. 68–73.
5. IEC 61161:2013 Ultrasonics — Power measurement — Radiation force balances and performance requirements.
6. ГОСТ Р МЭК 61161-2019 ГСИ. Мощность ультразвука в жидкостях. Общие требования к выполнению измерений методом уравнивания радиационной силы. — М.: Стандартинформ, 2019.
7. ГОСТ OIML R 111-1-2009 ГСИ. Гири классов E (1), E (2), F (1), F (2), M (1), M (1-2), M (2), M (2-3) и M (3). Часть 1. Метрологические и технические требования. — М.: Стандартинформ, 2012.
8. Technical data sheet Precision acoustics HAM A. — 2000. — P. 2. — URL: <https://www.acoustics.co.uk/wp-content/uploads/2022/03/HAM-A-TDS-V1-0222.pdf>.
9. Mettler Toledo Excellence XS // Mettler-toledo GmbH. — 2004. — P. 95.
10. ГОСТ Р МЭК 62127-1-2015. ГСИ. Параметры ультразвуковых полей. Общие требования к методам измерений и способам описания полей в частотном диапазоне от 0,5 до 40 МГц. — М.: Стандартинформ, 2016.
11. Del Grosso V.A., Mader C.W. Speed of sound in pure water // J. Acoust. Soc. Am. — 1972. — 52. — P. 1442–1446.

Статья поступила в редакцию: 24.06.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 24.06.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.