

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»



Н. Н. Попок
А. В. Сидикевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕРМОПАРЫ И ПИРОМЕТРА «OPTRIS LAZERSIGHT»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для выполнения учебно-исследовательской лабораторной работы
для студентов и магистрантов машиностроительных специальностей

Новополоцк
ПГУ
2019

УДК 621.9.048+620.178.152.341(075.8)

Одобрены и рекомендованы к изданию методической комиссией факультета машиностроения и автомобильного транспорта в качестве методических указаний (протокол № 1 от 20.04.2017)

Кафедра технологии и оборудования машиностроительного производства

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

проф., канд. техн. наук, проф. кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства В. И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ;
доц., канд. техн. наук, доц. кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства А. М. ДОЛГИХ

© Попок Н. Н., Сидикевич А. В., 2019
© Полоцкий государственный университет, 2019

1 ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Целью работы является изучение тепловых процессов в технологических системах с использованием термопары и пирометра «Optris LazerSight».

Рекомендуется выполнять работу в следующем порядке:

1. Ознакомиться с методами определения температуры в технологических системах.
2. Изучить схему тепловых потоков в заданной технологической системе.
3. Подготовить для эксперимента заданную технологическую систему.
4. Выбрать метод изучения теплового процесса и подготовить оборудование и аппаратуру для измерения температуры.
5. Провести эксперимент в заданной технологической системе в соответствии с предварительно выбранными режимами обработки.
6. Произвести качественную и количественную оценки изменения тепловых процессов и измеренной температуры.
7. Заполнить протокол исследования и составить отчет по работе.

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Классификация методов экспериментального определения тепловых потоков и температур в технологических системах

Исследование тепловых процессов в технологических системах тесно связано с проведением экспериментов по измерению температур на различных участках инструмента, заготовки или оборудования, а также с определением мощности и плотности тепловых потоков. Такие эксперименты необходимы, с одной стороны, для решения тепловых задач опытным путем, с другой – для проверки правильности и корректирования результатов теоретических построений, предназначенных для определения расчетным путем температур или характеристик источников и стоков теплоты [1, 2].

При экспериментальном изучении тепловых процессов в технологических системах:

- 1) определяют мощность источников тепловыделения, законы распределения плотности тепловых потоков или общее количество теплоты;
- 2) измеряют локальную температуру, т.е. температуру на небольшом участке твердого тела (условно в точке);
- 3) определяют среднюю температуру на поверхности твердого тела, в т.ч. и на участках, где происходит его соприкосновение с другими телами или жидкостью;

4) изучают закон распределения температур на той или иной части поверхности твердого тела, в т.ч. и на контактных площадках;

5) определяют температурное поле внутри твердого тела.

Методы измерения температуры можно разделить на две большие группы: косвенные и прямые (рис. 1). Методы первой группы позволяют оценить теплоту и температуру по некоторым косвенным показателям, например, цвету стружки, изменению силы резания и др.

Прямые методы подразделяются на контактные и бесконтактные.

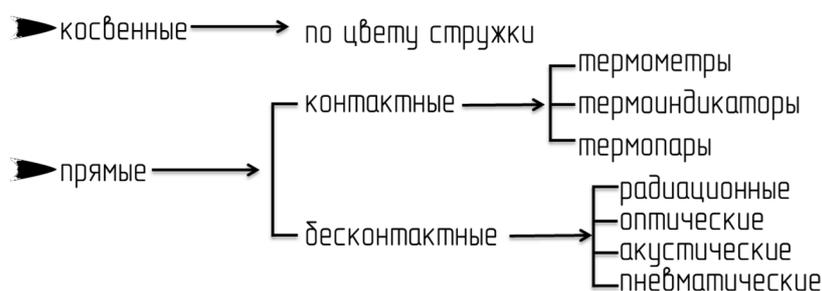


Рисунок 1. – Классификация методов экспериментального исследования тепловых потоков и температур в технологических системах

К контактным относятся методы и устройства, в которых между датчиком температуры и объектом измерения имеется непосредственный контакт. Бесконтактные содержат методы, при которых датчики измерительных устройств находятся на некотором удалении от объекта, температура которого подлежит определению.

Контактные методы измерения, в свою очередь, могут быть разделены на три группы в соответствии с основными особенностями устройств, с помощью которых их осуществляют: термометры, термопары, термоиндикаторы. Бесконтактные измерения, используемые в технологической практике, осуществляют либо с помощью радиационных устройств, в основе которых лежит регистрация инфракрасного излучения нагретых тел, либо с помощью других устройств, использующих радиационные, оптические, акустические или пневматические датчики.

2.2 Контактные методы измерения температуры

Среди приборов, предназначенных для измерения температур в технологических системах, *термометры* занимают несколько особое место, поскольку их используют преимущественно для определения температуры жидкостей (технологических или смазочных), газов (воздуха и воздушных

смесей) или расплавов (например, при тарировании термопар в жидкометаллических средах). Кроме обычных термометров, в которых для определения температуры используют тепловое расширение ртути или специальных жидкостей, применяют манометрические и механические термометры. В манометрических термометрах в небольшом резервуаре (термоприемнике) содержится жидкость или газ. Расширение жидкости или газа в замкнутом объеме создает давление, которое воспринимается чувствительным элементом (манометрической пружиной) и вызывает перемещение указателя по шкале прибора. Определение температуры механическими термометрами основано на измерении термической деформации биметаллического элемента, состоящего из двух примерно одинаковых по толщине слоев металлов или сплавов с различными коэффициентами теплового расширения.

Обычные термометры позволяют наблюдать изменение температуры объекта (жидкости, газа) только вблизи места измерения, поскольку отсчетная шкала расположена на самом приборе. В манометрических термометрах термоприемник, как правило, соединен с измерительным устройством длинным капилляром, что позволяет наблюдать результаты измерений на некотором удалении от объекта, температуру которого определяют. Механические термометры в процессе измерения могут развивать достаточно большие усилия, поэтому возможно их использование в качестве устройств, автоматизирующих процесс, например, дозирующих подачу смазочной жидкости в узлы станка.

Одним из наиболее распространенных методов контактного измерения температуры является метод с использованием *термопар*. Термопара представляет собой спай или механическое соединение двух разнородных проводников, образующих замкнутую цепь. Если один из спаев нагреть, то в цепи потечет ток, величина которого зависит от температуры и свойств материалов проводников. Это явление получило название эффекта Зеебека – по фамилии ученого, обнаружившего это явление в 1821 г.

В технологических экспериментах применяют три вида термопар: искусственные, полусинтетические и естественные.

Искусственная термопара (рис. 2, а) состоит из двух проводников, не имеющих непосредственного отношения к инструменту, заготовке или детали оборудования, температуру которых измеряют; проводники и спай термопары служат только для измерения температуры интересующего объекта. В полусинтетической термопаре (рис. 2, б) только один из проводников не принадлежит компонентам технологической подсистемы, а второй присутствует в ней естественно, выполняя какую-либо функцию в процессе обработки. Это может быть материал инструмента, заготовки

или детали оборудования, включенный в цепь термопары и находящийся в надежном контакте с первым из проводников.

В естественной термопаре (рис. 2, *в*) оба проводника, образующих спай, естественно присутствуют в технологической подсистеме, участвуя в ней в качестве необходимых компонентов. Таковы, например, металлический инструмент и обрабатываемая заготовка, которые в зоне контакта между ними прижаты друг к другу настолько плотно, что место их соприкосновения мало отличается от спая.

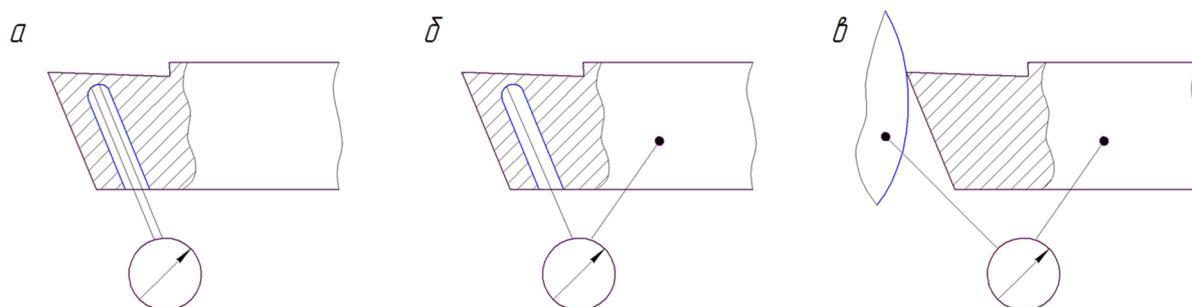


Рисунок 2. – Принципиальные схемы термопар:
а – искусственной; *б* – полуискусственной; *в* – естественной

Все важнейшие характеристики искусственной термопары (величина сигнала, чувствительность, диапазон измеряемых температур, стабильность показаний и др.) зависят в основном от свойств материалов проводников, образующих спай термопары. Для изготовления термопары может быть применена любая пара различных металлов, однако, целесообразно использовать лишь определенные из них, так называемые термоэлектродные сплавы, удовлетворяющие следующим требованиям:

- термоэлектрическая движущая сила (ТЭДС) сплава должна быть достаточно большой, чтобы ее можно было измерить с нужной точностью; она должна быть непрерывной к однозначной (желательно линейной) функцией температуры;
- температура плавления или размягчения сплава должна быть выше, чем температура поверхности, которую измеряет термопара;
- термоэлектродные сплавы, особенно для длительно работающих термопар, должны быть коррозионно-стойкими;
- сплавы для термопар в процессе эксплуатации и градуировки должны сохранять свои характеристики неизменными. Термопары, имеющие одинаковые размеры, должны обеспечивать воспроизводимость свойств при серийном изготовлении и эксплуатации и одинаковых условиях;
- материалы, из которых изготавливают термопары, должны быть достаточно прочными и пластичными.

В технологических экспериментах применяют искусственные термопары, изготовленные, как правило, из следующих пар материалов: медь – константан, медь – копель, железо – константан, хромель – копель, хромель – константан, хромель – алюмель. Технические требования к термопарам определяются ГОСТ 6616 [3]. Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров (НСХ), классы допуска и диапазоны измерений приведены в стандарте МЭК 60584-1,2 и ГОСТ Р 8.585-2001 [4]:

- платинородий-платиновые – ТПП13 – Тип R;
- платинородий-платиновые – ТПП10 – Тип S;
- платинородий-платинородиевые – ТПР – Тип В;
- железо-константановые (железо-медьникелевые) ТЖК – Тип J;
- медь-константановые (медь-медьникелевые) ТМКн – Тип T;
- нихросил-нисиловые (никельхромникель-никелькремниевые) ТНН – Тип N;
- хромель-алюмелевые – ТХА – Тип K;
- хромель-константановые ТХКн – Тип E;
- хромель-копелевые – ТХК – Тип L;
- медь-копелевые – ТМК – Тип M;
- силх-силиновые – ТСС – Тип I;
- вольфрам и рений – вольфрамрениевые – ТВР – Тип A-1, A-2, A-3.

Точный состав сплава термоэлектродов для термопар из неблагородных металлов в МЭК 60584-1 не приводится. НСХ для хромель-копелевых термопар ТХК и вольфрам-рениевых термопар определены только в ГОСТ Р 8.585-2001. В стандарте МЭК данные термопары отсутствуют. По этой причине характеристики импортных датчиков из этих металлов могут существенно отличаться от отечественных, например, импортный Тип L и отечественный ТХК не взаимозаменяемы. При этом, как правило, импортное оборудование не рассчитано на отечественный стандарт.

В настоящее время стандарт МЭК 60584 пересматривается. Планируется введение в стандарт вольфрам-рениевых термопар типа A-1, НСХ для которых будет соответствовать государственному стандарту, и типа C по стандарту ASTM.

В 2008 г. МЭК ввел два новых типа термопар: золото-платиновые и платино-палладиевые. Новый стандарт МЭК 62460 устанавливает стандартные таблицы для этих термопар из чистых металлов. В приложении А указаны свойства нескольких различных типов термопары по МЭК.

Рекомендации по выбору типа искусственной термопары

Термопары из благородных металлов

Тип J (железо-константановая термопара) [5]

- не рекомендуется использовать ниже 0 °С, т.к. конденсация влаги на железном выводе приводит к образованию ржавчины;
- наиболее подходящий тип для разряженной атмосферы;
- максимальная температура применения – 500 °С, т.к. выше этой температуры происходит быстрое окисление выводов. Оба вывода быстро разрушаются в атмосфере серы;
- показания повышаются после термического старения;
- преимуществом также является невысокая стоимость.

Тип E (хромель-константановая термопара)

- преимуществом является высокая чувствительность;
- термоэлектрическая однородность материалов электродов;
- подходит для использования при низких температурах.

Тип T (медь-константановая термопара)

- может использоваться ниже 0 °С;
- может использоваться в атмосфере с небольшим избытком или недостатком кислорода;
- не рекомендуется использование при температурах выше 400 °С;
- не чувствительна к повышенной влажности;
- оба вывода могут быть отожжены для удаления материалов, вызывающих термоэлектрическую неоднородность.

Тип K (хромель-алюмелевая термопара)

- широко используются в различных областях от –100 °С до +1000 °С (рекомендуемый предел, зависящий от диаметра термоэлектрода);
- в диапазоне от 200 до 500 °С возникает эффект гистерезиса, т.е. показания при нагреве и охлаждении могут различаться. Иногда разница достигает 5 °С;
- используется в нейтральной атмосфере или атмосфере с избытком кислорода;
- после термического старения показания снижаются;
- не рекомендуется использовать в разряженной атмосфере, т.к. хром может выделяться из Ni-Cr вывода (так называемая миграция); термопара при этом изменяет ТЭДС и показывает заниженную температуру;
- атмосфера серы вредна для термопары, т.к. воздействует на оба электрода.

Тип N (нихросил-нисиловая термопара)

- это относительно новый тип термопары, разработанный на основе термопары типа К. Термопара типа К может легко загрязняться примесями при высоких температурах. Сплавляя оба электрода с кремнием, можно тем самым загрязнить термопару заранее и снизить риск дальнейшего загрязнения во время работы;
- рекомендуемая рабочая температура до 1200 °С (зависит от диаметра проволоки);
- кратковременная работа возможна при 1250 °С;
- высокая стабильность при температурах от 200 до 500 °С (значительно меньший гистерезис, чем для термопары типа К);
- считается самой точной термопарой из благородных металлов.

Общие советы по выбору термопар из благородных металлов:

- ниже нуля – тип Е, Т;
- комнатные температуры – тип К, Е, Т;
- до 300 °С – тип К;
- от 300 до 600°С – тип N;
- выше 600 °С – тип К или N.

Термопары из благородных металлов

Тип S (платинородий-платиновая термопара)

- рекомендуемая максимальная рабочая температура 1350 °С;
- кратковременное применение возможно при 1600 °С;
- загрязняется при температурах выше 900 °С водородом, углеродом, металлическими примесями из меди и железа. При содержании железа в платиновом электроде на уровне 0,1% ТЭДС изменяется более, чем на 1 мВ (100 °С) при 1200 °С и 1,5 мВ (160 °С) при 1600 °С. Такая же картина наблюдается при загрязнении медью. Таким образом, термопары нельзя армировать стальной трубкой или следует изолировать электроды от трубки газонепроницаемой керамикой;
- может применяться в окислительной атмосфере;
- при температуре выше 1000 °С термопара может загрязняться кремнием, который присутствует в некоторых видах защитных керамических материалов. Важно использовать керамические трубки, состоящие из высокочистого оксида алюминия;
- не рекомендуется применять ниже 400 °С, т.к. ТЭДС в этой области мала и крайне не линейна.

Тип R (платинородий-платиновая термопара)

- свойства те же, что и у термопар типа S.

Тип B (платинородий-платинородиевая термопара)

- рекомендуемая максимальная температура рабочего диапазона 1500 °С (зависит от диаметра проволоки);
- кратковременное применение возможно до 1750 °С;
- может загрязняться при температурах выше 900 °С водородом, кремнием, парами меди и железа, но эффект меньше, чем для термопар типа S и R;
- при температуре выше 1000 °С термопара может загрязняться кремнием, который присутствует в некоторых видах защитных керамических материалов. Важно использовать керамические трубки, состоящие из высокочистого оксида алюминия;
- может использоваться в окислительной среде;
- не рекомендуется применение при температуре ниже 600 °С, где ТЭДС очень мала и не линейна.

Источники погрешности термопар

Принцип действия термопар и особенности преобразования и передачи сигнала приводят к следующим возможным проблемам при их эксплуатации, вызывающим ошибку в определении температуры:

- 1) дефекты формирования рабочего спая термопары.

Существует много способов формирования рабочего спая термопары: механическое скручивание, пайка, сварка и т.д. При сварке в спай добавляется третий металл, но т.к. температуры проводников, исходящих из спая одинаковы, это не может привести к какой-либо погрешности. Проблема заключается в том, что третий металл, как правило, имеет более низкую температуру плавления и при высоких температурах спай может разорваться. Более того, может происходить загрязнение электродов чужеродным испаряющимся металлом. Поэтому рекомендуется производить сварку рабочего спая. Однако процесс сварки требует особого внимания, т.к. перегрев может повредить термопарную проволоку, и газ, используемый для сварки, диффундировать в проволоку. Также дефектная сварка может привести к разрыву спая при эксплуатации. В программном обеспечении, используемом для считывания и обработки сигнала термопары, всегда есть специальный тест на разрыв спая;

- 2) возникновение термоэлектрической неоднородности по длине термоэлектродов и изменение градуировочной характеристики термопары.

Это наиболее серьезный и трудно диагностируемый источник погрешности, т.к. результат отсчета ЭДС может казаться вполне приемлемым, но при этом быть ошибочным. Термоэлектрическая неоднородность может быть

результатом диффузии примесей из окружающей атмосферы при высоких температурах, высокотемпературном отжиге или механической обработке электродов. Она может образоваться в результате протягивания электродов, неосторожного обращения, ударов и вибраций, вызывающих напряжения в проволоке. Изменение состава сплава может наблюдаться на отдельном участке проволоки, находящейся длительное время в зоне резкого температурного градиента. Однако неоднородность влияет на изменение градуировочной характеристики только в том случае, если она попадает в зону температурного градиента при измерении. Чем больше градиент температуры, тем больше погрешность, возникающая из-за неоднородности. Один из способов уменьшения данной погрешности – сделать более плавным изменение температуры на длине термоэлектрода, например, используя металлические рукава и чехлы;

3) электрическое шунтирование проводников изоляцией и возможное возникновение гальванического эффекта.

Сопротивление изоляции термоэлектродов уменьшается с повышением температуры по экспоненциальному закону. При высокой температуре, в отдельных случаях, этот эффект может привести к образованию так называемого «виртуального» спая, т.е. фактического замыкания электродов в средней точке термопары. Таким образом, термопара будет измерять температуру не в области рабочего спая, а в средней области. При высоких температурах следует очень тщательно подбирать материал для изоляции, т.к. примеси и химические вещества изоляции могут проникнуть в электроды и изменить их свойства.

Красящие вещества, применяемые в некоторых видах изоляции, могут вызвать образование электролита при попадании воды. Это может привести к гальваническому эффекту, который по силе превышает эффект А. Зеебека. Необходимо принимать меры для защиты термопарной проволоки от вредной атмосферы, проникновения воды и других жидкостей;

4) тепловое шунтирование.

Необходимо помнить, что термопара, как и любой другой контактный датчик, при введении в объект измерения меняет его температуру. Поэтому, если объект мал, термопара тоже должна иметь малые размеры. Однако термопара, изготовленная из тонкой проволоки, более подвержена эффектам загрязнения, отжига, возникновения напряжений, электрическому шунтированию. Чтобы минимизировать эти эффекты применяют удлинительные провода, которые соединяют термоэлектроды термопары с измерительным вольтметром и имеют коэффициент Зеебека, близкий к коэффициенту термопары данного типа. Обычно удлинительный провод имеет больший диаметр; его сопротивление, включенное последовательно с термоэлектродом,

не вызывает потерь при передаче сигнала на длинные расстояния. Кроме того, проще протянуть через подводящий измерительный канал удлинительный провод, чем тонкую термопарную проволоку. Поскольку требования к допускам удлинительных проводов установлены только в узком интервале температур, и сам провод может быть подвержен механическим повреждениям и натяжению, следует обеспечить минимальный температурный градиент вдоль провода;

5) электрические шумы и утечки.

Широкополосный шум может быть подавлен аналоговым фильтром. Единственный тип шума, который не может подавить система считывания и обработки сигнала, – сдвиг, обусловленный утечкой постоянного тока в системе. Хотя обычно такие утечки не вызывают больших погрешностей, возможность их возникновения должна всегда приниматься во внимание и, по возможности, предотвращаться, особенно если термоэлектроды очень малы и их сопротивление велико.

Проволока для термопар изготавливается в соответствии со стандартом допуски для термопар различных типов и классов. Отрезки проволоки, взятые из одного сертифицированного мотка, обычно имеют более близкое совпадение в значениях ТЭДС, чем отрезки из разных мотков, хотя абсолютное отклонение от номинальной ТЭДС может быть значительным. Если термопара изготавливается с целью получения большей точности, чем установлена стандартом, необходимы проверка на термоэлектрическую неоднородность термоэлектродов и последующие меры для снижения вероятности возникновения неоднородности.

Диагностика состояния термопары при эксплуатации

Некоторые очень ценные предложения по разработке диагностических процедур были изложены в работах доктора Рида (США). Три компонента предлагаемой системы: запись всех событий на объекте (event record), тест блока холодных спаев (the zone box test) и отслеживание изменения сопротивления термопары (the thermocouple resistance history).

Электронная запись всех событий особенно важна, когда на объекте установлены сотни датчиков и требуется отследить ошибку в измерениях, полученных с каждого датчика. Например, если в определенный момент термопара одного типа была заменена на термопару другого типа, но по ошибке не была изменена стандартная функция преобразования, сигнал будет ложный, и только по электронным записям событий можно выяснить причину выхода из строя датчика.

Тест блока холодных спаев проводится для проверки работы контроллера, сканера, вольтметра и системы компенсации холодных спаев. Термопара в рабочих условиях регистрирует температуру горячего спаев; показания вольтметра

$$V = E(T_2 - T_x).$$

Во время тестирования мы замыкаем короткими кусками медной проволоки терминалы на блоке холодных спаев. В это время регистрируется температура холодных спаев и показания вольтметра должны быть равны $V = 0$. Фактически это испытание тестирует все элементы измерительной системы, кроме самой термопары.

Внезапное изменение сопротивления термопарной цепи является индикатором неполадок в работе. Если непрерывно регистрировать и проводить *электронную запись сопротивления проводов каждой термопары* во времени, то при внезапном изменении сопротивления будет немедленно получен сигнал, который может быть индикатором разрыва, шунтирования изоляцией, влияния вибраций и других возможных нарушений. Так, если термопара, проходящая через высокотемпературную зону и имеющая спай в более холодной зоне, стала внезапно показывать 1200 °С вместо 300 °С, это может означать либо опасное повышение температуры зоны, либо выход термопары из строя и замыкание в месте повышенной температуры. Тестирование сопротивления поможет выявить причину. Сопротивление термоэлектродов изменяется с температурой, но если оно изменилось скачком, – непредвиденное замыкание или разрыв. Нужно иметь в виду, что когда термопара генерирует напряжение, то оно может вызвать существенную ошибку в измерении сопротивления. Измерение сопротивления термопары похоже на измерение сопротивления источника напряжения. Эту проблему решают с помощью технологии компенсации термоЭДС (offset compensated ohms measurement). Вольтметр сначала измеряет напряжение, генерируемое термопарой без включения источника измерительного тока, используемого при измерении сопротивления. Затем это напряжение вычитается программным способом из результирующего напряжения, измеренного при включенном источнике.

Рекомендации по работе с термопарами

Целостность и точность измерительной системы, включающей термопарный датчик, может быть повышена с помощью следующих мер:

– использовать проволоку большого диаметра, которая, однако, не будет изменять температуру объекта измерения;

- если необходимо использовать миниатюрную термопару из очень тонкой проволоки, следует использовать ее только в месте измерения, вне объекта следует использовать удлинительные провода;
- избегать механических натяжений и вибраций термопарной проволоки;
- если необходимо использовать очень длинные термопары и удлинительные провода, следует соединить экран провода с экраном вольтметра и тщательно перекрутить выводы;
- по возможности избегать резких температурных градиентов по длине термопары;
- использовать термопару только в пределах рабочих температур, желательно с запасом;
- использовать подходящий материал защитного чехла при работе во вредных условиях, чтобы обеспечить надежную защиту термопарной проволоки;
- использовать удлинительные провода в их рабочем диапазоне и при минимальных градиентах температур;
- вести электронную запись всех событий и непрерывно контролировать сопротивление термоэлектродов.

Для дополнительного контроля и диагностики измерений температуры применяют специальные термопары с четырьмя термоэлектродами, которые позволяют проводить дополнительные измерения температуры, электрических помех, напряжения и сопротивления.

2.3 Бесконтактные методы измерения температур

В течение ряда лет ведутся поиск и усовершенствование средств, позволяющих определить температуру компонентов технологических систем дистанционно, без непосредственного соприкосновения датчика с поверхностью, температура которой контролируется. Успехи техники регистрации инфракрасного излучения создали условия, благодаря которым бесконтактные способы измерения находят все более широкое применение в практике технологических экспериментов.

Из бесконтактных методов, применяемых в технологической практике, выделяется большая группа методов, реализуемых при помощи фотоэлектрических устройств.

Схема одного из таких устройств показана на рисунке 3. Устройство предназначено для измерения температуры контактной площадки между инструментом и заготовкой при выглаживании поверхностей. Кристалл 2,

прозрачный для инфракрасных лучей, укрепленный в державке 3, приводится в соприкосновение с заготовкой 1. Микроскоп 4 для измерения плотности потока инфракрасного излучения имеет объектив 5, окуляр 10 с сеткой 11, подвижное прозрачное зеркало 6 и фоторезистор 7. Микроскоп фокусирует на пятно контакта между инструментом 2 и заготовкой 1, в связи с чем тепловой поток фокусируется на приемник излучения 7. Сигнал последнего передается через усилитель 8 на регистрирующий прибор 9, отградуированный по температурам. Площадь участка, с которого прибор может принять сигнал, не более $0,04 \times 0,07 \text{ мм}^2$. Это дает возможность не только определить наибольшую температуру на контактной площадке между инструментом и материалом заготовки, но и судить о законе распределения температур на этой площадке.

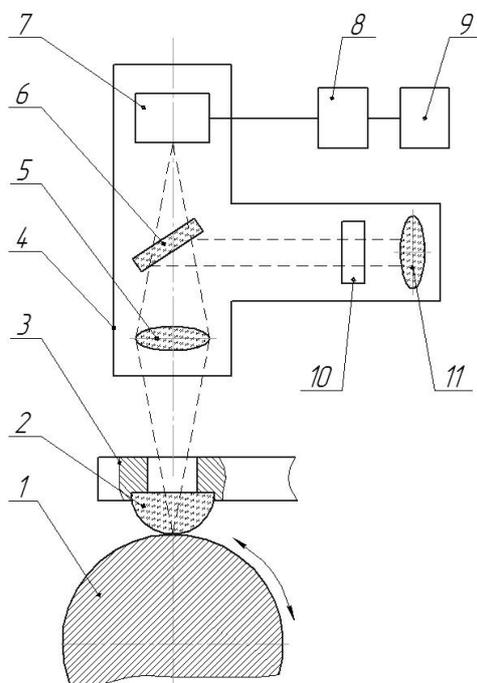


Рисунок 3. – Схема устройства для измерения температуры при выглаживании поверхностей заготовок

Аналогично устроены приборы для измерения температуры радиационным методом в том случае, если требуется определить температуру тел, не прозрачных для инфракрасного излучения. В этом случае оптическая система прибора фокусируется непосредственно на поверхность, температура которой измеряется. Если деталь вращается, то прибор выдает сведения о средней температуре участка, на который сфокусирован его луч.

В акустическом методе измерения температуры от генератора акустических колебаний импульс звука определенной длины волны λ_1 направляют

на объект, температуру которого измеряют. Исследования показывают, что отраженный импульс имеет длину волны λ_2 , зависящую от температуры поверхности, от которой он отразился. Направляя отраженную волну через фильтр в анализатор, определяют разность $\Delta = \lambda_1 - \lambda_2$ и по ней судят о температуре поверхности твердого тела.

В последние годы созданы бесконтактные приборы, так называемые тепловизоры и пирометры, позволяющие измерять температуру и наблюдать температурное поле на поверхности твердого тела. Путем калибровки по телам с заранее известной температурой прибор оценивает температуры, которым соответствует тот или иной цвет наблюдаемого поля на экране.

2.3.1 Методы пирометрии, пирометры и их использование

Методы пирометрии

Практическая пирометрия возникла на рубеже XIX и XX вв. Примерно тогда же и сформировались два основных метода пирометрии: радиационная (яркостная) и цветовая. Названия эти с течением времени менялись и корректировались, но суть методов осталась неизменной. Метод яркостной пирометрии (называемой также радиационной пирометрией, пирометрией по излучению) использует зависимость энергетической яркости излучения объекта в ограниченном диапазоне длин волн от его температуры. Другими словами, яркость излучения объекта зависит от его температуры. Следовательно, измерив яркость излучения объекта, можно измерить (с той или иной точностью) значение температуры объекта. Таким образом, ключевым элементом радиационного пирометра является приемник излучения, преобразующий приходящую на него энергию излучения в иную физическую величину, чаще всего в ток или напряжение. Его дополняют оптическая система, собирающая в определенном телесном угле излучение от объекта, и электронная схема с системами питания и индикации, усиливающая, преобразовывающая и отображающая результат измерения.

Метод цветовой оптической пирометрии первоначально основывался на зависимости спектрального распределения потока излучения нагретого объекта от температуры в диапазоне видимых длин волн. Другими словами, от температуры нагретого объекта зависел цвет его излучения. Объекты, нагретые до 700–800 °С, светят темно-оранжевым светом, при 1000–1200 °С цвет свечения становится ярко-оранжевым, постепенно переходя в желтый, при 2000 °С цвет воспринимается нашим глазом как ярко-желтый, а после 2500 °С свечение приближается к белому цвету. Долгое время основными

элементами цветового сравнения были глаз оператора и нагретая нить накала (или спираль), расположенная в окуляре пирометра в поле зрения оператора. Нить в окуляре совмещалась с изображением измеряемого объекта. Регулируя проходящий через накальную нить электрический ток, оператор подбирал такое его значение, чтобы цвет нити совпадал с цветом измеряемого объекта. При определенном значении тока изображение нити «исчезало» на фоне нагретого объекта, что являлось критерием равенства температуры объекта и нагретой нити.

Кстати, отсюда пошло и распространенное в литературе название подобных пирометров – пирометры с исчезающей нитью.

В силу особенностей человеческого зрения описанный метод при опоре на восприятие цвета человеческим глазом имеет серьезные ограничения в точности и повторяемости результатов измерений. Поэтому с развитием компонентной базы весьма субъективные визуальные измерения были вытеснены измерениями с помощью нескольких приемников излучения, работающих в различных спектральных диапазонах. Таких приемников может быть и три, и семь, но на практике чаще всего ограничиваются двумя. Таким образом, в настоящее время этот метод основывается на зависимости от температуры отношения энергетических яркостей объекта в двух различных областях спектра излучения. Соответственно, он получил название метода пирометрии спектрального отношения.

Пирометр – прибор для бесконтактного измерения температуры тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения и видимого света.

Пирометры применяют для дистанционного определения температуры объектов в промышленности, быту, сфере ЖКХ, на предприятиях, где большое значение приобретает контроль температур на различных технологических этапах производства (сталелитейная промышленность, нефтеперерабатывающая отрасль). Пирометры могут выступать в роли средства безопасного дистанционного измерения температур раскаленных объектов, что делает их незаменимыми для обеспечения должного контроля в случаях, когда физическое взаимодействие с контролируемым объектом невозможно из-за высоких температур. Их можно применять в качестве теплокаторов (усовершенствованные модели), для определения областей критических температур в различных производственных сферах.

Пирометры, или радиационные термометры, представляют собой неконтактные температурные датчики, действие которых основано на зависимости температуры от количества теплового электромагнитного излучения,

полученного от объекта измерения. Это целая группа приборов, которая включает как приборы, измеряющие температуру точки на объекте или области на объекте, так и приборы, позволяющие получить картину одномерного и даже двумерного распределения температуры на заданной площади измерения. Пирометры широко используются в различных отраслях промышленности: металлургии, производстве стекла и керамики, полупроводников, пластика, бумаги и т.д., а также в медицине, криминалистике, системах спасения людей и охраны.

Главная трудность состоит в измерении температуры тела, излучательная способность которого неизвестна. Объект измерения чаще всего далек от абсолютно черного тела, это может быть окисленная поверхность, полупрозрачное стекло, зеркальная поверхность и т.д. Кроме того, возникают трудности учета излучения, испущенного близлежащей областью, и излучения, отраженного от соседних объектов. К сожалению, не существует ни одного метода оптической пирометрии, который мог бы охватить весь набор встречающихся ситуаций. Однако разработаны различные подходы, каждый из которых способен преодолеть одну или две вышеупомянутые трудности.

Приборы этого типа имеют множество наименований: оптические пирометры, радиационные пирометры, пирометры полного излучения, автоматические инфракрасные термометры, термометры непрерывного излучения, линейные сканеры, тепловизионные радиометры, поверхностные пирометры, пирометры отношения, двухцветовые пирометры и т.п. Эти наименования больше связаны с назначением приборов. Общий термин, который применим к данному классу приборов и имеет техническое функциональное значение, – радиационные термометры.

В последнее время возрос интерес к формированию международной универсальной терминологии в неконтактной термометрии и разработке номенклатуры международных требований к характеристикам радиационных термометров. Так, в 2006-2007 гг. разрабатывался новый стандарт МЭК «Технические требования к радиационным термометрам» (IEC TS 62492 Radiation thermometers. Part 1: Specifications for Radiation Thermometers). Новый стандарт введен в обращение в марте 2008 г.

Классификация пирометров

Пирометры можно разделить по нескольким основным признакам:

– *оптические* – позволяют визуально определять, как правило, без использования специальных устройств, температуру нагретого тела путем сравнения его цвета с цветом эталонной нити;

– *радиационные*. – оценивают температуру посредством пересчитанного показателя мощности теплового излучения. Если пирометр измеряет в широкой полосе спектрального излучения, то такой пирометр называют пирометром полного излучения;

– *цветовые* (другие названия: мультиспектральные, спектрального отношения) – позволяют делать вывод о температуре объекта, основываясь на результатах сравнения его теплового излучения в различных спектрах.

Температурный диапазон

– *низкотемпературные* – обладают способностью показывать температуры объектов, обладающих даже отрицательными значениями этого параметра;

– *высокотемпературные* – оценивают лишь температуру сильно нагретых тел, когда определение «на глаз» не представляется возможным. Обычно имеют сильное смещение в пользу «верхнего» предела измерения.

Исполнение

– *переносные* – удобны в эксплуатации в условиях, когда необходима высокая точность измерений, в совокупности с хорошими подвижными свойствами, например, для оценки температуры труднодоступных участков трубопроводов. Обычно снабжены небольшим дисплеем, отображающим графическую или текстово-цифровую информацию;

– *стационарные* – предназначены для более точной оценки температуры объектов. Используются в основном в крупной промышленности, для непрерывного контроля технологического процесса производства расплавов металлов и пластиков.

Визуализация величин

– *текстово-цифровой метод* – измеряемая температура выражается в градусах на цифровом дисплее. Попутно можно видеть дополнительную информацию;

– *графический метод* – позволяет видеть наблюдаемый объект в спектральном разложении областей низких, средних и высоких температур, выделенных различными цветами.

Вне зависимости от классификации, пирометры могут снабжаться дополнительными источниками питания, а также средствами передачи информации и связи с компьютером или специализированными устройствами (обычно через шину RS-232).

Самыми важными характеристиками пирометра, определяющими точность измерения температуры, являются:

- оптическое разрешение;
- настройка степени черноты объекта.

Спектр электромагнитного излучения

По спектральному диапазону термометры излучения могут быть разделены на следующие виды:

- полного излучения;
- широкополосного излучения;
- узкополосного излучения (монохроматические).

Широкополосные пирометры работают обычно в широком диапазоне волн от 0,3 мкм до 2,5–20,5 мкм.

Монохроматические яркостные пирометры

В XXI в. бесконтактные термометры, которые часто называют ИК-термометрами, что означает инфракрасные радиационные термометры, стали особенно востребованным видом температурных приборов. Существует множество разновидностей пирометров и инфракрасных приборов. Приборы, дающие возможность получить изображение распределения температуры по поверхности объекта, называют тепловизорами, или тепловизионными камерами. Несмотря на то, что по точности пирометры сильно уступают контактному датчику температуры, они незаменимы там, где необходимо быстро и безопасно сделать отсчет температуры поверхности. Инфракрасные термометры применяются для диагностики тепловых и электрических линий передачи, источников тока, обнаружения неисправностей, вызванных утечками тепла, коррозией контактов и т.д. Данный вид приборов востребован также там, где трудно или невозможно использовать контактный датчик, – для оценки температуры сильно нагретых движущихся объектов, мощных моторов и турбин, расплавленных металлов. Одним из самых новых применений инфракрасных термометров является медицинская диагностика.

Большинство современных ИК термометров представляют собой портативные и, как правило, простые в обращении приборы. Однако существуют особенности их применения, которые необходимо учитывать пользователям, рассчитывающим получить наиболее точный результат измерения температуры (рис. 4). Критическими параметрами любого инфракрасного термометра являются оптическое разрешение и излучательная способность.

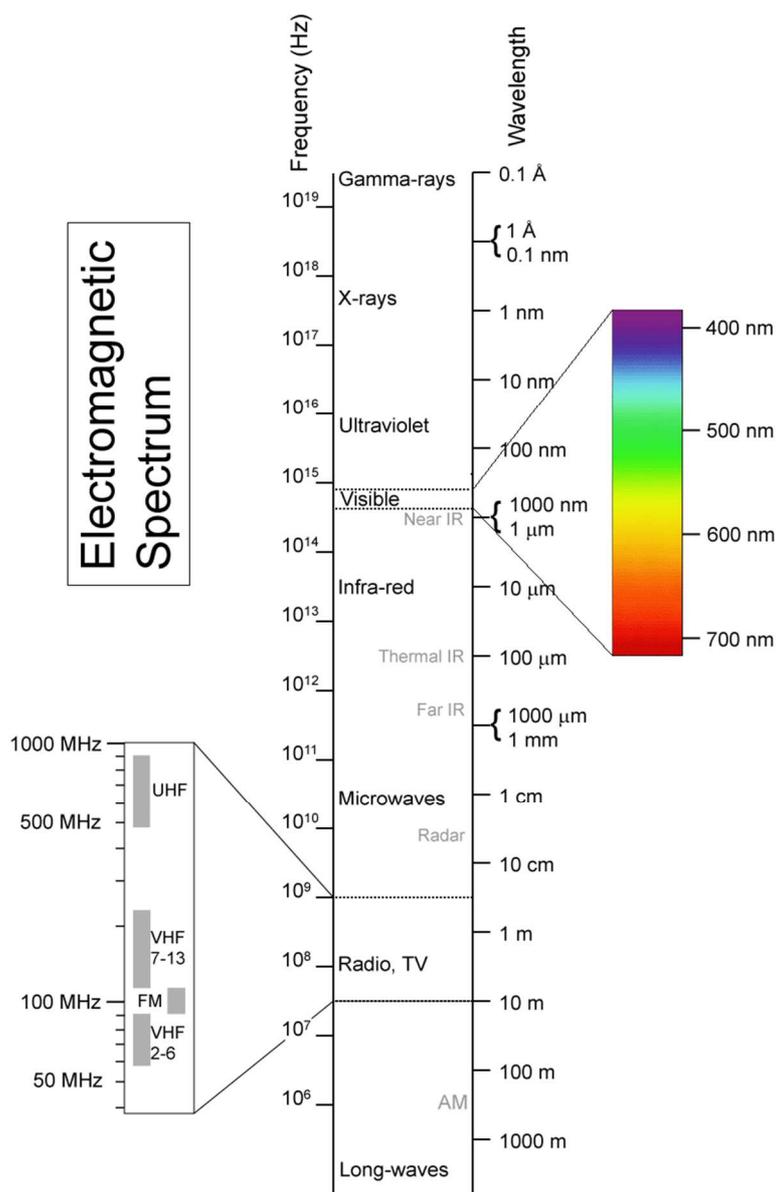


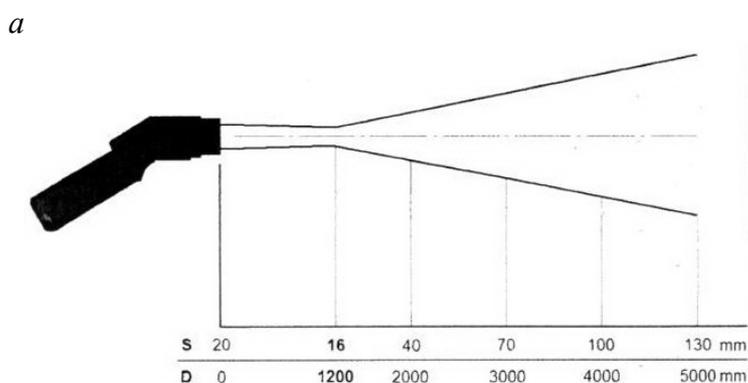
Рисунок 4. – Полный спектр электромагнитного излучения

Оптическое разрешение

Иногда оптическое разрешение называют показателем визирования. Оптическое разрешение определяется отношением диаметра пятна (круга) на поверхности, излучение с которого регистрируется пирометром к расстоянию до объекта. Чтобы правильно выбрать прибор, необходимо знать сферу его применения. Если нужно измерять температуру объекта с расстояния 4 м, то ИК термометр с оптическим разрешением 4:1 вряд ли подойдет. Диаметр излучающей поверхности будет слишком большим, и в поле зрения термометра попадут посторонние объекты. Лучше выбрать разрешение, по крайней мере, 50:1. Однако если необходимо принимать излучение с небольшого расстояния,

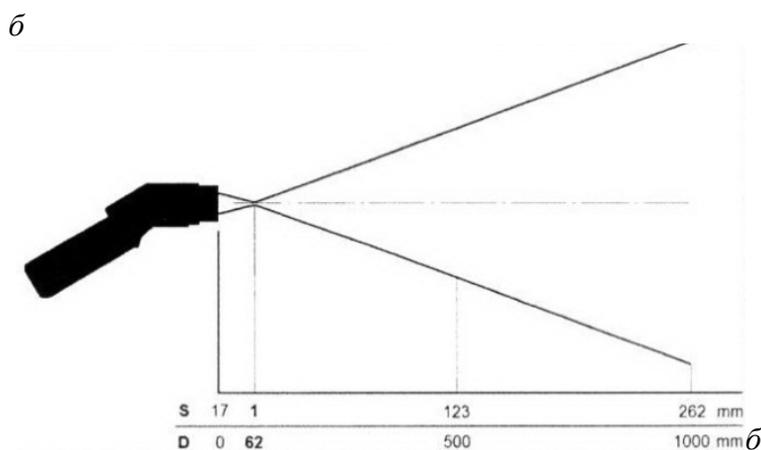
то лучше выбрать термометр с разрешением 4:1, т.к. у него будет больше минимальная допустимая площадь излучения. Необходимо иметь в виду, что точность измерений температуры может значительно снижаться, если пользователь ошибочно нацеливает ИК термометр на большую площадь, чем площадь измеряемого объекта. У большинства современных термометров имеется специальный лазерный целеуказатель для точного наведения на объект измерения. Некоторые пирометры, например, «Optris LazerSight», имеют перестраиваемую оптику. Это позволяет пирометру работать на двух режимах: SF (стандартный фокус) и CF (близкий фокус). В режиме SF могут быть измерены объекты диаметром от 16 мм и более.

На рисунке 5 представлены зависимость пятна контакта S от дистанции D до измеряемого объекта.



$$D:S \text{ (в точке фокуса)} = 75:1 / 16 \text{ мм на } 1200 \text{ мм};$$

$$D:S \text{ (дальнее поле)} = 36:1$$



$$D:S \text{ (в точке фокуса)} = 62:1 / 1 \text{ мм на } 62 \text{ мм};$$

$$D:S \text{ (дальнее поле)} = 4:1$$

Рисунок 5. – Режимы работы пирометра «Optris LazerSight»:
a – режим SF/перекрестный лазер; *б* – режим CF/двухточечный лазер,
 где D – дистанция до объекта измерения; S – размер пятна

Лазер с пересекающимися лучами демонстрирует реальный размер измеряемого пятна на поверхности объекта независимо от расстояния до объекта и без параллакса. В режиме «близкий фокус» можно измерять объекты размером от 1 мм (в т.ч. компоненты электронных схем). В этом режиме двухлучевой лазер показывает пятно измерения на объекте. Лучи лазера сходятся в точке фокуса на расстоянии 62 мм от передней плоскости с получением наименьшего пятна измерения диаметром 1 мм. Для переключения между режимами «стандартный» и «близкий фокус» необходимо передвинуть переключатель режимов в соответствующее положение.

Излучательная способность (коэффициент излучения)

Коэффициент излучения (называемый иногда степенью черноты) характеризует способность поверхности тела излучать инфракрасную энергию. Этот коэффициент определяется как отношение энергии, излучаемой конкретной поверхностью при определенной температуре, к энергии излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Он может принимать значения от очень малых, ниже 0,1, до близких к 1. ИК термометры, как правило, дают возможность устанавливать для каждого объекта свой коэффициент излучения. Неправильный выбор коэффициента излучения – основной источник погрешности для всех пирометрических методов измерения температуры. Как выбрать степень черноты? Существуют справочные таблицы, показывающие степень черноты для различных материалов и различной обработки поверхности. Таблицы для некоторых распространенных материалов приведены в приложении Б. Необходимо отметить, что на коэффициент излучения сильно влияет окисленность поверхности металлов. Так, если для стали окисленной коэффициент составляет примерно 0,85, то для полированной стали он снижается до 0,075.

Можно также использовать экспериментальные методики. Наиболее распространены в методиках поверки пирометров и тепловизионных термометров следующие методики определения коэффициента излучения:

1. Определите действительную температуру объекта с помощью контактного датчика – термопары, термометра сопротивления и т.д. Затем измерьте температуру с помощью пирометра и подберите такую степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с показаниями контактного датчика (термопары).

2. При сравнительно низких температурах объекта (до 250 °С) можно наклеить на участок поверхности объекта ленту черного цвета (например,

электроизоляционную). Затем измерьте температуру ленты с помощью пирометра при установленной степени черноты 0,95. После этого измерьте с помощью пирометра незакрытую лентой часть объекта и подберите такую степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с результатом измерения ленты.

3. Если часть объекта может быть окрашена, окрасьте ее матовой черной краской, которая имеет степень черноты около 0,98. Затем измерьте температуру окрашенного участка с помощью пирометра при установленной степени черноты 0,98. После этого измерьте с помощью пирометра неокрашенную часть объекта и подберите такую степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с результатом измерения на окрашенном участке [5].

Следует отметить, что коэффициент излучения зависит от длины волны. Он тем выше, чем короче длина волны. Кроме того, ошибка, вызванная неточным определением коэффициента излучения, будет пропорциональна эффективной длине волны.

Если необходимо измерять температуру поверхности частично окисленного металла, преимущество коротковолновых пирометров очевидно, т.к. окисленный слой будет иметь высокую и стабильную излучательную способность скорее при короткой длине волны, чем при длинной. Кроме того, коротковолновые яркостные пирометры обычно менее подвержены влиянию атмосферного поглощения, чем пирометры широкого спектра. Если поглощение вызвано частицами или каплями на пути визирования, уменьшенное значение погрешности при коротких волнах будет иметь меньшую относительную зависимость измерений температуры от энергии.

Поэтому там, где требуется высокая точность измерения температуры поверхности рекомендуется использовать коротковолновый яркостный пирометр.

Название «коротковолновый» относительное: например, при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 1 мкм – короткая длина волны, в то время как при $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 мкм также считается короткой длиной.

За критерий эффективной длины волны для отнесения пирометра к достаточно «коротковолновому» принимается максимальная длина волны, которая должна быть настолько короткой, чтобы обеспечить достаточную энергию для получения необходимого отношения сигнал-шум от детектора при минимальной измеряемой температуре.

Спектральный диапазон пирометра. Эффективная длина волны

На практике большинство приемников излучения имеет существенно широкий диапазон волн и даже использование фильтров недостаточно ограничивает диапазон волн, чтобы можно было считать его строго монохроматическим. Однако кривая энергии в зависимости от длины волны очень крутая при короткой длине волны, и показания пирометров четко согласуются в значительном температурном диапазоне с расчетами Планка, соответствующими длине волны близкой к «отсечной» верхней длине волны системы приемник–фильтр. Понятие эффективной длины волны удобно для оценки скорости изменения энергии (и, следовательно, показаний пирометра) с изменением температуры, а также погрешности, возникающей от ошибки в определении коэффициента излучения поверхности.

В МЭК 62942 даны определение спектрального диапазона и эффективной длины волны пирометра.

Спектральный диапазон. Спектральный диапазон приводится в мкм или нм. Спектральный диапазон определяется как нижний и верхний пределы длины волны при достижении спектральной чувствительности 50% от пика чувствительности. Могут также указываться основная (эффективная) длина волны и полная ширина полосы пропускания, в которой чувствительность достигает 50% от пика чувствительности (полная ширина на половине максимума (FWHM)). Общепринято для монохроматических пирометров приводить эффективную длину волны в спектральном диапазоне и полную ширину на половине максимума (FWHM), а для широкополосных пирометров – верхний и нижний пределы. Следует выбирать пирометр с самой короткой длиной волны, которая позволяет провести необходимые измерения самой низкой температуры в диапазоне измерения.

Кроме сложности учета коэффициента излучения объекта, яркостные пирометры имеют ряд иных существенных недостатков, их результаты зависят от расстояния до измеряемого объекта, формы объекта, запыленности и загазованности промежуточной среды, наличия защитных стекол и непрозрачных объектов в поле зрения пирометра, боковых засветок при работе с крупноразмерными объектами, переотражений измеряемым объектом излучения сильно нагретых объектов, расположенных рядом. Факторов, мешающих получению радиационными пирометрами точных результатов, набирается с десяток.

Пирометры спектрального отношения. Пирометры спектрального отношения определяют температуру объекта по отношению сигналов от двух приемников, работающих на разных длинах волн. Такой принцип измерения

температуры позволяет избавиться от большинства недостатков, свойственных яркостным пирометрам. Зависимость сигнала от расстояния одинакова для обоих приемников пирометра спектрального отношения, поэтому на отношение сигналов она не влияет. Форма измеряемого объекта, запыленность и загазованность промежуточной среды одинаково влияют на сигналы с обоих приемников, оставляя неизменным их отношение.

Пирометры спектрального отношения не чувствительны к боковым засветкам от крупноразмерных объектов, присутствию небольших непрозрачных объектов в поле зрения пирометра, наличию защитных стекол, например, стекол смотровых окон в вакуумных камерах. Отношение сигналов по-прежнему остается неизменным. Да и отличие значения коэффициента излучения измеряемого объекта от 1 чаще всего приводит к одинаковому уменьшению сигналов с обоих приемников. Поэтому отношение сигналов слабо зависит от излучательной способности объекта.

Необходимо отметить два основных недостатка пирометров спектрального отношения. Во-первых, пирометр спектрального отношения сложнее радиационного, априори состоит из большего числа элементов, труднее калибруется. Поэтому стоимость таких пирометров больше, чем монохроматических. Во-вторых, излучательная способность измеряемого объекта все же влияет на результаты измерений. Точнее, результат измерения пирометра спектрального отношения зависит не столько от величины излучательной способности или ее изменения от объекта к объекту, сколько от спектральной зависимости коэффициента излучения от длины волны. С ростом длины волны спектральная излучательная способность снижается. Это приводит к тому, что сигнал длинноволнового приемника пирометра спектрального отношения оказывается заниженным по сравнению с коротковолновым. По этой причине показания пирометра спектрального отношения оказываются завышенными нередко более чем на 10%.

В некоторых современных пирометрах спектрального отношения применяется специальная техника автоматической коррекции влияния изменения коэффициента излучения от длины волны. Для ряда материалов, в т.ч. высоколегированных сталей, была исследована зависимость коэффициента излучения от длины волны и подобрана универсальная корректирующая кривая, подходящая как для чистого железа и высоколегированных сталей, так и для ряда других металлов (никель, кобальт и т.п.). При этом для большинства этих металлов коррекция возможна до уровня, при котором погрешность измерений в диапазоне температур от 600 до 2400 °С составляет всего 1–1,5% (для кобальта – до 2%). Указанный

способ коррекции не только сохраняет все преимущества, которыми обладают пирометры спектрального отношения, но и избавляет пользователя от необходимости вводить в прибор корректирующий коэффициент, значение которого ему неизвестно, и заменяет механическую подстройку. Поэтому измерения температуры многих металлов выполняются без роста погрешности во всем диапазоне измеряемых температур. Использование трех спектров также позволяет существенно снизить зависимость погрешности измерения от изменения величины коэффициента излучения и от изменения отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$.

3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ПОМОЩИ ПИРОМЕТРА «Optris LazerSight»

В состав пирометра «Optris LazerSight» входят (рис. 6) [6]:

- 1 – объектив;
- 2 – переключатель фокуса 5P/CP;
- 3 – гнездо для штатива;
- 4 – триггер;
- 5 – дисплей;
- 6 – кнопки Вверх (Up) / Вниз (Down);
- 7 – клавиши режимов Mode I/II;
- 8 – рукоятка с отсеком питания;
- 9 – USB разъем;
- 10 – гнездо для контактного термометра.

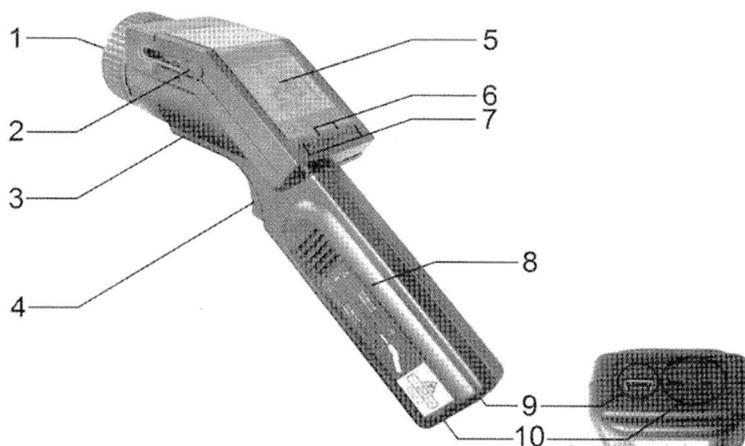


Рисунок 6. – Состав пирометра «Optris LazerSight»

Подготовка к включению пирометра

1. Вставьте две батареи типа АА, LR6 (с соблюдением полярности) в батарейный отсек.

2. Отсек элементов питания находится в рукоятке прибора под быстросъемной крышкой.

3. Для того чтобы открыть отсек питания, осторожно сдвиньте крышку на левой стороне рукоятки по направлению стрелки, установите батарейки (ориентация показана на внутренней стороне батарейного отсека) и закройте крышку.

4. При разряде батареек на дисплее появляется символ низкого заряда батарей. При мигающем символе разряда необходимо немедленно заменить батарейки.

Дисплей и информация о статусе показаний, выводимых на дисплей, показаны на рисунках 7 и 8.

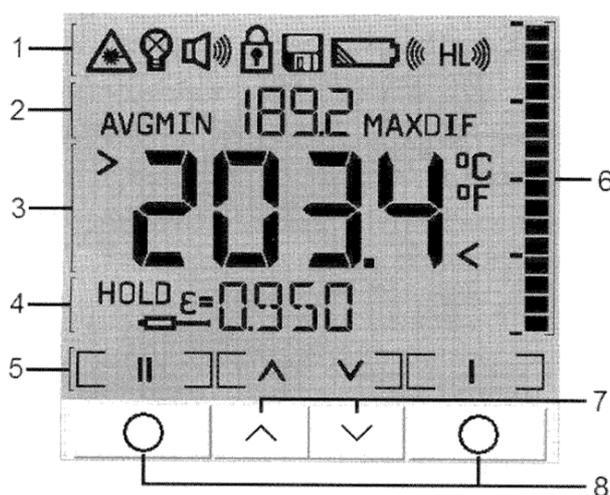


Рисунок 7. – Показания дисплея:

- 1 – информация о состоянии прибора;
- 2 – верхняя часть дисплея (функции Max/Min/Dif/Avg-температуры);
- 3 – основной дисплей: ИК температура и единица измерения (°C/°F);
- 4 – нижняя часть дисплея: коэффициент излучения, Hold, температура контактного пробника, комментарии, номер значения в памяти;
- 5 – установка режимов Mode I и Mode II, кнопки увеличения \wedge / уменьшения \vee показаний;
- 6 – боковой графический дисплей температуры;
- 7 – кнопки вверх/вниз;
- 8 – кнопки режима.

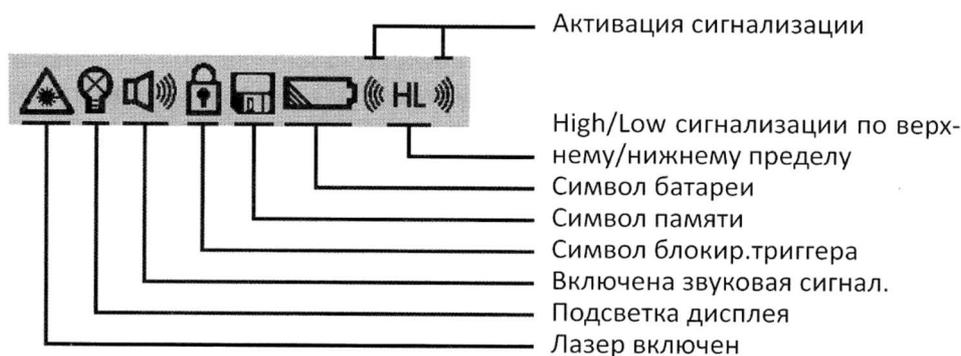


Рисунок 8. – Информация о статусе показаний

Порядок проведения измерений

Удерживая пирометр, как показано на рисунке 9, наведите его на объект. Нажмите на триггер (1) и держите его – при включенном лазере место положения и реальный размер пятна измерения будут показаны на поверхности измеряемого объекта. На дисплее (2) появляется значение температуры поверхности объекта.



Рисунок 9. – Проведения измерений при горизонтальном положении пирометра

Пирометр можно использовать в вертикальном положении (направление вниз). В таком положении легко можно измерить элементы электронных плат. Держите прибор, как показано на рисунке 10. При положении переключателя дисплея в режим Auto (по умолчанию) или On, кнопка режима Mode I имеет автоматическую функцию триггера (1), и показания на дисплее (2) поворачиваются на 180° (Поворот дисплея). При вертикальном положении прибора, в связи с переключением дисплея, положение кнопок режима (I и II) будет изменяться.

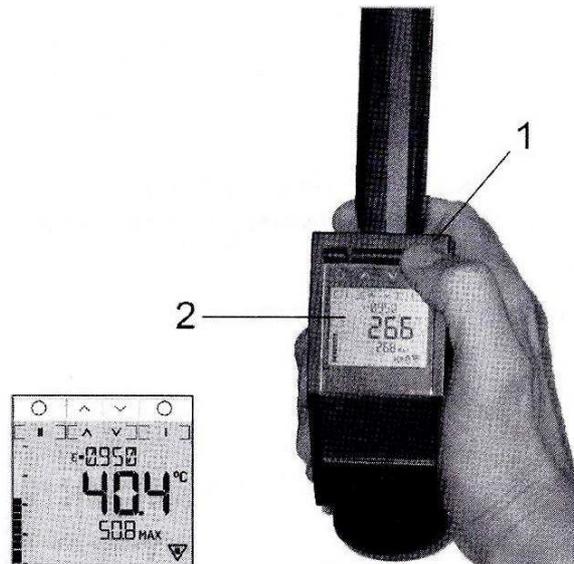


Рисунок 10. – Проведения измерений при вертикальном положении пирометра

Измеренная температура (рис. 11) отображается на главном дисплее (1). На верхнем дисплее показана максимальная температура (2), на нижнем – значение коэффициента излучения (3). Графический дисплей в правой части (4) показывает тренд температуры. Шкала устанавливается автоматически в пределах между минимальным и максимальным значениями.

HOLD: функция удержания показаний. Значение температуры сохраняется на дисплее в течение 7 с после отпускания триггера. На дисплее появляется слово HOLD.

Если после истечения этого времени не было нажато ни одной кнопки, прибор автоматически отключается.

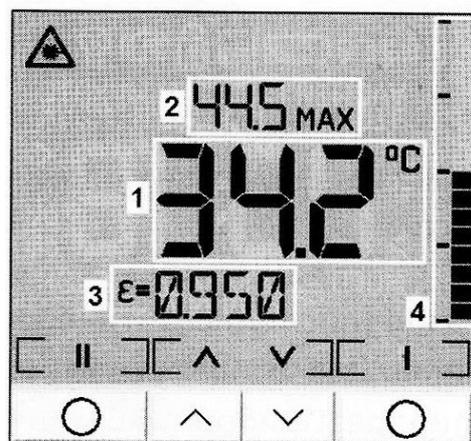


Рисунок 11. – Отображение полученной информации после измерения

После измерения, поочередно могут быть отображены следующие функции (нажатием кнопки $Up \wedge$) /начиная с режима HOLD (рис. 12).

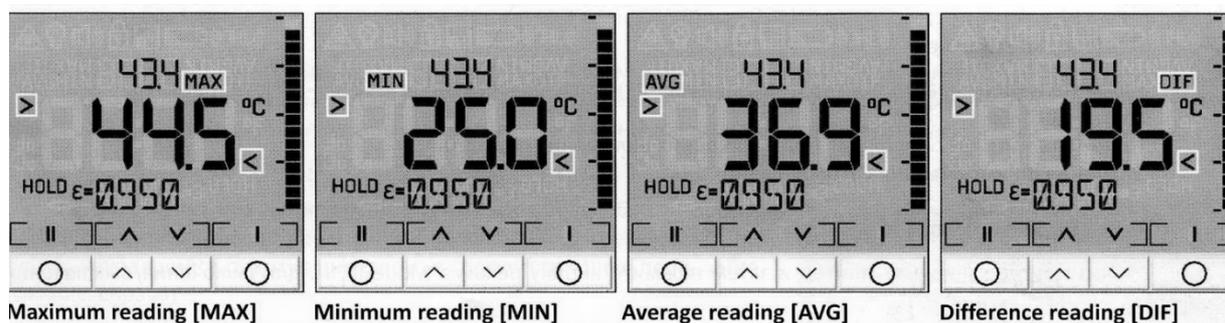


Рисунок 12. – Отображение функций после измерения:

MAX – наивысшее измеренное значение температуры; MIN – наименьшее измеренное значение температуры; AVG – среднее из измеренных значений температуры; DIF – разность между минимальным и максимальными значениями

Эти значения отображаются на основном дисплее и маркируются символами $>$ и $<$. Текущее значение температуры (в режиме удержания показаний HOLD последнее измеренное значение) будет отображаться вверху над основным дисплеем.

Последнее измеренное значение будет сохраняться в пирометре и после его выключения. Для отображения последнего измеренного значения, пожалуйста, нажмите кнопку I или II при выключенном приборе. Прибор отобразит значение в режиме удержания HOLD,

Для подсветки дисплея нажмите и удерживайте триггер и затем нажмите кнопку режима Mode I, для включения/выключения подсветки дисплея. На дисплее мигает символ для подтверждения включения подсветки. Значение по умолчанию: On (включено). Для включения или выключения лазерного прицела нажмите и удерживайте триггер и затем нажмите кнопку режима Mode II. Символ лазера на дисплее (только при нажатом триггере) показывает, что лазер включен. Значение по умолчанию: On (включено).

Оптика

Пирометр LS оснащен перестраиваемой оптикой. Два возможных режима работы обозначаются как SF (стандартный фокус) и CF (близкий фокус) соответственно (см. рис. 5). В режиме SF (стандартный режим измерений) могут быть измерены объекты диаметром от 16 мм и более. Лазер с пересекающимися лучами показывает реальный размер измеряемого пятна, на поверхности объекта, независимо от расстояния до объекта и без параллакса.

В режиме «близкий фокус» CF можно измерять объекты размером от 1 мм (в т.ч. компоненты электронных схем). В этом режиме двухлучевой лазер показывает пятно измерения на объекте. Лучи лазера сходятся в точке фокуса на расстоянии 62 мм от передней плоскости и показывают наименьшее пятно измерения диаметром 1 мм.

Для переключения между режимами «стандартной» и «близкофокусной» оптики необходимо передвинуть переключатель режимов Optic switch, находящийся рядом с дисплеем, в соответствующее положение.

Установка параметров

Меню 1. В меню 1 (рис. 13) устанавливаются параметры излучения, сигнализации и режим блокировки триггера. Каждая установка или изменение значений, сохраняется при нажатии на триггер или кнопку Mode 1. Для активирования конфигурации меню прибор должен быть в режиме HOLD.

Trigger \Rightarrow Save \Rightarrow Measure mode, Mode I \Rightarrow Save \Rightarrow Next menu mode

Если не нажата ни одна из этих кнопок, сделанные установки или изменения не будут сохранены, через 30 с прибор выключается. Значение коэффициента эмиссии ϵ – это постоянная материала, характеризующая его способность излучать ИК энергию. Значение ϵ может изменяться от 0 до 1 (от 0 до 100%). Значение по умолчанию – 0,950. Пределы устанавливаемых значений: 0,100...1,100 (при значении $> 1,000$ = усиление). Нажатие кнопки Up/Вверх увеличивает значение, кнопки Down/Вниз – уменьшает значение.

HOLD \Rightarrow Mode II \Rightarrow ϵ flashes \Rightarrow Up \Rightarrow INCREASE ϵ
 \Rightarrow Down \Rightarrow \Rightarrow INCREASE ϵ

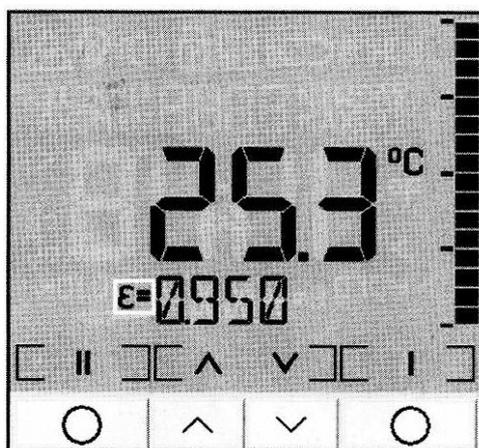


Рисунок 13. – Меню 1: Изменение коэффициента эмиссии

Долговременные измерения (блокировка триггера)

Эта функция позволяет проводить непрерывные долговременные измерения температуры без необходимости удержания триггера в нажатом состоянии. Лазер работает только при нажатом триггере. Пределы установки On/Off (включено/выключено). По умолчанию – выключено.

HOLD ⇒ II ⇒ 3xI ⇒ Lock symbol flashes ⇒ ∧ ⇒ On/Off
⇒ ∨ ⇒ On/Off

On:

2xI ⇒ HOLD + Lock ⇒ Trigger ⇒ Measurement mode + Lock
Trigger ⇒ Measurement mode + Lock

Выключить данную функцию можно в том же порядке, но начиная из режима Measurement mode + Lock.

Регистрация данных (память)

Пирометр имеет встроенный регистратор данных с максимальной памятью на 100 значений протоколов измерения. Каждый протокол содержит следующую информацию:

- номер записи: P от 0 до 99;
- комментарии;
- значение ИК температуры;
- Max/Min/Avg/Dif – значения;
- коэффициент излучения;
- температура контактной термопарой (если она подключена)

Для сохранения любых данных прибор должен быть в режиме HOLD. Вначале измерьте значение температуры, затем отпустите Trigger.

HOLD ⇒ Down ⇒ Disc symbol + next Pos.[Pxx] ⇒ Up ⇒ ⇒ INCREASE Pos.-№
⇒ Down ⇒ DECREASE Pos.-№
⇒ Mode II ⇒ Store ⇒ HOLD

Если Вы нажмете на триггер, записи данных не произойдет, пирометр перейдет в режим измерения. Если не будет нажата ни одна из кнопок, также записи данных не произойдет, прибор выключится через 20 с. Если запись данных началась, автоматически показывается следующая свободная позиция для записи. Если выбрана уже занятая позиция, на верхнем дисплее мигает P (рис. 14). Осуществить сохранение данных возможно также после вызова последнего измеренного значения.

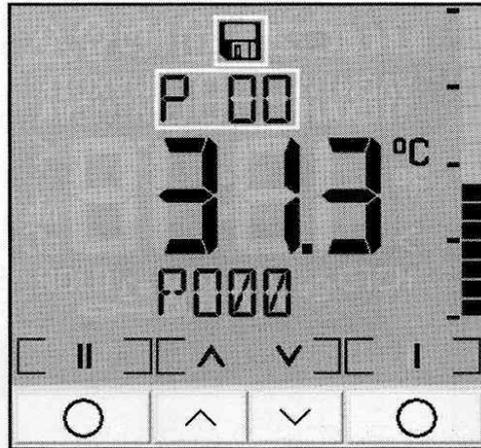


Рисунок 14. – Пример отображения на дисплее параметра «Регистрация данных»

Комментарии

Вы можете присвоить 4-значный буквенный комментарий любой позиции в регистраторе данных.

Комментарий будет отображаться на нижнем дисплее и имеет следующие установки:

P000 (для позиции 1) – **P099** (для позиции 100).

В режиме редактирования можно выбрать из 20 предустановленных комментариев (LOC1, LOC2, ... BUS1... VAL1 и т.д.).

Для выполнения этого необходимо войти в режим регистрации данных, выбрать нужную позицию:

Disc symbol + chosen position [Pxx] ⇒ Mode II ⇒ Disc symbol+next Pos. [Pxx]

⇒ Up ⇒ LOC1, LOC2, ... BUS1... VAL1

⇒ Down ⇒ LOC1, LOC2, ... BUS1... VAL1

⇒ Mode II ⇒ Save

Имеется возможность добавить собственный комментарий, используя следующие установки: [A...2] [0...9] [-/< >] [empty]:

Disc symbol + chosen position [Pxx] ⇒ 2 x Mode II ⇒ 1.character flashes

⇒ Up ⇒ Change Value

⇒ Down ⇒ Change Value

⇒ Up ⇒ Change Value

⇒ Down ⇒ Change Value

⇒ Mode II ⇒ Save

Вызов значений из регистратора данных

Для вызова значений из сохраненного протокола данных необходимо перейти в режим измерения (рис. 15):

Measur mode \Rightarrow Trigger+Down \Rightarrow Disc symbol flashes \Rightarrow P00 + Measurement value + comment



Рисунок 15. – Пример отображения на дисплее данных для вызова значений из сохраненного протокола

Для выхода из режима регистратора данных нажмите одновременно триггер и кнопку Вниз. Если не будет нажата ни одна из кнопок, произойдет отключение прибора через 20 с.

Работа с контактной термопарой (контактным термометром)

Применение контактного термометра совместно с ИК термометром позволяет определить неизвестный коэффициент излучения измеряемого материала.

Пирометр имеет разъем для подключения контактного датчика температуры (расположенный на конце рукоятки пирометра).

Можно подключить как контактный пробник – термоэлектрический преобразователь типа К комплекта пирометра, так и другую термопару типа К. Для отображения на дисплее значений, измеренных контактным термометром необходимо следующее:

Trigger + Up \Rightarrow thermocouple-temperatur [lower display]

При повторном нажатии кнопки Up (при нажатом триггере) произойдет переключение к дисплею коэффициента излучения (рис. 16).

При любом включении прибора после того, как он был выключен, коэффициент излучения будет отображен на нижнем дисплее.

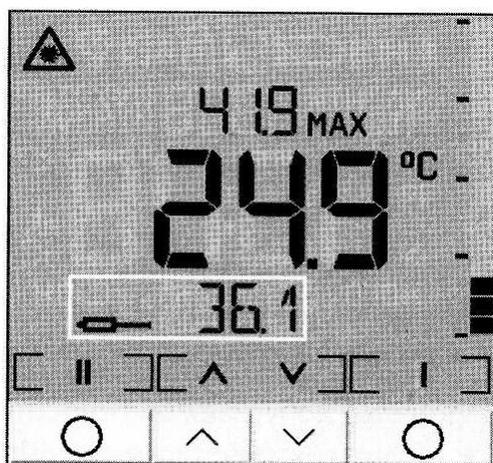


Рисунок 16. – Пример отображения на дисплее параметра «Коэффициент излучения»

Получение результатов эксперимента

Соедините пирометр с ПК при помощи USB кабеля, входящего в комплект поставки пирометра. После запуска ПО и установки соединения появится строка состояния ниже временной оси (рис. 17).

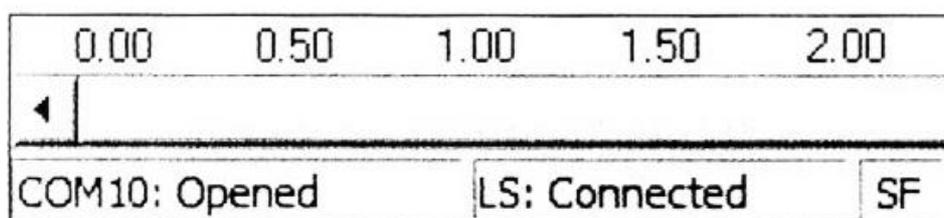


Рисунок 17. – Пример отображения на дисплее установки соединения пирометра с ПК:

COMxx указывает на порт, к которому подключен компьютер; LS:connected – на удачное подключение с ПК; SF/CF отображает опцию фокуса (стандартный, близкий)

При невозможности установить соединение выберите именно тот COM порт, к которому подключен пирометр [Menu: Setup/Interface]. Если пирометр подключен к ПК, то порт, к которому он подключен, будет помечен как [Infared Thermometer Adapter] (рис. 18).

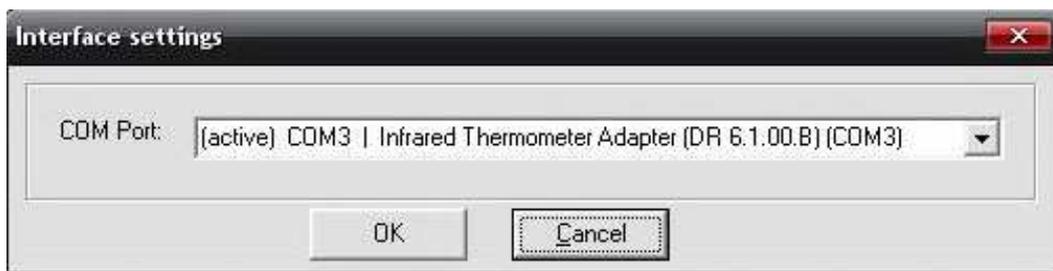


Рисунок 18. – Пример отображения на дисплее подтверждения установки соединения пирометра с ПК

Для загрузки сохраненных данных из пирометра в ПК нажмите кнопку Logger в меню. Все данные появятся в окне в виде таблицы, приведенной на рисунке 19.

Index	Date	Time	TObj	TObjMin	TObjMax	TObjAvg	TObjDiff	TInt	TExt	Hi Alarm	Lo Alarm	Eps	Name
1	14.10.2005	20:58:14	25,8°C	25,8°C	25,9°C	25,8°C	0,1°C	26,0°C	25,7°C	29,7°C	-40,0°C	0,946	P000
2	14.10.2005	20:13:50	26,8°C	26,8°C	29,8°C	27,9°C	3,0°C	27,3°C	.....	28,7°C	-40,0°C	0,946	P001
3	14.10.2005	20:58:24	26,0°C	25,6°C	26,0°C	25,8°C	0,4°C	26,0°C	25,7°C	29,7°C	-40,0°C	0,946	P002
4	14.10.2005	20:58:28	25,7°C	25,6°C	25,8°C	25,7°C	0,2°C	26,0°C	25,8°C	29,7°C	-40,0°C	0,946	LH12
5	14.10.2005	20:58:58	25,5°C	25,5°C	25,8°C	25,6°C	0,3°C	26,0°C	25,9°C	29,7°C	-40,0°C	0,946	P004
6	14.10.2005	20:17:20	599,6°C	29,2°C	600,5°C	538,2°C	571,3°C	27,2°C	.....	28,7°C	-40,0°C	0,947	P005
7	14.10.2005	20:14:06	26,8°C	26,8°C	29,8°C	27,9°C	3,0°C	27,3°C	.....	28,7°C	-40,0°C	0,946	P006
8	18.10.2005	13:16:46	22,3°C	22,0°C	23,0°C	22,4°C	1,0°C	25,6°C	.....	900,0°C	-40,0°C	1,000	P007
9	19.10.2005	17:05:06	23,0°C	21,3°C	23,2°C	22,6°C	1,9°C	26,8°C	.....	900,0°C	-40,0°C	0,999	P008
10	19.10.2005	17:05:12	23,0°C	21,3°C	23,2°C	22,6°C	1,9°C	26,8°C	.....	900,0°C	-40,0°C	0,999	P009
11	19.10.2005	17:05:28	34,6°C	24,8°C	34,6°C	28,8°C	9,8°C	26,8°C	.....	900,0°C	-40,0°C	0,999	P010
12	20.10.2005	13:50:46	24,6°C	24,2°C	26,0°C	24,5°C	1,8°C	27,1°C	.....	30,0°C	-40,0°C	1,000	P011
13	20.10.2005	13:28:24	24,1°C	24,1°C	24,3°C	24,1°C	0,2°C	27,0°C	.....	29,1°C	-40,0°C	0,950	P012
14	20.10.2005	13:51:12	51,1°C	21,0°C	51,2°C	37,3°C	30,2°C	27,1°C	.....	30,0°C	-40,0°C	1,000	P013
15	20.10.2005	13:53:28	21,8°C	21,8°C	21,9°C	21,8°C	0,1°C	27,3°C	.....	30,0°C	-40,0°C	1,000	PP5L
16	20.10.2005	18:06:44	48,7°C	24,3°C	48,6°C	41,2°C	24,3°C	24,5°C	.....	30,0°C	-40,0°C	0,950	P015
17	20.10.2005	18:08:48	-11,1°C	-11,4°C	4,8°C	-10,7°C	16,2°C	24,6°C	.....	30,0°C	10,0°C	0,950	P016

Close Open File... Save as... Clear Logger ...

LS Data from device

Рисунок 19. – Пример отображения на дисплее регистрации данных с пирометра

Значения температур, превышающих порог сигнализации по верхнему пределу, выделены в таблице жирным шрифтом и красным цветом.

Значения температур ниже порога сигнализации по нижнему пределу – жирным шрифтом и синим цветом. При этом в протоколе регистрации данных, считанных с пирометра, предусмотрены следующие сокращения и обозначения:

- Index – порядковый номер измерения;
- Date – дата измерения;

- Time – время измерения;
- TObj – температура объекта;
- TObj Min – минимальная температура объекта;
- TObj Max – максимальная температура объекта;
- TObj Avg – средняя температура объекта;
- TObj Diff – разница между максимальной и минимальной температурой объекта;
- TInt – внутренняя температура пирометра;
- TExt – температура внешнего датчика (если подключен);
- Hi-alarm – значение порога сигнализации по верхнему пределу;
- Lo-Alarm – значение порога сигнализации по нижнему пределу;
- Eps – значение коэффициента излучения;
- Name – название материала или места измерения.

Измерение температуры при помощи ПК

Настройка пирометра

Кнопка Setup, в меню [Menu: Device/Interface], открывает диалоговое окно для настройки пирометра (рис. 20).

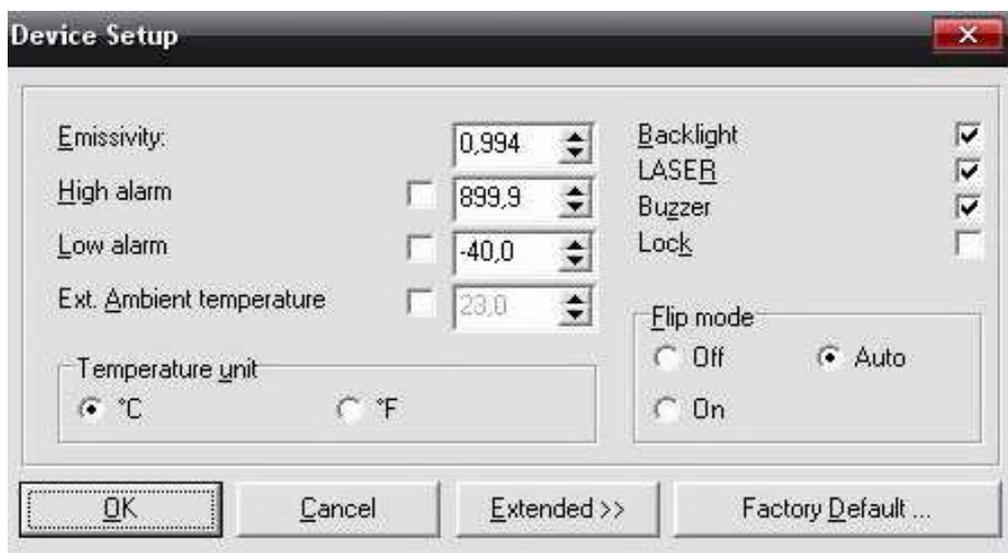


Рисунок 20. – Пример отображения на дисплее окна настройки пирометра

Можно настроить следующие параметры:

- Emissivity – коэффициент излучения;
- Hi-alarm – порог срабатывания сигнализации по верхнему пределу;
- Lo-Alarm – порог срабатывания сигнализации по нижнему пределу;

- Ext. Ambient Temp – температура окружающей среды;
- Temperature unit – выбор градусов С или F;
- Backlight – подсветка дисплея (вкл/выкл);
- Laser – лазер (вкл/выкл);
- Buzzer – звуковая сигнализация (вкл/выкл);
- Lock mode – режим длительного измерения без удержания курка (вкл/выкл);
- Flip mode – режим переключения поворота дисплея (вкл/выкл/авто).

Как только впервые выбрана опция Ext. Ambient Temp, она появляется в меню пирометра [Setup Menu 2] и может быть удалена через ПО.

Название материала и места измерений

Можно выбрать название места измерения из 20 предустановленных в пирометре или придумать свое. Таблица предустановленных названий может быть отредактирована при помощи ПО.

Нажмите кнопку Names в меню [Menu: Device/Materials and location names]. Затем выделите название, которое собираетесь редактировать и введите желаемое название.

Максимальная длина – 4 знака. Можно использовать следующие символы: [A...Z.] [0...9] [-/< >] [Space]. Если Вы неправильно ввели название (ни одного знака, более 4 или неверные символы), ячейка загорается красным цветом и таблица не закроется при нажатии на кнопку (рис. 21).

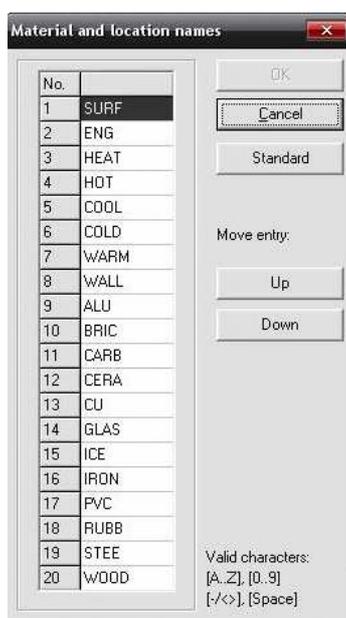


Рисунок 21. – Пример отображения на дисплее окна настройки названия материала и места измерений

Цифровые дисплеи

Если пирометр подключен к ПК и запущено ПО, то текущая температура объекта TObj появится на цифровом дисплее (справа наверху). Можно добавлять дисплеи Tint и TExt из меню [Menu: View/Digital displays].

Выбранные дисплеи сохраняются даже при перезагрузке программы. Вы можете изменить размер дисплея, пометив курсором мыши линию ниже дисплеев и сдвинув ее.

Работа с диаграммами

Для начала нажмите кнопку Start в меню [Menu: Measurement/Start]. Начнется измерение температуры и отображение ее в виде диаграммы (рис. 22).

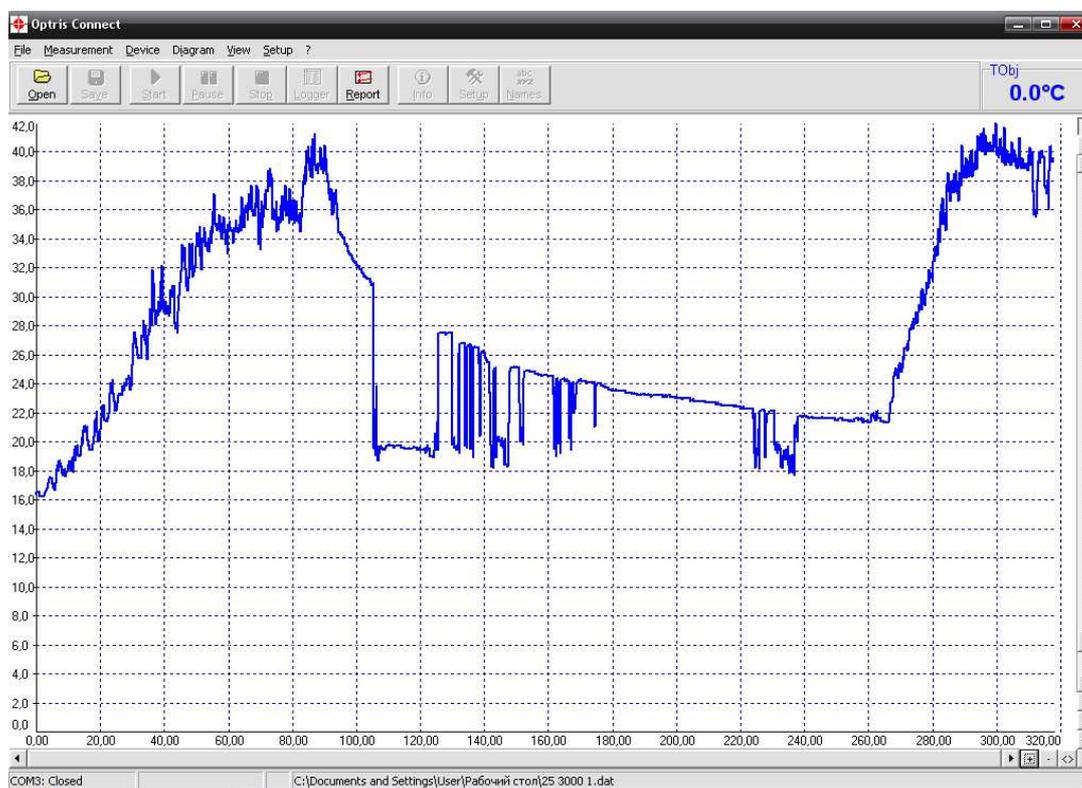


Рисунок 22. – Пример отображения на дисплее диаграммы измерений

Нажатие на любую кнопку на оси времени останавливает отображение графика, но сами измерения осуществляются в фоновом режиме. Для возврата к текущим измерениям нажмите кнопку Pause в меню [Menu: Measurement/Pause] или кнопку S. Когда отображение диаграммы остановлено, любая часть графика может быть выделена инструментом Time scroll bar и растянута или сужена по оси времени кнопками + и –.

Параметры измерений

Меню позволяет выбрать следующие параметры диаграмм (рис. 23):

- Digital – позволяет выбрать сигналы, которые будут выведены на экран в виде численных значений;
- Diagram – позволяет выбрать сигналы, которые будут выведены на экран в виде графиков;
- Pen Width – ширина температурного графика;
- Color – цвет температурного графика (от 1 до 5 точек);
- Initial time – цена деления в секундах по оси времени.

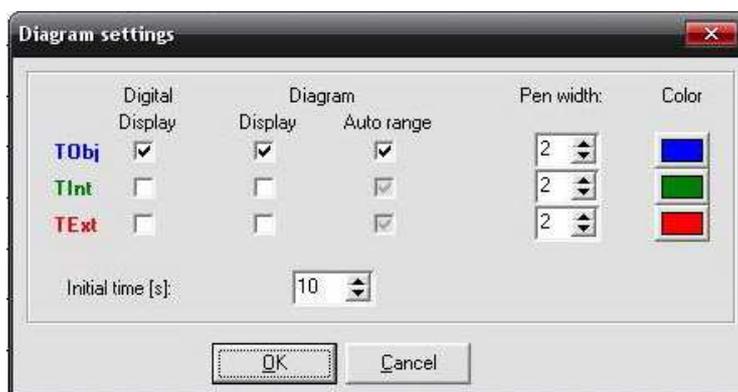


Рисунок 23. – Пример отображения на дисплее параметров диаграммы измерений

Структура измерений

Меню [Menu: Measurement/Setting] открывает следующее диалоговое окно (рис. 24):

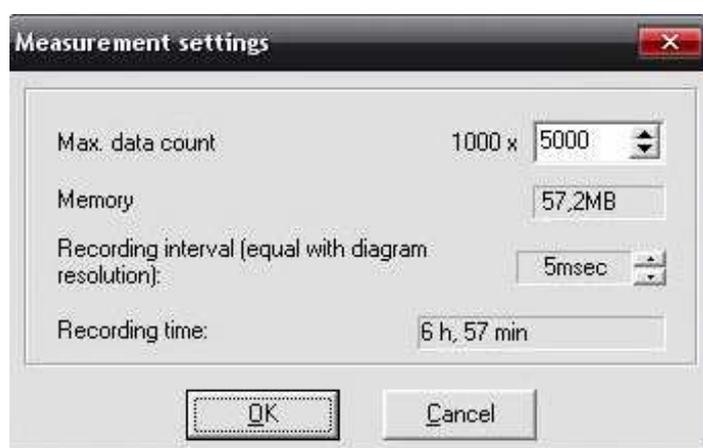


Рисунок 24. – Пример отображения на дисплее структуры измерений диаграммы

- Max. data count – ограничивает число измерений. По достижению выбранного значения запись прекращается;
- Memori – отображает размер файла;
- Recording interval – временной интервал между записываемыми данными (от 1мс до 10 с);
- Recording time – отображает время измерений.

Масштаб температурной оси

При выборе global scaling температурная шкала автоматически подстраивается под пиковые значения температур и остается неизменной в течении всего времени измерений. При выборе local scaling – динамически под пиковые значения измерений. Когда появляются следующие пиковые значения, шкала подстраивается под них. Данная опция позволяет оптимально отображать температурный график (рис. 25).

Ручная настройка manual scaling может быть произведена в любое время с помощью кнопок на температурной оси. Активация кнопок происходит нажатием их на оси температур или через меню [Menu: Diagram].

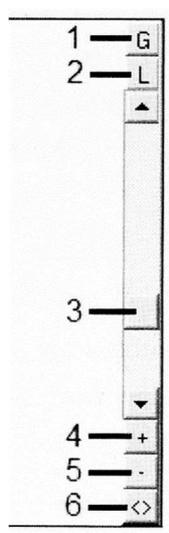


Рисунок 25. – Пример отображения масштаба-температурной оси:
 1 – глобальное масштабирование; 2 – локальное масштабирование;
 3 – область прокрутки; 4 – увеличение; 5 – уменьшение; 6 – весь диапазон

Остановка измерений

Для остановки текущих измерений нажмите кнопку Stop в меню [Menu: Measurement/Stop]. Кнопка Save в меню [Menu: Measurement/Save as] открывает окно проводника для выбора папки, в которой будет сохранен файл и название файла [file type: *.dat].

ЗАДАНИЕ

1. Для заданной схемы измерения подобрать режимы обработки (приложение А).
2. Настроить обработку в заданной технологической системе.
3. Измерить температуру заданного объекта в технологической системе, используя приложения Б и В.
4. Заполнить протокол исследования теплового процесса (приложение Г) и сделать необходимые выводы.

СТРУКТУРА ОТЧЕТА

1. Название, цель и порядок выполнения лабораторной работы.
2. Краткие сведения об экспериментальных методах измерения температуры.
3. Сущность и особенности объекта измерения, режимы обработки.
4. Привести протокол назначенных режимов обработки и результатов измерения температуры.
5. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как можно определить общую мощность тепловыделения в процессах механической обработки? Какие измерения при этом необходимо выполнить?
2. Какие контактные методы измерения средней температуры на поверхности твердого тела можно применять? Сопоставьте их преимущества и недостатки.
3. Перечислите основные виды термопар, применяемых при измерении температур в технологических системах, и сопоставьте их преимущества и недостатки.
4. От каких величин зависит погрешность измерения температуры с помощью искусственных термопар? Какие пути снижения этих погрешностей Вы можете предложить?
5. Какие металлы целесообразно использовать для термопар? Требования, предъявляемые к этим металлам?
6. Какие типы искусственных термопар Вы знаете?
7. Какие рекомендации по выбору типа искусственной термопары Вы можете назвать?
8. Назовите источники погрешности термопар.
9. Какие рекомендации по работе с термопарой Вы знаете?
10. Что такое пирометр?
11. Как классифицируются пирометры?
12. Изложите последовательность проведения эксперимента по измерению температуры и порядок настройки пирометра.

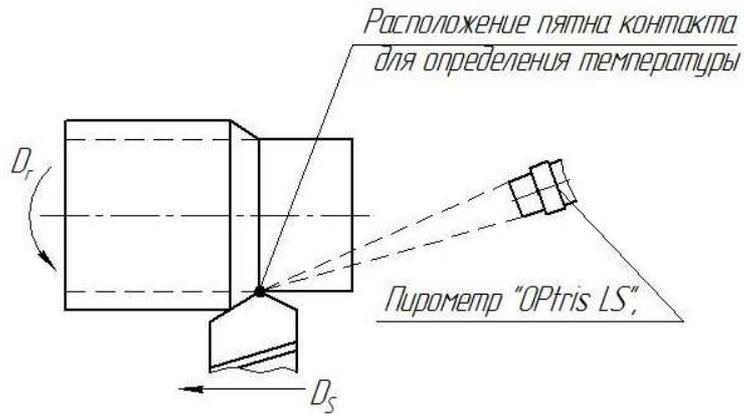
ЛИТЕРАТУРА

1. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах : учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Попок, Н.Н. Теория резания : учеб.-метод. комплекс для студентов машиностр. специальностей / Н.Н. Попок. – Новополюцк : ПГУ, 2005. – 240 с.
3. ГОСТ 6616-94. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 6616-93 ; введ. 1999–01–01. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; Изд-во стандартов. – 12 с.
4. ГОСТ Р 8.585-2001. Термомпары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Взамен ГОСТ Р 50431-92, МИ 2559-99 ; введ. 2001–11–21. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; Изд-во стандартов. – 80 с.
5. Термомпары (термоэлектрические преобразователи) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://temperatures.ru/pages/termoelektricheskie_termometry. – Дата доступа: 28.03.2017.
6. Паспорт пирометра «Optris LazerSight».

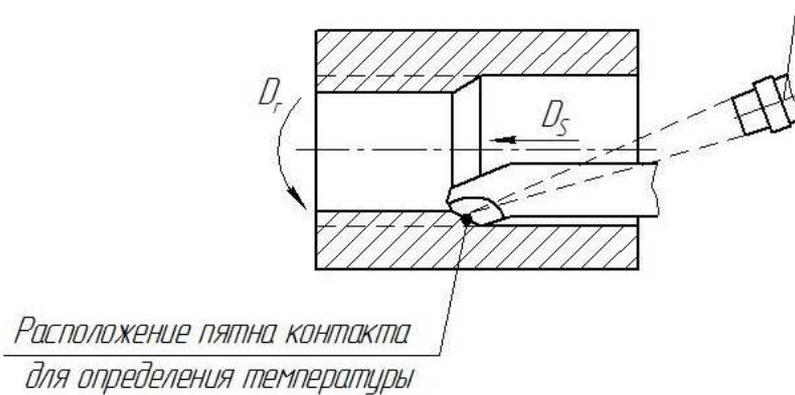
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Схемы измерения пирометром «Optris LazerSight»

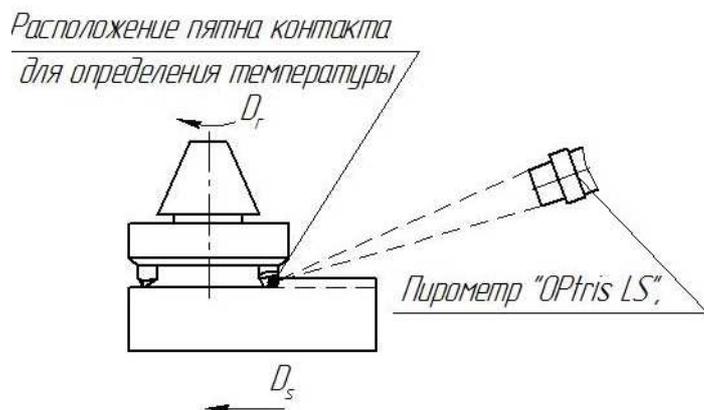
а) схема измерения пирометром «Optris LazerSight» при обтачивании с продольной подачей



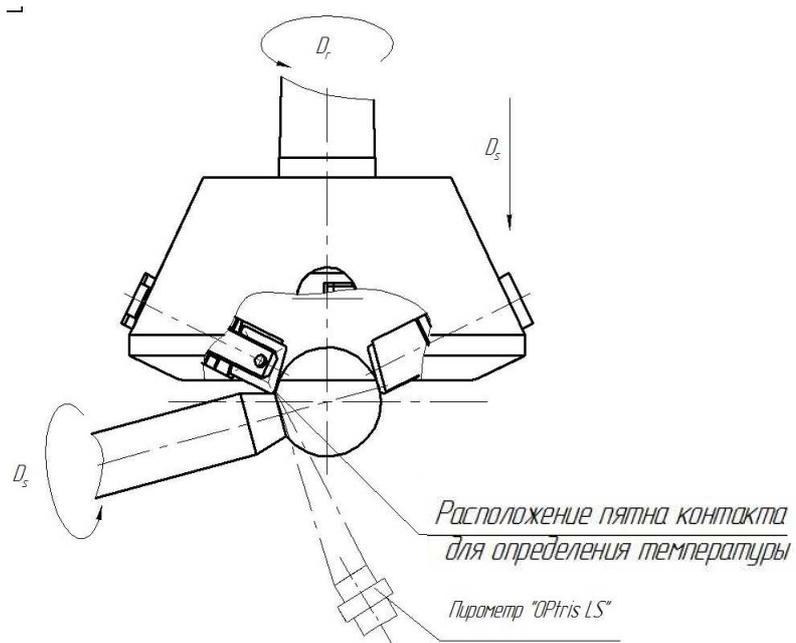
б) схема измерения пирометром «Optris LazerSight» при растачивании с продольной подачей



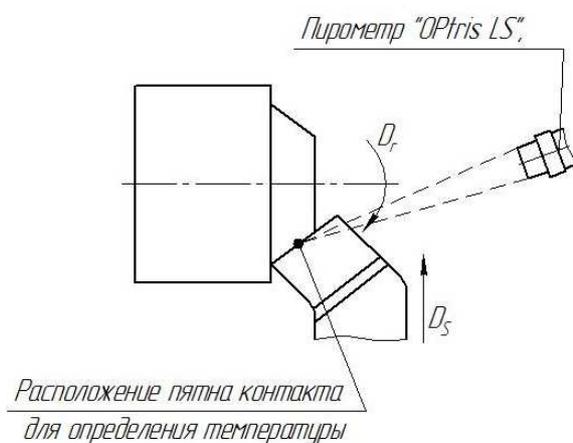
в) схема измерения пирометром «Optris LazerSight» при торцовом фрезеровании



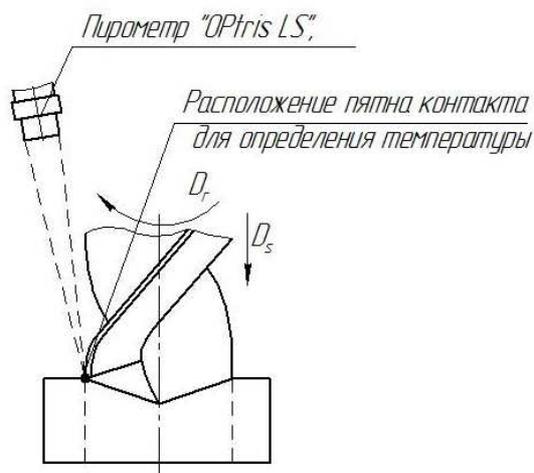
г) схема измерения пирометром «Optris LazerSight» при охватывающем фрезеровании



д) схема измерения пирометром «Optris LazerSight» при подрезании торца



е) схема измерения пирометром «Optris LazerSight» при обработке осевым инструментом



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Коэффициент излучения (степень черноты)

Коэффициент излучения (или степень черноты) ϵ показывает отношение энергии теплового излучения «серого тела», согласно закону Стефана Больцмана, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре. Коэффициент излучения абсолютно черного тела $\epsilon = 1$.

Материал поверхности	Коэффициент излучения ϵ
<i>1</i>	<i>2</i>
Глинозем, обработка пламенем	0,8
Алюминиевый лист	0,09
Алюминиевая Фольга	0,04
Алюминий сильно окисленный	0,2–0,31
Алюминий полированный	0,039–0,057
Алюминий грубой обработки	0,07
Сурьма полированная	0,28–0,31
Асфальт	0,93
Базальт	0,72
Бериллий	0,18
Висмут	0,34
Полость черного тела	1,00
Черная оптическая диафрагма	0,95
Черная краска силиконовая	0,93
Черная краска эпоксидная	0,89
Черная краска эмаль	0,80
Медная необработанная пластина	0,22
Латунь полированная	0,03
Латунь окисленная при 600°C	0,6
Красный кирпич	0,9
Кирпич, огнеупорная глина	0,75
Кадмий	0,02
Углерод, не окисленный	0,81
Углеродистая нить	0,77
Поверхность, обработанная прессованием углеродом	0,98
Чугун после плавки	0,44
Чугун, после плавки и тепловой обработки	0,60–0,70
Хром полированный	0,08–0,36
Бетон	0,85
Бетонные плитки	0,63
Хлопковая ткань	0,77
Слой металла, нанесенный на медь гальваническим способом	0,03
Медь нагретая и покрытая толстым окисным слоем	0,78

Окончание табл.

1	2
Полируемая Медь	0,023–0,052
Медно-никелевый сплав полированный	0,059
Стекло	0,92
Стекло, пирекс	0,85–0,95
Чистое золото высокой полировки	0,018–0,035
Гранит	0,45
Гипс	0,85
Лед	0,97
Инконель окисленный	0,71
Железо полированное	0,14–0,38
Железо, пластина покрытая красной ржавчиной	0,61
Железо, темно-серая поверхность	0,31
Железо, грубый слиток	0,87–0,95
Ламповая сажа	0,96
Свинец чистый неокисленный	0,057–0,075
Свинец окисленный	0,43
Окись Магния	0,20–0,55
Магний полированный	0,07–0,13
Мрамор белый	0,95
Ртуть жидкая	0,1
Мягкая сталь	0,20–0,32
Молибден полированный	0,05–0,18
Никель, полированный	0,072
Никель, окисленный	0,59–0,86
Провод нихромовый	0,65–0,79
Бумага офисная	0,55
Гипс	0,98
Платина, полируемая пластина	0,054–0,104
Фарфор глазурованный	0,92
Пластмассы	0,91
Каучук, твердая глянцевая пластина	0,94
Каучук, мягкий	0,86
Песок	0,76
Опилки	0,75
Кремниевый Карбид	0,83–0,96
Серебро полированное	0,02–0,03
Сталь нержавеющая	0,85
Сталь нержавеющая полированная	0,075
Сталь нержавеющая 301	0,54–0,63
Олово неокисленное	0,04
Титан полированный	0,19
Вольфрам полированный	0,04
Вольфрамовая нить	0,032–0,35
Вода	0,95–0,963
Дуб	0,91

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свойства различных типов термопары

Тип термопары МЭК	Коэффициент $\mu V/^{\circ}C$	Температурный диапазон, $^{\circ}C$ (длительно)	Температурный диапазон, $^{\circ}C$ (кратковременно)	Класс точности 1 ($^{\circ}C$)	Класс точности 2 ($^{\circ}C$)
К	41	0 до +1100	-180 до +1300	$\pm 1,5$ от $-40^{\circ}C$ до $375^{\circ}C$ $\pm 0,004 \times T$ от $375^{\circ}C$ до $1000^{\circ}C$	$\pm 2,5$ от $-40^{\circ}C$ до $333^{\circ}C$ $\pm 0,0075 \times T$ от $333^{\circ}C$ до $1200^{\circ}C$
J	55,2	0 до +700	-180 до +800	$\pm 1,5$ от $-40^{\circ}C$ до $375^{\circ}C$ $\pm 0,004 \times T$ от $375^{\circ}C$ до $750^{\circ}C$	$\pm 2,5$ от $-40^{\circ}C$ до $333^{\circ}C$ $\pm 0,0075 \times T$ от $333^{\circ}C$ до $750^{\circ}C$
N		0 до +1100	-270 до +1300	$\pm 1,5$ от $-40^{\circ}C$ до $375^{\circ}C$ $\pm 0,004 \times T$ от $375^{\circ}C$ до $1000^{\circ}C$	$\pm 2,5$ от $-40^{\circ}C$ до $333^{\circ}C$ $\pm 0,0075 \times T$ от $333^{\circ}C$ до $1200^{\circ}C$
R		0 до +1600	-50 до +1700	$\pm 1,0$ от $0^{\circ}C$ до $1100^{\circ}C$ $\pm [1 + 0,003 \times (T - 1100)]$ от $1100^{\circ}C$ до $1600^{\circ}C$	$\pm 1,5$ от $0^{\circ}C$ до $600^{\circ}C$ $\pm 0,0025 \times T$ от $600^{\circ}C$ до $1600^{\circ}C$
S		0 до +1600	-50 до +1750	$\pm 1,0$ от $0^{\circ}C$ до $1100^{\circ}C$ $\pm [1 + 0,003 \times (T - 1100)]$ от $1100^{\circ}C$ до $1600^{\circ}C$	$\pm 1,5$ от $0^{\circ}C$ до $600^{\circ}C$ $\pm 0,0025 \times T$ от $600^{\circ}C$ до $1600^{\circ}C$
B		+200 до +1700	0 до +1820		$\pm 0,0025 \times T$ от $600^{\circ}C$ до $1700^{\circ}C$
T		-185 до +300	-250 до +400	$\pm 0,5$ от $-40^{\circ}C$ до $125^{\circ}C$ $\pm 0,004 \times T$ от $125^{\circ}C$ до $350^{\circ}C$	$\pm 1,0$ от $-40^{\circ}C$ до $133^{\circ}C$ $\pm 0,0075 \times T$ от $133^{\circ}C$ до $350^{\circ}C$
E	68	0 до +800	-40 до +900	$\pm 1,5$ от $-40^{\circ}C$ до $375^{\circ}C$ $\pm 0,004 \times T$ от $375^{\circ}C$ до $800^{\circ}C$	$\pm 2,5$ от $-40^{\circ}C$ до $333^{\circ}C$ $\pm 0,0075 \times T$ от $333^{\circ}C$ до $900^{\circ}C$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Протокол экспериментального определения тепловых потоков и температур в технологических системах

№ опыта	Се- рия опы- тов	Режимы резания				Температура резания													
		t , мм	S , мм/об	n , мин ⁻¹	v , м/мин	Index	Date	Time	TObj	TObj Min	TObj Max	TObj Avg	TObj Diff	TInt	TExt	Hi- alarm	Lo- Alarm	Eps	Name
1	$\theta = f(v)$																		
2																			
3																			
4																			

*

Станок: модель –

Прибор измерительный: модель –

Заготовка: материал –

Режущий инструмент:

тип –

материал режущего лезвия –

геометрия режущего лезвия –

СОДЕРЖАНИЕ

1	Цель и порядок выполнения работы	1
2	Общие сведения	1
2.1	Классификация методов экспериментального определения тепловых потоков и температур в технологических системах	1
2.2	Контактные методы измерения температуры	2
2.3	Бесконтактные методы измерения температур	12
2.3.1	Методы пирометрии, пирометры и их использование	14
3	Проведение экспериментов при помощи пирометра «Optris LazerSight»	25
4	Задание	41
5	Структура отчета	41
6	Контрольные вопросы	42
	Литература	43
	Приложение А	
	Схемы измерения температуры пирометром «Optris LazerSight»	44
	Приложение Б	
	Коэффициент излучения (степень черноты)	47
	Приложение В	
	Свойства различных типов термопар	48
	Приложение Г	
	Протокол экспериментального определения тепловых потоков и температур в технологических системах	49

Учебное издание

ПОПОК Николай Николаевич
СИДИКЕВИЧ Алексей Владимирович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОПАРЫ
И ПИРОМЕТРА «OPTRIS LAZERSIGHT»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для выполнения учебно-исследовательской лабораторной работы
для студентов и магистрантов машиностроительных специальностей

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Подписано в печать 16.01.19. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,89. Тираж 30 экз. Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.14.

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.