Учреждение образования
«Международный государственный экологический
институт имени А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

Факультет мониторинга окружающей среды
Кафедра энергоэффективных технологий

А. И. Ерошов

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Методические указания
к практическим занятиям студентов для специальностей:
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»
и 1-100 01 01 «Ядерная и радиационная безопасность» (очная и заочная
форма обучения)

Минск
2016

УДК 001.8(075.8)
ББК 73я73
Е 76

Рекомендовано к изданию НМС МГЭУ им. А.Д. Сахарова
(протокол № 3 от 20 ноября 2013 г.)

Автор-составитель:
д. б. наук, проф. *А. И. Ерошов*

Рецензенты:
канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой физики и высшей математики
МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ *В. Ф. Малишевский;*
д-р тех. наук, проф., зав. кафедрой теоретической механики и теории машин и механизмов БГАТУ *А. Н. Орда*

Ерошов, А. И.
Е 76 Основы научных исследований и инновационная деятельность: практикум / А. И. Ерошов. – Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2016. – 51 с.

ISBN 978-985-551-037

Предлагаемые методы обработки экспериментальных данных будут способствовать качественному выполнению студентами научно-исследовательских работ (НИРС).

При создании нового продукта, бизнес-план является элементом любого проекта и включает большое количество положений, которые необходимо учитывать и выполнять. Одно из основных положений, включает этапы разработки продукта. Необходимо описание физических характеристик нового товара, проведение экспериментальных работ, которые невозможны без проведения измерений многочисленных физических параметров.

УДК 001.8(075.8)
ББК 73я73

ISBN 978-985-551-037

Оглавление

Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немыслима без меры

Д. И. Менделеев

Введение

При создании нового продукта, бизнес-план является элементом любого проекта и включает большое количество положений, которые необходимо учитывать и выполнять. Одно из основных положений, включает этапы разработки продукта. Необходимо описание физических характеристик нового товара, проведение экспериментальных работ, которые невозможны без проведения измерений многочисленных физических параметров.

Полученные физические параметры должны соответствовать тем требованиям, которые к ним предъявляются.

При любых научно-исследовательских работах, при которых используются разнообразные измерительные приборы, полученные физические единицы суммируются, усредняются с определением погрешности и достоверности полученных данных.

Методические указания к практическим занятиям, которые необходимо выполнить, будут способствовать получению необходимых навыков у студентов для выполнения НИРС.

Занятие 1. Методы обработки экспериментальных показателей при измерениях. Общие сведения об измерениях

Цель занятия: изучить методы обработки экспериментальных данных, которые направлены на анализ, уменьшение и оценку погрешностей результатов измерений.

Приборы, материалы: измерительные инструменты, калькуляторы, объекты измерения.

Теория. **Метод статистической обработки результатов измерения**

Основным условием применения статистических методов является статистическая устойчивость получения данных. Для применения статистических методов необходимо выполнение довольно строгих условий, в частности, наличие статистической устойчивости данных. К традиционным статистическим методам обработки данных относятся три основные группы методов: классические (традиционные), робастные (устойчивые) и непараметрические (вариационные ряды).

Математическая статистика позволяет установить пределы, в которых сделанные выводы являются достаточно надежными. Важное значение статистические выводы имеют для установления связи, сопряженности между изучаемыми показателями, а так же для установления соответствия полученного экспериментального ряда величин с теоретическими (априорными), что позволяет заключить о степени приближения результатов опыта к теоретическим предпосылкам.

Наиболее употребительной характеристикой определенной совокупности измерений вычисление среднего арифметического значения из n измерений $\mathbf{v_i = a - a_i}$, вычисление квадратов погрешности отдельных измерений $\mathbf{V_i^2}$.

Если несколько измерений резко отличаются по своим значениям от остальных измерений, то следует проверить, не являются ли они промахом. При исключении одного или нескольких измерений их нужно повторить.

Наличие отклонений от среднего арифметического свидетельствует об изменчивости, вариации значений повторных опытов. Для измерения этой изменчивости чаще всего используют **дисперсию**. Дисперсией называется среднее значение квадрата отклонений величины от ее среднего значения. Дисперсия обозначается $\mathbf{S^2}$ или $\mathbf{S_a}$, где $(\mathbf{n - 1})$ – число степени свободы, равная количеству опытов минус единица. Одна степень свободы использована для вычисления среднего. Корень квадратный из дисперсии, взятый с положительным знаком называется средним квадратичным отклонением, стандарта или квадратичной ошибкой.

Существуют показатели, которые устанавливают связи между различными показателями. Важнейшим из них является коэффициент корреляции (соотношения – r) это показатель того на сколько связь между случайными величинами близка к пропорциональной зависимости.

Если коэффициент корреляции (**r**) может изменяться в пределах – (**–1 ≤ r ≤ +1**). Считают, что при **r > 0,3** корреляционная зависимость между признаками слабая, при **r = 0,3–0,7** – среднее, а при **r < 7,0** – сильная (тесная).

Степень сопряженности двух величин более точно измеряется квадратом коэффициента корреляции ($\mathbf{r^2}$). Так, при **r** = 0,5 не 50, а только 25% изменчивости одного признака объясняется изменчивостью другого (0,50 = 0,25,или 25%). Остальная часть сопряженности (1,0 – 0,25 = 0,75 или 75%) обусловлено другими факторами. Для оценки надежности выборочного коэффициента корреляции вычисляют его ошибку.

Коэффициента корреляции вычисляют по формуле:

$$r = \frac{\sum (y-\overline{y})(x-\overline{x})}{\sqrt{(y-\overline{y})^2 (x-\overline{x})^2}}, \tag{1}$$

где $\sum (y-\overline{y})(x-\overline{x})$ – сумма произведений нормированных ординат.

Погрешность (ошибку) коэффициента корреляции (например, при **n** < 20) определяют по формуле:

$$m_r = \pm\sqrt{\frac{1-r^2}{n-1}} \tag{2}$$

Ошибка опыта является суммарной величиной, результатом многих ошибок: измерений факторов, измерения параметра оптимизации др.

Из формулы следует, что коэффициенты корреляции близкие к единице, всегда оказываются точнее коэффициента корреляции близких к нулю.

Для изучения корреляционных связей большое значение имеет коэффициент регрессии (**б**). Он является величиной именованной и показывает, на сколько в среднем изменяется признак (**Х)**, если коррелирующий с ним признак (**У**) изменяется на определенную величину (например, диаметр проводника и его сопротивление и другие признаки в технике, биологии).

Коэффициент регрессии в каждой конкретной выборке имеет два значения, а именно «**УХ**» и «**ХУ**», то есть прямое и обратное влияние признаков друг на друга. Формула коэффициента регрессии включает в себя коэффициент корреляции (**r**) и среднее квадратичное отклонение признаков:

$$\sigma_{yx} = r\frac{\sigma \overline{y}}{\sigma \overline{x}}; \sigma_x = r\frac{\sigma x}{\sigma y}\ . \tag{3}$$

Ошибку коэффициента регрессии рассчитывают по формуле:

$$S\sigma_{yx} = m_r = \frac{\sum (y-\overline{y})^2}{\sum (x-\overline{x})^2}\ . \tag{4}$$

На графике в общем случае линии регрессии являются кривыми, вид которых отражает ту или иную закономерность, связывающими признаки между собой.

Во многих статистических математических расчетах (технике, биологии) считается достаточно надежным (0,95) 95% доверительный интервал.

Показателем достоверности различия между средними арифметическими служит (как описано выше) критерий Стьюдента (t), который вычисляется по формуле:

$$\mathbf{t} = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\delta^2 \overline{x_1} + \delta^2 \overline{x_2}}}, \tag{5}$$

где $\delta^2 \overline{x_1} + \delta^2 \overline{x_2}$ – квадрат ошибок средних арифметических рядов;

$\overline{x_1}$ и $\overline{x_2}$ – среднее значение рядов.

В классической статистике предполагается, что исходные экспериментальные данные представляют собой выборку из вероятностных распределений известного вида, чаще всего – гауссовского, и неизвестны лишь его параметры – **a** и **σ.**

Такая определенная модель позволяет развить полный статистический аппарат, который способствует решению основных задач оценивания и проверки гипотез.

При анализе и оценивании погрешность измерения обычно представляют в виде суммы составляющих, которые обусловлены различными факторами. Выделяют случайные и систематические составляющие, в результате этого возникает **три составных задачи**:

- оценивание отдельных и систематических составляющих;
- суммирование составляющих одного вида (случайных или систематических);
- суммирование случайных и систематических составляющих.

Решение этих задач позволяет получить оценка характеристик погрешности измерения, т. е. оценить погрешность. Наиболее разработаны методы оценки случайных погрешностей, которые непосредственно взяты из математической статистики. Основной характеристикой случайной погрешности является **среднее квадратичное отклонение (СКО).** Например, если при прямых измерениях величины получен ряд результатов наблюдений $\mathbf{x_1, \ldots, x}_n$, то СКО их погрешностей чаще всего оценивают по формуле:

$$S = \sqrt{\sum (x_i - \overline{x})^2 / (n-1)}. \tag{6}$$

Если в качестве результата измерения принимают среднее арифметическое выборки

$$\overline{x} = \sum\nolimits_1^n x_i / n,$$

то его СКО оценивают как

$$S(\overline{x}) = S / \sqrt{n}. \tag{7}$$

К другому способу вычисления результатов измерения и соответствующих оценок его СКО относится выборка из нормального распределения методом максимального правдоподобия: математическое ожидание – также среднее арифметическое выборки.

$$\bar{X} = \sum_1^n \frac{x_i}{n}. \quad (8)$$

Дисперсия – выборочная дисперсия

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n}. \quad (9)$$

Оценка $\bar{x}$ и S_i^2 – асимптотически эффективны, причем $\bar{x}$ не смещена, а S_i^2 имеет смещение. Несмещенной оценкой дисперсии является

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (10)$$

Соответствующая оценка СКО является смещенной

$$S_i^2 = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (11)$$

Смещения можно сделать малым, если заменить в знаменателе $\boldsymbol{n}$ на $\boldsymbol{n-1}$. Однако требования несмещенности на практике не всегда целесообразно, потому что оценка с небольшим смещением и малой дисперсией может оказаться предпочтительнее, чем несмещенная оценка с большей дисперсией.

Важным методом получения оценок параметров является метод наименьших квадратов (МНК). В нем оценки находят из условия минимизма суммы квадратов отклонений экспериментальных данных от их расчетных значений.

В сущности он является частным случаем метода максимального правдоподобия для гауссовского распределения погрешностей.

Доверительные границы случайной погрешности получают путем умножения оценки СКО S(Q) на коэффициент $\mathbf{t_p}$, который зависит от распределения погрешностей, числа наблюдений **n** и доверительной вероятности **P**. Доверительная вероятность **P**, которая характеризует степень доверия для интервала, выбирают обычно равной 0,95, реже – 0,99 или 0,90. Доверительный интервал для параметра **a** строят на основе статистики **T**, которая зависит от **a** и имеет известную функцию распределения. При гауссовском распределении погрешностей $\mathbf{t_p}$ – коэффициент Стьюдента с числом свободы **(n – 1)** соответствует вероятности **P** (приложение 1).

Прямые измерения с многократным наблюдением – наиболее распространенная и изученная задача обработки данных. В настоящее время для обработки данных при прямых измерениях с многократными наблюдениями преимущественно используется классическая оценка – среднее арифметическое выборки $\bar{x}$, – которая является оптимальной для случайной выборки с гауссовским распределением.

Когда распределения погрешностей известно лишь приближенно, в таком случае целесообразно использовать устойчивые методы. Эти оценки строятся таким образом, чтобы их свойства остались хорошими в тех случаях, когда истинное распределение экспериментальных данных отличается от предполагаемого. Многие выборки данных не соответствуют строгой модели гауссовского распределения и имеют большие отклонения от среднего.

В общем случае при обработке результатов наблюдений при прямых измерениях необходимо выполнять следующие операции:

1. Из всех результатов наблюдений исключить систематические погрешности и оценить границы не исключенных остатков систематических погрешностей.

2. Определить соответствие распределения группы результатов наблюдений нормальному распределению (или другому заданному распределению); определить наличие грубых погрешностей (промахов) и исключить их.

3. Выбрать и применить статистический метод оценки результатов измерений.

4. Вычислить результат измерения.

5. Оценить СКО результата измерения и границы случайной погрешности измерения.

6. Оценить границы систематической погрешности измерения.

7. Оценить границы общей погрешности результата измерения.

Математическая статистика позволяет установить пределы, в которых сделанные выводы являются достаточно надежными. Важное значение статистические методы имеют для установления связи, сопряженности между изучаемыми показателями, а также для установления соответствия полученного экспериментального ряда величин (апостериорным) с теоретическим (априорным) соответствии. Это дает возможность судить о степени приближения результатов опыта к теоретическим предпосылкам.

Наиболее употребительной характеристикой положения ряда является среднее арифметическое значение **($\bar{x}$)** :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}, \tag{12}$$

где x – отдельные значения совокупности ряда,

n – число членов совокупности;

и среднее квадратичное отклонение от среднего значения **(σ):**

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}. \tag{13}$$

При определении наличия грубых погрешностей (промахов), нужно использовать **правило «трех сигм**» и исключить их.

Существуют показатели, устанавливающие связи между признаками. Важнейшим из них является коэффициент корреляции (соответствия).

Это показатель того, насколько связь между случайными величинами близка к пропорциональной зависимости.

Методы обработки экспериментальных данных имеют существенное значение при измерениях. С усложнением и повышением требований к точности измерений происходит разработка новых методов обработки данных и средств измерений, а также широкое освоение вычислительной техники.

Измерение можно определить как нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Во всех научно-исследовательских разработках выполняются измерения с созидательной целью. Цель определяет физическую величину (размер, вес, мощность, сопротивление, скорость, емкость и многие другие), которую необходимо измерить с задаваемой точностью. Под физической величиной понимают особенность физических объектов или явлений, которые используются для определения их свойств, состояний или процессов.

Сущность измерений состоит в сравнении двух физических величин: измеряемой и известной, которая свойственна специально созданному или существующему в природе объекту (мере) – набор мер (набор гирь, магазинов сопротивлений, линеек, секундомеров и других мер). Известная величина выражается определенным числом узаконенных физических единиц Международной системы (**СИ – SI**), что позволяет через сравнение выразить измеряемую величину.

Сущность измерения как процесса сравнения и его цель выражает основное уравнение измерения:

$$\mathbf{Q = q[Q]}\,, \tag{14}$$

где **Q** – измеряемая величина;

q – числовое значение величины;

[Q] – единица величины.

Правая часть уравнения представляет собой результат измерения. Однако для получения представительного результата измерения требуется не одна известная величина, а их упорядоченная совокупность, т. е. шкала физических величин.

Основные структурные элементы измерений:

- цель измерения;
- объект исследования и его модель;
- априорная информация;
- измеряемые величины;
- средства измерений;
- результат и погрешность измерений.

Цель измерения определяется совокупностью требований к измерению, которые входят в этапы научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР), в рамках которой проводят эту работу. Цель измерения конкретизирует объект исследования (измерения), выделяет в нем интересующую исследователя физическую величину и определяет требуемую точность измерений.

Объект исследования (измерения) – реальный физический объект, элемент природной или технологической среды.

Многообразие свойств и их взаимосвязей с другими объектами приводит к необходимости создания (построения) модели объекта.

Модель объекта – теоретико-физическая и математическая конструкция, которая отражает свойства объекта, существенные для определенной задачи, например, измерительной.

Модель строится в соответствии с целью измерения до его выполнения на основе априорной информации и условиях измерения. Модели могут быть физические, математические, натурные.

Априорная (до опыта, до измерения) информации дает общие представления об измеряемом объекте. Она определяет достижимую точность измерений и их эффективность на основе типовых метрологических характеристик средств измерений.

Измеряемая величина представляет собой постоянный параметр модели объекта, которая отражает ту его особенность, количественную оценку которой необходимо получить в результате измерений.

Средство измерений определяется как техническое средство, которое используется при измерениях и имеет нормированные метрологические свойства (устройство, прибор и т. д.) и прошло метрологическую поверку в специальной лаборатории.

Метод измерений определяется как совокупность приемов использования принципов и средств измерений или взаимодействия средств измерений с объектом исследования.

Метод измерения должен соответствовать цели измерения с определением и организацией взаимодействия средств измерения с объектом для получения требуемой информации.

Условия измерения – важный фактор, который определяет состояние объекта и эффективность использования средства измерения, т. е. изменение состояния объекта влияет на измеряемую физическую величину (точность результатов измерения).

Измеряемая величина представляет собой постоянный параметр модели объекта, который отражает ту его особенность, количественную оценку которой необходимо получить в результате измерения. Непосредственным элементом измерения является конкретная физическая величина.

Результат измерения – значение физической величины (совокупность многих значений), которое получено в результате измерения. Он выражается в форме именованного числа или ряда чисел. Измерение можно рассматривать как систему, которая состоит из двух параллельных рядов соответствующих друг другу элементов (реальный, модельный ряды). Оба ряда неразрывно связаны между собой.

Важнейшим для обработки экспериментальных данных является разделение измерений на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

Примеры различных категорий измерений

1. Измерение падения напряжения на участке цепи с помощью вольтметра (прямые измерения).

2. Измерение мощности, выделяемой током в резисторе, путем измерения действующей силы тока и активного сопротивления резистора (косвенные измерения).

3. Измерение плотности твердого тела путем измерений его массы и объема (косвенные измерения).

4. Линейная градуировочная характеристика воздушного термопреобразователя (совместные измерения).

5. Калибровка наборов гирь или магазинов сопротивления (совокупные измерения).

Результат измерения выражает собой конечную цель спланированного и подготовленного измерительного эксперимента и непосредственную цель обработки данных.

Все категории измерений сводятся к прямой и поэтому этим результатом является **число**. Качество результата измерения определяется степенью его близости к истинному значению измеряемой величины. Оно может быть охарактеризовано с помощью показателей: положительного (точности) и отрицательного (погрешности). Эти показатели связаны обратной зависимостью.

Погрешность результата (неопределенность) измерения определяется как отклонение результата от истинного значения измеряемой величины. Опыт научных исследований показывает, что невозможно точно определить погрешность измерений и, поэтому, истинное значение измеряемой величины.

Основные цели анализа погрешностей – их уменьшение и оценка. Уменьшение погрешностей требует выявления основных влияющих факторов и изучение зависимостей от них погрешностей.

Постоянные систематические погрешности разделяют на безусловно (методические) и условно постоянные (средства измерений, разные наблюдатели эксперимента).

Средства измерений – важнейший инструмент измерения. Погрешность средства измерений влияет и обуславливает аппаратурную (инструментальную) погрешность результата измерения. Инструментальная погрешность образуется в зависимости от категории используемых средств измерения, которую необходимо учитывать во всех звеньях измерительной цепочки, т. е. суммировать все погрешности.

Для этого производят нормирование погрешностей средств измерения **(ГОСТ 8. 401-80 «ГСИ. Средства измерений. Классы точности»)** во время выпуска данной продукции определенным предприятием.

Различают два вида оценивания погрешностей: **априорное (до измерения)** и **апостериорное (после измерения).** Априорная оценка выполняется на основе общих метрологических характеристик конкретных средств измерения и методик. Апостериорная оценка выполняется для достижения максимальной возможной точности измерения (введения поправок) и применяется для коррекции априорной оценки.

Математическая формулировка измерительной задачи предполагает конкретизацию основного уравнения (1) применительно к различным этапам измерения.

Математическая задача обработки данных при измерениях может быть представлена как совокупность трех элементов:

- исходная система соотношений для истинных значений исследуемых величин, которая отражает постановку измерительной задачи;
- совокупность полученных экспериментальных данных – результаты экспериментального этапа измерения;
- математические модели экспериментальных данных и критерии качества, которые отражают по априорным данным и составляют основу для решения задачи обработки экспериментальных данных.

Обработка данных при измерении представляет собой заключительный этап измерительной процедуры. На данном этапе по экспериментальным данным с помощью математических методов получаем искомый результат измерения и показатели его погрешности. Наиболее существенным действием является вычисление результата измерения и его показателей погрешности согласно определенному алгоритму. Это и является обработка данных в узком смысле.

В общем случае обработка данных осуществляется в последовательности, отражающей логику решения измерительной задачи.

Выделяют и анализируют всю информацию, которая является исходной для обработки (как априорную, так и полученную на этапах измерения):

а) соотношение между искомой (измеряемой) величиной Q и непосредственно измеряемыми аргументами $\mathbf{X, Y, \ldots}$:

$$\boldsymbol{\varphi_i\,(Q, X_i, Y_i\ldots) = 0, \quad i = 1, \ldots, m}\,, \tag{15}$$

которые приняты за исходные при постановке измерительной задачи и планировании измерения;

б) метрологические характеристики используемых СИ (градуировочные характеристики, показатель погрешностей или их нормы, динамические характеристики);

в) результаты наблюдений $\mathbf{x_i}$, $\mathbf{y_i}$, $\mathbf{i = 1, \ldots, m}$, т. е. отдельные значения непосредственно измеряемых величин, которые получены при выполнении экспериментальных исследований и подлежат дальнейшей обработке для получения конечного результата измерений;

г) результаты дополнительных измерений, которые выполняются с целью контроля или уточнения условий измерения: $\mathbf{v}$, $\mathbf{u}$, а также сведений об их погрешностях;

д) сведения о свойствах алгоритмов обработки данных для решения задач данного типа и вычислительных устройствах, используемых наблюдателем (научным сотрудником, студентом, магистрантом, аспирантом);

е) априорные оценки погрешностей на этапе планирования измерения или на начальном этапе обработки.

Из многочисленных и разнообразных методов обработки экспериментальных данных наиболее разработанными и распространенными являются статистические методы.

Метод статистической обработки результатов измерений

Задание

Обработать результаты измерений диаметра трубы микрометром и штангенциркулем.

Определить диаметр трубы с надежностью а = 0,95

Оценить влияние измерительного инструмента на точность получаемого результата (использовать коэффициент Стьюдента $\mathbf{t_a}$ (**n** – измерений).

Микрометр, мм – 15,85, 15,80, 15,84, 15,81, 15,83 (n_5).

Штангенциркуль, мм – 15,70, 15,50, 15,30, 15,20, 15,30 (n_5).

1. Определить среднеарифметическое значение из 5 измерений (n).
2. Определить погрешности отдельных измерений.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

3. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений.
4. Определить среднюю квадратичную погрешность результатов серии измерений с надежностью 0,95 (а).
5. Записать окончательный результат.
6. Найти абсолютную и относительную погрешность этих измерений.
7. Уточнить корреляционную связь между точностью измерений диаметра трубы штангенциркулем и микрометром.

Занятие 2. Факторный эксперимент

Цель занятия: планирование эксперимента.

Приборы и оборудование: калькуляторы или ноутбук.

Теория

В научных исследованиях многообразных биологических и технических процессов наибольшее место отводится экспериментальным методам. Эксперименты проводятся в поле, в ремонтных мастерских, в лабораториях научно-исследовательских институтов и вузов страны и т. д. В эксперименте участвуют земля и животные, продукты растениеводства и животноводства, энергетические установки, промышленные, сельскохозяйственные и другие машины, разнообразные технологические процессы и т. п.

Все многообразие решаемых исследователями задач можно объединить в три основных вида: выявление количественных зависимостей между параметрами объекта или процесса; отыскание оптимальных параметров рабочих органов машин и протекания технологических процессов. Под оптимальностью следует понимать получение наилучших результатов в конкретных условиях.

Задачи первого вида называются интерполяционными, а второго и третьего – экстремальными. Интерполяционные задачи требуют отыскания лишь зависимости между параметром оптимизации и факторами, в той или иной мере влияющими на него. Экстремальные задачи требуют отыскания экстремума функции, описывающей с достаточной точностью изучаемый объект или процесс.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Планирование эксперимента заключается в выборе такой стратегии экспериментирования, которая позволяет принимать обоснованные решения после каждой серии опытов. Оно позволяет определить заранее схему шагового процесса проведения эксперимента, включить в него минимальное число опытов при одновременном варьировании всеми факторами без снижения количества и качества полученной информации.

Когда в эксперименте при изучении того или иного технологического процесса одновременному варьированию подлежат несколько факторов, то такой эксперимент называется **факторным.** В сложном факторном эксперименте уровни одного фактора сочетаются (комбинируются, пересекаются) с уровнями всех остальных факторов. Под уровнями факторов понимают значения их величин, которые принимают при варьировании в эксперименте, а факторы – независимые переменные величины, которые влияют на значение отклика и результата опыта, зависящего от них. Многофакторный эксперимент имеет много преимуществ, из которых наиболее существенны следующие:

1. Значительно сокращается число опытов по сравнению с однофакторным методом, где последовательно изучается действие каждого фактора.

2. Появляется возможность обобщить материалы исследований в виде математической модели и дать им статистическую оценку.

3. За счет получения данных о роли взаимодействий различных факторов между собой увеличивается объем полученной информации.

Сущность методов экстремальных экспериментов, нашедших широкое распространение на практике, изложена в работе В. В. Налимова и Н. А. Черновой.

Требуется получить некоторое представление о функции отклика при действии ряда, факторов, т. е.

$$\eta = \varphi\,(x_1, x_2, \ldots, x_K), \tag{1}$$

где η – критерий оптимизации (отклик), которым оценивается объект исследования, $(x_1, x_2, \ldots, x_K)$ – независимые переменные (факторы).

Геометрический образ функции отклика (1) называется поверхностью отклика в факторном пространстве.

Функцию отклика можно аппроксимировать полиномом вида

$$з = \beta_0^k + \sum \beta_0^k X_i + \sum_{i<j} \beta_{ij}^k X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2, \tag{2}$$

где β_0 $\beta_ì$ β_{ij} $\beta_{ìì}$ — теоретические коэффициенты регрессии.

По результатам опытов получают коэффициенты регрессии β_0 $\beta_ì$ β_{ij} $\beta_{ìì}$, которые являются оценками теоретических коэффициентов. Уравнение (2) принимает вид

$$Y = \beta_0^k + \sum \beta_0^k X_i + \sum_{i<j} \beta_{ij}^k X_i X_j + \sum \beta_{ii} X_i^2, \tag{3}$$

где Y – выборочная оценка для η.

Таким образом, формально целью эксперимента является определение численных значений коэффициентов уравнения регрессии, а для определения оптимальных условий протекания процессов находят значения факторов X_1 X_2, ...,. X_k, соответствующих экстремуму функции (3), именуемой еще функцией цели или целевой функцией.

Полином (3) имеет порядок второй степени, которой для практического описания большинства технологических процессов в различных отраслях бывает достаточно. Если в правой части (3) убрать два последних члена, то получится линейное уравнение, которое используется для грубого описания поверхности отклика. Если убрать последний член, содержащий независимые переменные во второй степени, то получится неполное квадратное уравнение, более точно описывающее результаты опытов, чем линейное.

Если изучается действие двух факторов X_i и X_2, то функцию отклика можно записать в виде $y = f(X_2, X_i)$.

Такую поверхность можно вычертить в трехмерном пространстве. Допустим, что эта поверхность имеет вид, изображенный на рис. 1, где x_1 – абсцисса; x_2 – ордината; y – аппликата. Спроектировав точки поверхности, которые дают одинаковые значения y на плоскость (x_1, x_2), и соединив их плавной линией, получим линии равного выхода на плоскости (изолинии).

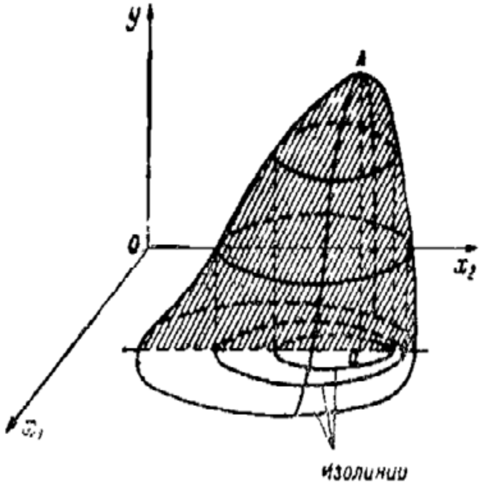

Рис. 1. Изображение поверхности отклика

Если целью эксперимента является определение максимального значения y, то координаты точки a в плоскости факторов (x_1, x_2) определят это значение.

Занятие 3. Рандомизация опытов, расчет ошибок измерений

Цель занятия: расчет ошибок измерений.

Приборы и оборудование: калькуляторы или ноутбук.

Теория

Планированием эксперимента можно исключить из результата опытов ошибку, которую вносят неоднородности дискретного и непрерывного типов. Неоднородности дискретного типа – это различия в машинах, операторах, способах проведения процессов. Величина напряжения в электрической сети при работе установок с электродвигателем является также дискретной неоднородностью в эксперименте.

Однако большее искажение результатов эксперимента создают неоднородности непрерывного типа, вызывающие непрерывные изменения свойств объектов — временной дрейф. Особое искажение в результаты исследований технологических процессов вносят колебания состава различного сырья в промышленном и сельскохозяйственном производстве, и в тех случаях, когда проведение экспериментов затягивается во времени. Поэтому действие временного дрейфа можно уменьшить ускорением эксперимента, но часто это невозможно осуществить из-за большой переналадки пилотной установки или ожидания анализов предыдущего опыта для постановки последующего. При планировании эксперимента очень важно рандомизировать порядок проведения опытов, т. е. расположить их один за другим в процессе исследования в случайном порядке (**от англ. random – случайный**).

Это особенно важно при наличии большой неоднородности влияния неконтролируемых и неуправляемых факторов на отклик и большой неоднородности условий эксперимента. Например, при исследовании рабочего процесса силосорезки сравниваются два режима ее работы. Если в измельчаемом сырье имеется неоднородность материала по влажности, то может оказаться, что контрольные замеры показателей работы первого режима пройдут при одной влажности, а второго – при другой. В результате такого эксперимента получаются искаженные данные и опыты окажутся несравнимыми.

Рандомизация проведения опытов обеспечивает равномерное внесение элемента случайности влияния неуправляемых и неконтролируемых факторов на отклик, позволяет обоснованно использовать аппарат математической статистики при обработке результатов эксперимента.

Имеется несколько способов рандомизации (бросание монеты, вытаскивание наугад карточек с номерами и т. д.), но лучшим является использование таблиц случайных чисел, которые приводятся во многих книгах по математической статистике. Наиболее простая таблица состоит из двузначных чисел, сгруппированных в столбцы (приложение 1). При использовании таблицы случайных чисел необходимо пронумеровать рандомизируемые объекты, наугад выбрать столбец и, двигаясь вниз вдоль столбца, выписывать встречающиеся цифры, которыми были пронумерованы объекты. Цифры, встречающиеся дважды, трижды и т. д., опускаются. Например, требуется расположить в случайном порядке цифры от 0 до 10. Выбираем 4-й столбец и получаем следующий рандомизированный ряд: 3, 0, 10, 1, 8, 7, 2, 6, 9, 5, 4.

В конкретных ситуациях могут возникнуть условия, при которых рандомизация нецелесообразна или невыполнима из технико-экономических соображений и больших затрат времени. Это особенно относится к опытам с машинами, когда переход с одного режима на другой требует полной ее разборки или переналадки.

В таких случаях рандомизация не проводится. Это относится и к случаю большой однородности условий опытов, но при ее отсутствии снижаются чистота и безукоризненность результатов. В каждом конкретном случае экспериментатор сам должен решать вопрос о рандомизации опытов в зависимости от конкретных, условий эксперимента. Однако не во всех случаях обычная рандомизация является эффективным средством в борьбе с влиянием неоднородностей. В некоторых случаях на рандомизацию приходится накладывать ряд ограничений.

Пример

Требуется определить величину износа какой-либо детали, выполненной из четырех видов материала – A, B, C, D. Решили, что испытания детали будут проводиться одновременно на 4 машинах, т. е. повторность опыта будет равна 4. При этом на каждую машину требуется поставить одинаковые детали. Но можно составить и такой план эксперимента — на одну машину поставить деталь из материала А, на другую — из В и т. д.

Распределение деталей из разных материалов приведено в табл. 1–4.

Таблица 1

Исходный план

Машина			
I	II	III	IV
A	B	C	D
A	B	C	D
A	B	C	D
A	B	C	D

Таблица 2

Рандомизированный план

Машина			
I	II	III	IV
D	D	B	C
D	B	A	B
C	A	C	A
B	D	C	A

Таблица 3

Рандомизированный блочный план

Машина			
I	II	III	IV
C	D	B	A
D	C	C	B
B	B	A	D
A	A	D	C

Если провести эксперимент и полученные значения износов деталей проставить в соответствующих клетках таблицы, то окажется, что средние величины износа для данного вида материала будут одинаковы со средними значениями для соответствующего типа машины. Но может оказаться, что разные машины в эксперименте оказывали неодинаковое воздействие на детали в силу того, что каждой управлял свой оператор или были неодинаковые условия работы машин и т. д.

Такой план называется полностью смешанным, так как в нем нельзя различить эффекты машин от эффектов, обусловленных видом материала.

Рандомизируем этот план, т. е. распределим 16 деталей по машинам совершенно случайно. Для этого обозначим детали так: A1, A2, A3, A4, B5, B6, B7 , B8 , C9 , C10, C11, C12, D13, D14, D15, D16 . Теперь по таблице случайных чисел выберем по порядку (по нижним индексам деталей) на каждую машину по четыре детали. Сначала для машины I, потом – II и т. д. В результате получим рандомизированный порядок (план) испытания деталей, приведенный в табл. 2, в которой индексы у букв опущены.

Однако, если внимательно рассмотреть этот рандомизированный план, то можно обнаружить его грубые недостатки. Например, на машине I оказались поставленными две детали из материала D, а нет деталей из материала A; на машине III – две детали из материала C, но нет D и т. д.

При таком плане может оказаться, что случайная ошибка в измерении износа будет не просто ошибкой эксперимента, а может еще включать и различие между машинами.

Рандомизированный план хотя и усредняет эффекты, зависящие от машин, но не устраняет разницы между машинами. Поэтому на рандомизацию в этом случае накладывают ограничения, которые заключаются в том, что на одну машину нельзя ставить две или три детали из одного и того же материала.

Для этой цели составим план, в котором каждая деталь из одного и того же материала будет поставлена на одну машину только один раз. Такой план называется рандомизированным блочным планом (табл. 3).

В этом плане порядок размещения деталей на машине случаен, но на каждую машину устанавливается только по одной детали из одного материала. В таком плане мы можем выделить эффекты машин и эффекты материала деталей. Такие группировки (по машинам) называются **блоками.** В этом случае можно легко выделить эффекты блоков и устранить их из ошибки эксперимента.

Помимо изложенных планов, в теории планирования экспериментов разработаны и другие типы планов.

Остановимся кратко на них

Когда в рандомизированных блочных планах невозможно использовать все варианты в каждом блоке, то они оказываются как бы неполными. Например, в вышеизложенном эксперименте потребовалось бы испытывать 7 деталей на 4 машинах; если на каждую машину можно поставить только 4 детали и не более, то соответствующие блоки (машины) оказались бы неполными.

В каждом только 4 вместо 7 вариантов деталей. Такой план называется **неполноблочным**. В нем вариантов имеется больше, чем может поместиться в один блок.

Имеется еще **сбалансированный неполноблочный план**, когда в неполноблочном плане каждая пара вариантов встречается в опыте одинаковое число раз.

План, в котором каждый вариант испытаний появляется только один раз в строке и один раз в столбце, называется **латинским квадратом**. Например, распределение 4 деталей из разных материалов на 4 машинах может быть осуществлено следующим образом (табл. 4).

Таблица 4

Рандомизированный план

Положение детали	Машина			
	I	II	III	IV
1	C	D	A	B
2	B	C	D	A
3	A	B	C	D
4	D	A	B	C

Исследования, проводимые методом латинского квадрата, нашли широкое распространение в практике изучения технологических процессов. Если в латинском квадрате возможно только три испытания, допустим, в одном блоке (машине) возможны только три положения детали, а имеется 4 блока, то этот план называется квадратом Юдена.

Имеются планы под названием греко-латинские квадраты и ортогональные квадраты более высокого порядка.

Эффективным методом исследования, позволяющим получить эмпирические формулы – функции одновременного влияния многих факторов при небольшом числе опытов аналогично методу **латинского квадрата,** является использование комбинационного квадрата при рациональном планировании эксперимента.

Методика рационального планирования экспериментов предусматривает планировать такое сочетание факторов, которое позволяет при минимальном числе опытов выявить влияние всех основных факторов на всем поле комбинационного квадрата (рис. 2а, 2б)**.**

При планировании эксперимента решается вопрос о числе повторностей опыта при определении той или иной измеряемой величины. В литературе по обработке результатов измерений известно несколько методов определения необходимого числа повторностей или объема выборки.

Остановимся на одном из них. Допустим, определяется средняя арифметическая величина многократных измерений одного и того же объекта. Для определения количества повторностей измерений необходимо задаться следующими величинами.

1. Надежность результатов опыта – **а**, с помощью которой мы сможем установить доверительный интервал значений измеряемой величины. Показатель **а** еще называется доверительной вероятностью, т. е. вероятностью того, что значения измеряемой величины $\boldsymbol{x}$ не выйдут за доверительные пределы $\pm\boldsymbol{A_x}$**,** определяемые доверительной вероятностью. Чем выше требуется надежность, тем больше (шире) получится доверительный интервал и, чем больше задается доверительный интервал, тем вероятнее, что результаты измерений не выйдут за его пределы.

При обычных исследованиях в технике для нахождения зависимостей влияния различных факторов достаточна доверительная вероятность 0,7...0,9. При изучении же характеристик приборов нужна более высокая надежность – 0,95...0,99. Следует учесть, что чем выше надежность результатов, тем больше требуется повторность опытов.

2. Допустимой ошибкой – **е**, выраженной в долях среднеквадратического отклонения **b**. Из классической теории ошибок измерений известно, что результаты многократных измерений одной и той же величины должны лежать в пределах $\pm 3\sigma$. Поэтому, если заранее неизвестно, в каких пределах должна изменяться измеряемая величина, то можно для сокращения числа повторностей задаться ошибкой $\pm 3\sigma$. Практическая необходимость в конкретных условиях покажет экспериментатору, какой допустимой ошибкой необходимо задаться при дальнейших исследованиях.

В табл. 5 приведены значения числа повторностей опыта в зависимости от выбранных доверительной вероятности **α** и допустимой ошибки **е**.

Пример пользования табл. 5.

Требуется определить число измерений температуры воды ртутным термометром.

Таблица 5

Необходимое количество повторностей опытов

Предельная ошибка ε в долях δ	Доверительная вероятность, α					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
3,0	1	1	2	3	4	5
2,0	1	2	3	4	5	7
1,0	3	4	5	7	11	17
0,5	6	9	13	18	31	50
0,4	8	12	19	27	46	74
0,3	13	20	32	46	78	127
0,2	29	43	70	99	171	277
0,1	169	266	273	387	668	1089
0,05	431	659	1084	1540	2659	4338
0,01	10732	16436	27161	38416	66358	108307

Для этого принимаем доверительную вероятность **α = 0,95** и ошибку **ε = ±3σ**, где ***σ*** – среднеквадратическое отклонение результатов опытов. В пересечении столбца **α = 0,95** и строки **ε = ± 3σ** получаем число измерений, равное **3**.

Если заранее известно, что термометр сам имеет предельную погрешность измерения 1°, что составляет, допустим, **0,5ε**, то при доверительной вероятности **α**= 0,95 требуется сделать 18 измерений.

В литературе по оценке результатов измерений известны методы определения числа повторностей опытов при условии измерения погрешностей приборов для различных уровней измерения, при определении величин, которые измеряются опосредованно через ряд других, когда ошибки одного прибора накладываются на другие и т. д. В экспериментальных исследованиях необходимо знать и уметь рассчитывать ошибки измерения.

Численное значение физической величины получается в результате ее измерения, т. е. сравнение ее с другой того же рода, принятой за единицу.

Ошибкой измерения называется разность $\boldsymbol{x - x_0}$ между результатом измерения $\boldsymbol{x}_t$ и истинным значением $\boldsymbol{x_0}$ измеряемой величины.

Одной из основных задач математической обработки результатов опыта как раз и является оценка истинного значения измеряемой величины. Обычно неизвестны значение ошибки и истинное значение величины, поэтому ставится задача вычисления $\boldsymbol{x_0}$ с минимальной ошибкой.

Ошибки измерений классифицируются на 3 вида:

1. Грубые ошибки или промахи являются результатом низкой квалификации лица, производящего измерения, его небрежности или неожиданных сильных внешних воздействий на измерения. Промахи' исключаются из обработки результатов.

2. Систематические ошибки вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. Например, после проведения серии измерений будет обнаружена неправильная регулировка прибора на нулевую отметку.

В случае систематических ошибок их обнаруживают и вводят коррекцию в результаты наблюдений. Однако полностью исключить удается не всегда.

3. Случайные ошибки измерения вызываются большим количеством таких факторов, эффекты действия которых столь незначительны, что их нельзя учесть в отдельности. Случайную ошибку можно рассматривать как суммарный эффект действия таких факторов. Случайные ошибки являются неустранимыми, но с помощью методов теории вероятностей их можно учесть и внести соответствующие поправки к истинному значению. Если измерения выполняются неоднократно, то их результаты обозначают $\boldsymbol{x_1}$, $\boldsymbol{x_2},\ldots, \boldsymbol{x_n}$ *(n = 1, 2, ..., i),* тогда разность $\Delta \boldsymbol{X_i} = \boldsymbol{X_i} - \boldsymbol{X}_0$ называется **абсолютной ошибкой**.

Качество результатов измерений удобно характеризовать не абсолютной, а относительной ошибкой, которая равняется отношению абсолютной ошибки к истинному значению измеряемой величины, выраженной в процентах, т. е.

$$\frac{\Delta x_i}{x_0}100. \tag{1}$$

При измерениях физических величин, когда основную роль играют случайные ошибки, все оценки точности измерений можно сделать только с некоторой вероятностью.

При этом часть ошибок будет положительной, часть – отрицательной. Общая ошибка, которая образуется в результате сложения таких элементарных ошибок, может иметь различные значения, но каждому из них будет соответствовать определенная вероятность.

Для выявления случайной ошибки измерения необходимо измерение повторить несколько раз. Следует отметить, что любое значение искомого параметра, вычисленное на основе ограниченного числа опытов (измерений), всегда будет содержать элемент случайности. Такое приближенное, случайное значение **называют оценкой параметра.** Выбирают такие оценки параметров, чтобы ошибки были минимальными.

Для оценки истинного значения физической величины принимают ее среднее арифметическое значение, определяемое по формуле:

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_m}{m} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_i, \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{m}$ — число повторностей (число измерений).

В классической теории ошибок доказано, что случайные ошибки подчиняются нормальному закону распределения. Для оценки величины случайной ошибки измерения существует несколько способов. Наиболее распространена оценка с помощью стандарта или среднего квадратического отклонения (средняя квадратичная ошибка), определяемая по формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(x_1 - \overline{x})^2 + ... + (x_m - \overline{x})^2}{m-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(x_i - \overline{x})^2}{m-1}}. \qquad (3)$$

Квадрат этой величины называется дисперсией измерений. Дисперсию, а затем и среднюю квадратическую ошибку при работе с вычислительной техникой удобнее рассчитывать по алгебраически эквивалентной формуле:

$$\sum_{i=1}^{m}(x_i - \overline{x})^2$$

$$\sum_{i=1}^{m}(x_i - \overline{x})^2 = \sum_{i=1}^{m}(x^2{}_1 - 2x_1\overline{x} + \overline{x}^2) =$$

$$= x_1^2 - 2x_1\overline{x} + \overline{x}^2 + x_2^2 - 2x_2\overline{x} + \overline{x}^2 + ... + x_m^2 - 2x_m\overline{x} + \overline{x}^2 =$$

$$= (x_1^2 + x_2^2 + ... + x_m^2) - 2\overline{x}(x_1 + x_2 + ... + x_m) + (\overline{x}^2 + \overline{x}^2 + ... + \overline{x}^2) =$$

$$= \sum_{i=1}^{m} x_i^2 - \frac{2\sum_{i=1}^{m} x_i \sum_{i=1}^{m} x_i}{m} + m(\frac{\sum_{i=1}^{m} x_i}{m})^2 = \qquad (4)$$

$$= \sum_{i=1}^{m} x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^{m} x_i}{m}.$$

Тогда $\sigma_i^2 = \dfrac{\sum_{i=1}^{m} x^2{}_i - (\sum_{i=1}^{m} x_i)^2 / m}{m-1}$.

Пусть **α** означает вероятность того, что результат измерений отличается от истинного значения на величину, не большую, чем $\Delta\, \boldsymbol{x}$**.** Это принято записывать в виде $P(\overline{x} - \Delta x < x_0 < \overline{x} + \Delta x) = \text{a}$

Вероятность **а** носит название доверительной вероятности, или коэффициент надежности. Интервал от

$$\overline{x} - \Delta x \quad \text{до} \quad \overline{x} + \Delta x \qquad (5)$$

называется доверительным интервалом.

Чем большей надежности мы требуем, тем большим получается доверительный интервал и наоборот: чем больший доверительный интервал мы задаем, тем вероятнее, что результаты измерений не выйдут за его пределы.

Таким образом, приходим к очень важному заключению: для характеристики величины случайной ошибки необходимо задать два числа: величину самой ошибки (или доверительного интервала) и величину доверительной вероятности.

Задание величины ошибки без доверительной вероятности не имеет смысла, так как имеет неопределенность в обозначении границ изменения случайной величины (ошибки).

Если в ряду измерений какой-то величины есть сильно отклоняющиеся результаты, которые являются следствием грубых ошибок или промахов, то существуют методы их исключения.

В подобных случаях необходимо произвести проверку принадлежности подозреваемого измерения к исследуемому статистическому ряду. Считается, что отклонение от среднего арифметического значения не должно превышать предельной ошибки **±3b (ошибка «трех сигм»)**. Поэтому отклонение, превышающее по своему значению величину **±3а**, показывает, что данное измерение было грубым и его надо исключить из рассмотрения.

Удобным является следующий метод исключения грубых ошибок. Подозреваемые в грубой ошибке измерения исключаются, если они окажутся по величине больше или меньше величин $\lim \boldsymbol{X}_{\mathbf{max}}$ и $\lim \boldsymbol{X}_{\mathbf{min}}$, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} \lim x_{\max} &= \overline{x} + k(x_{\max} - x_{\min}), \\ \lim x_{\min} &= \overline{x} + k(x_{\max} - x_{\min}), \end{aligned} \qquad (6)$$

где $\lim \boldsymbol{X}_{\mathbf{max}}$ и $\lim \boldsymbol{X}_{\mathbf{min}}$ – предельно-возможные максимальные и минимальные значения измерений в исследуемом ряду, $\overline{X}$ – среднее арифметическое ряда, вычисленное без подозреваемого в грубой ошибке измерения, $\boldsymbol{X}_{\mathbf{max}}$ и $\mathbf{X}_{\mathbf{min}}$ – максимальное и минимальное значения измерений в ряду, $\boldsymbol{k}$ – коэффициент, зависящий от числа наблюдений $\boldsymbol{m}$ и равный:

при	**m** = 5 **k =** 1,7	**m** = 12...15 **k =** 1,2
	m = 6 **k =** 1,6	**m** = 16...22 **k =** 1,1
	m = 7 **k =** 1,5	**m** = 23...35 **k =** 1,0
	m = 8...9 **k =** 1,4	**m** = 36...63 **k =** 0,9
	m = 10...11 **k =** 1,3	**m** = 64...150 **k =** 0,8

Например, при испытании 10 образцов прессовочно-древесной массы (МДП) на растяжение получен следующий ряд пределов прочности: **2,25; 5,76; 5,36**; **13,80; 7,96; 7,17; 8,55; 9,85; 6,29; 3,09 МПа**. Сильно отклоняющееся наблюдение в этом ряду — величина **13,8 МПа**. Условно исключаем из ряда эту величину и рассчитываем по ($\lim \boldsymbol{X}_{\mathbf{max}}$ **= 6,26 + 1,4 (9,85 – 2,25) = 16,89**.

Величина **13,8 МПа** не превосходит максимальное значение и оставляется в ряду для дальнейшего рассмотрения.

При наличии в ряду двух подозреваемых в грубой ошибке измерений первоначально проверку делают для более резко отклоняющегося значения измерения, а ряды, содержащие более двух промахов, должны браковаться, и весь опыт должен быть повторен вновь.

При обнаружении грубой ошибки можно пользоваться и **критерием Стьюдента** или критерием Ирвина. Последний подсчитывают так. Берут разницу последнего и предпоследнего значения замера (между подозрительным и ближним к нему по значению) и относят **к оценке дисперсии**. Далее производят сравнение полученного результата с табличным аналогично вышеизложенному.

Существуют два условия, при которых можно с экспериментальными данными проводить анализ. Первое условие требует, чтобы испытание или серии измерений можно было рассматривать как случайные выборки из генеральных совокупностей, подчиняющихся нормальному распределению. Однако это не жесткое, требование и здесь важно, чтобы закон распределения выборок не слишком отличался от нормального.

Второе условие требует, чтобы дисперсии, обусловленные ошибками опытов, были для всех серий измерений однородными. Это жесткое требование, и выполнение его обязательно. Условие однородностей результатов измерений формулируется так, чтобы все измерения, входящие в данную совокупность, можно рассматривать как значения одной и той же случайной величины, подчиняющейся нормальному распределению. Однородность часто нарушается, если серии измерений распределены по биноминальному либо пуассоновскому закону.

В них дисперсия связана со средней и поэтому будет различна для разных серий измерений (для разных средних). Для получения однородных дисперсий производят различные искусственные преобразования экспериментальных данных с целью изменения шкалы наблюдений. Например, преобразования наблюдений выполняют при помощи функций $\boldsymbol{y} = 2\sqrt{x}$, $\boldsymbol{y} = \sqrt{x}$, $\boldsymbol{y} = \sqrt{x}+1$, $\boldsymbol{y} = lgx$ и др.

Для проверки однородности дисперсий имеется ряд статистических критериев: **Бартлета, Кохрена, F-критерий**. А для решения вопросов, какой тип преобразования применить и оправдало ли себя некоторое преобразование, имеется критерий **Тьюки**.

Для анализа опытных данных, особенно при проведении экстремальных экспериментов, обязательная проверка однородности (равноточности) дисперсий удобнее всего производится с помощью критерия Кохрена. Условие однородности опытов предполагает примерно одинаковое влияние ошибок и случайных помех по всем точкам в матрице планирования. Иначе, дисперсии параллельных опытов в точках плана должны быть сравнимы между собой. Критерий Кохрена применяется в случае, когда число повторностей опытов одинаково во всех строках матрицы опытов и представляет собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий.

$$G_{on} = \frac{\sigma^2_{i\max}}{\sum_{i=1}^{N} \sigma^2_{i\min}}, \tag{7}$$

где $\boldsymbol{\sigma}^2_{\mathbf{max}}$ – наибольшая построчная дисперсия; $\sum_{i=1}^{N} \sigma^2_{i\min}$ – сумма построчных дисперсий.

Вычисленное по (7) значение сравнивается с табличным (приложение 2). Если вычисленное значение критерия Кохрена $\mathbf{G_{on}}$ (данные опыта) меньше табличного $G_{\mathbf{Таб}}$, то дисперсии однородны. Если $G_{on} > G_{\mathbf{Таб}}$, то необходимо либо повысить точность замеров, либо улучшить стабильность процесса путем установления меньших интервалов варьирования факторов, или увеличить повторность в экспериментах.

Таблица 6

Расчет дисперсий в строках плана

№ опыта	Повторность		Среднее У	Δy_i	$(\Delta y_{i)})^2$	y_i^2
	$У_1$	$У_2$				
1	19,64	21,84	20,74	1,1	1,21	2,42
2	9,36	10,40	9,88	0,52	0,27	0,54
3	49,12	58,78	53,95	4,83	23,33	46,66
4	13,17	14,39	13,78	0,61	0,37	0,74

$$\sum_{1}^{N} \sigma_i^2 = 50{,}36.$$

0,907 < $\mathbf{G_{on}}$ – поэтому гипотеза об однородности дисперсности должна быть отброшена.

В результате преобразования экспериментальных данных (табл. 5) с помощью функции $\boldsymbol{y_i = lg\ y_i}$ удалось обеспечить условие однородности дисперсий. Пример расчета дисперсий после масштабирования представлен в табл. 7.

Таблица 7

Расчет дисперсий после масштабирования

№ опыта	$lg\ y_1$	$lg\ y_i$	$lg\ \bar{y}$	Δyl	$(\Delta yl)^2$	σ_i^2
1	1,293	1,339	1,316	0,023	0,000529	0,00106
2	0,971	1,017	0,994	0,023	0,000529	0,00106
3	1,691	1,769	1,730	0,039	0,00152	0,00304
4	1,120	1,158	1,139	0,019	0,00036	0,00072

$$\sum_{1}^{N} \sigma_i^2 = 0{,}00688.$$

Величина критерия Кохрена в результате расчетов оказалась равной $\mathbf{G_{on} = 0{,}00304 / 0{,}00588 = 0{,}517}$, что меньше $C_{табл} = 0{,}907$. В этом случае гипотеза об однородной дисперсий подтверждается. Если преобразованные данные опытов оказываются однородными, то дальнейшую обработку (расчет коэффициентов регрессии, проверка адекватности и т. п.) производят с ними, ***ie*** с первоначальными данными. В случае, когда опыты выполнены с неодинаковым числом повторностей в строках плана, проверку однородности дисперсий выполняют с помощью критерия Бартлета.

Занятие 4. Построение и исследование линейной градуированной характеристики вольтметра переменного тока

Цель занятия: построить и исследовать линейную градуированную характеристику вольтметра переменного тока.

Приборы и материалы: вольтметр переменного тока, калькулятор.

Теория. Экспериментальные данные, полученные при исследовании вольтметра переменного тока

На входе устанавливалось напряжение переменного тока с погрешностью не более ±0,002%; x_i=i*0,2 В, i = 1, …, 5; напряжение постоянного тока на выходе измерялось с погрешностью, характеризуемой пределом 0,005%. Измерения выполнялись с многократными наблюдениями; полученные результаты измерений y'_i, а также число наблюдений n_i и оценка дисперсий погрешностей S_i^2 в точке X_i приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты вычисление оценок a и b по МНК

i	x_i	n_i	S_i^2	y'_i	n_i / S_i^2	$\omega_i x_i$	$\omega_i y'_i$	$\omega_i (x_i - x')^2$	$\omega_i y_i (x_i - x')^2$
1	0,2	25	8,55	0,199946	2,924	0,584795	0,584637	0,931421	-,329968
2	0,4	25	4,46	0,400023	5,605	2,242152	2,242282	0,744319	-,817084
3	0,6	25	4,31	0,600071	5,800	3,480273	3,480690	0,156769	-,572221
4	0,8	25	2,82	0,800062	8,865	7,091198	7,092748	0,011239	0,252508
5	1,0	50	2,72	1,000024	18,382	18,382352	18,382793	1,020369	4,331004
Суммы	—	—	—	—	41,577	31,781775	31,783149	2,864109	2,864239
Средние						0,76440	0,76443	—	—

В зависимости от целей исследования и априорной информации о зависимости $Y = f(X)$ могут быть поставлены различные задачи обработки; их решение далее иллюстрируется на приведенных данных.

Пусть требуется построить линейную функцию общего вида (6.6.9). Величина X в данном случае является контролируемой переменной (на входе устанавливается заранее заданное значение X_i), поэтому для построения линейной зависимости можно использовать МНК. Вычисление оценок a и b по МНК также приведено в табл. 1; веса принимались равными n_i / S_i^2. Получены оценки:

$$\mathrm{b} = \frac{\sum \omega_i y'_i (X_i - X')}{\sum \omega_i (X_i - X')^2} = \frac{2,86424}{2,86411} = 1,00004;$$

$$\mathrm{a} = y' - \mathrm{b}X' = 0,76443 - 1,00004 * 0,76440 = 0$$

В итоге получена функция $Y = 1,00004X$. Расчетные значения $\hat{Y}_i = bX_i$ сопоставляются с данными y_i в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные данные по вычисление оценок a и b по МНК

i	x_i	y_i	$\hat{Y}_i$	$z_i \times 10^5$	$\omega_i\ z_i \times 10^{10}$	Y_{i0}	$u_i \times 10^5$	$\omega_i\ u_i \times 10^{10}$
1	0,2	0,199946	0,200008	–6,2	112	0,2	–5,4	85
2	0,4	0,400023	0,400017	0,6	2	0,4	2,3	29
3	0,6	0,600071	0,600026	4,5	117	0,6	7,1	292
4	0,8	0,800062	0,800035	2,7	64	0,8	6,2	340
5	1,0	1,000024	1,000044	–0,2	73	1,0	2,4	106
Суммы		—	—		–368	—		852

Пусть заранее известно, что прямая проходит через начало координат: $Y = \sigma X$; требуется найти коэффициент *b*, который оценивается по формуле:

$$\sigma = \sum \omega_i y_i' X_i \, / \sum \omega_i X_i^2;$$

при этом получается то же значение: σ =1,00004.

Для данного средства измерений желательно иметь коэффициент (номинальный) преобразования $\sigma_0 = 1$, т. е. $Y = X$.

Проверим, значимо ли отличается от номинальной построенная линейная функция.

Для этого убедимся в том, что коэффициенты σ и σ_0 различаются незначимо. Поскольку из предварительных исследований известно, что погрешности измерений имеют распределение, близкое к нормальному, то для этого проверяют условие

$$\left|\sigma - \sigma_0\right| < \frac{tS}{\sqrt{\sum \omega_i (X_i - X')^2}} = \psi(\sigma),$$

$$|b - b_0| < \frac{tS}{\sqrt{\sum \omega_i (X_i - X')^2}} = \Psi(b),$$

где *t* – квантиль распределения Стьюдента с *m-2* степенями свободы; оценка

$$S = \sqrt{\frac{1}{m-2} \sum \omega_i (y_i' - \hat{Y}_i)^2}$$

вычисление отклонений и соответствующих сумм приведено в табл. 2 в результате получено:

$$S2 = 123 * 10 - 10; \sum \omega_i (X_i - X')^2 = 2{,}86;$$

$$S / \sqrt{\sum \omega_i (X_i - X')^2} = 6{,}56 * 10^{-5},$$

принимая уровень значимости $q = 0{,}05$, получаем $\tau = 3{,}18$. Поскольку $\left|\sigma - \sigma_0\right| = 4 * 10^{-5} < \psi(\sigma) = 21 * 10^{-5}$, гипотеза о согласии прямых принимается.

Согласие экспериментальных данных с номинальной функцией $Y = f_0(X)$ можно проверить и без предварительного предположения о линейности истинной зависимости. Для этого используются отклонения y_i от расчетных значений $\hat{Y}_i = bX_i$ и $\hat{Y}_{i0} = b_0X_i$, полученных согласно построенной и номинальной функции:

$$z_i = y'_i - \hat{Y}_i; \quad u_i = y'_i - \hat{Y}_{i0}.$$

Такие разности, а также суммы их квадратов приведены в таблице в результате дисперсионное отношение

$$v^2 = \frac{\sum \omega_i u_i^2 - \sum \omega_i u_i^2}{\sum \omega_i z_i^2} \frac{m-2}{2} = \frac{852-368}{368} \frac{3}{2} = 1,97 .$$

Критическое значение определяется по таблицам распределения Фишера с 2 и 3 степенями свободы; при уровне значимости *0,05* получаем $F_{0,05}(2,3)=9,55$. Поскольку вычисленное значение $v^2 = 1,97 < 9,55$, то гипотеза о согласии данных с номинальной функцией принимается.

Занятие 5. Результата измерений диаметра цилиндра

Цель занятия: обработать результат измерений диаметра цилиндра.

Приборы и материалы: штангенциркуль, линейка, микрометр, калькулятор.

Теория. Обработка результата измерений диаметра цилиндра

Микрометром было сделано 10 замеров диаметра цилиндра. Цена деления микрометра 0,01 мм. Определить диаметр цилиндра с надежностью a = 0,95 и a = 0,99. Оценить влияние числа замеров на точность получаемого результата:

a_i – 14,85; 14,80; 14,84; 14,81; 14,79; 14,81; 14,80; 14,85; 14,84; 14,80.

Для первых пяти измерений определим среднеарифметическое значение и границы доверительного интервала. Для удобства расчетов выберем произвольное число a_0 удобное для расчетов (**a_0 = 14,80 мм**) и определим разности (**$a_i - a_0$**) и квадраты этих разностей. Результаты сведены в таблицу.

i	A_i	$a_i - a_0$, мм	$(a_i - a_0)^2$, мм^2
1	14,85	0,05	0,0025
2	14,8	0	0
3	14,84	0,04	0,0016
4	14,81	0,01	0,0001
5	14,79	–0,01	0,0001
Сумма	74,09	0,09	0,0043

Найдем среднее значение ***a*** и среднеквадратичное отклонение $\boldsymbol{S_a}$:

$$a = a_0 + \frac{1}{n}\sum\nolimits_{i=1}^{n}(a_i - a_0) = 14{,}80 + \frac{0{,}09}{5} = 14{,}81(\text{мм});$$

$$a - a_0 = 0{,}018;$$

$$S_a^2 = \frac{1}{n(n-1)}\left[\sum\nolimits_{i=1}^{n}(a_i - a_0)^2 - n(a - a_0)^2\right] =$$

$$= \frac{1}{5 \times 4}(0{,}0043 - 5 \times 0{,}000324) = \frac{27}{20} \times 10^{-4}\ (\text{мм}^2);$$

$$S_a = \sqrt{1{,}35 \times 10^{-4}} = 1{,}16 \times 10^{-2}\ (\text{мм}).$$

Для надежности **a = 0,95 и n = 5,** τ_a **= 2,78**. абсолютная погрешность измерения Dx:

$$Dx = \tau_a \times S_a = 2{,}78 \times 0{,}0116 = 0{,}0322 \text{ мм}.$$

Результаты измерения можно представить в виде:

(14,818±0,032) мм или сохраняя в величине погрешности одну значащую цифру (14,82±0,03) мм.

Относительная погрешность:

$$\varepsilon_a = \pm \frac{0,03}{14,82} 100\% \approx \pm 0,2\%.$$

Теперь найдем абсолютную и относительную погрешность этих измерений при a = 0,99.

В этом случае t_a = 4,60. Тогда $D_x = t_a \times S_a$=4,60 × 1,16 × 10^{-2}= =5,34 × 10^{2}(мм). Следовательно a = (14,83±0,05) мм.

$$\varepsilon_a = \pm \frac{0,05}{14,82} 100\% \approx \pm 0,3\%.$$

Видно, что с увеличением надежности границы доверительного интервала возросли, а точность результата уменьшилась.

Проведем расчет погрешностей для этих же пяти измерений, незаконно полагая, что $s^2 = S^2_n$ (что при n = 5 ошибочно). Для этого используем распределение Гаусса. При a = 0,95

$$k_a = \frac{\Delta x}{S_a} = 1,96.$$

Это дает возможность определить

$$D_x = k_a \times S_a = 1,96 \times 1,16 \times 10^{-2} = 2 \times 10^{-2} \text{ мм},$$

Т. е. погрешность получилась меньше примерно на 30%. Если по этой величине погрешности определить величину надежности при $\mathbf{t_a = k_a}$, то из таблицы коэффициентов Стьюдента получим a < 0,90 вместо заданной a = 0,95. Следовательно, при малом числе измерений *n* применение закона нормального распределения с $\mathbf{s^2 = S^2_n}$ вместо распределения Стьюдента приводит к уменьшению надежности результата измерений.

Найдем средние значения и погрешности следующих пяти измерений:

i	a_i	$a_i - a_0$, мм	$(a_i - a_0)^2$, мм^2
1	14,81	0,01	0,0001
2	14,8	0	0
3	14,85	0,05	0,0025
4	14,84	0,04	0,0016
5	14,8	0	0
Сумма		0,1	0,0042

$a_0 = 14{,}80$ мм;

$$a = a_0 + \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_0) = 14{,}80 + \frac{0{,}10}{5} = 14{,}82 \text{ мм.}$$

$a - a_0 = 0{,}02$ мм;

$$S_a^2 = \frac{1}{n(n-1)}\left[\sum\nolimits_{i=1}^{n}(a_i - a_0)^2 - n(a - a_0)^2\right] =$$

$$= \frac{1}{20}(0{,}0042 - 5 \times 0{,}0004) = 1{,}1 \times 10^{-4} \text{ мм}^2,$$

$$S_a = 1{,}05 \times 10^{-2} \text{ мм.}$$

При a = 0,95:

$$\varepsilon_a = \pm\frac{0{,}03}{14{,}82}100\% \approx \pm 0{,}2\%.$$

X = 14,82±0,03 мм.

При a = 0,99:

$$D_x = k_a \times S_a = \pm 4{,}60 \times 1{,}05 \times 10^{-2} = 5 \times 10^{-2} \text{ мм,}$$

$$\varepsilon_a = \pm\tfrac{0{,}05}{14{,}82}100\% \approx \pm 0{,}3\%.$$

X = 14,82±0,05 мм.

Результаты практически не отличаются, от результатов полученных из первой серии.

Найдем теперь погрешность результата всей серии из десяти измерений. В этом случае:

$$\sum(a_i - a_0)^2 = 0{,}0085 \text{ мм}^2.$$

Эти величины получаются суммированием последних строк из таблиц частных серий.

a_0 = 14,80 мм;

$$a = a_0 + \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_0) = 14{,}80 + \frac{1}{10} \times 0{,}19 = 14{,}819 \text{ мм.}$$

$a - a_0$=0,019 мм;

$$S_a^2 = \frac{1}{n(n-1)}\left[\sum\nolimits_{i=1}^{n}(a_i - a_0)^2 - n(a - a_0)^2\right] =$$

$$= \frac{1}{90}(0{,}0085 - 10 \times 0{,}000361) = 54 \times 10^{-6} \text{ мм}^2,$$

$$S_a = 7{,}35 \times 10^{-3} \text{ мм.}$$

При a = 0,95;

$$D_x = \tau_a \times S_a = \pm 2{,}26 \times 7{,}35 \times 10^{-3} = \pm 1{,}7 \times 10^{-2} \text{ мм,}$$

$$\varepsilon_a = \pm\frac{0{,}017}{14{,}82}100\% \approx \pm 0{,}11\%,$$

a = 14,819±0,017 мм.

При a = 0,99 получаем

$$D_x = \tau_a \times S_a = \pm 3{,}25 \times 7{,}35 \times 10^{-2} = \pm 2{,}4 \times 10^{-2} \text{ мм,}$$

$$\varepsilon_a = \pm\frac{0{,}02}{14{,}82}100\% \approx \pm 0{,}16\%,$$

a = 14,819±0,024 мм.

Видно, что абсолютная и относительная погрешность результата десяти измерений стали почти в два раза меньше погрешности пяти измерений.

Применение нормального распределения с $s^2 = S^2_n$ дает в случае a = 0,95 k_a = 1,96 и $D_x = \pm 1{,}4 \times 10^{-2}$ мм, а величина надежности понижается до 0,91; в случае a = 0,99 получаем k_a = 2,58 и $D_x = \pm 1{,}9 \times 10^{-2}$ мм, а величина надежности понижается до a = 0,97.

Занятие 6–7. Измерение температуры ограждающих конструкций внутри здания. Расчет теплового режима здания термометром UTV 2303A

Цель: измерить температуру ограждающих конструкций помещений здания (отдельных комнат) – стен, потолка, пола с помощью инфракрасного термометра (пирометра), статистически обработать полученные результаты измерений и сделать вывод по энергосбережению объекта.

По результатам практического з*анятия 6*, выполнить обработку полученных данных. Сделать выводы по утечки тепла части здания (корпус 2).

Техническое обеспечение занятия, приборы: инфракрасный термометр (пирометр) UTB 2303A.

Теория

Инфракрасные термометры измеряют температуру непрозрачных объектов. Оптика термометра собирает энергию инфракрасного излучения и фокусирует ее на детектор. Электронная система термометра обрабатывает эту инфрмацию и отображает ее на дисплее в виде значения температуры.

Испускаемые телом излучения обладают некоторой характерной для него длиной волны. Самым распространенным является свечение тел, обусловленное их нагреванием. Этот вид свечения называется тепловым (или температурным) излучением. Тепловое излучение имеет место при любой температуре. Однако при невысоких температурах излучаются практически лишь длинные (инфракрасные) электромагнитные волны. Опыт показывает, что единственным видом излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами, является тепловое излучение. К равновесным состояниям и процессам применимы законы термодинамики. Следовательно, и тепловое излучение подчиняется некоторым общим закономерностям, вытекающих из принципов термодинамики.

Лазерное излучение. В данном приборе оно используется только для более точного и правильного наведения термометра на объект исследования.

В 1960 году в США был создан первый лазер – квантовый генератор электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра. Лазер – термин, возникший от сокращения английской фразы – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света при помощи индуцированного (вынужденного) излучения). В полупроводниковых лазерах непрерывного действия энергия для излучения поступает от электрического тока. Лазер – генератор когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов.

Когерентностью называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов. Разность фаз двух колебаний $(\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1)$ неизменная с течением времени в данной точке пространства называется временной когерентностью. Если же разность фаз колебаний остается постоянной и происходящих в разных точках волновой поверхности, то такое состояние называется пространственной когерентностью.

Содержание и методика проведения занятия

Уменьшение количества потребляемой энергии и энергосбережение в промышленности, домах и квартирах – очень важные мероприятия по снижению потребления энергоресурсов.

На занятии студенты должны определить теплотехнические характеристики ограждающих конструкций в помещении – стен, потолка, пола и других объектов с помощью инфракрасного термометра UTV 2303A. Для определения температурных показателей в названных объектах, т. е. определение потерь тепла при нарушении теплоизоляции, протечек теплого воздуха и других причин необходимо выполнить следующее:

1. В приборе нажать кнопку SET и установить относительно высокий коэффициент излучения для обследования поверхностей, в том числе и поверхности окон (коэффициенты излучательной способности – для стекла листового – 0,85, бумаг – 0,95, дерева – 0,95, пластика – 0,95).

Измерение температуры ограждающих конструкций внутри здания.

2. Нажать кнопку MODE для выбора MIN в том случае, когда предполагаем, что противоположная стена имеет более низкую температуру или выбрать MAX, если противоположная стена имеет более высокую температуру.

3. Измерить температуру поверхности разделительных стен внутри помещений. Не отпуская пусковой кнопки, записать эти данные по температуре в качестве опорного значения, которые характеризует относительно хорошо изолированные стены.

4. Следующие измерения провести, повернувшись лицом к каждой стене, которую необходимо обследовать и встать на расстоянии примерно 1,2 м от стены и провести сканирование стены 10 – сантиметровым пятном лазера.

5. Сканировать стену необходимо горизонтальными полосами, спускаясь вниз, или потолок горизонтальными полосами от стены к стене. Для обнаружения проблемных зон (т. е. с низкой температурой) следует обратить внимание на места с наибольшим отклонением от опорной температуры.

На этом проверка изоляции стен завершена.

Задание

Вариант 1. Определить теплотехнические характеристикики помещения № 1 – две смежные комнаты (2 этаж).

Вариант 2. Определить теплотехнические характеристики помещения № 2 (одна комната – 2 этаж).

Вариант 3. Определить теплотехнические характеристики коридоров (1 и 2 этажи – смежные секции).

Вариант 4. Определить теплотехнические характеристики помещения № 3 – актовый зал.

Полученные результаты записать в рабочую тетрадь, статистически обработать и выдать заключение по местам потерь тепла (энергии) и способу их снижения. Сделать вывод об энергосбережении на данном объекте.

Особенности прибора

Термометр включает:

- одноточечное лазерное визирование;
- источник питания USB;
- дисплей с подсветкой;
- двухуровневая подсветка дисплея (белого цвета) (при использовании источника питания USB, эта особенность включается автоматически);
- отображение текущей температуры, минимальной (MIN), максимальной (MAX), температуры, разницы между ними (DIF) и средней температуры (AVG);
- простой переключатель коэффициента излучательной способности (Emissivity);
- фиксацию кнопки запуска измерения;
- выбор температурной шкалы (Цельсия или Фаренгейта);
- возможность установки на треногу;
- одну 9 В батарею.

Элементы термометра приведены на рис. 1.

Дисплей

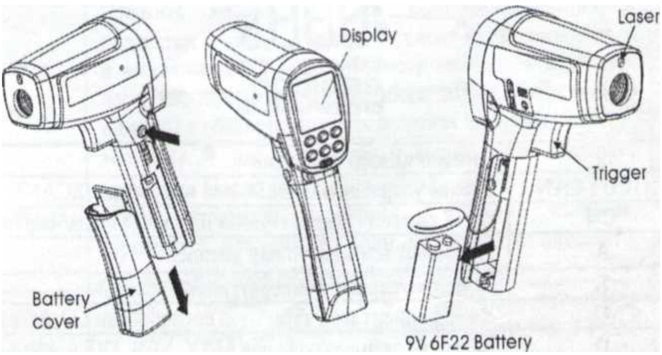

Рис. 1. ИК-термометр

Основной температурный дисплей отображает текущее или последнее показание ИК температуры, полученное до истечения 8-секундного интервала удержания.

Дополнительный температурный дисплей отображает (по вашему выбору) максимальную (MAX), минимальную (MIN), среднюю (AVG) температуру, либо разницу между максимальной и минимальной температурой (DIF).

Вы можете последовательно переключаться между максимальной, минимальной, разностной и средней температурами. Значения MAX, MIN, DIF и AVG непрерывно вычисляются и обновляются при нажатой кнопке запуска измерения. После того, как кнопка отпущена, значения MAX, MIN, DIF и AVG удерживаются в течение 8 секунд.

> *Примечание*
>
> *Когда батарея разряжена, на дисплее появляется значок*  *. Последний выбранный вариант измерения температуры на дополнительном дисплее (MAX / MIN / DIF / AVG) сохраняется после выключения термометра, для предохранения батареи от разрядки.*

Таблица 1

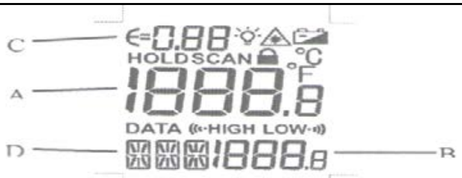

Рис. 4. Дисплей термометра

A	Символ «Лазер включен»
HOLD SCAN	Режим удержания (HOLD) или измерения (SCAN)
°C°F	°C/°F символ (температурная шкала Цельсия / Фаренгейта)
A	Основной температурный дисплей
B	Дополнительный температурный дисплей
C	Коэффициент излучательной способности LO, MED, HI
D	Значения температуры для MAX, MIN, DIF и AVG
	Символ разряда батареи. Появляется, когда напряжение батареи ниже **4,5** В.

Таблица 2

Управление

MODE	Нажмите кнопку **MODE** для переключения между опциями MAX, MIN, DIF и AVG. Нажмите **MODE** снова для включения термометра и отображения результата последнего измерения.
SET	Нажмите для входа в режим настроек и последовательного прохода через настройки Emissivity, Trigger Lock и Switching °C / °F. Подробности описаны в соответствующих разделах настроек (Setup).
 **/▼**	Нажмите кнопку  для включения/выключения подсветки дисплея. Символ  также будет включаться и выключаться. Когда термометр находится в режиме настроек, нажмите ▼ для выбора опции. Подробности описаны в соответствующих разделах настроек (Setup).
***/▲**	Нажмите*****для включения и выключения лазерного указателя. После включения лазера появится символ **▲.** Когда термометр находится в режиме настроек, нажмите ▲ для выбора опции. Подробности описаны в соответствующих разделах настроек (Setup).
USB порт	После подключения USB кабеля, термометр автоматически выберет USB источник питания и будут включены два уровня подсветки дисплея (белого цвета).

Принцип действия термометра

Инфракрасные термометры измеряют температуру поверхности непрозрачного объекта. Оптика термометра собирает энергию инфракрасного излучения и фокусирует ее на детектор. Электронная система термометра обрабатывает эту информацию и отображает ее на дисплее в виде значения температуры. Лазер используется исключительно для прицеливания.

Работа с термометром

Термометр включается нажатием кнопки запуска измерения и выключается, если в течение 8 секунд с ним не производится никаких действий.

Для измерения температуры наведите термометр на цель, нажмите и удерживайте кнопку запуска измерений. Для сохранения считанной температуры отпустите пусковую кнопку.

При измерении обязательно учитывайте отношение «расстояние / размер пятна» и поле зрения. Лазер используется только для прицеливания.

Определение положения наиболее горячей и холодной точек

Чтобы, установить положение наиболее горячей или холодной точки, направьте термометр за пределы исследуемой области. Затем медленно сканируйте исследуемую область движениями вверх и вниз, пока не обнаружите расположение наиболее горячей или холодной точки (см. рис. 5).

С увеличением расстояния (Э) до измеряемой области размер пятна (Б) (измеряемая площадь), в котором производится измерение, также растет. Размер пятна соответствует 90% принимаемой энергии. Максимальное значение 0:8 достигается, когда расстояние от термометра до цели составляет 600 мм (60 см), при этом прибор улавливает излучение от пятна диаметром 60 мм (6 см) (см. рис. 6).

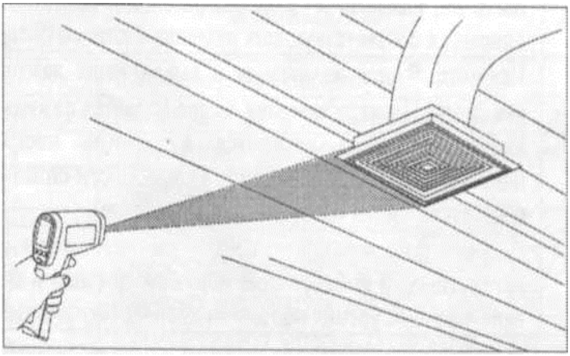

Рис. 5. Положение горячей или холодной точек

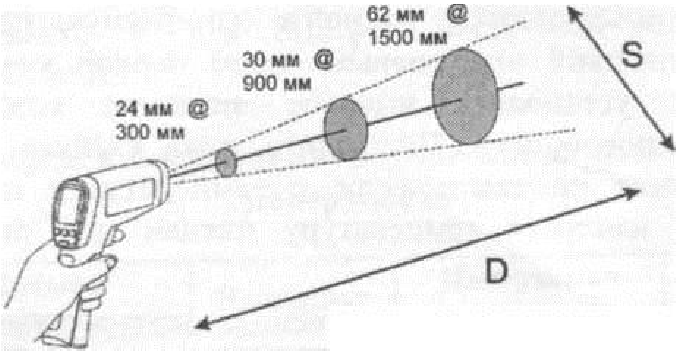

Рис. 6. Расстояние и размер пятна

Поле зрения

Убедитесь, что размер цели больше размера пятна. Чем меньше цель, тем ближе Вы должны находиться (см. рис. 7).

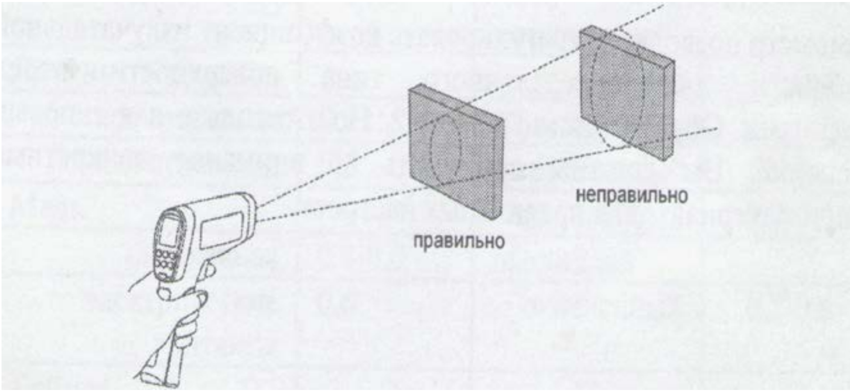

Рис. 7. Поле зрения

Характеристика прибора: прибор определяет температуру поверхностей методом измерения количества инфракрасной энергии (ИК), которую излучает поверхность объекта.

Прибор выполняет следующие функции:

- одноточечное лазерное визирование объекта исследования;
- дисплей с подсветкой; отображение текущей температуры – минимальной (MIN), максимальной (MAX), разности температур (DIF), средняя температура (AVG);
- показатели удерживаются 8 секунд;
- переключение коэффициента излучательной способности (Emissivity);
- фиксирующая кнопка запуска измерений;
- выбор температурной шкалы (Цельсия – °C, Фаренгейта – °F).

Внимание: при работе с прибором нельзя направлять луч лазера прямо в глаза или через отражающую поверхность.

Типовые измерения, которые можно выполнять при помощи инфракрасного термометра UTB 2303A:

- измерение температуры поверхности зданий, контактов пускателей (стартеров), реле, предохранителей и шинных соединений, электрических соединений и других объетов. Повышение температуры на электрических контактах разных приборов свидетельствует о повышении сопротивления. Это может привести к выходу приборов из строя и даже к возгоранию.

Занятие 8–9. Тепловизионный контроль качества теплоизоляции здания. Расчет теплового режима здания тепловизором FLIR i5, FLIR i7

Цель: определить теплоизоляционную характеристику здания учебного корпуса и дать заключение по распределению тепловых излучений СС через ограждающие конструкции (стены, окна, подвальные помещения, тамбуры и др. части здания).

По результатам практического з*анятия 8*, выполнить обработку полученных данных по температурному режиму здания (корпус 2). Сделать выводы по сравнению данных, полученных с применением термометра UTV 2303А и тепловизора FLIR i7.

Техническое обеспечение, приборы: тепловизор марки FLIR i5, FLIR i7, калькуляторы.

Теория

Глаза человека – это детекторы, которые способны воспринимать видимый свет (или видимое излучение). Существуют другие формы излучения, которые человек видеть не может. Человеческий глаз способен видеть только малую часть электромагнитного спектра. С одной стороны видимого диапазона спектра мы не можем видеть ультрафиолетовое излучение, с другой стороны глаза не видят инфракрасное излучение (ИК – лучи). ИК-излучение находится между видимым светом и сверхчастотны (СВЧ*)* диапазоном электромагнитного спектра. Основным источником инфракрасного излучения является тепло или теплое излучение. Любой предмет с температурой выше нуля (–273,15 °С или 0 градусов Кельвина) испускает излучение в ИК-области. Даже объекты, которые кажутся очень холодными, также как и кубики льда, испускают ИК-лучи. Мы ощущаем ИК-излучение каждый день. Тепло солнечных лучей, костер или радиатор отопления – все это ИК-излучение. Хотя глаза его не видят, нервная система человека ощущает это излучение как тепло. Чем теплее объект, тем больше ИК-излучения он испускает.

Рис. Камера тепловизионная (теповизор марки FLIR i7)

Тепловизоры FLIR i5, FLIR i7 используется в энергетике, строительстве, химической, нефтехимической, электронной промышленности, машиностроении, здравоохранении, МЧС, МВД. Тепловизоры FLIR i5, FLIR i7 являются хорошим техническим обеспечением для обнаружения скрытых дефектов теплоизоляции. Нарушений в работе оборудования, аномальных температурных явлений, контроля процессов промышленного производства.

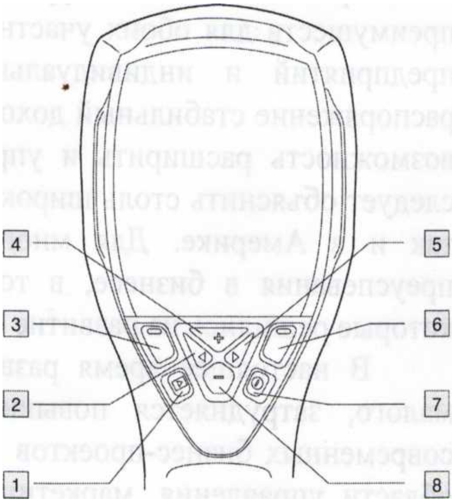

Рис. 1. Управление тепловизором

1. Кнопка архива
2. Кнопка со стрелкой влево (на навигационной панели)
3. Левая кнопка выбора. Данная кнопка является контекстно-зависимой. Ее текущая функция отображается над кнопкой на экране.
4. Кнопка «+» (на навигационной панели)
5. Кнопка со стрелкой вправо (на навигационной панели)
6. Правая кнопка выбора. Данная кнопка является контекстно-зависимой. Ее текущая функция отображается над кнопкой на экране.
7. Кнопка On/OA.
8. Кнопка «–» (на навигационной панели) (рис. 1).

Примечание

Описание всех функций кнопок приведено в документации для пользователей на компакт диске.

До первого использования камеры аккумулятор должен заряжаться в камере не менее четырех часов (или пока индикатор заряда аккумулятора не загорится зеленым светом).

Зарядите аккумулятор, подключив источник питания к разъему питания в камере.

Примечание. При первой зарядке нового аккумулятора нужно включить, а затем выключить камеру после подключения источника питания к разъему питания в камере.

1. Индикатор заряда аккумулятора.
2. Шнур питания.

Краткое руководство

Выполните следующие действия, если требуется немедленно начать работу.

1. Снимите защитную пленку с поверхности ЖК-дисплея.
2. Вставьте карту памяти mini SD™ в слот для карты памяти.
3. Нажмите кнопку On/Off (Включение/выключение), чтобы включить камеру.

> *Примечание*
>
> *Если камера не включается, нажмите кнопку сброса с помощью непроводящего инструмента. Кнопка сброса расположена возле разъема аккумулятора в аккумуляторном отсеке. Затем снова нажмите кнопку On/Off (Включение/выключение).*

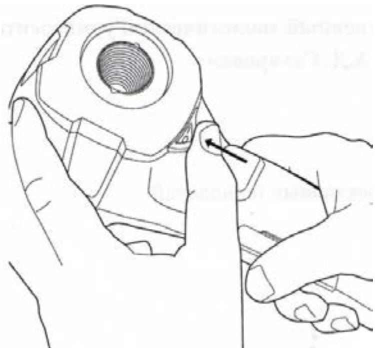

Рис. 2

4. Нажав на рычаг, откройте крышку объектива.
5. Направьте камеру на изучаемый объект.
6. Нажмите пусковую кнопку, чтобы сохранить изображение.
7. Чтобы перенести изображение на компьютер, выполните одно из следующих действий.

- Выньте из камеры карту памяти mini SD™ и вставьте ее в считывающее устройство, подключенное к компьютеру (рис. 2). Адаптер для карты памяти mini SD™ входит в комплект поставки камеры.
- Подключите камеру к компьютеру с помощью кабеля USB Mini-B (рис. 3).

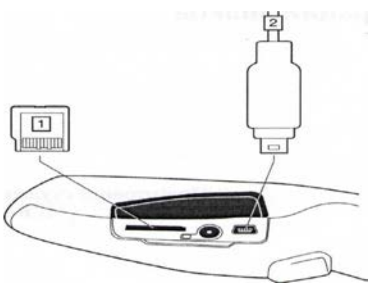

Рис. 3. Подключение камеры к компьютеру

8. В проводнике Windows® перенеси изображение с карты памяти или с камеры, перетащив его при помощи мыши.

Памятка

- Оголенные объекты могут выглядеть через камеру теплыми или холодными вследствие отражения от других объектов.
- Избегайте попадания прямых солнечных лучей на изучаемые объекты.
- Различные типы дефектов, например, в конструкции зданий, могут вызывать инфракрасные изображения одинакового типа.
- Для правильного анализа инфракрасных изображений необходимы профессиональные знания в данной области.

Принцип работы тепловизора

Сравнивание занятие 6 с занятием 7 можно констатировать, что безконтактное измерение температуры можно проводить разными современными приборами, в том числе и инфракрасным термометром (пирометром). Однако инфракрасный термометр (пирометр) позволяет измерять температуру только в одной отдельной точке с переносом измерения к другим точкам. Тепловизоры позволяют измерять температуру на больших участках и получать температурные данные большой площади объекта или на всем объекте.

Тепловизоры сканируют целые компоненты объекта и проводят мгновенную его температурную диагностику, т. е. температурные данные по каждой составной части объекта (панели дома, поврежденная или недостаточная изоляция и много других температурных нарушений в технических объектах). Использование тепловидения (тепловизоров) отдельно или в сочетании с другими методами значительно ускоряет работу в области энергопотребления в строительной индустрии. Метод тепловидения точно показывает, в какой части любого сооружения необходимо провести работу по снижению потерь тепла и энергопотребления без использования разрушающего контроля. Тепловидение – самый простой в настоящее время (изобретение и создание прибора) и быстрый способ определения потерь энергии в зданиях. Тепловизионная камер показывает точное место потери энергии и помогает специалистам диагностировать их и устранять.

Задание

Провести тепловизионное обследование учебного корпуса. Места обследования:

1. Фасад здания - первый и второй этажи: окна, стены, входные тамбуры.
2. Торцовая часть здания – первый и второй этажи (северная сторона).
3. Торцовая часть здания – первый и второй этажи (южная сторона).
4. Учебная аудитория – все окна в верней и нижней частях, пол в шести точках, потолок в шести точках, стены в шести точках.
5. Результаты измерений.

Полученные результаты температурной характеристики каждой части здания и учебной аудитории математически обработать и дать заключение по локализации потерь тепла (энергии) и наметить способы их устранения.

Приложение 1

Критерий Стьюдента

Критическое значение критерия Стьюдент t f.p при числе степеней свободы f и доверительной вероятности p = 0,95 (уровень значимости α = 0,025 – двухсторонний критерий)

$$t = \frac{(\bar{Y} - \mu)\sqrt{n}}{S}.$$

n	F	$t_{n-1,}$ 0,95	$t_{n-1,}$ 0,95 / $\sqrt{n}$
2	1	12,67	8,985
3	2	4,303	2,484
4	3	3,182	1,591
5	4	2,776	1.242
6	5	2,571	1,049
7	6	2,447	0,925
8	7	2,365	0,836
9	8	2,306	0,769
10	9	2,262	0,715
11	10	2,228	0,672
12	11	2,201	0,635
13	12	2,179	0,604
14	13	2,160	0,577
15	14	2,145	0,554
16	15	2,131	0,533
17	16	2,120	0,514
18	17	2,110	0,497
19	18	2,101	0,482
20	19	2,093	0,468
21	20	2,086	0,455
22	21	2,080	0,443
23	22	2,074	0,432
24	23	2,069	0,422
25	24	2,064	0,413
26	25	2,060	0,404
27	26	2,056	0,396
28	27	2,052	0,388
29	28	2,048	0,380
30	29	2,045	0,373
31	30	2,042	0,367
32	31	2,040	0,361
33	32	2,037	0,355
34	33	2,035	0,349
35	34	2,032	0,344

n	F	$t_{n-1,}$ 0,95	$t_{n-1,}$ 0,95 / $\sqrt{n}$
36	35	2,030	0,338
37	36	2,028	0,333
38	37	2.026	0.329
39	38	2.024	0.324
40	39	2,023	0,320
41	40	2,021	0,316
42	41	2,020	0,312
43	42	2,018	0,308
44	43	2,017	0,304
45	44	2,015	0,300
46	45	2,014	0,297
47	46	2,013	0,294
48	47	2,012	0,290
49	48	2,011	0,287
50	49	2,010	0,284
51	50	2,009	0,281
52	51	2,008	0,278
53	52	2,007	0,276
54	53	2,006	0,273
55	54	2,005	0,270
56	55	2,004	0,268
57	56	2,003	0,265
58	57	2,002	0,263
59	58	2,002	0,261
60	59	2,001	0,258
61	60	2,000	0,256
62	61	2,000	0,254
63	62	1,999	0,252
64	63	1,998	0,250
65	64	1,998	0,248
66	65	1,997	0,246
67	66	1,997	0,244
68	67	1,996	0,242
69	68	1,995	0,240
70	69	1,995	0,238
∞	∞	1,96	0

Список литературы

1. Ерошов, А. И. Основы научных исследований и инновационной деятельности: учебно-методическое пособие: в 2 ч. / А. И. Ерошов. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2012. – 212с.

2. Ерошов, А. И., Силко, И. К. Основы управления интеллектуальной собственностью: учебно-методическое пособие. / А. И. Ерошов, И. К. Силко, под общей редакцией А. И. Ерошова. – Минск: МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009, – 192 с.

3. Леонов, А. Н. Основы научных исследований и моделирования: учебно-методический комплекс./ А. И. Леонов [и др.] – БГАТУ, 2010,– 276с.

4. Грановский, Т. Н. Сирая, Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях: производственное издание. / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Ленинград: Энергоатомиздат,1990. – 288с.

Учебное издание

Ерошов Анатолий Иванович

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Методические указания
к практическим занятиям студентов для специальностей:
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»
и 1-100 01 01 «Ядерная и радиационная безопасность»
(очная и заочная форма обучения)

Редактор *А. В. Красуцкая*
Компьютерная верстка *М. Ю. Мошкова*
Корректор *А. В. Красуцкая*

Подписано в печать 18.04.2016. Формат 60×90 1/16.
Бумага офсетная. .Печать офсетная
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,01.
Тираж 45 экз. Заказ № .

Республиканское унитарное предприятие «Криптотех».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/277 от 07.04.2014.
Ул. Свердлова, 32а, 220006, г. Минск.

.«Оргстрой»Открытое акционерное общество
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/167 от 01.10.2014.
г. Минск, ул. Берестянская, 16, 220034