

УДК 006.91

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВО ВНИИФТРИ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**Э.Г. Асланян, М.В. Балаханов, В.И. Добровольский,
О.И. Коваленко, В.Н. Некрасов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

*aslanyan@vniiftri.ru,
balah@vniiftri.ru,
vid@vniiftri.ru,
koi@vniiftri.ru,
nvn@vniiftri.ru*

Приводятся результаты анализа современного состояния и перспектив дальнейшего развития во ВНИИФТРИ эталонной базы в области физико-технических измерений, необходимой для удовлетворения требований науки, техники и технологий как сегодняшнего дня, так и ближайшего будущего.

Ключевые слова: физико-технические измерения, эталон, точность измерений, анализ перспективы.

PHYSICAL AND TECHNICAL MEASUREMENTS IN VNIIFTRI. DEVELOPMENT PROSPECTS

**E.G. Aslanyan, M.V. Balakhanov, V.I. Dobrovolskii,
O.I. Kovalenko, V.N. Nekrasov**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

*aslanyan@vniiftri.ru,
balah@vniiftri.ru,
vid@vniiftri.ru,
koi@vniiftri.ru,
nvn@vniiftri.ru*

The results of the analysis of the current state and prospects of further development at VNIIFTRI of the reference base in the field of physical and technical measurements necessary to meet the requirements of science, engineering and technology both today and in the near future are presented.

Key words: physical and technical measurements, standard, measurement accuracy, analysis of the prospect.

ВНИИФТРИ — крупнейший центр государственных эталонов. Поддержание, совершенствование и развитие эталонной базы на протяжении всех шестидесяти пяти лет с момента создания было генеральной линией деятельности института. За последнее десятилетие эталонная база института значительно укрепились. Интенсивно развиваются прикладные исследования в целях

опережающего развития эталонной базы по широкому кругу направлений как в области наиболее востребованных измерений времени, частоты и больших длин, измерений радиотехнических и электромагнитных величин (ВНИИФТРИ активно участвует в выполнении Федеральной целевой программы ГЛОНАСС, является головной научной организацией Росстандарта РФ по созданию новых и модернизации существующих эталонных средств координатно-временного и навигационного обеспечения с целью достижения заданных точностных характеристик ГЛОНАСС), так и в области физико-технических измерений. Здесь созданы эталон единицы массовой концентрации кислорода и водорода в жидких средах, эталон твёрдости по шкалам Мартенса и индентирования, а также специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий; развиваются гидроакустические, гидрофизические, включая ультразвуковые, измерения; измерения параметров ионизирующих излучений и радиоактивности; электрохимические измерения и измерения параметров аэрозолей; измерения твёрдости металлов, физико-механических свойств строительных материалов. Ниже даётся краткий прогноз развития эталонной базы ВНИИФТРИ в области физико-технических измерений.

Измерения параметров ионизирующих излучений [1, 2]

Радиационный фактор является неотъемлемой составной частью среды обитания человека. При этом обязательность обеспечения ядерной и радиационной безопасности является приоритетным требованием при осуществлении любой деятельности в области использования атомной энергии. Обеспечение высокой эффективности и качества радиационных технологий в технике и медицине при выполнении требований радиационной безопасности является основным направлением развития метрологии ионизирующих излучений в настоящее время.

Основу эталонной базы ВНИИФТРИ в области *измерений параметров ионизирующих излучений* в настоящее время составляют шесть государственных первичных и первичных специальных эталонов:

- ГЭТ 38-2011 Государственный первичный эталон единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного и электронного излучений;
- ГЭТ 117-2010 Государственный первичный эталон единиц мощности поглощённой дозы и эквивалента дозы нейтронного излучения;
- ГЭТ 51-2017 Государственный первичный специальный эталон единиц плотности потока нейтронов и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок;
- ГЭТ 20-2014 Государственный первичный эталон единиц активности и объёмной активности нуклидов в бета-активных газах;

- ГЭТ 39-2014 Государственный первичный эталон единицы объёмной активности радиоактивных аэрозолей;
- ГЭТ 209-2014 Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий.

Прогнозируется развитие следующих четырёх направлений в области измерений параметров ионизирующих излучений.

1. Измерение параметров пучков протонов и тяжёлых заряженных частиц

В последние годы существенно вырос интерес к проведению лучевой терапии с использованием ускорителей протонов с энергиями 50–250 МэВ. Дозиметрия при лучевой терапии с использованием протонного излучения должна осуществляться с высокой точностью, неопределённость результатов измерений поглощённой дозы не должна превышать 3%.

Также с развитием космической отрасли увеличивается потребность в проведении достоверных испытаний на радиационную стойкость. В связи с этим в настоящее время актуальной задачей является проведение испытаний электронных компонентов и изделий, предназначенных для применения, в частности, на космических аппаратах, на радиационную стойкость в полях тяжёлых ионов высокой энергии. При проведении испытаний на радиационную стойкость в пучках протонов и тяжёлых заряженных частиц необходимо определять в месте размещения испытываемого объекта мощность поглощённой дозы в кремнии — материале, входящем в состав электронных компонентов, а также ряд других параметров. Необходимо создать установки, позволяющие осуществлять измерения дозиметрических и прочих параметров, требуемых при испытаниях на радиационную стойкость материалов.

2. Измерение поглощённой дозы фотонного и электронного излучений в целях развития (создания новых) технологий обработки радиационным способом сельскохозяйственной продукции и продуктов питания

Используемые в России методы обработки пищевых продуктов (термические, химические, различные виды упаковок) не позволяют существенно сократить потери при хранении продуктов без потери качества и пищевой ценности. Методы радиационной обработки продуктов питания в России в настоящее время не применяются, так как отсутствуют нормативная база, регламентирующая данный вид деятельности, и эталонные средства, позволяющие метрологически обеспечивать радиационные процессы облучения, гарантирующие безопасность продукции. Единство и правильность измерений в технологии холодной электронной пастеризации чрезвычайно важны для обеспечения достоверности и безопасности радиационных технологических процессов в этой области.

Создание эталонов и высокоточных средств измерений поглощённой дозы фотонного и электронного излучений в различных материалах позволит повысить достоверность, правильность и точность измерений параметров ионизирующих излучений в процессе обработки ионизирующим излучением продуктов питания. Технология обработки промышленной продукции радиационным способом имеет важное государственное значение. Так, например, обработка продуктов питания радиационным способом используется во многих странах для продления срока их годности. Это позволяет сократить потери при хранении продуктов в несколько раз без потери качества и пищевой ценности.

3. Измерение активности, удельной и объёмной активности радионуклидов в радиоактивных отходах и других специальных средах

В настоящее время существует потребность промышленности в обеспечении единства и достоверности измерений активности, удельной и объёмной активности радионуклидов в радиоактивных отходах (РАО) и других специальных средах (например, в геометрии специальных «толстых» источников альфа-излучения, в жидких средах, содержащих тритий).

Эти измерения нормируются документами (СПОРО-2002, ОСПОРБ-99/2010). В настоящее время в стране нет эталонов, которые смогли бы воспроизвести и передать единицу удельной и объёмной активности средствам измерений, применяемым для контроля РАО.

4. Измерение активности и объёмной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов в материалах строительных конструкций, жидких средах и атмосферном воздухе

Разработка эталонных средств для метрологического обеспечения измерений активности и объёмной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов в материалах строительных конструкций, жидких средах и атмосферном воздухе позволит повысить достоверность, правильность и точность измерений параметров ионизирующих излучений при проведении измерений активности и объёмной активности в материалах строительных конструкций, жидких средах и атмосферном воздухе.

Проведение таких измерений необходимо для оценки соответствия требованиям федеральных нормативных документов в области обеспечения радиационной безопасности — ОСПОРБ-99/2010, НРБ-99/2010, СанПиН 2.6.1.2523-09, СанПиН 2.1.2.2645-10, СП 2.6.1.1292-03, СП 2.6.1.2612-10, МУ 2.6.1.2838-11 и др.

Обобщённые данные по прогнозу потребностей в области измерений ионизирующих излучений до 2025 года представлены в таблице 1.

Таблица 1

Прогноз потребностей в области измерений ионизирующих излучений

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
1	Измерение параметров пучков протонов и тяжёлых заряженных частиц	Диапазон мощности поглощённой дозы: до 10^2 Гр/с. Диапазон поглощённой дозы: до $1 \cdot 10^3$ Гр. Диапазон энергии протонов и тяжёлых заряженных частиц: до 300 МэВ. Погрешность измерений поглощённой дозы при лучевой терапии: $\pm (5-6) \%$	Диапазон мощности поглощённой дозы: до 10^2 Гр/с. Диапазон поглощённой дозы: до $3 \cdot 10^3$ кГр. Диапазон энергии протонов и тяжёлых заряженных частиц: до 300 МэВ. Погрешность измерений поглощённой дозы в воде и поглощённой дозы в биологической ткани при лучевой терапии: не более $\pm 3\%$ при внешнем облучении
2	Измерение поглощённых доз интенсивного фотонного и электронного излучений для радиационных технологий	Диапазон мощностей поглощённой дозы: от $3 \cdot 10^{-1}$ до $2 \cdot 10^5$ Гр/с. Доверительные границы основной относительной погрешности измерения поглощённой дозы фотонного и электронного излучений при $P = 0,95$: от 7 до 12%	Диапазон измерений поглощённой дозы: от $5 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^5$ Гр в диапазоне мощностей поглощённой дозы: от 10^{-1} до 10^5 Гр/с. Доверительные границы основной относительной погрешности измерения поглощённой дозы фотонного и электронного излучений при $P = 0,95$: от 5 до 7%
3	Измерение активности, удельной и объёмной активности радионуклидов в радиоактивных отходах и других специальных средах	Диапазон измерений удельной и объёмной активности альфа-, бета- и гамма-излучающих радионуклидов: от $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^{11}$ Бк/кг	Диапазон измерений удельной и объёмной активности альфа-, бета- и гамма-излучающих радионуклидов в радиоактивных отходах и других специальных средах: от 3 до $1 \cdot 10^{12}$ Бк/кг. Доверительные границы основной относительной погрешности измерения единицы удельной и объёмной активности альфа-, бета- и гамма-излучающих радионуклидов в радиоактивных отходах и других специальных средах при $P = 0,95$: 8%

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
4	Измерение активности и объёмной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов в материалах строительных конструкций, жидких средах и атмосферном воздухе	Диапазон измерений альфа- и бета-излучающих радионуклидов: от 1 до $1 \cdot 10^{11}$ Бк	Диапазон измерений альфа- и бета-излучающих радионуклидов от $3 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^4$ Бк в диапазоне регистрируемых энергий альфа-излучения от 3 до 8 МэВ и бета-излучения от 0 до 2 МэВ. Доверительные границы основной относительной погрешности измерения поглощённой дозы фотонного и электронного излучений при $P = 0,95$: не хуже (10–15) %

Измерения физико-химического состава и свойств веществ [3, 5]

В настоящее время растут и ужесточаются требования к обеспечению качества жизни человека: продукты питания, экология, медицина, фармацевтика, косметика, вода питьевая, вода техническая, вода речная, вода морская, почва, сельскохозяйственная продукция, воздух рабочей зоны, чистота производственных и клинических помещений и многое другое. Многие из важнейших нормированных и регламентируемых показателей качества жизни определяются в результате физико-химических измерений. Эти измерения проводятся практически во всех сферах жизнедеятельности человека, в частности, в интересах предприятий энергетики, металлургии, пищевой и химической промышленности, в биотехнологии и клинических исследованиях, службе экологического мониторинга и других.

Основу эталонной базы ВНИИФТРИ в области физико-химических измерений в настоящее время составляют семь государственных первичных и первичных специальных эталонов:

- ГЭТ 54-2011 Государственный первичный эталон показателя рН активности ионов водорода в водных растворах;
- ГЭТ 171-2011 Государственный первичный эталон показателей активности рХ ионов в водных растворах;
- ГЭТ 163-2010 Государственный первичный эталон единиц дисперсного состава аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов;
- ГЭТ 177-2010 Государственный первичный эталон единиц объёмной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счётной концентрации аэроионов;

- ГЭТ 212-2014 Государственный первичный эталон единицы массовой концентрации кислорода и водорода в жидких средах;
- ГЭТ 217-2018 Государственный первичный эталон единиц массовой доли и массовой (молярной) концентрации неорганических компонентов в водных растворах на основе гравиметрических и спектральных методов;
- ГЭТ 132-99 Государственный первичный эталон единицы удельной электрической проводимости жидкостей в части диапазона от $1 \cdot 10^{-3}$ до 10 см/м.

Как известно, средства измерений pH по их количеству и типам занимают одно из первых мест среди анализаторов жидкости, их парк составляет несколько миллионов приборов в Российской Федерации. Определение водородного показателя (pH) является на сегодняшний день самым востребованным методом контроля состава водных растворов и других жидких сред. Водородный показатель является важнейшей физико-химической характеристикой, определяющей основные кислотно-щелочные свойства растворов. В период с 2019 по 2025 год ожидается рост спроса на буферные растворы, стандарт-титры и другие СИ в области pH-метрии на 5–7% в год от общего объема поставок, расширение сферы сбыта выпускаемой продукции и выход на международный рынок.

Следует также отметить, что в настоящее время на территории Российской Федерации эксплуатируется более 10 000 приборов для гастроэнтерологических исследований. Для градуировки, калибровки и настройки данных приборов в кислотной области успешно применяется мера кислотности pH (номер в государственном реестре СИ № 47547-11) с воспроизводимым значением pH 1,2 при температуре раствора $36,5 \pm 0,5$ °C. Однако на сегодня наименьшая мера кислотности, производимая в Российской Федерации и за рубежом, — pH 1,1. Следовательно, метрологически прослеживаемая область измерения pH у большинства гастроэнтерологических приборов ограничена диапазоном от 1,1 до 9,2. Поэтому создание стабильных мер воспроизведения водородного показателя в интервале от 0,01 до 1,00 ед. pH с погрешностью не более $\pm 0,06$ позволит обеспечить более точную градуировку (настройку) pH-зондов, а значит, повысит точность и качество проведения гастроэнтерологических исследований, так как при ошибочных результатах анализа желудочного сока человеку могут поставить неправильный диагноз и назначить лечение, в котором он не нуждается.

В связи с развитием нанотехнологий и nanoиндустрии всё более актуальным становится решение проблемы, связанной с обеспечением безопасности жизнедеятельности человека, контролем качества сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов, созданием природоохранительных технологий и утилизацией техногенных отходов. Особенно важен контроль пищевой

продукции, так как производство изделий с использованием нанотехнологий в той или иной степени связано с их воздействием на потребляемые человеком биологические объекты, и чрезвычайно важной задачей является установление контроля как производственной среды, так и производимой продукции на уровне наноизмерений, чтобы исключить саму возможность негативного воздействия наночастиц на здоровье человека. Именно поэтому высокоточные измерения параметров аэрозолей и взвесей самым непосредственным образом связаны с глобальной проблемой контроля безопасности использования нанотехнологий.

Также огромное значение имеют измерения параметров аэрозолей при обеспечении и контроле чистых помещений при производстве электроники, в медицинских учреждениях, в фармацевтических производственных помещениях и др.

В связи с появлением области метрологического обеспечения измерений дзета-потенциала и размеров частиц нанометрового диапазона (1...30 нм) в период с 2019 по 2025 год ожидается переутверждение типов всех применяемых на территории РФ анализаторов дисперсных параметров, планируется создание ряда рабочих эталонов единиц дзета-потенциала и единиц размера частиц нанометрового диапазона (1...30 нм) для ЦСМ и других потребителей.

Ещё одним параметром, характеризующим чистоту помещений, является содержание аэроионов в определённом объёме окружающего воздуха. Кроме того, единица объёмной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счётной концентрации аэроионов — основные характеризующие показатели в аэроионотерапии, где для достижения того или иного терапевтического эффекта необходима установленная нормированная концентрация отрицательных ионов в воздухе. В России нормирован и установлен контроль аэроионного состава воздуха в соответствии с санитарно-гигиеническими нормативами СанПиН 2.2.4.1294-03, СанПиН 2.1.3.2630-10 и государственным стандартом ГОСТ 12.0.003-2015, в которых контролируемыми показателями аэроионного состава воздуха являются счётная концентрация лёгких аэроионов обеих полярностей, а также коэффициент униполярности. В соответствии с указанными выше документами при значениях показателей, лежащих вне допустимых пределов, условия труда относятся к вредным. В период с 2019 по 2025 год ожидается появление новых типов счётчиков аэроионов с более точными метрологическими характеристиками и увеличение объёма поверочных работ на 10–20%.

Обобщённые данные по прогнозу потребностей страны в области физико-химических измерений ФГУП «ВНИИФТРИ» [3–5] до 2025 года представлены в таблице 2.

Таблица 2

Прогноз потребностей в области физико-химических измерений

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
1	Измерения показателя pH активности ионов водорода в водных растворах	– Диапазон от 1 до 12 при t от 0 до 95 °C; – СКО = 0,001 при $t = 25$ °C; – НСП $\leq 0,0017$ при $t = 25$ °C; – $U = 0,004$ при $k = 2$	Диапазон от 0,01 до 12 при t от 0 до 95 °C
2	Измерения показателя рХ активности ионов в водных растворах	– Диапазон от 1 до 7; – СКО = 0,001; – НСП $\leq 0,0016$; – $U = 0,004$ при $k = 2$	То же
3	Измерения дисперсных параметров (счётной и массовой концентрации, размера частиц и дзета-потенциала) аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов	✓ Размер частиц — 0,03–1000 мкм: – НСП — 1,3–1,6%, – СКО — 1,0–1,1%; ✓ счётная концентрация частиц — $10^3 - 10^{12} \text{ м}^{-3}$: – НСП — 1,6%, – СКО — 1,5–1,7%	✓ Размер частиц — 0,001–1000 мкм: – НСП — 1,3–1,6%, – СКО — 1,0–1,1%; ✓ дзета-потенциал — –150 – +150 мВ: – НСП — 2,2–2,4%, – СКО — 2,0–2,2%; ✓ счётная концентрация частиц — то же; ✓ массовая концентрация — 0,001–10000 мг/м ³ : – НСП — 1,4–1,6%, – СКО — 0,9–1,2%
4	Измерения единиц массовой концентрации кислорода и водорода в жидких средах	✓ O ₂ : – диапазон 1–100000 мкг/дм ³ , – НСП — 0,5 мкг/дм ³ – 130 мкг/дм ³ , – СКО — 0,2 мкг/дм ³ – 300 мкг/дм ³ ; ✓ H ₂ : – диапазон 1–20000 мкг/дм ³ , – НСП — 1–120 мкг/дм ³ , – СКО — 0,8–80 мкг/дм ³	✓ O ₂ — то же; ✓ H ₂ — то же; ✓ CO ₂

Продолжение таблицы 2

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
5	Измерения единиц массовой доли и массовой (молярной) концентрации неорганических компонентов в водных растворах на основе гравиметрического и спектральных методов	– Диапазон: 10^{-9} до 10 %; – СКО $\leq (0,01-4)$ %; – НСП $\leq (0,01-4)$ % при $P = 0,99$; – $U \leq (0,02-8,8)$ % при $k = 2$	То же
6	Измерения объёмной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счётной концентрации аэроионов	– Диапазон: $1,6 \cdot 10^{-2}$ до $200 \text{ нКл} \cdot \text{м}^{-3}$ (от 108 до $1,2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$); – НСП $\leq 4,0$ % при $P = 0,99$; – СКО $\leq 4,0$ %	То же

Для обеспечения современных международных и отечественных требований, предъявляемых к показателям качества жизни, ФГУП «ВНИИФТРИ» проводит научные изыскания по развитию и совершенствованию своей эталонной базы, активно участвует в региональных и международных сличениях для подтверждения своих измерительных возможностей на международном уровне в закреплённых за ним направлениях с целью обеспечения единства физико-химических измерений в стране в необходимом диапазоне измерений с требуемой точностью, а также обеспечения прослеживаемости этих измерений к СМС-строкам в базе данных МБМВ.

Теплофизические и температурные измерения [6]

В последние годы возникает всё больше запросов промышленности о метрологическом обеспечении СИ температуры в диапазонах низких и сверхнизких температур, это связано с импортом вновь разработанных СИ температуры иностранного производства. Для обеспечения калибровки и испытаний с целью утверждения типа требуется снижение границы нижнего диапазона эталона температуры.

Существенно вырос в последние годы интерес к использованию датчиков теплового потока, специалисты заинтересованы в метрологически обеспеченных средствах измерения. Для обеспечения потребностей необходимо разрабатывать и утверждать типы СИ для эталона единицы плот-

ности радиационного теплового потока в диапазоне от 1 до 5 кВт/м². Также для данного диапазона температур требуется разработка государственной поверочной схемы.

Основу эталонной базы ВНИИФТРИ в области теплофизических и температурных измерений образуют семь государственных первичных и первичных специальных эталонов:

- ГЭТ 35-2010 Государственный первичный эталон единицы температуры — кельвина в диапазоне 0,3–273,16 К;
- ГЭТ 66-75 Государственный первичный специальный эталон единицы температурного коэффициента линейного расширения твёрдых тел в диапазоне температур 4,2–90 К;
- ГЭТ 69-85 Государственный первичный специальный эталон единицы теплопроводности твёрдых тел в диапазоне температур 90–300 К;
- ГЭТ 70-85 Государственный первичный специальный эталон единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел в диапазоне температур 90–273,15 К;
- ГЭТ 79-75 Государственный первичный специальный эталон единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел в диапазоне температур от 4,2 до 90 К;
- ГЭТ 141-84 Государственный первичный специальный эталон единицы теплопроводности твёрдых тел в диапазоне температур от 4,2 до 90 К;
- ГЭТ 151-2014 Государственный первичный эталон единиц относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/иней.

Обобщённые данные по прогнозу потребностей в области теплофизических и температурных измерений до 2025 года представлены в таблице 3.

Таблица 3

Прогноз потребностей в области теплофизических
и температурных измерений

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
1	Температура	Диапазон: (0,3–273,16) К. Суммарная стандартная неопределённость: (0,2–0,7) мК	Диапазон: 0,15–273,16. Суммарная стандартная неопределённость: 0,2–0,7 мК
2	Плотность радиационного теплового потока	Диапазон: от 5 до 2500 кВт/м ² . Доверительные границы сум- марной погрешности: 3%	Диапазон: от 5 до 2500 кВт/м ² . Доверительные границы суммарной погрешно- сти: 2,5%

Продолжение таблицы 3

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
3	Теплопроводность твёрдых тел в диапазоне температур (4,2–90) К	Диапазон температур: (4,2...90) К. Диапазон теплопроводности: (0,1...10) Вт/(м · К). Суммарная стандартная неопределённость: $6,5 \cdot 10^{-3}$	Диапазон температур: (4,2...300) К
4	Удельная теплоёмкость твёрдых тел в диапазоне температур (4,2–90) К	Диапазон температур: (4,2...90) К. Диапазон удельной теплоёмкости: (0,1...500) Дж/(кг · К). Суммарная стандартная неопределённость: $4,8 \cdot 10^{-4} - 1,65 \cdot 10^{-3}$	Диапазон температур: (4,2...300) К

Измерения твёрдости [7, 8]

Основу эталонной базы ВНИИФТРИ в области измерений твёрдости составляют пять государственных первичных и первичных специальных эталонов:

- ГЭТ 30-2018 Государственный первичный специальный эталон твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла;
- ГЭТ 31-2010 Государственный первичный специальный эталон твёрдости металлов по шкалам Виккерса;
- ГЭТ 33-85 Государственный первичный специальный эталон твёрдости по шкалам Бринелля;
- ГЭТ 161-2001 Государственный первичный эталон твёрдости металлов по шкале твёрдости Шора D;
- ГЭТ 211-2014 Государственный первичный эталон твёрдости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования.

Одним из основных факторов развития эталонной базы в области измерений твёрдости является рост потребности промышленности в обеспечении единства измерений твёрдости в нанодиапазоне. Старение нормативно-правовой и нормативно-технической баз отрицательно сказывается на измерениях твёрдости металлов, в частности, в связи с отнесением шкал твёрдости к шкалам порядка и неприменимостью понятий среднего арифметического значения и среднего квадратического отклонения. Влияние старения эталонного и вспомогательного оборудования в области измерений твёрдости частично компенсируется за счёт внедрения в эталоны современных технических устройств и нового программного обеспечения.

За последние годы в промышленности появился интерес к измерениям твёрдости по шкалам Либа и шкалам Кнуппа. Также возникла потребность в расширении диапазонов измерений твёрдости по шкалам Бринелля, Виккерса и в уменьшении погрешности измерений твёрдости по шкалам Роквелла, Мартенса, индентирования.

Обобщённые данные по прогнозу потребностей в области измерений твёрдости до 2025 года представлены в таблице 4.

Таблица 4

Прогноз потребностей в области измерений твёрдости

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
1	Измерения твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла	Диапазон чисел твёрдости HR: от 10 до 100. Погрешность HR: от $\pm 1,0$ до ± 6	Диапазон чисел твёрдости HR: от 10 до 100. Погрешность HR: от $\pm 0,5$ до ± 6
2	Измерения твёрдости по шкалам Бринелля	Диапазон чисел твёрдости HB: от 8 до 450. Диапазон чисел твёрдости HBW: от 8 до 650. Погрешность HB (HBW): от $\pm 0,2$ до $\pm 19,5$	Диапазон чисел твёрдости HB: от 3 до 450. Диапазон чисел твёрдости HBW: от 3 до 650. Погрешность HB (HBW): от $\pm 0,1$ до $\pm 19,5$
3	Измерения твёрдости по шкалам Виккерса	Диапазон чисел твёрдости HV: от 8 до 2000. Погрешность HV: от $\pm 0,2$ до ± 60	Диапазон чисел твёрдости HV: от 8 до 3000. Погрешность HV: от $\pm 0,2$ до ± 90
4	Измерения твёрдости по шкалам Кнуппа	—	Диапазон чисел твёрдости HK: от 3 до 2000. Погрешность HK: от $\pm 0,1$ до ± 90
5	Измерение твёрдости металлов по шкале Шора D	Диапазон чисел твёрдости HSD: от 20 до 140. Погрешность HSD: от $\pm 2,5$ до ± 4	Диапазон чисел твёрдости HSD: от 20 до 140. Погрешность HSD: от $\pm 2,5$ до ± 4
6	Измерение твёрдости металлов по шкалам Либа	—	Диапазон чисел твёрдости HL: от 300 до 960. Погрешность HSD: от ± 12 до ± 30

Продолжение таблицы 4

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
7	Измерение твёрдости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования	Диапазон чисел твёрдости НМ: от 0,01 до 70. Погрешность НМ: от $\pm 0,001$ до ± 7 . Диапазон чисел твёрдости ННТ: от 0,1 до 70. Погрешность ННТ: от $\pm 0,01$ до ± 7	Диапазон чисел твёрдости НМ: от 0,01 до 70. Погрешность НМ: от $\pm 0,001$ до ± 4 . Диапазон чисел твёрдости ННТ: от 0,1 до 70. Погрешность ННТ: от $\pm 0,01$ до ± 4

Измерения статических и динамических давлений [9]

В области статических и динамических давлений измерений основу эталонной базы ВНИИФТРИ составляет ГЭТ 43-2013 Государственный первичный эталон единицы давления в диапазоне 10–1600 МПа и эффективной площади поршневых пар грузопоршневых манометров в диапазоне 0,05–1 см². В таблице 5 приведены его характеристики и прогнозная оценка его развития.

Таблица 5

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
1	Статическое давление	Диапазон: 10–1600 Мпа. Суммарная стандартная неопределённость: $6 \cdot 10^{-6}$	Создание эталона-переносчика. Диапазон: 10–1600 Мпа. Суммарная стандартная неопределённость: $1 \cdot 10^{-5}$
2	Импульсное давление	Диапазон: 1–1000 Мпа. Минимальная длительность фронта изменения давления в жидкости: не более $3 \cdot 10^{-3}$ с. Минимальная длительность фронта изменения давления в газе: не более $1,0 \cdot 10^{-6}$ с. Предел погрешности в диапазоне длительности фронта перепада давления не более 1 мкс: 3%. Предел погрешности в диапазоне длительности фронта перепада давления не более 3 мс: 0,05%	Диапазон: 1–1200 Мпа. Минимальная длительность фронта изменения давления в жидкости: не более $1,5 \cdot 10^{-3}$ с. Минимальная длительность фронта изменения давления в газе: не более $1,5 \cdot 10^{-6}$ с. Относительное среднее квадратическое отклонение воспроизведения единицы импульсного давления: от $1 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$. Относительная неисключённая систематическая погрешность воспроизведения единицы импульсного давления: от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$

Измерения акустических и гидроакустических величин [10–12]

Основу эталонной базы ВНИИФТРИ в области акустических и гидроакустических измерений образуют пять государственных первичных и первичных специальных эталонов:

- ГЭТ 19-2010 Государственный первичный эталон единицы звукового давления в воздушной среде;
- ГЭТ 55-2017 Государственный первичный эталон единиц звукового давления и колебательной скорости в водной среде;
- ГЭТ 169-2005 Государственный первичный специальный эталон единицы мощности ультразвука в воде в диапазоне частот от 0,5 до 12,0 МГц;
- ГЭТ 189-2014 Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения и коэффициента затухания ультразвуковых волн в твёрдых средах;
- ГЭТ 194-2011 Государственный первичный эталон единиц амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твёрдых сред;
- ГЭТ 201-2012 Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах.

В последнее время наиболее значимыми факторами в области измерений акустических величин являются:

- ужесточение законодательства в отношении оценки и смягчения воздействия шумового загрязнения на морскую жизнь (директивы Евросоюза 2008/56/ЕС и 92/43/ЕЕС в области морской экологической политики, сохранения естественных сред обитания дикой фауны и флоры);
- внедрение международных стандартов IEC/TS 62556:2014 и IEC 62555:2013 (сфокусированный ультразвук высокой интенсивности) и европейских программ EMRP с участием NPL (Великобритания), PTB (Германия), INRIM (Италия), UME (Турция) и др. по применению ультразвука в лечении онкологических заболеваний, установлению допустимых доз ультразвукового облучения.

Рост промышленного производства и социальная направленность политики государства будут способствовать увеличению количества применяемых акустических и аудиометрических средств измерений [10–12]. В 2019–2025 гг. прогнозируется рост потребности в поверке и испытаниях в целях утверждения типа на 10–20%.

Развитие метрологического обеспечения гидроакустических измерений за рубежом обусловлено ужесточением законодательства в отношении оценки и смягчения воздействия шумового загрязнения на морскую жизнь (директивы Евросоюза 2008/56/ЕС и 92/43/ЕЕС в области морской экологической политики, сохранения естественных сред обитания дикой фауны и флоры).

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

Зарубежные научно-исследовательские суда (НИС) рыбной отрасли, предназначенные для обеспечения решения задач, связанных с изучением, сохранением и рациональным использованием сырьевых ресурсов промысловых гидробионтов, должны соответствовать рекомендациям ICES-209 по уровню подводного шума, излучаемого в воду. Строящиеся отечественные суда (опытный образец крупнотоннажного НИС для проведения комплексных рыбохозяйственных и океанографических исследований в открытых районах Мирового океана, включая арктические и антарктические воды) также проектируются и строятся с учётом ICES-209 и имеют на борту гидроакустическую лабораторию.

Документ стратегического планирования МКМБ «Strategy Document for Rolling Programme Development for 2013 to 2023. The Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration. Strategic Planning 2013-2015 CCAUV» предусматривает увеличение потребности в абсолютных акустических измерениях в океане и установление более строгих требований в области основополагающей метрологии как в отношении характеристик источников звука, так и в отношении проведения долгосрочного мониторинга. Тенденция к переходу на большие глубины оффшорных технологий, добычи нефти и газа в связи с истощением мелководных прибрежных зон ставит новые проблемы, поскольку акустические системы должны работать на больших глубинах и в широком диапазоне температур. Таким образом, есть реальные предпосылки о намерении зарубежных стран реализовать контроль акустического качества гражданского морского флота с целью уменьшения шумового загрязнения Мирового океана [12].

В настоящее время в зарубежных странах проводятся интенсивные исследования по разработке эталонных и рабочих СИ мощности ультразвука высокой интенсивности в рамках мероприятий по практическому внедрению международных стандартов IEC/TS 62556:2014 и IEC 62555:2013 (сфокусированный ультразвук высокой интенсивности) и европейских программ EMRP с участием NPL (Великобритания), PTB (Германия), INRIM (Италия), UME (Турция) и др. по применению ультразвука в лечении онкологических заболеваний, установлению допустимых доз ультразвукового облучения. CCAUV МКМБ намечает проведение ключевых сличений в области измерений ультразвуковой мощности высоких уровней. Данное положение дел нашло своё отражение в Стратегическом плане Международного бюро мер и весов («Strategy Document for Rolling Programme Development for 2013 to 2023. The Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration»). 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. Прогнозируемое развитие промышленного применения ультразвука связано с расширением его частотного диапазона выше 500 кГц.

Обобщённые данные по прогнозу потребностей в области акустических измерений до 2025 года представлены в таблице 6.

Таблица 6

Прогноз потребностей в области акустических и гидрофизических измерений

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
1	Измерение уровня звукового давления в воздушной среде	От 0,01 Гц до 100 кГц; от 6,3 мкПа до 8 кПа; от 0,2 до 1,5 дБ	От 0,003 Гц до 160 кГц; от 6,3 мкПа до 8 кПа; от 0,2 до 1,5 дБ
2	Скорость звука в жидких средах	Диапазон измерений скорости звука: 800–2000 м/с. СКО: 0,005 м/с. НСП: 0,04 м/с. Диапазон избыточных давлений: от 0 до 15 МПа. Диапазон воспроизводимых температур: от –4 до +50 °С	Снижение НСП до (0,02–0,03) м/с. Передача единицы скорости звука в воде при избыточных давлениях до 60 МПа
3	Колебательная скорость (в воде)	Диапазон частот: от 5 до 10^4 Гц. СКО: 0,5%. НСП: (4–6)%	Диапазон частот: до $5 \cdot 10^4$ Гц. НСП: (3–5)%

Продолжение таблицы 6

№ п/п	Измеряемые величины	Текущее состояние	Прогноз потребности
4	Звуковое давление в воде	Диапазон частот: 10^{-3} – 10^6 Гц в свободном поле в диапазоне частот 10^3 – 10^6 Гц; 1–500 Гц при избыточных давлениях до 50 МПа. СКО: (0,1–0,5)%. НСП: (0,5–5)%	Диапазон частот до $2 \cdot 10^7$ Гц воспроизведе- ния единицы: – в свободном поле в диапазоне частот ($2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^7$) Гц; – свободном поле в диапазоне частот ($2 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^5$) Гц; – передача единицы приёмным гидроаку- стическим модулям с размером до 3 м в свободном поле в диапазоне частот ($2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^5$) Гц, погрешность от 6 до 12%; – при избыточных давлениях (0–15) МПа и температур от 4 до 35 °С. СКО: (0,1–0,3)%. НСП: (0,5–4)%
4	Мощность ультразвука в воде	Диапазон частот: от 0,5 до 12 МГц. Динамический диапазон: от 5 мВт до 12 Вт	До 20 МГц; от 2 мВт до 20 Вт; от 10 до 200 Вт (в диапазоне частот от 1 до 5 МГц)

Заключение

В последнее время резко возросло значение физико-технических и физико-химических измерений для разработки новой техники и производства. Актуальность развития метрологического обеспечения в области физико-технических и физико-химических измерений повышается, если принять во внимание важнейшие государственные задачи, решаемые сегодня в стране по повышению жизненного уровня населения. Метрологические институты,

Альманах современной метрологии, 2019, № 4 (20)

как главное звено системы метрологического обеспечения, самым непосредственным образом влияют на улучшение общего состояния измерительного дела в стране. Результаты работы по анализу этого состояния, востребованности создания высокоточных методов и аппаратуры могут быть использованы при обосновании постановки работ по совершенствованию эталонной базы, анализе метрологического обеспечения перспективных исследовательских направлений, планировании создания новых высокоточных средств измерений.

Литература

1. Алейкин В.В., Генералова В.В., Громов А.А., Коваленко О.И. Государственный первичный специальный эталон единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 // Измерительная техника. 2019. № 7. С. 10–13.
2. Ярына В.П. Измерения ионизирующих излучений в ФГУП «ВНИИФТРИ» (История развития, современное состояние и перспективы развития) // Российская Метрологическая Энциклопедия: в 2 т. / под ред. В.В. Окрепилова. Т. 1. СПб., 2015. С. 675.
3. Добровольский В.И., Оганян Н.Г., Прокунин С.В. Деятельность ФГУП «ВНИИФТРИ» в сфере физико-химических измерений // Стандартные образцы. 2018. Т. 14. № 3–4. С. 51–56.
4. Dobrovolskii V.I., Stakheev A.A., Stolboushkina T.P. GET 217–2018: State primary standard of unit of mass fraction and unit of mass (molar) concentration of inorganic components in aqueous solutions based on gravimetric and spectral methods // Measurement Techniques. 2019. V. 61. No. 11. P. 1041–1044.
5. Balakhanov M.V., Dobrovolskii V.I., Balakhanov D.M., Belen'kii D.I. Improvements in GET 163–2010. The state primary standard of the units of disperse parameters of aerosols, suspensions, and powder-like materials // Measurement Techniques. 2019. V. 61. No. 12. P. 1135–1140.
6. Osadchii S.M., Potapov B.G., Pilipenko K.D., Aslanyan E.G., Shchipunov A.N. Measurement of the Boltzmann constant in a quasispherical acoustic resonator // Measurement Techniques. 2017. V. 60. No. 7. P. 656–665.
7. Аслабян Э.Г., Аслабян А.Э., Щипунов А.Н. Совершенствование государственного первичного эталона твёрдости по шкалам Роквелла и Супер-Роквелла // Альманах современной метрологии. 2018. № 16. С. 80–89.
8. Aslanyan A., Aslanyan E., Shchipunov A. Influence of measurement cycle parameters on Martens and indentation hardness values // 13th Conference on the Measurement of Hardness. Together with 23rd TC3 Conference on the Measurement of Force, Mass and Torque and 4th TC22 Conference on Vibration Measurement 13 // Measurement Facing New Challenges. 2017.

9. Боровков В.М. Грузопоршневые манометры высокого давления: математическое моделирование и реализация поршневых пар с противодавлением // Альманах современной метрологии. 2019. № 1 (17). С. 109–115.
10. Nikolaenko A., Pozdeeva V., Kosterov A. Final report «The comparison of national standards of the sound pressure unit in air through calibration of working standard microphones» // Metrologia. 2018. V. 55. No. 1A. P. 09001.
11. Исаев А.Е., Матвеев А.Н., Некрич Г.С., Поликарпов А.М. Особенности передачи единицы колебательной скорости частиц водной среды в государственном первичном эталоне ГЭТ 55-2017 // Альманах современной метрологии. 2019. № 1 (17). С. 116–136.
12. Еняков А.М. Гидроакустические измерения на мегагерцовых частотах. Состояние, проблемы и перспективы развития // Альманах современной метрологии. 2019. № 1 (17). С. 159–180.