
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.583.3:621.384.3

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ОПТИЧЕСКИМИ ПИРОМЕТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ

М.А. Ураксеев, М.Г. Куреев

Показана актуальность разработки и применения современных информационно-измерительных систем (ИИС) с оптическими пирометрическими преобразователями температуры (ОППТ). Приведены физические основы функционирования и ряд структурных схем ИИС ОППТ. Рассмотрены особенности построения пирометрических преобразователей для различных отраслей промышленности.

Для обеспечения безопасного обслуживания технологических машин и оборудования, осуществления контроля за ходом технологических процессов в различных отраслях промышленности (авиастроение, металлургия, нефтехимия, энергетика, жилищно-коммунальное хозяйство) необходимо применение современных средств измерения физических величин, к которым относятся ИИС ОППТ.

К ИИС ОППТ предъявляются жесткие требования: высокое быстродействие, возможность измерения температуры движущихся объектов и элементов оборудования под высоким напряжением, отсутствие искажения температурного поля объекта измерения, возможность измерения высоких температур. Этим требованиям во многом отвечают ИИС с преобразователями температуры с использованием теплового излучения тел.

Главное их достоинство заключается в том, что они позволяют дистанционно измерять температуру контролируемого объекта или процесса. Такие преобразователи получили название – оптические пирометрические преобразователи температуры¹.

Использование современной элементной базы существенно расширило возможности ИИС ОППТ и позволило наделить их новыми свойствами: помимо измерения, они могут теперь проводить обработку полученной информации и осуществлять сложные действия по управлению технологическим процессом, т.е., по сути, имеем информационно-измерительные и управляющие системы. Снизился их вес, уменьшились габариты, а сами системы стали проще и удобнее в эксплуатации, в то же время их функции при применении новой элементной базы, включающей микропроцессоры, существенно расширились. Использование электроники нового поколения позволило также снизить процент отказов таких систем как за счет уменьшения количества используемых элементов, так и за счет высокой надежности каждого из них. Кроме того, более корректно учитывается влияние излучательной способности измеряемого объекта и температуры окружающей среды, что позволило повысить точность измерений в цеховых условиях. Высокая стабильность источников опорного напряжения и цифровое преобразование сигнала приемника излучения в температуру создали предпосылки для увеличения межповерочного интервала пирометров.

Основы теплового излучения

Известно, что любое тело, температура которого отлична от температуры абсолютного нуля (-273°C), излучает в окружающее пространство электромагнитные волны различной длины λ или частоты ν (число колебаний в секунду) за счет преобразования энергии хаотического теплового движения частиц тела в энергию излучения². С ростом температуры

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

увеличиваются амплитуда и частота колебаний молекул вещества тела. Например, сильно нагретые тела светятся, а при обычных температурах являются источниками только невидимого инфракрасного излучения.

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется тепловым, или температурным, излучением. Оно зависит только от температуры и оптических свойств излучающего тела.

Тепловое излучение имеет сплошной спектр, положение максимума которого зависит от температуры тела. С ее повышением возрастает общая энергия испускаемого теплового излучения, а максимум перемещается в область малых длин волн. Тепловое излучение испускает, например, поверхность нагретого металла, биологический организм, лопатка турбины ГТД и т.д.

Тепловое излучение соответствует электромагнитному излучению с длинами волн λ , расположенными в диапазоне от 0,76 до 1000 мкм (инфракрасное излучение ИК, рис. 1). Диапазон длин волн ультрафиолетового излучения УФ составляет от 1,0 нм до 0,38 мкм, видимого В от 0,38 до 0,76 мкм.

Тепловое излучение подчиняется законам излучения Стефана – Больцмана, Кирхгофа и Планка³, которые будут рассмотрены далее.

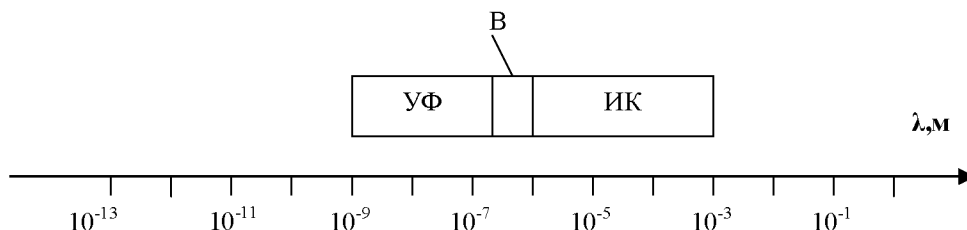


Рис. 1. Диапазоны длин волн различных излучателей (в логарифмическом масштабе)

Закон Кирхгофа. Кирхгоф, опираясь на второй закон термодинамики и анализируя условия равновесного излучения в изолированной системе тел, установил количественную связь между спектральной плотностью энергетической светимости и спектральной поглощательной способностью тел. Отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела; оно является для всех тел универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры (закон Кирхгофа)

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T} \quad (1)$$

Для черного тела $A_{\nu,T}^u \equiv 1$, поэтому из закона Кирхгофа (1) вытекает, что $R_{\nu,T}$ для черного тела равна $r_{\nu,T}$. Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $r_{\nu,T}$ есть не что иное, как спектральная плотность энергетической светимости черного тела. Следовательно, согласно закону Кирхгофа для всех тел отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности равно спектральной плотности энергетической светимости черного тела при той же температуре и частоте.

Из закона Кирхгофа следует, что спектральная плотность энергетической светимости любого тела в любой области спектра всегда меньше спектральной плотности энергетической светимости черного тела (при тех же значениях T и ν), так как $A_{\nu,T} < 1$ и поэтому $R_{\nu,T} < r_{\nu,T}$. Кроме того, из (1) вытекает, что если тело при данной температуре T не поглощает электромагнитные волны в интервале частот от ν до $\nu + d\nu$, то оно их в этом интервале частот при температуре T и не излучает, так как при $A_{\nu,T} = 0$ $R_{\nu,T} = 0$.

Используя закон Кирхгофа, выражение для энергетической светимости тела можно записать в виде

$$R_T = \int_0^{\infty} A_{v,T} \cdot r_{v,T} \cdot dv \quad (2)$$

Для серого тела

$$R_T = A_{v,T} \int_0^{\infty} r_{v,T} dv = A_T R_e, \quad (3)$$

где $R_e = \int_0^{\infty} r_{v,T} dv$ – энергетическая светимость черного тела (зависит только от температуры).

Закон Кирхгофа описывает только тепловое излучение, являясь настолько характерным для него, что может служить надежным критерием для определения природы излучения. Излучение, которое закону Кирхгофа не подчиняется, не является тепловым.

Формула Планка. Фундаментальным выражением, определяющим свойства излучения абсолютно черного тела, является формула Планка

$$E_{\lambda, \dot{\sigma}}^i = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1)^{-1} \Delta\lambda \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$$

где $c_1 = 2\pi h c^2 = (3,7413 \pm 0,0002) \cdot 10^{-6} \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$; c – скорость света в вакууме; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана.

Формула Планка определяет светимость абсолютно черного тела, т.е. мощность энергии, излучаемой в полусферу единицей поверхности с температурой T внутри спектрального интервала $\Delta\lambda$, середина которого характеризуется длиной волны λ . С помощью этой формулы можно рассчитать распределение энергии в спектре черного тела при заданной температуре T . Группа кривых распределения энергии в спектре черного тела для ряда температур представлена на рис. 2.

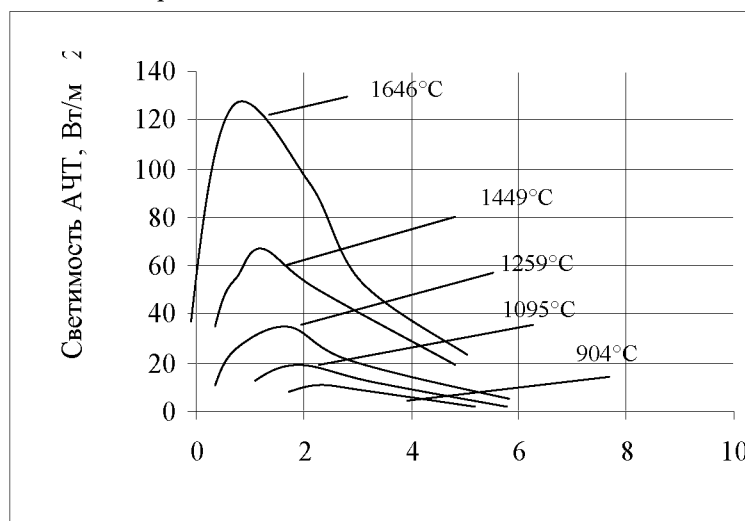


Рис. 2. Кривые спектрального распределения светимости АЧТ при различных температурах

Из формулы Планка следует, что с повышением температуры тела его светимость во всех длинах волн спектра очень быстро возрастает и максимум кривой распределения энергии излучения по спектру смещается в сторону коротких волн.

Характер смещения максимума выражается законом смещения Вина, который непосредственно может быть выведен из формулы Планка. Для этого необходимо выражение (4) решить на максимум

$$dE_{\lambda,T}^i/d\lambda=0,$$

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

и, обозначая $c_2/\lambda_{\max}T = \gamma$, получим следующее трансцендентное уравнение $e^\gamma - \gamma e^\gamma/5 = 1$, откуда $\gamma = 4,9651$ и, следовательно, $T_{\lambda_{\max}} = c_2/\gamma = 2896$ мкм·град. Эта формула выражает закон смещения Вина.

Закон Стефана – Больцмана. Из закона Кирхгофа (1) следует, что спектральная плотность энергетической светимости черного тела является универсальной функцией, поэтому нахождение ее явной зависимости от частоты и температуры является важной задачей теории теплового излучения.

Австрийский физик Й. Стефан (1835–1893), анализируя экспериментальные данные (1879), и Л. Больцман, применяя термодинамический метод (1884), решили эту задачу лишь частично, установив зависимость энергетической светимости R_e от температуры. Согласно закону Стефана – Больцмана

$$R_e = \sigma \cdot T^4, \quad (5)$$

т.е. энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры; σ – постоянная Стефана – Больцмана: ее экспериментальное значение равно $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² · К⁴.

Закон Стефана – Больцмана, определяя зависимость R_e от температуры, не дает ответа относительно спектрального состава излучения черного тела. Из экспериментальных кривых зависимости функции $r_{\lambda,T}$ от длины волны λ ($r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T}$) при различных температурах следует, что распределение энергии в спектре черного тела является неравномерным. Все кривые имеют явно выраженный максимум, который по мере повышения температуры смещается в сторону более коротких волн. Площадь, ограниченная кривой зависимости $r_{\lambda,T}$ от λ и осью абсцисс, пропорциональна энергетической светимости R_e черного тела и, следовательно, по закону Стефана – Больцмана четвертой степени температуры.

Современные информационно-измерительные системы для дистанционного контроля температуры

Они могут быть использованы в различных отраслях (авиация, металлургия, нефтегазовая промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство, энергетика), где требуется дистанционное измерение температуры. Например, измерение температуры лопаток ротора газотурбинного двигателя, потока металла в струе, детали, находящейся под высоким напряжением (электрические контакты линий электропередач, трансформаторные подстанции и т.д.).

На рис. 3 приведена структурная схема оптического устройства для контроля температуры лопаток ротора газотурбинного двигателя⁴.

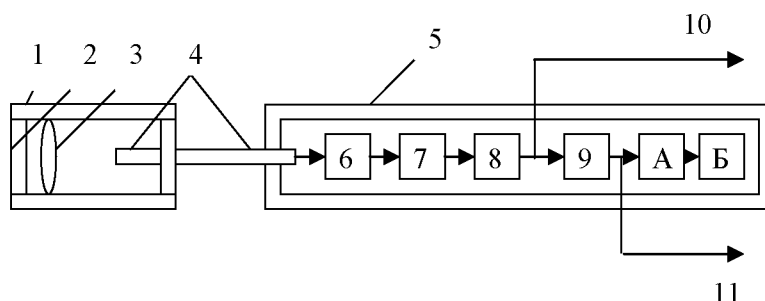


Рис. 3. Оптическое пирометрическое устройство для контроля температуры рабочих лопаток ротора газотурбинного двигателя: 1 – оптическая головка; 2 – инфракрасно-прозрачное стекло; 3 – объектив; 4 – волоконно-оптический кабель; 5 – электронный блок; 6 – приемник излучения; 7 – усилитель; 8 – устройство коррекции помех; 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); А – запоминающий регистр; Б – жидкокристаллический индикатор; 10 и 11 – аналоговый и цифровой выходы связи

Для повышения надежности устройства оптическая головка 1 и электронный блок 5 разнесены с помощью волоконно-оптического кабеля 4, так как двигатель работает при повышенной температуре и вибрации.

Излучение от лопатки проецируется оптической головкой 1 через инфракрасно-прозрачное стекло 2 и объектив, одновременно выполняющий функции полосового фильтра частоты, на входной торец волоконно-оптического кабеля 4. Далее излучение преобразуется в электрический сигнал приемником оптического излучения 6 и усиливается услителем 7. С помощью устройства коррекции помех 8 выделяется информативный сигнал, являющийся функцией температуры лопаток турбины. В АЦП 9 аналоговый сигнал преобразуется в цифровой код, который хранится в запоминающем регистре А и представляется на жидкокристаллическом индикаторе в виде результата измерения.

Устройство для дистанционного измерения температуры⁵, показанное на рисунке 4а, содержит сигнальную оптическую систему 1 и опорную оптическую систему 2, выходы которых связаны по сигналу, соответственно, с сигнальным приемным окном 3 и опорным приемным окном 4 пирозлектрического блока 5. Пирозлектрический блок 5 включает два пирозлектрических канала 6 и 7 – сигнальный и опорный соответственно, при этом входы каналов 6 и 7 связаны по сигналу, соответственно, с сигнальным приемным окном 3 и опорным приемным окном 4. Выходы каналов 6 и 7 соединены, соответственно, с первым и вторым входом электронного блока 8.

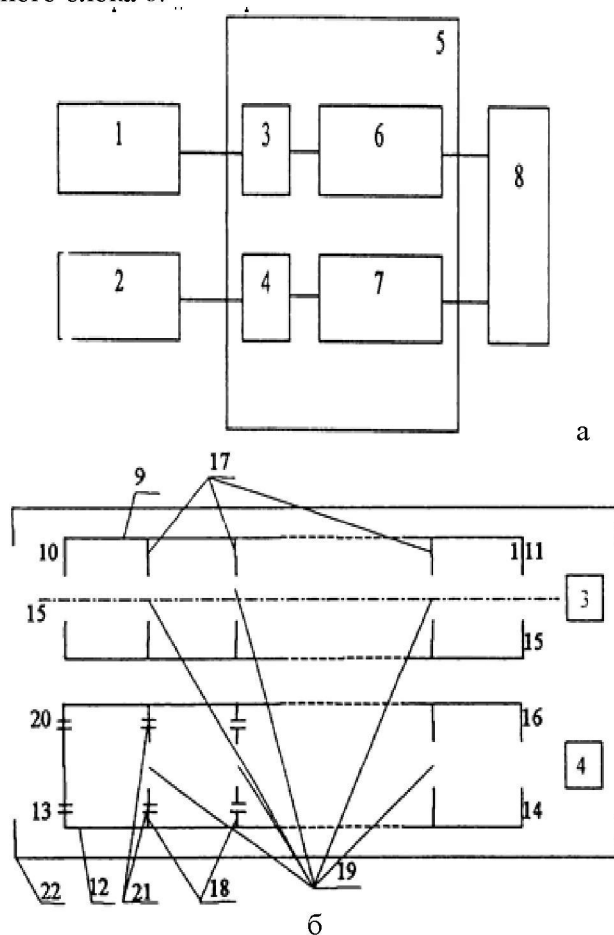


Рис. 4. Устройство для дистанционного контроля температуры

В конкретной реализации разработанного устройства сигнальная оптическая система 1, как показано на рисунке 4б, выполнена в виде трубки 9 с первой и второй заглушками (10 и 11 соответственно), при этом опорная оптическая система 2 выполнена в виде трубки 12 с

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

первой и второй заглушками (13 и 14 соответственно). В заглушках 10, 11 выполнены соосно первые отверстия 15. В заглушке 14 выполнено отверстие 16. Внутри трубок 9, 12 размещены в каждой N (N – натуральное) перегородок, соответственно, 17, 18 с первыми отверстиями 19, выполненными соосно. В заглушке 13 и в перегородках 18 выполнены вторые отверстия 20, 21, соответственно, расположенные за границами проекции окна 4, соответственно, на заглушку 13 и перегородки 18. Оптические системы 1, 2 теплоизолированы с помощью теплоизолирующего контейнера 22.

На рис. 5 приведена структурная схема устройства для дистанционного контроля или диагностики объектов в металлургии, энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве и других сферах⁶.

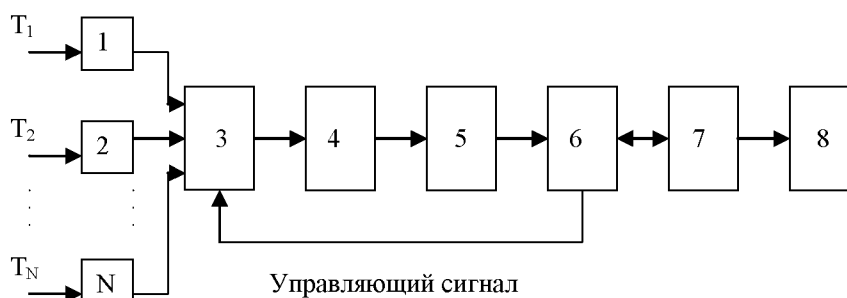


Рис. 5. Информационно-измерительное устройство температурной диагностики объектов: 1, 2, ... N – оптические пирометрические преобразователи; 3 – мультиплексор; 4 – усилитель; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – микропроцессор; 7 – интерфейс; 8 – жидкокристаллический индикатор

Устройство работает следующим образом. Излучение от объектов диагностирования попадает на оптические пирометрические преобразователи 1, 2, ..., N , где оно преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный температуре объектов. Мультиплексор 3 коммутирует нужные каналы, сигналы которых усиливаются усилителем 4. В аналого-цифровом преобразователе 5 аналоговые сигналы преобразуются в цифровой код, который обрабатывается микропроцессором 6 и через интерфейс 7 отображается на жидкокристаллическом индикаторе 8 в виде значения температуры. Микропроцессор 6 управляет работой мультиплексора 3, выдавая команды на подключение нужного канала, по которому от соответствующего пирометрического преобразователя температуры выходной электрический сигнал через мультиплексор передается для дальнейшей обработки и измерения.

Применение N оптических пирометрических преобразователей позволяет контролировать в режиме реального времени сразу несколько объектов. Такое конструктивное исполнение устройства дает возможность автоматизировать контроль за ходом технологического процесса на предприятии и создать надежную систему безопасности, предотвращая аварийные ситуации.

¹ Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванов А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992; Гордов А.Н. Основы пирометрии. М.: Металлургия, 1971.

² Госсорг Ж. Инфракрасная термография: Основы, техника, применение: Пер. с фр. / Под ред. Л.Н. Курбатова. М.: Мир, 1988.

³ Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1984; Яворский Б.М., Детлаф А.А. Физика: Для школьников старших классов и поступающих в вузы: Учебное пособие. М.: Дрофа, 2003; Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Физика. Справочное руководство: Для поступающих в вузы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

⁴ Измерительное устройство для контроля температуры рабочих лопаток ротора турбины газотурбинного двигателя: пат. 053007 РФ: МПК7 G01J5/10 / Ураксеев М.А., Камалов С.В.;

заявитель Уфимский государственный авиационный технический университет; пат. повременный Ефремова В.П. № 2005133667; заявл. 31.10.05; опубл. 20.04.06.

⁵ Пирометр: пат. 2215269 Рос. Федерация МПК7 G01J5/00 / Семёнов А.Н., Тюрин В.Н., Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Хрулев А.Е., Черемных Г.С., Блинов А.М.; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалея»; заявл. 06.05.2002; опубл. 27.10.2003.

⁶ Информационно-измерительное устройство температурной диагностики контролируемых объектов: решение о выдаче патента на полезную модель от 17.10.2006 по заявке № 2006134227/22: МПК8 G01J15/10 / Ураксеев М.А., Фаррахов Р.Г.; заявитель Уфимский государственный авиационный технический университет.

УДК 681.518

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ФАРАДЕЯ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

М.А. Ураксеев, Т.М. Левина

Проведено исследование магнитооптики и волоконной оптики для создания современных информационно-измерительных систем (ИИС) контроля магнитного поля и электрического тока с элементом Фарадея в виде оптического волокна. Представлены преимущества волоконно-оптических кабелей в качестве физической среды. Определены способы разделения световых волн в соответствии с их поляризацией и разработки в ИИС контроля магнитного поля и электрического тока с применением магнитооптического элемента Фарадея

Для принятия правильных и быстрых решений необходимо иметь полную и достоверную информацию о контролируемых объектах и процессах. Поэтому современный уровень науки и производства выдвигает перед измерительной техникой ряд новых сложных задач, решение которых связано с созданием новых средств измерений, качественно отличающихся от тех, которые использовались ранее.

Важным отличием новых средств измерений является их интеллектуальность, т.е. способность измерительных приборов и систем выполнять операции преобразования, обработки, анализа и управления информацией, которые ранее были доступны только человеку. К таким средствам относятся ИИС, т.е. комплекс измерительных устройств, обеспечивающих одновременное получение необходимой измерительной информации о состоянии объекта. Технические средства, входящие в ИИС, должны обладать определенными свойствами:

- легко сопрягаться между собой без дополнительных устройств;
- не оказывать заметного взаимного влияния;
- иметь одинаковые условия эксплуатации.

Следовательно, эта система должна обладать различными видами совместимости: энергетической, метрологической, конструктивной, эксплуатационной и информационной¹.

Уникальные открытия в области магнитооптики и волоконной оптики в последние десятилетия привлекают к этой области физики всеобщее внимание. Это связано с повышением требований к ИИС и объемам измерительной информации, ее качеству (достоверности), способам получения, анализа, хранения и передачи, что приводит к постоянным изменениям взглядов на обеспечение необходимыми средствами специалистов, занимающихся измерениями и управлением полученными данными. Вместе с тем повышаются требования