

Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172–2016

Н. И. РЫБАК, В. Я. ЧЕРЕПАНОВ, Э. М. ШЕЙНИН, В. А. ЯМШАНОВ

Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии,
Новосибирск, Россия, e-mail: tphys@sniim.ru

Представлен состав Государственного первичного эталона единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172–2016, его метрологические характеристики и принцип работы.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, поверхностная плотность теплового потока, датчик теплового потока, адиабатический калориметр.

The results of updating the State primary measurement standard of heat flux surface density unit are considered. The structure, the metrological characteristics, and work principle are presented.

Key words: State primary measurement standard, heat flux surface density, heat flux sensor, adiabatic calorimeter.

Совершенствование метрологического обеспечения средств измерений теплового потока вызвано расширением сфер их применения и возрастающими требованиями к техническим характеристикам [1–4]. Подтверждение востребованности теплотрии и необходимость развития её метрологического обеспечения описаны в стратегии Консультативного комитета МБМВ по термометрии на 2018–2027 гг. [5, раздел 3]: «Достоверные значения теплофизических величин особенно важны для сокращения глобального потребления энергии. Улучшение изоляции зданий, холодильников, печей, котлов, трубопроводов и химических производств приведёт к уменьшению огромных потерь тепла в мире. Теплопроводность – прямой показатель качества теплоизоляционных материалов, и важность определения плотности теплового потока увеличится, так как это – прямой показатель потерь тепла».

В настоящее время организационной основой обеспечения единства измерений поверхностной плотности теплового потока в Российской Федерации является поверочная схема [6], возглавляемая Государственным первичным эталоном поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172–2008 [7]. Возрастающие требования к показателям точности, диапазонам воспроизводимых значений плотности теплового потока и температуры, а также к метрологическому запасу точности в поверочной схеме привели к необходимости совершенствования ГЭТ 172–2008. Также для проведения сличений необходимо было решить вопросы совместимости ГЭТ 172–2008 с эталонами других стран [8].

В связи с этим в Сибирском государственном научно-исследовательском институте метрологии (СНИИМ) разработан и утверждён Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172–2016 с улучшенными метрологическими характеристиками. ГЭТ 172–2016 воспроизводит единицу поверхностной плотности теплового потока в диапазоне 10–10000 Вт/м² и передаёт

её в диапазоне 1–10000 Вт/м² при температуре 200–500 К. ГЭТ 172–2016 состоит из двух калориметрических установок (К-1, К-2) и двух наборов эталонных датчиков теплового потока (№ 1, 2) (рис. 1).

Калориметрическая установка К-1 предназначена для воспроизведения единицы абсолютным адиабатическим методом в диапазоне 10–2000 Вт/м² при температуре 200–350 К и передачи единицы эталонным датчикам теплового потока. Установка К-1 являлась основой эталона ГЭТ 172–2008. Она воспроизводила и передавала единицу в более широких диапазонах плотности теплового потока (10–5000 Вт/м²) и температуры (200–420 К). Сужение диапазонов измерений установки К-1 в составе ГЭТ 172–2016 позволило повысить показатели точности этой установки в 1,5–2 раза.

Принцип действия установки К-1 подробно описан в [7, 9–11], на рис. 2 показана схема её теплового блока. В вакуумной камере 1 на основании, закреплённом на патрубке 2 вакуум-

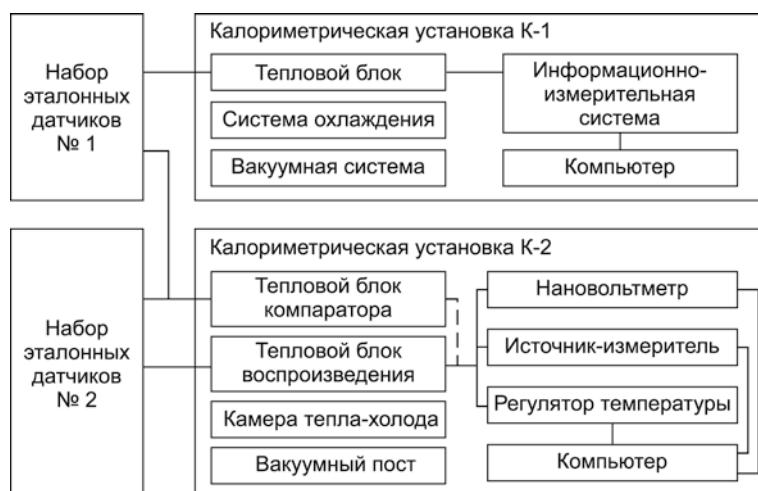


Рис. 1. Состав ГЭТ 172–2016

ной системы, установлен термостатированный теплосток 3 с встроенными электрическим нагревателем 4 и термометром 5. К нижней поверхности теплостока с помощью специальных растяжек прижата сборка с калибруемым и контрольным датчиками 6, 8 теплового потока и основным нагревателем 7. Вся сборка окружена адиабатическим экраном 10 с нагревателем. Между основным нагревателем и экраном установлена дифференциальная термопара 9. Остаточный теплообмен на нижней поверхности нагревателя определяют контрольным датчиком 8.

Равенство температур поверхностей основного нагревателя 7 и адиабатического экрана 10 контролируется по сигналу дифференциальной термопары 9. При равенстве температур теплообмен между поверхностями отсутствует. В этом случае вся выделяемая основным нагревателем мощность P постоянного тока создаёт направленный к теплостоку 3 тепловой поток, плотность q которого определяют с учётом площади F контактной поверхности нагревателя:

$$q = P/F. \quad (1)$$

Главным источником неисключённой систематической погрешности (НСП) воспроизведения единицы поверхностной плотности теплового потока является остаточный теплообмен нагревателя и датчика с адиабатическим экраном. Теплообмен происходит за счёт теплопроводности измерительных проводов и остаточного газа, а также вследствие теплового излучения. Значения составляющих остаточного теплового потока рассчитывали по формулам, соответствующим законам

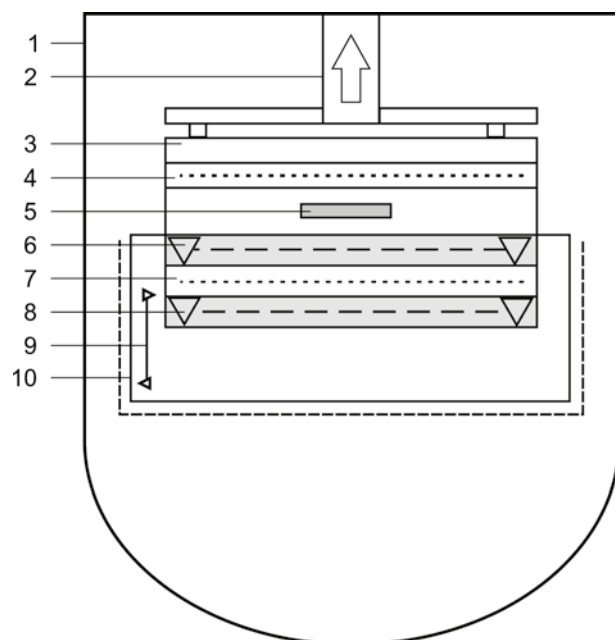


Рис. 2. Схема теплового блока калориметрической установки К-1: 1 – вакуумная камера; 2 – патрубок; 3 – теплосток; 4 – нагреватель теплостока; 5 – термометр теплостока; 6, 8 – калибруемый и контрольный датчики теплового потока, соответственно; 7 – основной нагреватель; 9 – дифференциальная термопара; 10 – адиабатический экран

теплообмена. При передаче единицы поверхностной плотности теплового потока эталонному датчику также необходимо учитывать теплообмен его боковой поверхности с экраном и стационарность температуры всего теплового блока. Анализ и расчёт погрешностей воспроизведения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока установкой К-1 с учётом всех факторов показывает, что НСП не превышает 0,4 % при максимальной температуре 350 К и минимальной воспроизводимой эталоном плотности теплового потока 10 Вт/м². Наименьшая погрешность не превышает 0,25 % при минимальной температуре 200 К и максимальной плотности потока 2000 Вт/м².

Для передачи единицы, воспроизводимой установкой К-1, а также для подтверждения стабильности её работы используется набор № 1 эталонных датчиков теплового потока [6].

Результаты экспериментальной оценки средней квадратической погрешности (СКП) передачи единицы поверхностной плотности теплового потока установкой К-1 эталонным датчикам из набора № 1 показывают, что значение СКП при семи независимых измерениях в диапазоне 10–2000 Вт/м² при температуре 200–350 К находится в пределах 0,25–0,4 %.

Калориметрическая установка К-2 предназначена для воспроизведения единицы поверхностной плотности теплового потока в диапазоне 1000–10000 Вт/м² при температуре 300–500 К и передачи этой единицы датчикам теплового потока в диапазоне 1–10000 Вт/м². Установка состоит из двух тепловых блоков (теплового блока воспроизведения и теплового блока компаратора), системы термостатирования, вакуумной системы, системы задания тепловых режимов и измерений.

Тепловой блок воспроизведения служит для воспроизведения единицы поверхностной плотности теплового потока абсолютным адиабатическим методом и её передачи датчикам теплового потока диаметром 27 мм в диапазоне 1000–10000 Вт/м² при температуре 300–500 К. Принцип действия этого блока аналогичен рассмотренному выше принципу действия установки К-1: в адиабатических условиях вся выделяемая основным нагревателем мощность постоянного тока создаёт направленный к более холодному термостату-теплостоку тепловой поток, плотность которого определяют с учётом площади контактной поверхности нагревателя по формуле (1).

Тепловой блок воспроизведения (рис. 3) содержит основной нагреватель 10, адиабатический экран 8 с нагревателем, контрольный датчик теплового потока 9, термостатированный теплосток 13, установленный на основании блока. Температуру теплостока обеспечивает регулятор по сигналу термометра сопротивления, расположенного в основании теплового блока. Тепловой поток в калибруемом датчике 11 задают электрической мощностью, выделяющейся в основном нагревателе. Адиабатический экран при этом исключает теплообмен на верхней и боковой поверхностях нагревателя. Контрольный датчик 9 является нуль-индикатором, подтверждающим соблюдение адиабатических условий. По сигналу этого датчика устанавливается температура экрана, при которой отсутствует теплообмен между основным нагревателем и экраном. Вокруг датчика создаётся градиент температуры, идентичный градиенту на его боковой поверхности, для минимизации теплообмена на боко-

вой поверхности. Для этого в пространстве между адиабатическим экраном и термостатированным теплостоком размещается кольцо 12 из эластичного материала с теплопроводностью, близкой к эффективной теплопроводности датчика.

Основной нагреватель, адиабатический экран, контрольный и калибруемый датчики надёжно прижаты друг к другу и к теплостоку с помощью прижимного устройства, содержащего стойки 4, перекладину 3 и сильфон 5. Сильфон, выполняя функцию упругой пружины, воздействует через пластину 6 и теплоизоляционную прокладку 7 на основные элементы теплового блока, обеспечивая надёжный и воспроизводимый тепловой контакт между ними. Для работы в расширенных диапазонах температуры и плотности теплового потока тепловой блок помещают в камеру тепла-холода 1 и снабжают колпаком 2, в котором создают вакуум.

Источники систематических погрешностей установок К-2 (в комплекте с тепловым блоком воспроизведения) и К-1 аналогичны. С учётом этого погрешность воспроизведения единицы поверхностной плотности теплового потока установкой К-2 для наиболее неблагоприятного случая (максимальной плотности потока 10000 Вт/м^2 и температуры 500 К) не превышает $0,35 \%$.

Экспериментальная оценка СКП определения коэффициента преобразования эталонных датчиков из набора № 2 при пяти независимых измерениях в диапазоне $1000\text{--}10000 \text{ Вт/м}^2$ и температуре $300\text{--}500 \text{ К}$ находится в пределах $0,2\text{--}0,4 \%$.

Тепловой блок компаратора установки К-2 предназначен для передачи единицы поверхностной плотности теплового потока в область малых значений ($1\text{--}500 \text{ Вт/м}^2$), в том числе рабочим эталонам (датчикам различных форм и размеров). Передача единицы поверхностной плотности теплового потока рабочим эталонам происходит в процессе их калибровки путём компарирования с эталонными датчиками при использовании теплового блока компаратора в составе установки К-2 в диапазоне температур $270\text{--}320 \text{ К}$.

Основой метода передачи единицы поверхностной плотности теплового потока является допущение о равенстве значений тепловых потоков Q_0 и Q_x , проходящих соответственно через эталонный и калибруемый датчики [12]. Из условия $Q_0 = Q_x$ следует основное уравнение метода передачи единицы поверхностной плотности теплового потока путём сличения с помощью компаратора по формуле

$$q_x = Q_0 / S_x = q_0 S_0 / S_x, \quad (2)$$

где q_x , q_0 – искомое и эталонное значения плотности теплового потока; S_0 , S_x – площади контактных поверхностей эталонного и калибруемого датчиков, соответственно.

Такой метод позволяет передавать единицу плотности теплового потока калибруемым датчикам различных форм и размеров, отличающимся от эталонного датчика. При компарировании в зависимости от требуемого диапазона плотностей теплового потока калибруемого датчика и соотношения площадей поперечного сечения калибруемого и эталонного датчиков единица передаётся от датчика ДТДВ-1 (из набора № 2) или от датчика ДТДЗ-3 (из набора № 1).

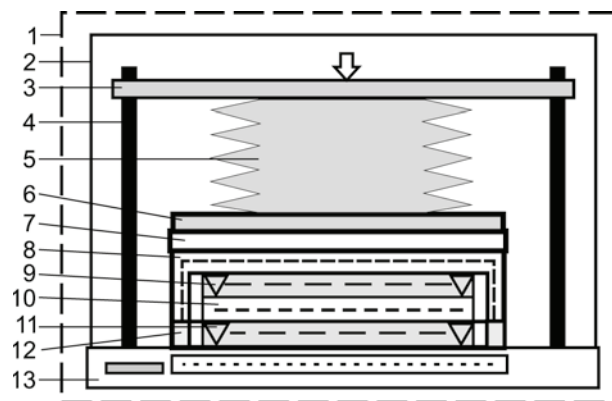


Рис. 3. Схема теплового блока воспроизведения калориметрической установки К-2:

1 – камера тепла-холода; 2 – колпак; 3 – перекладина; 4 – стойка; 5 – сильфон; 6 – пластина; 7 – прокладка; 8 – адиабатический экран; 9, 11 – контрольный и калибруемый датчики теплового потока, соответственно; 10 – основной нагреватель; 12 – кольцо; 13 – теплосток

Устройство и принцип действия теплового блока компаратора показаны на рис. 4. Внутри закрытой колпаком 1 вакуумированной зоны на основании 14 располагается холодильник-термостат 12. Он выполнен в виде диска и снабжён датчиком температуры и элементами Пельтье 13, которые служат для отвода теплоты. Температура холодильника-термостата стабилизируется с помощью прецизионного регулятора. Это обеспечивает стационарность температуры всего теплового блока.

Тепловой поток создаётся за счёт электрической мощности, подводимой к основному нагревателю 7 от стабилизированного источника. Этот поток проходит последовательно через эталонный датчик 8, распределитель потока 9 и калибруемый датчик 11. Для минимизации теплообмена на нижней и боковой поверхностях распределителя используется адиабатический экран 10, температура которого с помощью регулятора поддер-

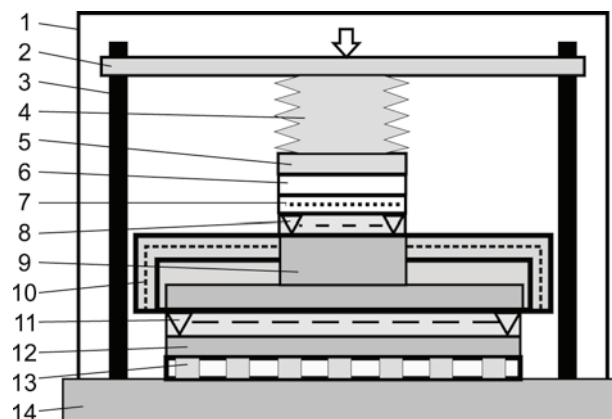


Рис. 4. Схема теплового блока компаратора калориметрической установки К-2:

1 – колпак; 2 – перекладина; 3 – стойка; 4 – сильфон; 5 – пластина; 6 – прокладка; 7 – основной нагреватель; 8, 11 – эталонный и калибруемый датчики теплового потока, соответственно; 9 – распределитель потока; 10 – адиабатический экран; 12 – холодильник-термостат; 13 – элементы Пельтье; 14 – основание

живается равной температуре распределителя. Для обеспечения надёжного и воспроизводимого теплового контакта между поверхностями основного нагревателя, эталонного датчика, распределителя потока, калибруемого датчика и термостата используется сильфон 4, который через пластину 5 и теплоизоляционную прокладку 6 плотно прижимает их друг к другу.

При таком методе компарирования важно обеспечить равенство тепловых потоков, проходящих через эталонный 8 и калибруемый 11 датчики. Для этого между ними располагается распределитель потока 9 из материала с высокой теплопроводностью, который создаёт в калибруемом датчике равномерный по плотности тепловой поток. Равенство значений плотности теплового потока в датчиках обеспечивает адиабатизация открытой поверхности распределителя потока. Для этого её окружают адиабатическим экраном 10, температура которого поддерживается равной температуре открытой поверхности распределителя потока. Распределитель потока является сменным элементом теплового блока компаратора и изготавливается таким образом, чтобы его теплоотдающая поверхность полностью повторяла поверхность калибруемого датчика.

Таким образом, с помощью теплового блока компаратора установки К-2 и датчиков из состава ГЭТ 172–2016 диаметром 27 мм осуществляется передача единицы калибруемым датчикам диаметром до 100 мм. Это позволяет не только расширить диапазон передаваемой единицы до 1 Вт/м^2 , но и обеспечить, в частности, возможность сличений ГЭТ 172–2016 с эталонами других стран, в состав которых входят датчики других размеров и форм.

Главными источниками систематических погрешностей метода и реализующих его устройств являются: несоблюдение равенства тепловых потоков Q_0 , Q_x , обусловленное остаточным теплообменом распределителя потока и экранов; погрешности определения значений площади S_0 , S_x датчиков; погрешности из-за нестационарности температуры датчиков. Теоретический анализ этих источников погрешности передачи единицы поверхностной плотности теплового потока с помощью компаратора, а также экспериментальные исследования компаратора показали, что суммарная погрешность передачи единицы в область потоков теплоты малой плотности не превышает 1,5–2,5 % при температуре 270–320 К.

Таким образом, единицу поверхностной плотности теплового потока от ГЭТ 172–2016 можно передавать с повышенной точностью в расширенных диапазонах значений плотности теплового потока и температуры методом прямых измерений на установках К-1 и К-2, а также с помощью наборов № 1, 2 эталонных датчиков. Кроме этого, передача единицы поверхностной плотности теплового потока методом сличения с помощью компаратора возможна калибруемым датчиком, отличающимся по форме и размерам от эталонных датчиков.

В связи с этим взамен поверочной схемы [6] для средств измерений поверхностной плотности теплового потока разработана и находится в стадии утверждения поверочная схема, возглавляемая эталоном ГЭТ 172–2016. С учётом возможностей ГЭТ 172–2016 в схему внесены следующие изменения:

расширены диапазоны воспроизводимых эталоном значе-

ний единицы поверхностной плотности теплового потока до 10000 Вт/м^2 (вместо 5000 Вт/м^2) и температуры 200–500 К (вместо 200–420 К), а также передаваемых значений единицы поверхностной плотности теплового потока (от 1 Вт/м^2 вместо 10 Вт/м^2);

улучшены показатели точности: среднее квадратическое отклонение результата измерений составляет 0,25–0,4 % (вместо 0,6 %), неисключённая систематическая погрешность 0,3–0,4 % (вместо 0,4–0,6 %), неопределённость по типу А 0,25–0,4 % (вместо 0,4 %), неопределённость по типу В 0,15–0,25 % (вместо 0,4 %);

при сохранении числа ступеней передачи единицы поверхностной плотности теплового потока от ГЭТ 172–2016 средствам измерений практически выполнено условие по соотношению 1:3 погрешностей между ними;

для выполнения прецизионных измерений схема предусматривает прямую передачу единицы поверхностной плотности теплового потока от ГЭТ 172–2016 средствам измерений повышенной точности с пределом допускаемой погрешности 1,5 %.

Таким образом, внедрение ГЭТ 172–2016 позволяет существенно повысить уровень обеспечения единства измерений плотности теплового потока. Это создаёт условия для создания современных типов средств измерений теплового потока и более совершенных эталонных (поверочных) теплотрических установок. В свою очередь, это позволит существенно расширить сферы применения средств измерений этой важнейшей физической величины.

Л и т е р а т у р а

1. **Герашенко О. А.** Основы теплотрии. Киев: Наукова думка, 1971.
2. **Bales E., Bomberg M., Couille G.** Applications of Heat Flux Transducers: A Select and Annotated Bibliography // American Society for Testing and Materials. Philadelphia: ASTM STP. 1985. P. 223–236.
3. **Сапожников С. З.** Основы градиентной теплотрии. СПб: Изд-во СПб ГПУ, 2012.
4. **Грищенко Т. Г., Декуша Л. В., Воробьев Л. И., Бурова З. А., Ковтун С. И., Декуша О. Л.** Теплотрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах / Под ред. д-ра техн. наук Т. Г. Грищенко // Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока. Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017.
5. **Strategy Document for Rolling Programme Development for 2018 to 2027.** The Consultative Committee for Thermometry. Strategic Planning CCT 2018-2027 29. September 2017 [Электрон. ресурс]. <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCT-strategy-document.pdf> (дата обращения: 19.01.2018).
6. **Рыбак Н. И., Черепанов В. Я., Шейнин Э. М., Ямшанов В. А.** Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока // Законодательная и прикладная метрология. 2015. № 5. С. 27–31.
7. **Лозинская О. М., Рыбак Н. И., Черепанов В. Я., Шейнин Э. М., Ямшанов В. А.** Государственный первичный эталон

единицы поверхностной плотности теплового потока // Измерительная техника. 2009. № 10. С. 52–55.

8. **EUROMET** Project №426. Intercomparison of heat flux sensors. Final Report / MKEH Hungarian Trade Licensing Office, Thermometry Department. April 2010.

9. **Геращенко О. А., Грищенко Т. Г., Калинин А. Н., Томбасов Е. А., Черепанов В. Я.** Особенности кондуктивной градуировки преобразователей теплового потока в вакуумном адиабатическом калориметре // Промышленная теплотехника. 1984. Т. 6. № 5. С. 60–64.

10. **Томбасов Е. А., Лозинская О. М., Черепанов В. Я.** Образцовая установка для градуировки и поверки преоб-

разователей теплового потока // Метрология. 1987. № 1. С. 34–38.

11. **Черепанов В. Я.** Методы и средства определения метрологических характеристик контактных преобразователей теплового потока // Измерительная техника. 2004. № 8. С. 17–21.

12. **Вихарева Н. А., Зонова А. Д., Троценко Д. П., Черепанов В. Я., Ямшанов В. А.** Разработка и исследование новых методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотрии // Приборы. 2012. № 10. С. 1–8.

Дата принятия: 04.12.2017.

621.317.4

Государственный первичный эталон единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017

Е. А. ВОЛЕГОВА^{1,2}, М. А. МАЛЫГИН¹, Т. И. МАСЛОВА¹, А. С. ВОЛЕГОВ^{1,2}

¹Уральский научно-исследовательский институт метрологии, Екатеринбург, Россия, e-mail: ekaterina.volegova@gmail.com

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Представлена информация о совершенствовании Государственного первичного эталона единицы мощности магнитных потерь ГЭТ 198–2011. В состав эталона введена установка для воспроизведения единиц магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб. Работы по совершенствованию проходили в 2015–2016 гг. Описаны состав, принцип работы и метрологические характеристики Государственного первичного эталона единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ Вб ГЭТ 198–2017. Приведена информация о предварительных сличениях.

Ключевые слова: эталон, магнитотвёрдые материалы, магнитная индукция, магнитный поток, магнитомягкие материалы, мощность магнитных потерь, дополнительные сличения.

The information on updating the State primary measurement standard of magnetic power losses GET 198–2011 by comprising the setup for reproduction of magnetic flux density in the range 0.1 T to 2.5 T and magnetic flux in the range $1 \cdot 10^{-5}$ Wb to $3 \cdot 10^{-2}$ Wb has conducted in 2015–2016 is presented. The structure, principle of work and the metrological characteristics of this new standard GET 198–2017 are described. Some information about carrying out of preliminary comparisons is presented.

Key words: measurement standard, hard magnetic materials, magnetic flux density, magnetic flux, soft magnetic materials, magnetic power losses, preliminary comparisons.

Магнитные материалы во многом определяют уровень технологического развития промышленности, науки, военно-промышленного комплекса. Производимая предприятиями военно-промышленного комплекса продукция (промышленные роботы, обрабатывающие станки, ветрогенераторы, вентильные электродвигатели, системы наведения ракет, системы ориентировки, радары, некоторые виды фазированных антенных решёток) обеспечивает промышленную мощь и обороноспособность страны.

Применяемые в быту изделия (электродвигатели, громкоговорители и др.), содержащие постоянные магниты, определяют уровень комфорта жизни современного человека, поскольку в основном используются в качестве преобразователей электрической энергии в механическую. Дальнейшее развитие и совершенствование технических устройств на основе постоянных магнитов, а также снижение материалоемкости магнитов требуют создания новых магнитотвёрдых материалов (МТМ) с