

Государственный первичный эталон единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019

А. М. Еняков, С. И. Кузнецов, Г. С. Лукин

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: enyakov@vniiftri.ru,
sergantex@vniiftri.ru, lukin@vniiftri.ru*

Приведены результаты работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2005. В результате включения в состав эталона двух новых эталонных измерителей мощности ультразвука расширен частотный и динамический диапазоны воспроизведения и передачи единицы мощности нижестоящим средствам измерений. Для измерения радиационного воздействия ультразвуковой волны и поглощённой ультразвуковой энергии в эталонных измерителях мощности ультразвука использованы поглощающие мишени. Это имеет большое значение для метрологического обеспечения современного высокотехнологичного медицинского ультразвукового оборудования, использующего, в том числе, сфокусированные ультразвуковые пучки высокой интенсивности для лечения онкологических заболеваний. Применённая в Государственном первичном эталоне единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019 автоматизация процесса измерений существенно снизила трудоёмкость поверочных работ и повысила точность измерений.

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

Введение. Ультразвуковые воздействия находят всё более широкое применение в здравоохранении. Приведём выдержку из стратегического плана Консультативного комитета «Акустика. Ультразвук. Вибрации» Международного комитета мер и весов «Strategy Document for Rolling Program Development for 2013 to 2023. The Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration» (Strategic Planning 2013–2015 CCAUV: [Электрон. документ]. URL: <https://www.bipm.org/utis/metrology/pdf/CCAUV-strategy-document.pdf>): «Ультразвук находит широкое применение как в здравоохранении, так и в промышленности. Во всём мире используются около 250 000 приборов ультразвуковой диагностики и ежегодно проводится около 250 миллионов обследований. За последние 15 лет частотный и динамический диапазоны ультразвуковых диагностических сигналов существенно расширены. Появляются новые терапевтические применения ультразвука, поддерживающие медикаментозное лечение, использующие ультразвук высокой мощности или акустическую кавитацию, а также сфокусированный ультразвук высокой интенсивности (HIFU и HITU). Оценка эффективности и безопасности этих ультразвуковых воздействий связана с оценкой дозы облучения, методы определения которой необходимо стандартизировать. При этом основными измеряемыми величинами являются ультразвуковая мощность и акустическое давление».

В стратегических планах Консультативного комитета CCAUV на 2017–2027 гг. (Strategy 2019 to 2029 Consultative

Committee for Acoustics, Ultrasound, and Vibration (CCAUV): [Электрон. документ] URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCAUV-strategy-document.pdf>) запланированы очередные сличения в области измерений мощности ультразвука с возможным увеличением сличаемых значений до 200–300 Вт (2023 г.) и калибровок гидрофонов в диапазоне частот 0,5–20 МГц (или до 40 МГц) (2024 г.), что свидетельствует о постоянном интересе участников сличений в подтверждении измерительных и калибровочных возможностей.

Оценивая эти документы, 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 2–20 МГц и выше, а в современной терапии сфокусированным ультразвуком – сотни ватт в диапазоне частот 0,5–5 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 $5 \cdot 10^{-3}$ –12 Вт и диапазоне частот 0,5–12 МГц [1]. На ГЭТ 169-2005 в последних ключевых сличениях (2009–2012 гг.) получены хорошие результаты [2], но условиям будущих сличений, планируемых Международным комитетом мер и весов, ГЭТ 169-2005 не соответствовал.

Цель работы – описать состав, устройство и метрологические характеристики Государственного первичного эталона

единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019, утверждённого Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 3380 от 27 декабря 2019 г.

Состав ГЭТ 169-2019. Анализ результатов последних сличений привёл к решению о том, что при совершенствовании ГЭТ 169-2005 необходимо оставить в его составе эталонные измерители мощности ультразвука ЭИМУ-1 и ЭИМУ-2 и дополнить состав двумя новыми измерителями ЭИМУ-3 и ЭИМУ-4 с целью расширения динамического диапазона воспроизведения единицы мощности. Входящая в состав ГЭТ 169-2005 установка линейного сканирования с ручным и трудоёмким позиционированием гидрофона для оценки пространственной структуры ультразвукового пучка также нуждалась в модернизации.

Таким образом, в состав ГЭТ 169-2019 включены:

эталонные измерители мощности ультразвука ЭИМУ-1 ($5 \cdot 10^{-3}$ –1 Вт) и ЭИМУ-2 (0,5–12 Вт) [1];

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;

эталонный измеритель мощности ультразвука ЭИМУ-4, позволивший существенно повысить верхнюю границу динамического диапазона воспроизведения единицы мощности (с 12 до 200 Вт);

комплект современных радиоизмерительных приборов и вспомогательного оборудования;

автоматизированная установка измерения интенсивности (УИИ) ультразвукового поля, реализующая его растровое сканирование по трём ортогональным координатам.

Функциональные возможности УИИ:

оценка пространственной структуры ультразвукового поля (продольного и поперечного профилей ультразвукового пучка, его поперечных размеров, размеров и местонахождения фокальной области);

определение и введение поправок, обусловленных фокусировкой или расхождением ультразвукового пучка, в результаты измерений мощности ультразвука на ЭИМУ-1, ЭИМУ-2, ЭИМУ-3, ЭИМУ-4;

измерение параметров акустического давления и интенсивности в каждой точке ультразвукового поля;

измерение полной мощности ультразвукового пучка;

оценка и контроль параметров безопасности ультразвукового медицинского оборудования в соответствии с национальными стандартами и стандартами Международной электротехнической комиссии (МЭК);

калибровка гидрофонов методом плоского сканирования в поперечном сечении ультразвукового пучка известной мощности.

В настоящее время воспроизведение единицы мощности на ГЭТ 169-2019 осуществляется четырьмя методами:

методом уравнивания статического давления ультразвуковой волны на отражающую мишень положительной плавучести, оттягиваемую вниз тонкими цепочками так, что радиационная сила ультразвукового пучка компенсируется

перераспределением веса цепочек, что уравнивает мишень в новом положении, а её вертикальное перемещение пропорционально измеряемой мощности ультразвукового пучка (в ЭИМУ-1 и ЭИМУ-2) [1];

гравитационным уравниванием поглощающей мишени, подвешенной в воде за крюк прецизионных весов, так что приращение кажущейся массы мишени при воздействии на неё падающего сверху ультразвукового пучка пропорционально его мощности (в ЭИМУ-3);

модифицированным калориметрическим методом, когда подвешенная к весам мишень в виде ёмкости, заполненной касторовым маслом, нагревается при поглощении ультразвукового импульса и расширяется, в результате плавучесть мишени увеличивается пропорционально поглощённой ультразвуковой энергии (в ЭИМУ-4);

четвертый (но не основной) метод реализован в УИИ способом суммирования квадратов напряжений с выхода калиброванного гидрофона в каждой точке поперечного сечения ультразвукового пучка.

Сочетание в ГЭТ 169-2019 принципиально разных методов несомненно повышает достоверность измерений мощности при её воспроизведении в различных измерительных ситуациях.

Особенности конструкции эталонных измерителей ЭИМУ-3 и ЭИМУ-4. В эталонном измерителе мощности ультразвука в воде ЭИМУ-3 применён метод гравитационного уравнивания радиационной силы ультразвукового пучка с помощью прецизионных электронных весов и поглощающей ультразвук мишени. Данный метод рекомендован стандартом МЭК (IEC 61161:2013 Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements) и национальным стандартом (ГОСТ Р МЭК 61161-2019. ГСИ. Мощность ультразвука в жидкостях. Общие требования к выполнению измерений методом уравнивания радиационной силы). В указанных стандартах предложены семь вариантов компоновки устройства для измерения радиационной силы с помощью весов. Анализ преимуществ и недостатков каждого из вариантов позволил выбрать наиболее приемлемый для реализации в ГЭТ 169-2019: вариант Е с верхним расположением весов и подвешенной к ним поглощающей мишени (ГОСТ Р МЭК 61161-2019). При этом измеряемый преобразователь погружён в воду над поглощающей мишенью.

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 [3]. Поперечный размер мишени должен быть достаточно большим, чтобы перекрыть всю значимую часть поля, а именно, чтобы измеряемая радиационная сила была не меньше 98 % (рекомендации IEC 61161 и ГОСТ Р МЭК 61161-2019) радиационной силы F , действующей на мишень бесконечных поперечных размеров и пропорциональной полной мощности P ультразвукового пучка как

$$P = cF,$$

где c – скорость звука в воде.

Учитывая допускаемую близость (около 5 мм) расположения мишени к измеряемому преобразователю и его типичные размеры (диаметр не более 40 мм), предполагается достаточным, чтобы минимальный диаметр мишени составлял 70 мм. Однако основной проблемой при создании эталонного измерителя ЭИМУ-3 стал выбор материала мишени, которая в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61161-2019 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 HAM A, разработанный в Национальной физической лаборатории (Великобритания) [4] и выпускаемый фирмой Precision Acoustics Ltd (Великобритания) (Precision Acoustics Ltd. HAM A. Technical Data Sheet: [сайт]. URL: <https://www.acoustics.co.uk/pal/wp-content/uploads/2016/05/ham-a-tds-2017.pdf>). Уникальность акустических свойств этого материала оценили и использовали в первичных эталонах единицы мощности многие национальные метрологические институты зарубежных стран [2]. По данным производителя характеристики ER , IL амплитудных потерь ультразвуковой волны соответственно при отражении от материала HAM A и прохождении через лист HAM A толщиной 14 мм, представленные как

$$ER = -20 \log_{10}(p_r/p_i);$$

$$IL = -20 \log_{10}(p_t/p_i),$$

где p_r , p_t , p_i – амплитуды акустического давления соответственно в отражённой, прошедшей через материал и падающей на него ультразвуковой волне, измеренные в диапазоне частот 1–20 МГц в соответствии с [5], изменяются с увеличением частоты от 45 дБ до 33 дБ (для ER) и от 32 дБ до 60 дБ и выше (для IL).

Долю энергии FPD , поглощённую мишенью, с учётом потерь на отражение рассчитывают как

$$FPD = 1 - (p_r/p_i)^2 - (p_t/p_i)^2.$$

Результаты измерений p_r , p_t , p_i , проведённых методом ретроградного сканирования поля акустических давлений ультразвукового преобразователя на частотах 0,5–3 МГц с поглотителем HAM A и при его отсутствии на автоматизированной установке УИИ, позволили уточнить заявленные изготовителем акустические характеристики материала HAM A. Частотные зависимости доли энергии FPD и стандартные неопределённости её измерений, полученные во ВНИИФТРИ, в сравнении с данными фирмы Precision Acoustics Ltd представлены на рис. 1. На частотах выше 1 МГц эти зависимости достаточно хорошо совпадают, на частотах ниже 1 МГц провести сравнение нельзя, так как соответствующих данных от производителя нет, не найдены они и в каких-либо документах других пользователей материала HAM A. Важность измеренной авторами частотной зависимости доли энергии ультразвукового пучка, поглощённой мишенью из HAM A на частотах 0,5–1 МГц, заключается в возможности обоснования бюджета неопределённостей измерений с помощью ЭИМУ-3.

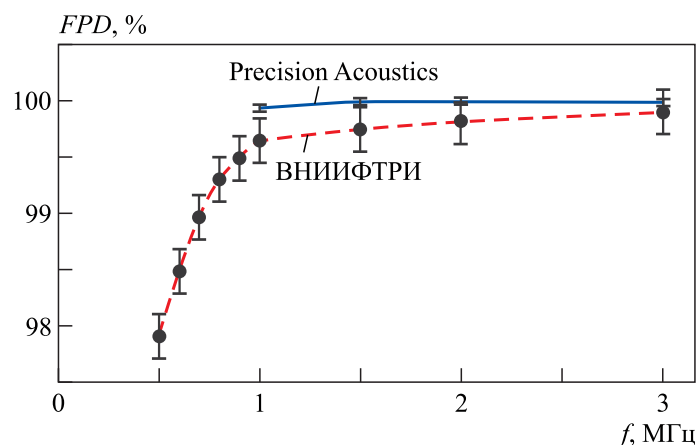


Рис. 1. Частотные зависимости доли энергии FPD , поглощённой в материале HAM A толщиной 14 мм, с учётом потерь на отражение

Fig. 1. Frequency dependence of energy fraction absorbed in HAM A (14 mm)

Использование мишени из поглощающего материала HAM A обеспечило высокую точность воспроизведения на ЭИМУ-3 единицы мощности ультразвука в диапазоне частот 0,5–20 МГц. На основании данных рис. 1 в результате измерений мощности на частотах 0,5–1 МГц можно вводить поправки на несовершенство поглощающей мишени, а погрешность от их введения (около $\pm 0,2$ %) следует учитывать 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.

В эталонном измерителе мощности ультразвука в воде ЭИМУ-4 реализована модификация калориметрического метода, разработанная А. Shaw [6], усовершенствованная для применения в эталонах [7] и апробированная на межлабораторных сличениях [8]. В ЭИМУ-4 мишень выполнена в виде ёмкости, заполненной поглощающей ультразвук жидкостью массой m . Тепловое расширение жидкости в результате поглощённой в её объёме ультразвуковой энергии мощностью P за промежуток времени t вызывает изменение плавучести (Δmg) мишени, находящейся в воде и подвешенной к весам, как и в компоновке Е.

Измеряемая мощность P определяется уравнением измерений

$$P = \Delta mg / (tS),$$

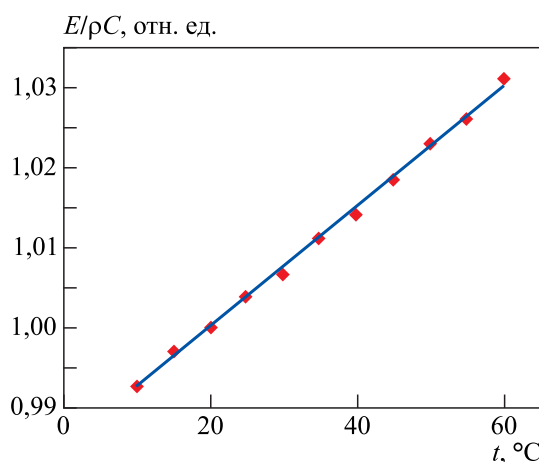
где g – ускорение свободного падения; S – чувствительность мишени, определяемая по изменению архимедовой силы B выталкивания при дозированном электрическом нагреве (мощностью P_a за промежуток времени t_0) поглощающей жидкости, заполняющей мишень, т. е.

$$S = B / (P_a t_0) = \rho_w E / (\rho C), \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды; E – коэффициент объёмного расширения поглощающей жидкости; ρ – плотность поглощающей

Метрологические характеристики усовершенствованного ГЭТ 169-2019

Наименование параметра	Значение
Динамический диапазон воспроизведения единицы мощности, Вт: ГЭТ 169-2019 ЭИМУ-1 ЭИМУ-2 ЭИМУ-3 ЭИМУ-4	0,001–200 0,005–1,0 0,05–12,0 0,001–10 10–200
Частотный диапазон воспроизведения единицы мощности, МГц: ЭИМУ-1, ЭИМУ-2 ЭИМУ-3 ЭИМУ-4	0,5–12,0 0,5–20,0 0,5–5,0
Среднее квадратическое отклонение результата при 10 независимых измерениях, %, не более	3
Неисключённая систематическая погрешность измерений при воспроизведении единицы мощности (при доверительной вероятности $P = 0,99$), %, не более: ЭИМУ-1 ЭИМУ-2 ЭИМУ-3, ЭИМУ-4	$[0,05+(1/P)] \cdot 100$ $[0,05+(2/P)] \cdot 100$ $[0,05+(0,5/P)] \cdot 100$ P – измеренное значение мощности в милливаттах (для ЭИМУ-1, ЭИМУ-2, ЭИМУ-3) и в ваттах (для ЭИМУ-4)
Стандартная неопределённость измерений при воспроизведении мощности ультразвука, %: по типу А по типу В Суммарная стандартная неопределённость измерений при воспроизведении мощности ультразвука, %	0,5–1,5 1–3,5 1,7–3,9
Расширенная (при $k = 2$) неопределённость измерений при передаче единицы мощности в различных режимах возбуждения (частота, номинальная мощность $P_{ном}$), %	3,7–7,9

Рис. 2. Зависимость отношения $E/(\rho C)$ от температуры t :
 $y=0,0007x+0,9851$, $R^2=0,9975$ Fig. 2. The temperature dependence of the ratio $E/(\rho C)$

жидкости; C – объёмная теплоёмкость поглощающей жидкости.

Как и в [6], в качестве поглощающей жидкости для ЭИМУ-4 выбрано касторовое масло, обладающее рядом уникальных свойств:

сходством удельного акустического импеданса ρc (для касторового масла при $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho c \approx 1,46 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, так

как $\rho = 970 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c = 1500 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [9]) с импедансом воды ($\rho c \approx 1,465 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, так как $\rho = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c = 1465 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ [9]), определяющим практически полное отсутствие отражений ультразвуковой волны при её переходе через границу вода/масло;

линейностью теплового расширения от температуры нагревания в пределах от комнатной до $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивающей линейность отклика мишени на дозу поглощённой в ней ультразвуковой энергии;

высокой вязкостью (самой высокой из всех жидкостей, она на три порядка больше вязкости воды [9]), приводящей не только к росту поглощения ультразвука, т. е. высокой чувствительности измерителя ЭИМУ-4, но и к существенному повышению порога кавитации в масле, а значит, и возможности измерения параметров сфокусированных ультразвуковых полей высокой интенсивности; слабой температурной зависимостью отношения $E/(\rho C)$

параметров поглощающей жидкости, пропорционального чувствительности S измерителя по формуле (1) при достаточной теплоизоляции мишени от окружающей среды (воды). В идеале это отношение не должно зависеть от изменения температуры внутри мишени в процессе измерения её плавучести. На рис. 2 показана температурная зависимость отношения $E/(\rho C)$ для касторового масла, построенная по данным из IEC 62555-2013 (Ultrasonics – Power measurement – High intensity therapeutic ultrasound (HITU) transducers and systems) и нормированная к значению при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из рис. 2 следует, что отношение $E/(\rho C)$ при повышении температуры масла от 20 до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивается на 3 %. Это значение следует принять как погрешность, связанную с выбором типа расширяющейся жидкости. Учитывая линейный характер представленной температурной зависимости, этот источник неопределённости измерений ультразвуковой мощности можно уменьшить введением соответствующей поправки.

Таким образом, касторовое масло является оптимальным выбором для использования в поглощающей мишени с достаточно предсказуемой изменяемой плавучестью. При этом важно, что касторовое масло не гигроскопично, не высыхает, не агрессивно по отношению к резинам и большинству полимерных материалов.

Тем не менее реализация калориметрического метода с мишенью изменяемой плавучести не столь проста, как представляется на первый взгляд. При вертикальной ориентации

измеряемого ультразвукового пучка на облучаемую мишень воздействуют три силы, влияющие на результаты её гравитационного уравнивания:

радиационная сила ультразвуковой волны;

сила акустических течений, существенно возрастающая с повышением интенсивности;

архимедова сила из-за теплового расширения мишени, которую и необходимо измерять калориметрическим методом.

Радиационная сила ультразвуковой волны существенно больше выталкивающей архимедовой силы, но их можно разделить во времени, так как радиационная сила воздействует на мишень практически мгновенно и улавливается современными электронными весами в течение не более 0,5 с от начала воздействия, а для отклика мишени на тепловой нагрев жидкости требуется достаточно большое время (не менее 10 с). Если потери тепла из мишени минимальны (т. е. при достаточной теплоизоляции её конструкции), то архимедову силу можно измерять непосредственно после выключения ультразвукового воздействия, исключив влияние радиационной силы и акустических течений. Такой режим измерения схематично показан на рис. 3. Режим измерения ультразвуковой мощности, реализующий подобные тональные импульсы, соответствует и режимам работы НИТУ-оборудования. Это важно, так как не требуется какой-либо перенастройки ЭИМУ-4 для измерений и последующей интерпретации результатов к реальным терапевтическим режимам.

Метрологические характеристики ГЭТ 169-2019. Проведённые исследования метрологических характеристик ГЭТ 169-2019 при воспроизведении единицы мощности ультразвука в воде и результаты его аттестации свидетельствуют о соответствии полученных результатов требованиям, установленным в техническом задании на совершенствование эталона. Метрологические характеристики ГЭТ 169-2019 представлены в таблице.

Входящая в состав ГЭТ 169-2019 установка измерения интенсивности УИИ обеспечивает измерение чувствительности гидрофонов методом плоского сканирования в диапазоне частот 1–20 МГц.

Метрологические характеристики УИИ при калибровке гидрофонов

Диапазон частот	1–20 МГц
Диапазон чувствительности гидрофонов.....	0,1–50 мкВ/Па
Среднее квадратическое отклонение результата при 5 независимых измерениях	<5 %
Неисключённая систематическая погрешность (при доверительной вероятности $P = 0,95$).....	<15 %

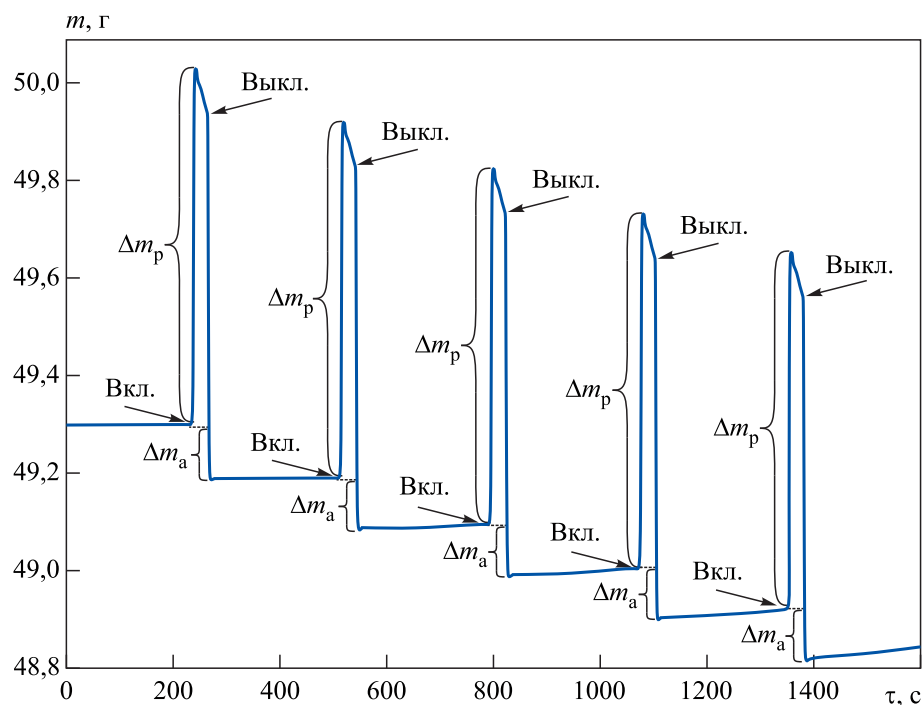


Рис. 3. Измерение радиационной m_p и архимедовой m_a сил в моменты τ включения и выключения напряжения возбуждения преобразователя

Fig. 3. Measurement of radiation m_p and Archimedean m_a forces at the moments τ of switching on and off the transducer excitation voltage

Заключение. Разработка и введение в эксплуатацию в составе ГЭТ 169-2019 новых эталонных измерителей позволили отодвинуть верхнюю границу частотного диапазона воспроизводимых значений мощности до 20 МГц и существенно расширить их динамический диапазон $1 \cdot 10^{-3}$ –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 как датчики частоты сердечных сокращений плода матери (так называемых фетальных мониторов). Высокий уровень воспроизводимых значений мощности позволит обеспечить единство измерений при испытаниях ультразвуковых аппаратов с фокусированным ультразвуковым полем высокой интенсивности (НИТУ) – важного направления современной медицины для лечения онкологических заболеваний.

Список литературы

1. Еняков А. М. Государственный специальный эталон единицы мощности ультразвука в воде // Измерительная техника. 2006. № 3. С. 3–7.

2. Еняков А. М. Международные ключевые сличения в области измерений мощности ультразвука в воде // Измерительная техника. 2014. № 7. С. 68–73.
3. Beissner K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 128, pp. 3355–3362. DOI: 10.1121/1.3505105
4. Zeqiri B., Bickley C. J., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2000, vol. 26, no. 3, pp. 481–485. PII S0301-5629(99)00147-7.
5. Jenkinson M., Hurrell A. M., *Absorbing target for radiation force measurements below 1 MHz*, In *Proc. 23rd International Congress on Acoustics*, 9 to 13 Sept. 2019 in Aachen, Germany, pp. 1010–1017.
6. Shaw A., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2008, vol. 34, no. 8, pp. 1327–1342. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2008.01.008
7. Rajagopal S., and Shaw A., Buoyancy method – a potential new primary ultrasound power standard, *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 327–339. DOI:10.1088/0026-1394/49/3/411
8. Jenderka K. V., Durando G., Karaboce B., Rajagopal S., Shaw A., *Journal of Physics, Conference Series*, 279(1):012015, May 2011. DOI: 10.1088/1742-6596/279/1/012015
9. Kaye G. W. C., Laby T. H., *Tables of Physical and Chemical Constants*, available at: <https://archive.org/details/tablesofphysical004093mbp/page/n19/mode/2up> (accessed: 14.02.2020).

References

1. Enyakov A., *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, no. 11, pp. 1151–1156. DOI: 10.1007/s11018-006-0252-z

2. Enyakov A., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 7, pp. 838–844. DOI: 10.1007/s11018-014-0545-6
3. Beissner K., *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, 128, pp. 3355–3362. DOI: 10.1121/1.3505105
4. Zeqiri B., Bickley C. J., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2000, vol. 26, no. 3, pp. 481–485. PII S0301-5629(99)00147-7.
5. Jenkinson M., Hurrell A. M., *Absorbing target for radiation force measurements below 1 MHz*, In *Proc. 23rd International Congress on Acoustics*, 9 to 13 Sept. 2019 in Aachen, Germany, pp. 1010–1017.
6. Shaw A., *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2008, vol. 34, no. 8, pp. 1327–1342. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2008.01.008
7. Rajagopal S., and Shaw A., Buoyancy method – a potential new primary ultrasound power standard, *Metrologia*, 2012, vol. 49, pp. 327–339. DOI:10.1088/0026-1394/49/3/411
8. Jenderka K. V., Durando G., Karaboce B., Rajagopal S., Shaw A., *Journal of Physics, Conference Series*, 279(1):012015, May 2011. DOI: 10.1088/1742-6596/279/1/012015
9. Kaye G. W. C., Laby T. H., *Tables of Physical and Chemical Constants*, available at: <https://archive.org/details/tablesofphysical004093mbp/page/n19/mode/2up> (accessed: 14.02.2020).

Дата поступления: 24.12.2019.

Дата принятия: 25.01.2020.

State primary measurement standard of ultrasound power unit in water GET 169-2019

Alexander M. Enyakov, Sergey I. Kuznetsov, Georgiy S. Lukin

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: enyakov@vniiftri.ru, sergantex@vniiftri.ru, lukin@vniiftri.ru

Results of works on improvement of the state primary special measurement standard of ultrasound power unit in water GET 169-2005 are given. As a result of the inclusion of two new reference ultrasound power meters in the standard, the frequency and dynamic ranges of reproduction and transmission of the power unit to lower-level measuring instruments were expanded using absorbing targets for measuring the radiation effect of the ultrasonic wave and the absorbed ultrasonic energy. That is very important for metrological support of modern high-tech medical ultrasound equipment, including focused high-intensity ultrasound beams for the treatment of cancer. The automation of the measurement process used in the updated standard has reduced significantly the complexity of verification procedures increasing the accuracy of measurements.

Key words: hydrophone, ultrasound power, non-exceptional systematic measurement error, measurement uncertainty, reflecting target, buoyancy, absorbing target, radiation force, standard deviation, ultrasound beam.