

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ



Министерство науки и высшего образования
Республики Казахстан

Некоммерческое акционерное общество
«Торайгыров университет»

А. К. Кинжибекова

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Учебное пособие

Павлодар
Toraighyrov University
2024

УДК 621.1 (075.8)
ББК 31.3я73
К-41

**Рекомендовано к изданию Учёным советом
НАО «Торайгыров университет»
(Протокол №2 от 27 сентября 2024)**

Рецензенты:

А. С. Никифоров – доктор технических наук, профессор,
Торайгыров университет;

О. А. Степанова – кандидат технических наук, доцент,
«Университет имени Шакарима города Семей»;

М. Г. Жумагулов – PhD, профессор, Евразийский национальный
университет им. Л. Н. Гумилева.

Кинжибекова А. К.

К-41 Теплотехнический эксперимент: учебное пособие /
А. К. Кинжибекова. – Павлодар : Toraighyrov University,
2024. – 115 с.

ISBN 978-601-345-565-5

В учебном пособии даются основы планирования, подготовки и проведения теплотехнического эксперимента. Пособие имеет своей целью приобретение более глубоких знаний и навыков по дисциплине «Теория и техника теплотехнического эксперимента». Учебное пособие предназначено для магистрантов образовательной программы «Теплоэнергетика».

УДК 621.1 (075.8)
ББК 31.3я73

ISBN 978-601-345-565-5

© Кинжибекова А. К., 2024
© Торайгыров университет, 2024

За достоверность материалов, грамматические и орфографические ошибки
ответственность несут авторы и составители

Введение

Настоящее учебное пособие составлено в соответствии с образовательной программой магистратуры «Теплоэнергетика», которая включает изучение учебной дисциплины «Теория и техника теплотехнического эксперимента».

Теплотехнический эксперимент является неотъемлемой частью любого научного исследования в области теплоэнергетики. Кроме того, и другие виды практической деятельности (проектная, эксплуатационная) неразрывно связаны с получением сведений о процессах тепло- и массообмена.

В ряде случаев единственно возможным вариантом получения этих данных является проведение теплотехнический экспериментальных исследований.

В связи с этим представляется целесообразным привести в настоящем пособии методы и технику проведения теплотехнического эксперимента, его подготовку, планирование и реализацию. Учебный материал изложен в семи главах, сопровождается достаточным справочным материалом.

Пособие имеет практическую направленность, снабжено необходимым графическим сопровождением и расчетными формулами в объеме, достаточном для выполнения экспериментальной деятельности.

Данное учебное пособие будет полезно также студентам и докторантам, принимающим участие в научно-исследовательской работе.

1 Эксперимент как предмет исследования

1.1 Понятие эксперимента

В современной деятельности человека, во многих ее областях значительное место отводится теоретическим методам исследования различных объектов и процессов окружающего мира. Например, в таких отраслях как машиностроение и металлургия часто используют результаты, полученные в ходе теоретического решения поставленных задач из разных направлений. Высокая эффективность теоретических методов, тем не менее, не позволяет при решении практических задач получить конкретные результаты без привлечения экспериментального метода. Эксперимент, его организация и проведение требует глубокого понимания сущности этого процесса, методов и особенностей проведения.

С общефилософской точки зрения эксперимент (от латинского *experimentum* – проба, опыт) – это чувственно-предметная деятельность в науке; в более узком смысле – опыт, воспроизведение объекта познания, проверка гипотез и т.д. [1].

В технической литературе термину эксперимент устанавливается следующее определение – система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях [2].

Как известно, главной целью эксперимента являются выявление свойств исследуемых объектов, проверка справедливости гипотез и на этой основе широкое и глубокое изучение темы научного исследования [3].

Эксперименты, их объекты и методы настолько разнообразны, что сложно выдвигать к ним общие требования. Тем не менее, можно определить некоторые общие позиции, необходимость соблюдения которых не вызывает сомнения:

- для улучшения качества процесса необходимо на первоначальном этапе провести выбор плана эксперимента;
- для уменьшения времени и затрачиваемых средств необходимо оптимизировать количество факторов эксперимента;
- обязательный контроль над ходом эксперимента;
- исключение или учет влияния случайных внешних воздействий;
- оценивают погрешность измерительных приборов и точность получения данных;
- оценка и анализ результатов эксперимента.

Следует также отличать эксперимент от наблюдения, который тоже относится к эмпирическим методам исследования. Наблюдение

(за объектом или процессом) предполагает отсутствие вмешательства со стороны исследователя. Эксперимент же, наоборот, предполагает активную позицию исследователя, создание специальных условий и получение новых данных о свойствах объекта исследования в этих новых условиях.

Иногда средства, выделенные на проведение эксперимента, не оправдываются его результатами. Это можно объяснить отсутствием должного уровня организации проведения эксперимента, его малой эффективностью. Таким образом, вопросы организации эксперимента, вопросы оптимизации затрат на его проведение, вопросы сокращения временных, человеческих и материальных ресурсов продолжают оставаться достаточно актуальными.

С целью снижения объема необходимых исследований можно воспользоваться методами планирования эксперимента, в основе которых лежат элементы математической статистики и теории вероятности. Использование этих методов дает возможность существенно улучшить работу исследователя, повысить ее эффективность и оптимизировать затраты.

1.2 Виды экспериментов

Существует разнообразное множество экспериментов. Они могут существенно отличаться друг от друга по различным признакам. Эксперименты различаются (рисунок 1.1):

- по цели проведения и форме представления результатов (качественный и количественный);
- по способу формирования условий (естественный и искусственный);
- по целям исследования (преобразующий, констатирующий, контролирующий, поисковый, решающий);
- по организации проведения (лабораторный, натурный и т.д.);
- по структуре изучаемых объектов и явлений (простой, сложный) и т.д.

Качественный эксперимент предполагает установление только самого факта существования какого-либо явления. Результаты этого эксперимента описываются словесно, получение количественных данных не предусматривается. Поэтому, как правило, качественный эксперимент намного проще количественного и требует меньших затрат.

Пример 1. Если визуально проанализировать режим течения жидкости в стеклянной трубе, то можно заметить влияние степени открытия крана на режим течения.

Однако, именно количественный эксперимент, включающий в себя замеры скоростей и расчеты чисел Рейнольдса, придадут этому эксперименту более глубокий анализ. Поэтому для технических экспериментов важно количественное представление его результатов в виде чисел, зависимостей, таблиц, графиков и пр.

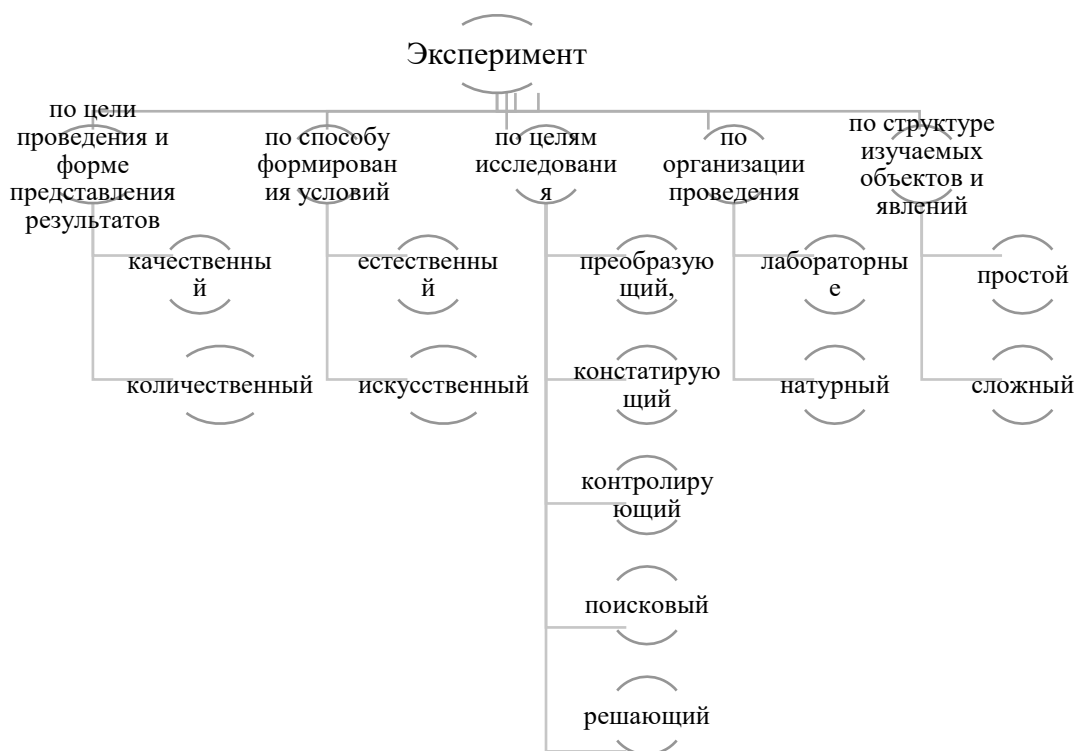


Рисунок 1.1 – Классификация экспериментов

Количественный эксперимент кроме фиксации существования конкретного явления, дает возможность получить количественные данные, характеризующие данное явление.

В примере 1 чтобы получить «количественный» эксперимент, следует:

- определить и количественно описать те параметры, которые оказывают влияние на режим течения (например, температура жидкости, ее плотность, скорость движения, размер трубы, состояние ее внутренней поверхности и т.д.);

- в ходе эксперимента необходимо установить зависимость между параметрами течения и ее режимом.

Естественный эксперимент предполагает проведение опытов в естественных условиях существования объекта исследования [4].

Пример 2. В качестве естественного эксперимента можно представить анализ состояния тепловой изоляции на действующих трубопроводах тепловой магистрали.

Искусственный эксперимент предполагает создание специальных (искусственных) условий и исследование изменения свойств объекта в новых условиях.

Пример 3. В качестве искусственного эксперимента можно провести исследование по влиянию влажности на теплопроводность тепловой изоляции. Для этого определяется изменение теплопроводящих свойств изоляции с увеличением ее влажности от 0 % до 90 %, например.

Преобразующий эксперимент имеет целью получение новых, ранее не известных, свойств исследуемого объекта. Это предполагает намеренное изменение структуры и функций объекта исследования, формирование новых связей [5].

Констатирующий эксперимент необходим для проверки выдвинутых гипотез либо для сбора информации об исследуемом объекте. В ходе проведения констатирующего эксперимента фиксируют наличие определенной связи между воздействием на объект исследования и результатом этого воздействия. Результаты этого эксперимента лягут в основу формирующего эксперимента.

Пример 4. В качестве примера констатирующего эксперимента можно привести анализ состояния питательных насосов после 5 лет эксплуатации на ТЭЦ. Результаты обработки данных могут лечь в основу повышения надежности этих агрегатов.

Контролирующий эксперимент предполагает контроль и фиксация результатов экспериментального воздействия над объектом исследования. Итогом эксперимента является учет состояния объекта исследования и эффекта от воздействия.

Пример 5. Определение коэффициента теплопроводности у тепловой изоляции, нагретой до заданной температуры.

Поисковый эксперимент характерен для тех случаев, когда необходимых знаний в исследуемой области недостаточно.

Решающий эксперимент ставится для проверки справедливости основных положений фундаментальных теорий в том случае, когда две или несколько гипотез одинаково согласуются со многими явлениями [3]. Чтобы решить, какая из этих гипотез будет верной, необходимо в ходе проведения эксперимента получить данные, которые дадут противоречие с одной из выдвинутых гипотез.

Лабораторным экспериментом считается эксперимент, который организован и проведен в специальных условиях (лабораториях). В

ходе проведения данного типа эксперимента используют различные виды моделирования или стандартное оборудование, стенды и установки и т.п. Этот вид эксперимента дает возможность многократно повторять опыты, создавать искусственные условия, изменять параметры, не опасаясь негативного влияния на технологический процесс. К недостаткам можно отнести материальные затраты и погрешность, связанную с использованием моделей и оборудования.

Пример 6. К лабораторному эксперименту можно отнести исследования влияния температуры на теплопроводность материала.

В отличие от лабораторного эксперимента **натурный** эксперимент осуществляется в естественных условиях, или на реальных объектах. В ходе таких экспериментов удается получить более точные результаты. Однако, неизбежно возникают ограничения, связанные с вмешательством в реальный процесс или явление (ограничения на разбег параметров процесса, на объем опытов, временные ограничения и пр.). В зависимости от места проведения испытаний он делится на производственный, полевой, полигонный и т.д.

Пример 7. К натурному эксперименту можно отнести анализ влияния качества твердого топлива на состав дымовых газов на действующем котельном агрегате.

Простой эксперимент возможно использовать в случае исследования простых объектов с малым количеством факторов и с несложной структурой.

Пример 8. В качестве простого эксперимента можно привести пример исследования влияния степени сжатия теплопроводного материала на его теплоизоляционные свойства.

В ходе проведения **сложного** эксперимента изучаются явления или объекты со сложной структурой и большим количеством факторов, которые взаимодействуют между собой и имеют тесные связи.

Пример 9. Таким сложным экспериментом можно считать исследования по оптимизации работы тепловой электрической станции, которая представляет собой сложную систему различных взаимосвязанных между собой объектов (цехов, процессов, оборудования и т.д.).

Такое разнообразие видов экспериментов позволяет получить новые знания об объекте исследования, проверить истинность выдвинутых гипотез и различных теорий. Особенно важную роль эксперимент играет в технических отраслях, включая теплотехнику. Следует заметить, что существующие методы планирования

эксперимента и обработки его результатов дают возможность снизить необходимые затраты на его проведение.

1.3 Основные характеристики эксперимента

Рассмотрим основные характеристики эксперимента, его достоинства и преимущества, признаки.

В качестве преимуществ эксперимента можно назвать:

- активная позиция исследователя (возможность влияния на ход эксперимента, его корректировка, создание новых либо специальных условий проведения и т.п.);

- возможность многократного повторения эксперимента;

- строго контролируемые условия проведения (с целью получения надежных результатов экспериментатор держит под своим контролем условия проведения эксперимента).

В качестве недостатков эксперимента можно привести:

- искусственность созданных условий, что неизменно влечет за собой снижение точности результатов и необходимость проверки их адекватности;

- существенные материальные затраты.

Достоинства и недостатки эксперимента требуют взвешенного подхода при его организации и проведении, учета всех факторов, затрат и вероятных результатов.

К существенным признакам эксперимента можно отнести:

- изолируемые изменения (часть параметров процесса подвергаются изменению, в то время как другие должны оставаться неизменными);

- экспериментатор в ходе проведения эксперимента должен иметь активную позицию, вмешиваясь в его ход и в процесс анализа полученных данных;

- устанавливаются причинно-следственные связи (например, влияние условий эксплуатации материала на его теплопроводность).

Объектами экспериментальных исследований в теплоэнергетической отрасли могут быть различные технические устройства и системы (от простейшего оборудования до очень сложных технологических систем), режимы их работы, условия эксплуатации, технико-экономические показатели, экологические параметры и др.

Объект исследования в ходе проведения эксперимента в общем случае представлен на рисунке 1.2. На указанной схеме имеются входные параметры (вектор X), выходные параметры (вектор Y), управляющие параметры (вектор U) и вектор возмущающих

воздействий Z . Входные параметры вектора X могут быть измерены. Однако, они остаются неизменными при постоянных значениях вектора выходных параметров Y [6]. На выходные параметры вектора Y значительное воздействие оказывают величины управляющего вектора U , которые легко меняют свои значения. Воздействие объект исследования независимых возмущающих параметров Z носит случайный характер.

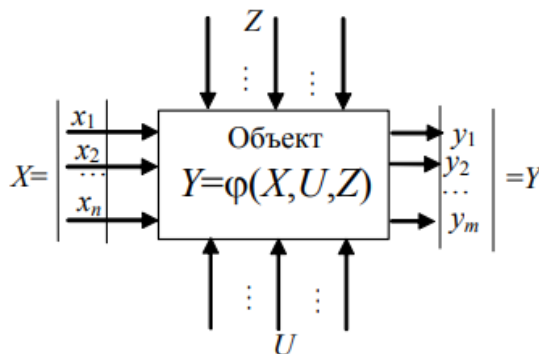


Рисунок 1.2 – Общая схема представления объекта исследования

Под такое описание объекта исследования можно подвести большое количество примеров из теплотехники и теплоэнергетики.

Одним из наглядных примеров может служить рекуперативный теплообменник (рисунок 1.3).

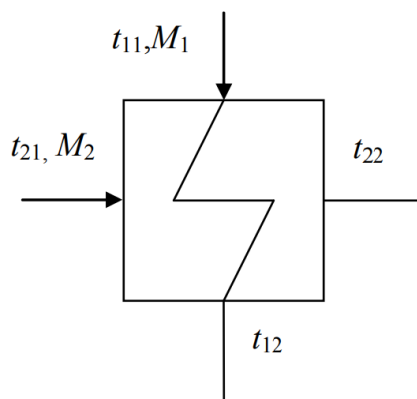


Рисунок 1.3 – Схема рекуперативного подогревателя

В случае, когда объектом исследования был выбран рекуперативный подогреватель поверхностного типа, входными параметрами становятся:

- массовые расходы горячей и холодной среды M_1 и M_2 соответственно;

- температуры на входе и выходе горячего теплоносителя;
- входная температура холодного теплоносителя.

В качестве выходных характеристик объекта взяты:

- выходная температура холодного теплоносителя;
- тепловая нагрузка (количество переданной теплоты);
- энергетический КПД аппарата.

Один из массовых расходов (например, холодной среды) может быть управляющим параметром, позволяющим изменять выходные температуры теплоносителей.

В качестве случайных воздействий могут служить резкое снижение или повышение температуры наружного воздуха, что влияет на наружные тепловые потери агрегата. Если влияние вектора случайных воздействий Z на выходные параметры Y велико, то для описания такого объекта (стохастического) эффективнее будет использование вероятностных характеристик. В случае, если влияние возмущающих параметров на работу рассматриваемого объекта мало, то такой объект относится к детерминированным. Следует отметить, что большинство технических устройств и агрегатов, используемых в теплоэнергетической области, относятся к детерминированным объектам.

1.4 Организация проведения эксперимента

Научный эксперимент, включая теплотехнический, требует тщательной подготовки и качественной организации его проведения. Для проведения эксперимента любого типа необходимо реализовать следующие позиции:

- выдвинуть гипотезу, которую необходимо подтвердить или опровергнуть;
- составить план экспериментальных исследований;
- определить методику проведения экспериментов;
- создать условия для осуществления процедуры опытных работ;
- определить способы получения и документирования результатов эксперимента;
- обеспечить средства и персонал для проведения экспериментального исследования;
- определить методы обработки и анализа результатов эксперимента;
- выбрать способы определения погрешности и адекватности полученных результатов.

Правильно выбранная методика проведения эксперимента является залогом успешности планируемых исследований, влияет на

точность и адекватность ожидаемых результатов. Поэтому выбору методики проведения эксперимента следует уделить особое внимание.

Методика – это совокупное и. мыслительных и физических операций, размещенных в определенной последовательности, в соответствии с которой достигается цель исследования [7].

Как уже было отмечено выше одним из необходимых условий является составление плана экспериментальных исследований. План эксперимента должен включать в себя:

- цель эксперимента и вытекающие из неё задачи;
- выбор параметров эксперимента (выявить характеристики, которые оказывают влияние на исследуемый процесс, определить наиболее и наименее значимые из них);
- определить необходимые объем и количество опытов;
- установить порядок проведения опытов;
- задать диапазон изменения параметров процесса и шаг их изменения;
- выбрать необходимые средства измерений с учетом заданных точности и погрешности;
- выбрать способы обработки полученных данных.

При выборе методики проведения эксперимента следует обратить внимание на наличие:

- сбора исходных данных по изучаемому объекту или процессу, необходимость которых обуславливается выдвижением гипотезы и определением параметров;
- создания необходимых условий для проведения эксперимента путем выбора объекта, методов, средств и пределов измерений;
- постоянного контроля за ходом проведения эксперимента, за изменением его параметров;
- регистрации и оценки проведенных измерений;
- повторяемости опытов и измерений;
- анализа полученных результатов эксперимента.

Полученные результаты экспериментов в обязательном порядке должны:

- иметь минимальное среднеквадратичное отклонение от действительного значения;
- с ростом количества опытов среднее значение полученных наблюдений должно стремиться к истинному значению;
- не иметь систематических ошибок в процессе вычисления параметров.

План эксперимента должен быть согласован с научной группой и утвержден в установленном порядке. При его разработке

приветствуется стремление к его упрощению, удешевлению и снижению временных и человеческих ресурсов. С другой стороны, это не должно существенно сказаться на уровне достоверности полученных результатов. Применение средств компьютерных технологий, вычислительной техники, пакетов прикладных программ, автоматизации дает возможность повысить качество проведенных исследований и поднять уровень обработки результатов эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие эксперимента.
2. Обозначьте общие позиции, которые необходимо соблюдать при проведении любого эксперимента.
3. В чём заключается отличие наблюдения от эксперимента?
4. Дайте классификацию экспериментов.
5. Какие эксперименты можно отнести к количественным? Приведите примеры.
6. Какие эксперименты можно отнести к констатирующим? Приведите примеры.
7. В каких случаях возможно использование простого эксперимента?
8. Назовите преимущества и недостатки эксперимента.
9. Каковы основные характеристики эксперимента?
10. Приведите пример объекта эксперимента из теплоэнергетики.
11. Что должен включать в себя план эксперимента?

Тесты

1. Найдите неверный вариант ответа: «Отличительные особенности эксперимента заключаются в следующем

- А) исследователь сам вызывает интересующие его явления;
- В) устанавливает причинно-следственные связи между явлениями;
- С) варьирует условия возникновения явлений;
- Д) эксперимент можно повторять многократно;
- Е) условия проведения эксперимента строго контролируются и фиксируются.

2. Зависимая переменная – это

- А) переменная, которая зависит от экспериментатора;
- В) фактор, изменяемый экспериментатором;

- С) фактор, изменение которого зависит от независимой переменной;
- Д) переменная, которая не зависит от экспериментатора;
- Е) фактор, неизменяемый экспериментатором.

3. Идеальный эксперимент – это

- А) эксперимент, в котором меняется только независимая переменная, другие условия остаются неизменными;
- В) эксперимент, в котором меняется только зависимая переменная;
- С) правильно спланированный эксперимент;
- Д) эксперимент, в котором все испытуемые эквивалентны;
- Е) эксперимент с экспериментальной и контрольной группой.

4. Какие работы производят для выявления новых свойств объекта?

- А) исследовательские;
- В) наладочные;
- С) экспериментальные;
- Д) ремонтные;
- Е) испытательные.

5. Как называется научно-поставленный опыт, проводимый на производстве или в лаборатории?

- А) эксперимент;
- В) опыт;
- С) испытание;
- Д) проба;
- Е) наладочные работы.

6. Как разделяются эксперименты по способу формирования условий?

- А) естественный и искусственный;
- В) лабораторный и натурный;
- С) лабораторный и искусственный;
- Д) простой и сложный;
- Е) поисковый и решающий.

7. Как разделяются эксперименты по организации проведения:

- А) естественный и искусственный;
- В) лабораторный и натурный;

- С) лабораторный и искусственный;
- Д) простой и сложный;
- Е) поисковый и решающий.

8. Найдите неверный ответ: «Достоинства эксперимента – это

- А) активная позиция наблюдателя;
- В) возможность повторения;
- С) строго контролируемые условия проведения;
- Д) небольшие затраты;
- Е) проверяются причинно-следственные связи».

9. Методы экспериментальных исследований имеют общее свойство:

- А) стремятся увеличить число рассматриваемых переменных;
- В) стараются не контролировать ход эксперимента;
- С) пытаются исключить влияние случайных внешних воздействий;
- Д) проводят только однократные эксперименты;
- Е) стремятся увеличить объем эксперимента.

10. Найдите верный ответ: «Констатирующий эксперимент ...

- А) используется для проверки определенных предположений;
- В) проводится вследствие отсутствия достаточных предварительных данных;
- С) включает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой;
- Д) сводится к контролю над результатами внешних воздействий над объектом исследования;
- Е) используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры».

11. Контролирующий эксперимент

- А) используется для проверки определенных предположений;
- В) проводится вследствие отсутствия достаточных предварительных данных;
- С) включает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой;
- Д) сводится к контролю над результатами внешних воздействий над объектом исследования;
- Е) используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры.

12. Продолжите предложение: «Простой эксперимент ...

- A) используется для проверки определенных предположений;
- B) проводится вследствие отсутствия достаточных предварительных данных;
- C) включает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой;
- D) сводится к контролю над результатами внешних воздействий над объектом исследования;
- E) используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры.

13. Продолжите предложение: «Поисковый эксперимент

- A) используется для проверки определенных предположений;
- B) проводится вследствие отсутствия достаточных предварительных данных;
- C) включает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой;
- D) сводится к контролю над результатами внешних воздействий над объектом исследования;
- E) используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры».

14. Продолжите предложение: «Преобразующий эксперимент

- A) используется для проверки определенных предположений;
- B) проводится вследствие отсутствия достаточных предварительных данных;
- C) включает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой;
- D) сводится к контролю над результатами внешних воздействий над объектом исследования;
- E) используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры».

2 Общие сведения об измерениях и средствах измерений

2.1 Виды, методы и средства измерений

При проведении любого исследовательского теплотехнического эксперимента возникает необходимость опытного определения физических величин, которые называются измерениями.

Измерение представляет собой процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств [8]. Часто в процессе измерения происходит сравнение измеряемой величины с физической величиной, которой присвоено числовое значение, равное единице, и которая называется единицей физической величины, или единицей измерения.

2.1.1 Основные понятия, используемые при проведении измерений.

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства, и способах достижения требуемой точности.

Истинное значение физической величины – значение, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

Действительное значение физической величины – значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Цена деления шкалы – разность значений, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Диапазон показаний – область, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Влияющая физическая величина – физическая величина, не являющаяся измеряемой данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений этим средством.

Нормальная область значений влияющей величины – область значений, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства измерений данного вида в качестве нормальной.

Рабочая область значений влияющей величины – область значений, устанавливаемая в стандартах или технических условиях на средства измерений данного вида, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность этих средств измерений.

Коэффициент преобразования измерительного преобразователя – отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отображающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя.

Чувствительность измерительного прибора – отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.

2.1.2 Классификация видов измерений

Измерения различают по назначению, по способу получения информации, по характеру изменений измеряемой величины в процессе измерений, по количеству измерительной информации, по используемому методу измерения, по условиям, определяющим точность результата (рисунок 2.1).

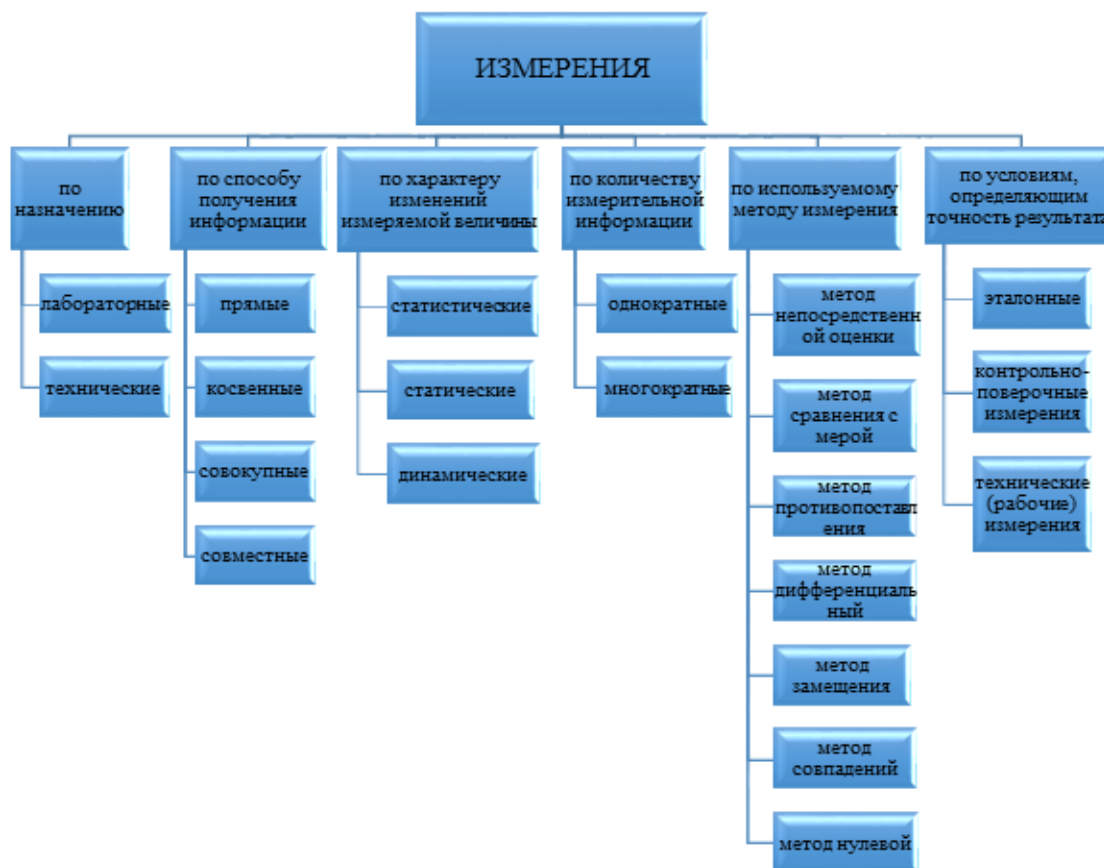


Рисунок 2.1 – Классификация измерений

Измерения в зависимости от назначения и предъявляемых требования к точности результатов измерения подразделяют на лабораторные и технические.

По способу получения информации измерения делятся на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямые измерения – это непосредственное сравнение физической величины с ее мерой. Например, при определении площади прямоугольной поверхности необходимо измерить длины сторон

поверхности линейкой. Для этого используется сравнение искомой величины (длины) с мерой, т. е. линейкой.

Косвенные измерения – характеризуются тем, что искомую величину определяют по полученным значениям прямых измерений величин, которые связаны с искомой определенной зависимостью (по формуле, например). Так, если определить коэффициент теплопроводности необходимо измерить толщину материала, температуры, тепловую мощность прибора, площадь поверхности. Исходя из полученных данных, по известной формуле можно рассчитать коэффициент теплопроводности материала методом плоского слоя.

Совокупные измерения – сопровождаются решением системы уравнений. Данные уравнения (зависимости) выводятся на основе измерений нескольких однородных величин. Искомая величина определяется путем решения полученной системы уравнений.

Примером совокупных измерений может служить определение массы отдельных гирь при известной массе одной гири и проведении ряда прямых измерений. На основе изменения комбинации гирь проводим ряд прямых измерений, включающих в себя неизвестные величины. Затем составляются уравнения. Количество уравнений должно совпадать с количеством неизвестных величин. Решение полученной таким образом системы дает возможность выяснить неизвестную массу каждой гири.

Совместные измерения проводятся с целью определения зависимости между двумя или более неоднородными физическими величинами. В качестве примера совместного измерения может служить определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала в зависимости от его влажности или плотности. Другим примером можно привести определение теплоты сгорания брикета в зависимости от фракционного состава.

В области теплотехники совокупные и совместные измерения имеют важное значение, их часто используют при определении теплотехнических параметров и характеристик.

По характеру изменения измеряемой величины в ходе проведения эксперимента измерения делятся на статистические, статические и динамические измерения.

Статистические измерения связаны с определением величин, имеющих случайный характер (например, определение уровня шума в уличном пространстве). Статические измерения связаны с определением величин, значения которых остаются постоянными во времени, например, измерение длины, размеров тела и т.п.

Динамические измерения связаны с определением величин, значения которых в ходе проведения процесса измерений изменяются с течением времени. Например, в качестве динамических измерений служит определение температуры воды в ходе ее закипания. В «чистом виде» вышеназванные статические и динамические измерения встречаются редко.

По количеству измерительной информации различают однократные и многократные измерения.

Однократные измерения – это одно измерение одной величины, т.е. число измерений равно числу измеряемых величин. Однократные измерения просты и удобны, однако характеризуются высокой погрешностью. Для снижения погрешности рекомендуется проводить не менее трех однократных измерений. При этом искомая величина может быть определена как среднее арифметическое от проведенных измерений.

При многократных измерениях числа измерений значительно превышает количество измеряемых величин. Для многократных измерений характерно существенное уменьшение влияния случайных воздействий и, соответственно, повышение их точности.

Совокупность физических явлений, на которых основаны измерения, называется принципом измерения, а метод измерения представляет собой совокупность способов использования принципов и средств измерений.

В зависимости от использованного метода измерения делятся на:

- метод непосредственной оценки;
- метод сравнения с мерой.

При методе непосредственной оценки (рисунок 2.2) определяют значение величины непосредственно по отсчетному устройству показывающего средства измерения.

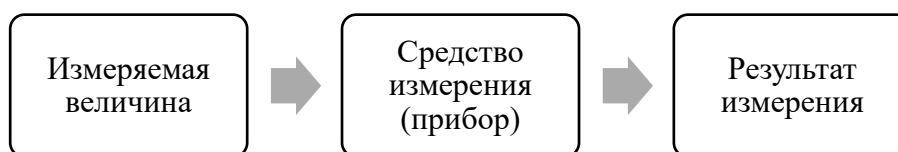


Рисунок 2.2 Метод непосредственной оценки

В данном виде измерения сама мера в процессе измерения не принимает участия, измерение происходит при помощи проградуированной шкалы на самом измерительном приборе. Для метода непосредственной оценки характерны быстрота процесса

измерения, отсутствие сложных вычислений и невысокая точность. Последняя объясняется погрешностью градуировки шкалы и влиянием случайных параметров.

В случае метода сравнения с мерой измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой [9]. Для метода сравнения с мерой характерным является непосредственное участие меры в процедуре измерения и наличие сравнивающего устройства.

По условиям, определяющим точность результата, измерения делятся на три класса:

- измерения максимальной возможной точности, достижимой при существующем уровне техники (так называемые эталонные измерения). Эталонные измерения выполняются с применением эталонов [9]. Эталонные измерения широко используются при проведении поверочных и калибровочных работ. Также они необходимы для метрологической аттестации оборудования и СИ;

- контрольно-поверочные измерения. При таких измерениях задается некоторое значение погрешности, превышение которой не допустимо;

- технические (рабочие) измерения. Технические измерения характеризуются тем, что погрешность измерений определяется погрешностью самих средств измерений.

2.2 Средства измерений

Под результатом любого, в том числе теплотехнического измерения, понимается численное значение физической величины в общепринятых единицах, полученное путем измерения.

Технические средства, имеющие нормированные метрологические характеристики (для определения погрешности), называют средствами измерений [10]. Средство измерения дает возможность осуществить две функции:

- 1) обнаружить физическую величину;
- 2) сопоставить неизвестный размер с известным, т.е. измерить обнаруженную величину.

Кроме того, средства измерений могут также хранить (или воспроизводить) единицу физической величины.

Средства измерений классифицируются по различным признакам (рисунок 2.3). Для более детального изучения рассмотрим классификацию только по двум основным признакам:

- конструктивное исполнение;
- метрологическое назначение.



Рисунок 2.3 – Классификация средств измерений

По конструктивному исполнению средства измерения имеют следующие основные виды: меры (например, гири, линейка), измерительные приборы (манометры, термометры и пр.), измерительные преобразователи (термопреобразователи, например), устройства и информационные измерительные системы.

Меры – это средства измерений, необходимые для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров [9]. Меры бывают:

- однозначные, для воспроизведения физической величины одного размера (например, гиря 1 кг, песочные часы, баки постоянной емкости). К однозначным мерам можно отнести стандартные образцы;

- многозначные, для воспроизведения физической величины разных размеров (штриховая мера длины – линейка, конденсатор переменной емкости);

- набор мер – комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор гирь, набор калибров, набор концевых мер длины);

- магазин мер – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

Стандартные образцы существуют двух видов: стандартные образцы состава и стандартные образцы свойств.

Стандартные образцы состава вещества (или материала) – это стандартный образец с установленными значениями величин, характеризующих содержание определенных компонентов в веществе (материале) [9].

Стандартный образец свойств веществ – стандартный образец с установленными значениями величин, характеризующих те или иные физические, химические, биологические и другие свойства.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне [9].

Измерительный прибор содержит устройство для преобразования измеряемой величины и ее индикации в удобной и доступной для восприятия форме. Как правило, для индикации измеряемой величины требуется шкала со стрелкой или любое другое устройство, дающее возможность проведения отсчета либо фиксации значения измеряемого параметра.

По принципу действия измерительные приборы делятся на приборы прямого действия и приборы сравнения.

В приборах прямого действия искомая физическая величина отображается на показывающем устройстве. Показывающее устройство содержит градуировку в единицах измеряемой величины (манометры, термометр расширения, амперметр и т.д.).

Приборы сравнения предназначаются для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны (компараторы) [9].

По степени индикации значений измеряемой величины измерительные приборы подразделяются на показывающие и регистрирующие.

Показывающий прибор допускает только отсчитывание показаний измеряемой величины (например, цифровой вольтметр).

В регистрирующем приборе предусмотрена регистрация показаний – в форме диаграммы, путем печатания показаний (например, тепловизор, измерительный прибор, сопряженный с ЭВМ, дисплеем и устройством для печатания показаний).

Измерительные преобразователи – средства измерений, которые преобразуют измеряемую величину в другую величину или сигнал измерительной информации, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, но не доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Это термопреобразователи (рисунок 2.3), преобразователи давления и т.д. Они по характеру преобразования делятся на аналоговые, цифровые, аналого-цифровые преобразователи.

В зависимости от места нахождения в измерительной цепи преобразователи бывают первичные и промежуточные.

Измерительная установка – это совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, которые дают возможность проводить измерения одной или нескольких физических величин. Примером таких установок являются: установка для измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов, установка для определения предела прочности огнеупорных материалов на сжатие, установка для определения теплоты сгорания топлива и т.п. Измерительная установка, как правило, предусматривает использование конкретного метода измерения и дает возможность предварительной оценки погрешности проведенного измерения.



Рисунок 2.3 – Термопреобразователи (общий вид)

Если измерительная установка необходима для проведения испытаний каких-либо изделий, то такую установку называют испытательным стендом.

Измерительная система – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству.

Примером является радионавигационная система, которая представляет собой совокупность различных радиотехнических средств и измерительных устройств для определения местоположения объекта (воздушных судов, кораблей, космических аппаратов, летающих объектов и т.п.). При этом составляющие данного комплекса разнесены в пространстве на довольно значительном расстоянии друг от друга.

По метрологическому назначению средства измерения делятся на три категории:

Рабочие – предназначенные для повседневных измерений; подразделяют на лабораторные (повышенной точности) и технические.

Образцовые средства измерений предназначены для поверки и градуировки рабочих мер, измерительных приборов и преобразователей.

Эталоны служат для воспроизводства и хранения единиц измерения с наивысшей точностью, достигшей на данном уровне развития науки и техники [9].

2.3 Метрологические свойства и характеристики средств измерений

Все средства измерений, независимо от их конкретного исполнения, обладают рядом общих свойств, необходимых для выполнения ими их функционального назначения. Такие свойства называются метрологическими свойствами.

Технические характеристики, описывающие метрологические свойства и оказывающие влияние на результаты и на погрешности измерений, называются *метрологическими характеристиками* [11]. Таким образом, метрологические характеристики являются количественными показателями метрологических свойств.

Как уже известно, техническое средство можно использовать для измерений только в том случае, если оно имеет нормированные метрологические характеристики.

Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативными документами, называют нормируемыми метрологическими характеристиками [12].

Основные метрологические характеристики дают возможность оценить пригодность средств измерений к измерениям в известном диапазоне с известной точностью и обеспечивают:

- сравнение средств измерений между собой и достижение их взаимозаменяемости;
- возможность установления точности измерений;
- выбор нужных средств измерений по точности и другим характеристикам;
- определение погрешностей измерительных систем и установок;
- оценку технического состояния средств измерений при их поверке.

Все метрологические свойства средств измерения можно разделить на две группы:

- 1) свойства, определяющие область применения;
- 2) свойства, определяющие качество измерения [9].

К метрологическим характеристикам, характеризующим свойства для определения области применения, относятся диапазон измерений и порог чувствительности.

Диапазон измерений (рабочий диапазон) – множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений или измерительной системой с указанными инструментальной неопределенностью или указанными показателями точности при определенных условиях [12].

Порог чувствительности – наименьшее значение изменения величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством измерения [12].

К метрологическим свойствам, определяющим качество измерения, относятся три главных свойства: точность, сходимость и воспроизводимость измерений.

Наиболее широко в метрологической практике используется первое свойство – точность измерений. Точностные характеристики средства измерений представляют собой совокупность его метрологических характеристик, влияющих на точность измерения [12]. К точностным характеристикам относят: погрешность средства измерений, нестабильность, смещение нуля и др.

Точность средства измерений – это качество средства измерений, отражающее близость к нулю его погрешности. Считается, что чем меньше погрешность, тем точнее средство измерений [12].

Точность измерений определяется погрешностью средства измерения. Погрешность – это разность между показанием средства измерений и известным опорным (действительным) значением величины [12].

Сходимость результатов измерений характеризует качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами, и средствами измерений, и в одних и тех же условиях.

Воспроизводимость результатов измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенных к одним и тем же условиям.

Как уже было сказано выше, одной из важнейших характеристик средств измерения является такая погрешность как инструментальная погрешность измерения.

Основной инструментальной погрешностью называется инструментальная погрешность средства измерения в нормальной области значений влияющих величин. Существует также дополнительная инструментальная погрешность. Она возникает при превышении значения влияющей величины за пределы нормальной области. Эти две погрешности (основная и дополнительная) для средств измерений нормируются отдельно.

Кроме вышеописанных на практике также используют и другие метрологические характеристики средств измерений (рисунок 2.4).

Все вышеуказанные метрологические характеристики нормируют для нормальных условий эксплуатации средств измерений. Условия эксплуатации измерительного прибора можно считать нормальными, если изменения метрологических характеристик под воздействием влияющих величин незначительны и ими можно пренебречь.

В справочных изданиях принята следующая структура описания средств измерений: регистрационный номер, наименование, номер и срок действия сертификата об утверждении типа средства измерения, местонахождение изготовителя и основные метрологические характеристики [13].



Рисунок 2.4 – Метрологические характеристик средств измерений

Контрольные вопросы

1. Общие сведения об измерениях. Дайте основные определения.
2. Представление результатов измерений.
3. Назовите сущность и основные характеристики измерений.
4. Представьте классификацию измерений.
5. Дайте понятие средств измерений и их характеристик.
6. Назовите основные типы средств измерений.
7. Для чего нужны эталонные средства измерений?
8. Дайте понятие измерительным приборам, измерительной установке и измерительной системе.
9. Перечислите метрологические характеристики средств измерений.
10. Что такое инструментальная погрешность измерения?

Тесты

1. Измерением называется

- А) опытное нахождение значения физической величины с помощью технических средств;
- В) выбор технического средства, имеющего нормированные метрологические характеристики;
- С) операция сравнения неизвестного с известным;
- Д) вычисление параметров технического средства;
- Е) обработка результатов измерений.

2. По способу получения результата все измерения делятся на

- А) статические и динамические;
- В) прямые и косвенные;
- С) прямые, косвенные, совместные и совокупные;
- Д) однократные и многократные;
- Е) равноточные и неравноточные.

3. В зависимости от числа измерений измерения делятся на

- А) однократные и многократные;
- В) статические и динамические;
- С) прямые и косвенные;
- Д) прямые, косвенные, совместные и совокупные;
- Е) равноточные и неравноточные.

4. По характеру изменения измеряемой величины измерения делятся на

- А) абсолютные и относительные;
- В) технические и метрологические;
- С) прямые и косвенные;
- Д) однократные и многократные;
- Е) статические и динамические.

5. Измерения двух или более неоднородных физических величин для определения зависимости между ними называются

- А) совокупными;
- В) косвенными;
- С) совместными;
- Д) прямыми;
- Е) многократными.

6. Искомое значение физических величин находится по результатам прямых измеряемых величин, связанных с искомой величиной определенной зависимостью, — это измерения ...

- A) косвенные;
- B) совокупные;
- C) совместные;
- D) прямые;
- E) многократные.

7. Измерения, сопряженные с решением системы уравнений, составляемых по результатам одновременных измерений нескольких однородных величин, называется

- A) совокупными;
- B) косвенными;
- C) совместными;
- D) прямыми;
- E) многократными.

8. Средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера, — это

- A) измерительный прибор;
- B) мера;
- C) измерительный преобразователь;
- D) измерительная система;
- E) измерительная установка.

9. Средства измерения – это:

- A) технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства;
- B) технические средства, используемые в процессе измерения;
- C) лабораторное оборудование;
- D) приборы по контролю за состоянием рабочего тела процесса;
- E) всё вышеперечисленное.

10. Какое название носит средство измерения, которое вырабатывает сигнал, в форме удобной для восприятия человека?

- A) преобразователь;
- B) измерительное устройство;
- C) образцовое устройство;
- D) мера измерений;
- E) измерительный прибор.

11. По характеру показаний измерительные приборы разделяются на:

- A) показывающие, регистрирующие;
- B) приборы, преобразователи;
- C) лабораторные, технические;
- D) прямые, косвенные, совместные;
- E) образцовые, эталонные.

12. Какой объект включает в себя измерительные приборы и измерительные преобразователи?

- A) измерительное устройство;
- B) измерительный прибор;
- C) измерительная установка;
- D) измерительная установка;
- E) измерительный образец.

13. По назначению средства измерений классифицируют на:

- A) рабочие, образцовые, эталонные;
- B) рабочие, измерительные, эталонные;
- C) лабораторные, рабочие, эталонные;
- D) лабораторные, образцовые;
- E) эталонные, образцовые.

14. Косвенное измерение — это получение величины, расчетом из нескольких величин:

- A) прямым измерением;
- B) косвенным измерением;
- C) подкосвенным измерением;
- D) прямым и косвенным измерениями;
- E) нет правильного ответа.

15. Образцовые средства измерений предназначены

A) для поверки и градуировки рабочих мер, измерительных приборов и преобразователей;

B) для воспроизводства и хранения единиц измерения с наивысшей точностью;

C) для хранения единиц измерения с наивысшей точностью;

D) для градуировки измерительных приборов и преобразователей;

E) для повседневных измерений.

3 Оценка и учет погрешностей при технических измерениях

3.1 Общие сведения из теории погрешности измерений

В ходе проведения теплотехнического эксперимента в обязательном порядке осуществляются технические измерения. Для любого экспериментатора целью таких измерений является получение истинного значения искомой физической величины. Тем не менее, никакие самые точные средства измерения, ни какие совершенные методы измерений, ни скрупулёзность выполнения измерений не дает возможность получить истинного значения. Результат измерения всегда будет отличаться от него на величину погрешности. Таким образом, для достижения максимально правильного значения измеряемой величины необходимо стремиться к снижению погрешности, понимая причины появления и, по возможности, предотвращая эти погрешности.

Источники погрешности представлены на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Источники погрешности

Следует отметить, что кроме указанных источников погрешности на точность измерений оказывают влияние и ряд других факторов, например:

- внешние помехи;
- внутренние помехи,

- климатические условия,
- порог чувствительности измерительного прибора.

Разберем некоторые основные понятия из теории погрешности [12]:

1) Измеряемая величина – это физическая величина, подлежащая измерению.

2) Результат измерения – это множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией.

В качестве результата измерений принимается случайная величина, которая получается путем сложения истинного значения измеряемой величины и погрешности измерений. Определение степени отклонения измеряемой физической величины от истинного значения является неотъемлемой частью процесса измерения. Без этого измерение нельзя считать завершенным.

3) Погрешность результата измерения - отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Истинное значение измеряемой величины $X_{И}$ неизвестно, его используют только в теоретических исследованиях. Это модельное значение, которое характеризует идеальным образом в количественном и качественном отношении свойство объекта (процесса) [9].

Таким образом, существует два главных постулата в теории измерений:

- 1) Истинное значение измеряемой величины существует.
- 2) Истинное значение измеряемой величины не достижимо.

Тем не менее, для возможности оценки погрешности измерения необходимо проводить сравнение с некой величиной, максимально приближенной к истинному значению измеряемой физической величины.

На практике такой величиной является **действительное значение** величины $X_{Д}$. В качестве действительной величины принимают значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в конкретной измерительной задаче оно может быть использовано вместо истинного значения [12].

На практике за действительное значение зачастую принимают общее среднее значение (математическое ожидание) совокупности результатов проведенных измерений. Самым простым вариантом является среднее арифметическое от результатов измерений.

Тогда погрешность измерения $\Delta x^{ИЗМ}$ определяется по формуле:

$$\Delta x = x^{\text{изм}} - X_{\text{д}}, \quad (3.1)$$

где $x^{\text{изм}}$ – измеренное значение физической величины,

$X_{\text{д}}$ – действительное значение физической величины.

В общем случае к показателям точности можно отнести: среднее квадратическое отклонение, доверительный интервал погрешности, стандартная неопределенность измерений, суммарная стандартная и расширенная неопределенности [12].

3.2 Классификация погрешностей измерений

При более подробном рассмотрении погрешность измерений возникает в следующих случаях:

а) при воспроизведении размера единицы физической величины (так как на практике технически невозможно создать абсолютно точные эталоны);

В) при передаче размера единицы физической величины (к ним относятся поверка, калибровка, аттестация);

С) при аттестации (из-за несовершенства аттестационного оборудования, методик выполнения измерений и др.);

Д) при поверке СИ (из-за несовершенства методов поверки и др.);

Е) при градуировке (из-за несовершенства способов нанесения шкал, ошибок при построении градуировочных кривых и т. д.);

е) при рабочих измерениях (выполняемых в лабораторных, полевых или других условиях);

ж) при статистической обработке результатов измерений.

Классификация погрешностей измерений приведена на рисунке 3.2.

По форме числового выражения погрешности измерения делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная погрешность (Δ) – это погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины [12]. Она представляет собой отклонение результата измерения ($x_{\text{изм}}$) от истинного значения ($X_{\text{и}}$), или действительного значения ($X_{\text{д}}$). Исходя из данного утверждения, формулу (3.1) можно использовать для количественной оценки абсолютной погрешности. Абсолютная погрешность дает возможность оценить величину погрешности и ее знак. Однако, по ней невозможно определить насколько точно было проведено измерение.



Рисунок 3.2 – Классификация погрешностей измерений

Для того, чтобы понять насколько близко к истинному значению измеряемой величины оказалось полученный результат, необходимо использовать понятие относительной погрешности.

Относительная погрешность (δ) – это погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к опорному (истинному) значению измеряемой величины [12]. Она вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta x^{\text{изм}}}{X_{\text{д}}}$$

Относительная погрешность (δ) часто выражают в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta x^{\text{изм}}}{X_{\text{д}}} \cdot 100\%.$$

Приведенная погрешность – это относительная погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона [12].

По закономерностям проявления погрешности измерений подразделяются на **систематические, случайные и грубые промахи**.

Систематические погрешности – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины [12].

Из всех существующих видов погрешностей, именно систематические, являются наиболее опасными и трудно устранимыми. Для это есть несколько причин:

1) систематическая погрешность искажает действительное значение измеряемой величины на постоянной основе. В каком направлении будет это искажение (в сторону увеличения или уменьшения) заранее предсказать практически невозможно.

2) нет возможности определить саму величину систематической погрешности методами математической обработки данных. Увеличение количества измерений одними и теми же приборами не уменьшает ее значение.

3) характер изменения систематической погрешности невозможно предопределить.

4) систематическую погрешность может вызываться одновременно несколькими факторами. Разные методы измерений также, в свою очередь, дают свои систематические погрешности и надо искать варианты исключения влияния этой систематической погрешности в процессе измерения [14].

Примеры:

1) Если перед началом измерений в U-образном манометре не было равенство уровней рабочей жидкости, а уровень жидкости в одном из колен выше на 1 мм уровня во втором колене, то все измеренные значения высоты столба жидкости будут не корректны на 1 мм. Это ошибка, связанная с неисправностью прибора.

2) Если при проведении эксперимента по определению теплоты сгорания в калориметрической бомбе не учтен теплообмен с

окружающей средой через стенки прибора. Другим примером такого же рода систематической ошибки служит отсутствие тепловой изоляции на торцах цилиндрической стенки при определении теплового потока через нее (не обеспечен, таким образом, одномерный тепловой поток). Эти ошибки связаны с ошибкой метода измерения.

3). Если в ходе проведения эксперимента не был учтен значимый фактор, который меняется и влияет на результат измерений (систематическая ошибка в этом случае непостоянна). Например, влажность или температура в помещении, где проводится измерение коэффициента теплопроводности материала. Это внешние погрешности. Они определяются дополнительными погрешностями используемых средств измерений.

Снижение систематической погрешности – единственный путь к уменьшению погрешности измерений. Для этого необходимо тщательно изучить их причины и применять, например, приборы с более высоким классом точности, выбирать более точные методы измерений, проводить систематическую поверку измерительных приборов, вводить поправку и т.д. Однако, следует помнить, что полностью их устранить нельзя.

Случайная погрешность – это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных в определенных условиях [12].

Примеры:

1) Ошибки параллакса (зрительная ошибка расположения глаза), приводящая к некорректной фиксации значений измерения.

2. Случайные изменения внешних параметров эксперимента, которые приводят к появлению ошибок измерений: колебание здания, повышение или понижение температуры воздуха, атмосферного давления и т.д.

При многократных измерениях одной физической величины случайная погрешность проявляет себя в виде разброса результатов измерений. При этом никакой закономерности в появлении не наблюдается. Такие погрешности всегда имеют место быть в процессе измерений, устранить их не представляется возможным. Так как такой вид погрешности носит случайный характер, то и их описание возможно только при помощи теории вероятности и математической статистики.

Введение поправки не дает возможность исключить случайные погрешности. С этой целью можно многократно повторить измерение и провести обработку полученных данных, что позволит значительно ее уменьшить.

Грубая погрешность (промах) – это случайная погрешность результата отдельного наблюдения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда [15].

Данные погрешности возникают из-за ошибок оператора (например, неверная фиксация результата на приборе или ошибочная запись результата наблюдений) или каких-либо непредвиденных внешних воздействий (внезапное изменение условий проведения измерения, неисправность в измерительном приборе).

Обнаружить грубую ошибку при однократном измерении не представляется возможным. Рекомендуется провести несколько измерений ради исключения промаха из результатов измерений. Если при проведении многократных измерениях была обнаружена грубая ошибка, то содержащий ее результат исключается.

По причинам возникновения (по виду источника) систематические погрешности измерения подразделяются на методические, инструментальные, внешние и субъективные.

Инструментальные погрешности возникают из-за несовершенства средств измерения, т.е. от погрешностей средств измерений [14].

Источниками инструментальных погрешностей могут быть, например, неточная градуировка прибора и смещение нуля, вариация показаний прибора в процессе эксплуатации и т.д. Точность средств измерений является характеристикой их качества. Известно, что чем точнее прибор, тем ближе его погрешность к нулю. Обобщённой характеристикой погрешности средства измерения является класс точности. Аппаратная погрешность оценивается по паспортным данным прибора и ее следует учитывать в ходе обработки результатов эксперимента. Уменьшают инструментальную погрешность применением более точного прибора.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством метода измерений, некорректностью алгоритмов или расчетных формул, по которым производят вычисления, округления результатов, отличием модели объекта измерений от оригинала.

Примеры:

1) При определении чисел Рейнольдса при движении воды в трубе университетской лаборатории мешают колебания от прохождения транспорта на улице.

2) При измерении площади большого помещения рулеткой погрешность вызывается ее перекалыванием. Это вызвано

сложностью совмещения начала средства измерения с местом, где находился её конец в предыдущем положении.

3) При измерении температуры не обеспечен полный контакт термометра с поверхностью тела.

4) При расчете коэффициента теплопроводности методом цилиндрической стенки логарифмы в уравнении заменены на алгебраические аналоги.

Методические погрешности не указаны в паспортных данных и должны быть исключены самим экспериментатором в ходе проведения каждого измерения. Методическую погрешность можно уменьшить путем применения более точного метода измерения, использованием корректных формул, уравнений и т.п.

Субъективные (личные) погрешности вызываются ошибками экспериментатора при отсчете показаний средств измерения (погрешности от небрежности, невнимания, плохого самочувствия, психологического состояния, от параллакса, т.е. от неправильного направления взгляда при отсчете показаний стрелочного прибора и пр.). Субъективные погрешности можно уменьшить путем использования более современных цифровых приборов или полной автоматизацией процесса измерения.

В зависимости от характера проявления (изменения во времени) систематические погрешности в свою очередь подразделяют на постоянные, прогрессирующие, периодические и погрешности, изменяющиеся по сложному закону [12].

Постоянные погрешности – погрешности, которые в течение длительного времени, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений, остаются постоянными (или – неизменными). Они встречаются наиболее часто.

Прогрессирующие погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

В зависимости от характера изменения по диапазону измерений систематические погрешности подразделяются на постоянные и пропорциональные.

Пропорциональные погрешности – погрешности, значение которых пропорционально значению измеряемой величины.

По условиям, в которых используются средства измерения, различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность измерений – это та погрешность, которая имеет место при нормальных условиях его эксплуатации, оговоренных в регламентирующих документах (паспорте, технических условиях и пр.).

Дополнительная погрешность средства измерения возникает вследствие выхода какой-либо из влияющих величин (температуры, влажности и др.) за пределы нормальной области значений.

По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины различают погрешности:

- аддитивные Δ_a , они не зависят от измеряемой величины;
- мультипликативные Δ_m , они прямо пропорциональны измеряемой величине;
- нелинейные Δ_n , они зависят от измеряемой величины нелинейным образом.

3.3 Принципы оценивания погрешностей

Оценивание погрешности является неотъемлемой частью проведения измерений в частности и эксперимента в целом.

Для оценки погрешности часто используют некоторую её модель. Она дает возможность определить количественные выражения погрешности в виде их характеристик. Обработка полученных данных в ходе проведения эксперимента позволяет получить требуемые оценки погрешности. На рисунке 3.2 представлен процесс оценки погрешности.



Рисунок 3.3 – Процесс оценки погрешности

Модель погрешности выбирается исходя из ее источников, информация о которых собирается в ходе самого эксперимента (измерения).

Модели погрешности бывают детерминистские и недетерминистские (случайные). Детерминистские модели используются для систематических погрешностей, для случайных правильно будет применение недетерминистских моделей.

В свою очередь детерминистские модели для систематических погрешностей бывают двух видов: числовая и функциональная. Функциональная модель разделяется на линейную, периодическую и функцию общего вида.

Для случайных погрешностей в качестве модели наиболее часто используют нечеткое множество. Каждому значению погрешности в этом случае ставится в соответствие степень его принадлежности нечеткому множеству.

Характеристики погрешности делятся на точечные и интервальные. В качестве точечной характеристики можно рассматривать, например, относительную погрешность или среднее квадратическое отклонение (СКО). В качестве интервальных характеристик могут служить доверительный и безусловный интервалы. Корректный выбор характеристик погрешности произвести достаточно сложно, в этом прослеживается субъективность со стороны экспериментатора, который затрудняется обосновать данный выбор. В общем случае требуемую характеристику следует определять, опираясь на цель анализа погрешности и особенности обработки данных.

Если говорить о цели анализа погрешностей измерений, то таковыми являются оценка погрешности и ее уменьшение. Исходя из этих разных целей вытекают и различные требования к описанию погрешностей. Например,

1) оценка погрешности сводится к определению их количественных характеристик.

2) уменьшение погрешности вызывает необходимость выявления основных факторов, оказывающих влияние на погрешность, и анализ этого влияния.

В основу разработки и выбора характеристик погрешности положены следующие принципы:

1) производят оценку отдельных характеристик погрешности, так как модели погрешностей достаточно сложны и характеризуются большим количеством различных параметров;

2) оценка погрешности производится на приближенной основе с учетом цели измерения;

3) оценку погрешности измерений производят сверху (погрешность лучше преувеличить, чем преуменьшить);

4) оценка погрешности измерений должна быть максимально реалистичной (низкая точность измерений может привести к принятию ошибочного решения, излишне высокая точность приведет к перерасходу ресурсов: материальных, человеческих и временных).

Последовательность оценивания погрешностей измерений представлена на рисунке 3.4.

Эффективность оценивания погрешности измерений определяется адекватностью модели погрешности.

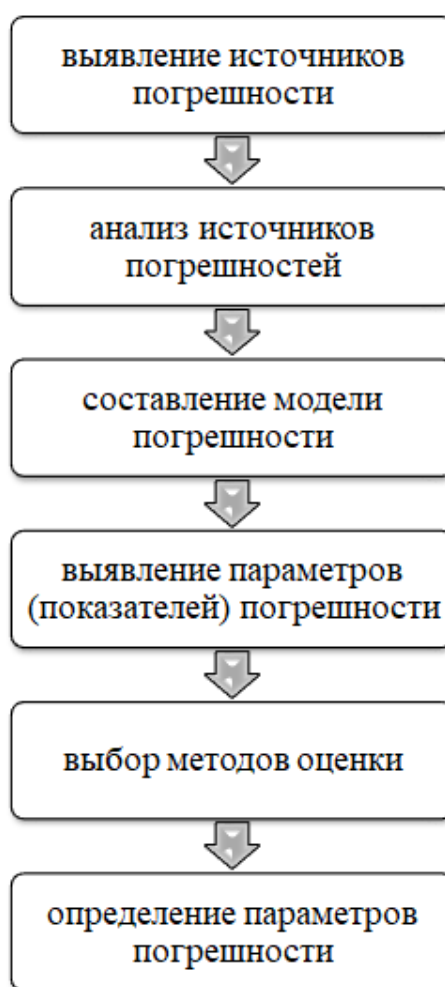


Рисунок 3.4 – Последовательность оценивания погрешностей измерений

Возможны различные варианты оценивания погрешностей: до измерения (априорное) и после измерения (апостериорное).

Априорное оценивание – это проверка возможности обеспечить требуемую точность измерений, проводимых в заданных условиях выбранным методом с помощью конкретных средств измерений [16]. Оно проводится в случаях:

- нормирования метрологических характеристик средств измерений;
- разработки методик выполнения измерений;
- выбора средств измерений для решения конкретной измерительной задачи;
- подготовки измерений, проводимых с помощью конкретного средства измерений.

Для коррекции априорных оценок, когда она оказалась неудовлетворительной и необходим учет особенностей конкретного средства измерения, проводится апостериорное оценивание погрешностей.

3.4 Обработка результатов измерений. Доверительный интервал

С целью оценки погрешности измерений проводится обработка их результатов. К определяемым характеристикам погрешности относится доверительный интервал, представляющий собой границы, в которых заключено истинное значение измеряемой величины.

Как известно, существует следующая форма записи результата измерений физической величины:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad (3.1)$$

где \bar{x} – наиболее вероятное значение измеряемой величины x ;

Δx – рассчитанная тем или иным способом погрешность измерений.

3.4.1 Оценка погрешности при прямых измерениях

3.4.1.1 Оценка погрешности измерений

Пусть в результате проведённых в одинаковых условиях прямых измерений физической величины x был получен набор из n значений

$$X_1, X_2, \dots, X_n.$$

Как было указано выше истинное значение измеряемой величины узнать невозможно. Тем не менее, необходимо в обязательном порядке

дать оценку истинного значения величины с указанием погрешности, допущенной в эксперименте.

За наилучшую оценку истинного значения величины x принимается действительное значение этой величины $X_{\text{д}}$. Таким образом

$$x = X_{\text{д}} \pm \Delta x^{\text{изм}}, \quad (3.1)$$

Действительная значение $X_{\text{д}}$ искомой величины x определяется как общее среднее (например, среднее арифметическое или среднее логарифмическое) значение результатов измерений:

$$X_{\text{д}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.2)$$

При этом, очевидно, что большее количество измерений стремится среднее арифметическое значение к истинному.

Погрешность прямых измерений Δx оценивается следующим образом.

1) Вычисляются частные отклонения отдельных измерений $\Delta x_i^{\text{изм}}$

$$\Delta x_i^{\text{изм}} = x_i - X_{\text{д}}.$$

Иногда эту величину также называют абсолютной погрешностью отдельного измерения. Частное отклонение, как и абсолютная погрешность является размерной величиной. Знак частных отклонений отдельных измерений может быть, как положительным, так и отрицательным.

2) Оценивается абсолютная погрешность измерений $\Delta x^{\text{изм}}$

$$\Delta x^{\text{изм}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i|.$$

Следует обратить внимание, что усреднению подвергаются модули частных отклонений. Абсолютная погрешность не дает полноценную оценку точности проведенных измерений.

3) Полезно также определить относительную погрешность измерений δ

$$\delta = \frac{\Delta x^{\text{изм}}}{X_{\text{д}}}$$

Относительная погрешность δ – величина безразмерная. Обычно относительная погрешность выражается в процентах. Относительная погрешность наглядно характеризует точность проведённых измерений.

3.4.1.2 Оценка приборной погрешности

Правила расчёта приборных погрешностей средств измерений приводятся в технических паспортах.

1) Приборная погрешность стрелочных электроизмерительных приборов определяется их классом точности.

Класс точности $\varepsilon_{\text{кл.т}}^{\text{пр}}$ большинства приборов равен отношению максимально возможной погрешности прибора к величине верхнего предела шкалы, выраженному в процентах.

Класс точности таких приборов указывается на лицевой панели рядом со шкалой в виде числа, не обведенного в кружок или звездочку, без знака «%».

Классы точности $\varepsilon_{\text{кл.т}}^{\text{пр}}$ приборов, используемых в физическом практикуме, равны 0,05 %; 0,1 %; 0,2 %; 0,5 %; 1,0 %; 1,5 %; 2,5 %; 4,0%. Абсолютная приборная погрешность в этом случае одинакова при измерениях во всем диапазоне шкалы и равна

$$\Delta x^{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_{\text{кл.т}}^{\text{пр}}}{100\%} \cdot x_{\text{max}}$$

Относительная приборная погрешность определяется следующим образом

$$\delta^{\text{пр}} = \frac{\Delta x^{\text{пр}}}{X_{\text{д}}}$$

и она имеет свойство увеличиваться с уменьшением значения измеряемой величины x . Таким образом, если проводить измерения на приборах в районе нуля, то точность измерений будет невысокой. От таких измерений лучше отказаться.

В случае если измерение производится при помощи прибора, не имеющих паспорта с указанием класса точности, можно в качестве приборной погрешности взять цену наименьшего деления шкалы. Например, при измерениях высоты столба воды в пьезометре с

«миллиметровой шкалой» приборную погрешность принимают равной 1 мм.

3.4.1.3 Оценка полной погрешности эксперимента

В случае прямых измерений физической величины полную погрешность эксперимента определяют суммированием погрешности измерений и погрешности прибора

$$\Delta x = \Delta x^{\text{изм}} + \Delta x^{\text{пр}}.$$

Если измерение физической величины проведено однократно, то в расчет берется только приборная погрешность.

3.4.2 Оценка погрешности при косвенных измерениях

Как известно, косвенные измерения довольно часто встречаются при проведении теплотехнических экспериментов. Результат таких измерений получается в ходе проведения ряда прямых измерений с последующим расчетом конечной величины посредством формулы (функциональной зависимости). Допустим, что искомая величина ξ вычисляется по некоторой расчётной формуле, требующей знания ряда прямо измеряемых величин x, y, z, \dots :

$$\xi = f(x, y, z, \dots).$$

Для определения погрешности косвенных измерений рекомендуется применение законов дифференциального исчисления

$$\Delta \xi = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \Delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \Delta z \right| + \dots.$$

В таблице 3.1 приведены выражения для оценки погрешности косвенно измеряемых величин, вычисляемых по некоторым простым расчётным формулам.

Таблица 3.1 – Расчетные выражения для оценки погрешности косвенно измеряемых величин

Расчётная формула для величины ξ $\xi = f(x, y)$	Абсолютная погрешность величины ξ $\Delta\xi$	Относительная погрешность величины ξ $\varepsilon_\xi = \frac{\Delta\xi}{\langle\xi\rangle}$
$x + y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{\langle x \rangle + \langle y \rangle}$
$x - y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{ \langle x \rangle - \langle y \rangle }$
$x \cdot y$	$\langle x \rangle \cdot \Delta y + \langle y \rangle \cdot \Delta x$	$\frac{\Delta x}{\langle x \rangle} + \frac{\Delta y}{\langle y \rangle} = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$\frac{x}{y}$	$\frac{\langle x \rangle \cdot \Delta y + \langle y \rangle \cdot \Delta x}{\langle y \rangle^2}$	$\frac{\Delta x}{\langle x \rangle} + \frac{\Delta y}{\langle y \rangle} = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
x^n	$ n \cdot \langle x \rangle^{n-1} \Delta x$	$ n \cdot \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} = n \cdot \varepsilon_x$
$\sqrt[n]{x}$	$\left \frac{1}{n} \right \cdot \langle x \rangle^{\frac{1}{n}-1} \Delta x$	$\left \frac{1}{n} \right \cdot \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} = \left \frac{1}{n} \right \cdot \varepsilon_x$

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие погрешности измерения.
2. Дайте понятие истинного и действительного значений измеряемой величины.
3. Классификация погрешностей. Абсолютная, относительная и приведенная погрешности.
4. Назовите причины появления случайных погрешностей?
5. Приведите примеры систематических погрешностей.
6. Погрешности средств измерения (инструментальная погрешность).
7. Назовите методы снижения разных видов погрешностей.
8. Как определяется класс точности прибора?

9. Как находят погрешность прямых измерений?
10. Как находят погрешность косвенных измерений?

Тесты

1. Погрешностью результата измерения называется

- A) разность между показанием средства измерения и истинным значением измеряемой величины;
B) разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины;
C) значение физической величины, идеальным образом характеризующее свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении;
D) значение физической величины, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному, что в поставленной измерительной задаче оно может быть использовано вместо него;
E) отношение результата измерения к истинному значению измеряемой величины.

2. По характеру проявления погрешности делятся на:

- A) систематические, случайные, грубые;
B) абсолютные, относительные, приведенные;
C) инструментальные, методические, субъективные;
D) основные и дополнительные;
E) статические и динамические.

3. По форме числового выражения погрешности делятся на:

- A) систематические, случайные, грубые;
B) абсолютные, относительные, приведенные;
C) инструментальные, методические, субъективные;
D) основные и дополнительные;
E) статические и динамические.

4. По источнику возникновения погрешности делятся на:

- A) систематические, случайные, грубые;
B) абсолютные, относительные, приведенные;
C) инструментальные, методические, внешние, субъективные;
D) основные и дополнительные;
E) статические и динамические.

5. Абсолютная погрешность - это

- A) разность между выходным сигналом и истинным значением измеряемой величины;
- B) произведение выходного сигнала и истинного значения измеряемой величины;
- C) сумма выходного сигнала и истинного значения измеряемой величины;
- D) разность между нормирующим и истинным значением измеряемой величины;
- E) допустимая погрешность средств измерения.

6. Погрешности подразделяют на:

- A) относительные, абсолютные;
- B) относительные, инструментальные;
- C) методологические, совокупные;
- D) совместные, абсолютные;
- E) инструментальные, относительные.

7. Назовите причины, влияющие на погрешность измерений, в зависимости от характера их появления

- A) случайные, систематические, грубые;
- B) приведенные, абсолютные;
- C) дополнительные, методологические;
- D) относительные, абсолютные;
- E) прямые, косвенные.

8. На какие виды подразделяют систематические погрешности?

- A) инструментальные, методологические, субъективные;
- B) прямые, косвенные, приведенные;
- C) абсолютные, относительные;
- D) дополнительные, случайные;
- E) случайные, прямые, косвенные.

9. В каком случае может возникать дополнительная погрешность?

- A) когда работы проводят в условиях, отличными от нормальных;
- B) когда измерения производят на работающих агрегатах и устройствах;
- C) когда работы производят в условиях, соответствующих нормальным;

Д) когда при замерах используют неправильно градуированные приборы;

Е) когда расчеты производят по неправильно подобранной методике измерения.

10. Класс точности прибора указывает на:

А) предел допускаемой основной и дополнительной погрешности;

В) предел допускаемой инструментальной и абсолютной погрешности;

С) предел допускаемой методологической и дополнительной погрешности;

Д) предел допускаемой грубой и систематической погрешности;

Е) предел допускаемой приведенной и субъективной погрешности.

4 Элементы теории вероятностей и математической статистики

Как уже говорилось ранее результаты эксперимента и, в частности, результаты измерений носят случайный характер и описываются аппаратом математической статистики и теории вероятности.

Математическая статистика – наука, занимающаяся методами обработки экспериментальных данных, полученных в результате наблюдений над случайными явлениями [17].

К задачам математической статистики относятся:

- описание явлений – упорядочить статистический материал, представить в удобном для экспериментатора виде (таблица, график, диаграмма);
- анализ и прогноз – приближенная оценка интересующих числовых событий (средняя, дисперсия) и погрешности этих величин;
- выработка оптимальных решений – в результате возникает задача проверки правдоподобности гипотез, решением которой является принятие или непринятие выдвинутой гипотезы [17].

4.1 Генеральная совокупность и выборка

Генеральная совокупность и выборка являются основными понятиями математической статистики. Рассмотрим их поподробнее.

Генеральная совокупность – это совокупность всех объектов (единиц), относительно которых учёный намерен делать выводы при изучении конкретной проблемы. Исходя из этого можно утверждать, что генеральной совокупностью является всё исследуемое множество.

Состав генеральной совокупности зависит от целей исследования. Например, генеральной совокупностью может служить все население страны (если изучается отношение потенциальных избирателей к кандидату в президенты). Довольно часто задаются критерии, которые конкретизируют объект исследования. Например, женщины 20-50 лет, регулярно посещающие фитнес залы; юридические лица РК; ТЭЦ страны; розничные торговые точки, осуществляющие продажу продуктов питания и т.д.

В качестве генеральной совокупности в области теплотехнического эксперимента могут служить все множество температур поверхности тела за определенный промежуток времени.

Чаще всего генеральная совокупность оказывается слишком большой, и проводить исследования на всей совокупности достаточно сложно. В этом случае оптимально будет работать с выборкой.

Выборкой (на английском sample) называют некоторое случайно отобранное подмножество из генеральной совокупности.

Характеристики выборки представлены на рисунке 4.1.

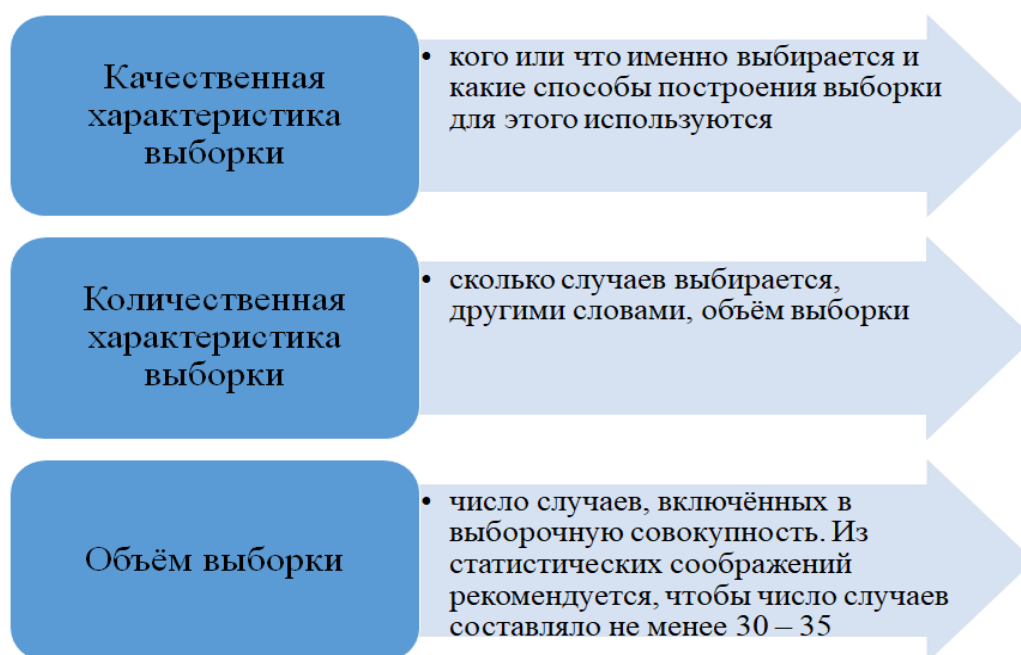


Рисунок 4.1 – Характеристики выборки

Значения, полученные из генеральной совокупности, обычно называют **параметрами**, а значения, полученные из выборочной совокупности, **статистикой**.

4.2 Статистическое оценивание. Состоятельность, несмещенность и эффективность оценок

Статистическое оценивание – один из основных разделов математической статистики, посвященный оцениванию по случайным выборочным наблюдениям тех или иных признаков (случайных величин) параметров их генерального распределения [18].

Статистические оценки параметров распределения представлены на рисунке 4.2.

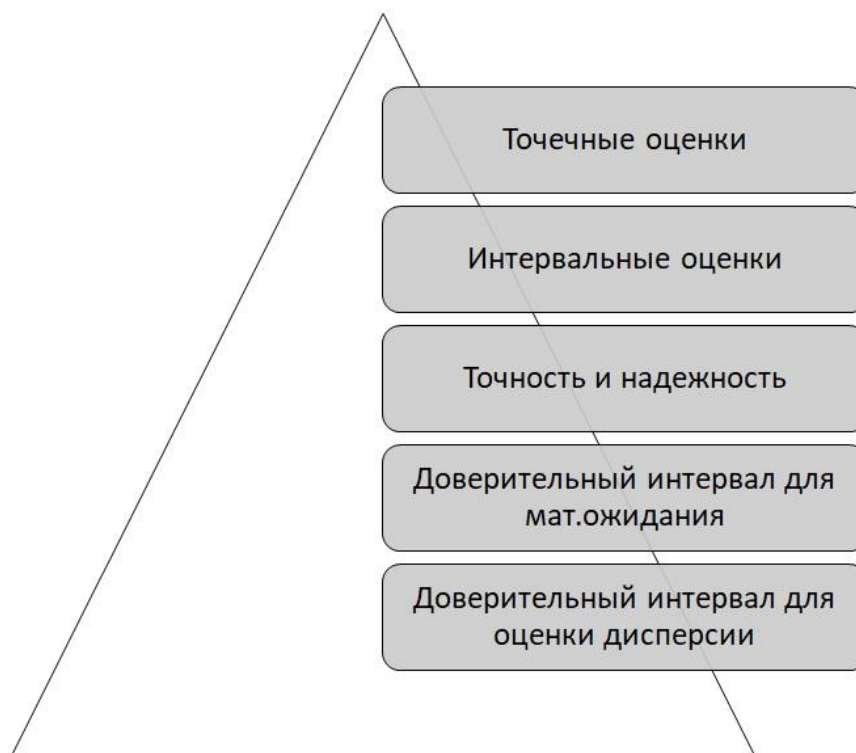


Рисунок 4.2 – Статистические оценки параметров распределения

На практике чаще всего используются два вида оценивания - точечное и интервальное.

Рассмотрим условия, которым должны удовлетворять статистические оценки, чтобы обеспечить максимальное приближение оцениваемых параметров. Этими условиями являются:

- достаточность для оценивания объема выборки;
- оценки параметров есть случайная величина.

Точечное оценивание параметра генерального распределения — это нахождение его точечной оценки, т.е. такого значения некоторой выборочной статистики, о котором можно говорить, как о хорошем приближении к неизвестному генеральному значению параметра. Иначе говоря, точечной называют оценку, определяющую одним числом. Любая точечная оценка, вычисленная на основании опытных данных, является их функцией и поэтому сама должна представлять собой случайную величину с распределением, зависящим от распределения исходной случайной величины, от самого оцениваемого параметра и от числа опытов n [19].

Требования к точечным оценкам показаны на рисунке 4.3.

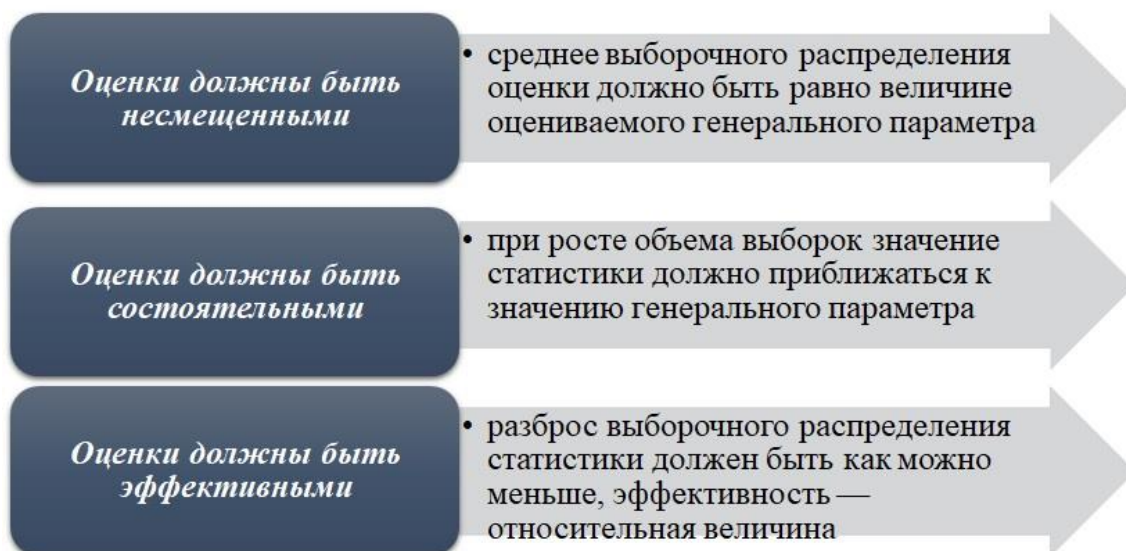


Рисунок 4.3 – Требования к точечным оценкам

Исходя из выдвигаемых требований, касательно точечных отклонений можно сделать следующие заключения:

1 Оценка называется несмещенной, если ее математическое ожидание равно оцениваемому параметру.

2 Оценка называется состоятельной, если при увеличении числа наблюдений она приближается (сходится по вероятности) к значению оцениваемого параметра.

3 Оценка называется эффективной, если ее дисперсия меньше дисперсии любой другой оценки данного параметра.

Такие условия позволяют увеличить вероятность того, что точечная оценка параметров распределения будет близка к значениям соответствующего параметра.

Удовлетворить одновременно все эти требования удастся редко, поэтому следует обязательно провести предварительный критический анализ точечной оценки со всех вышеназванных позиций.

Под интервальным оцениванием значения параметра генеральной совокупности понимается нахождение его интервальной оценки, т.е. интервала, внутри которого с определенной долей вероятности можно будет находиться искомое значение параметра. Интервальные оценки более информативнее, дают возможность оценить точность и надежность производимых оценок.

4.2.1 Точечные оценки случайных величин

Основными точечными характеристиками погрешностей измерений являются математическое ожидание и дисперсия (или среднее квадратическое отклонение) [20].

Математическое ожидание погрешности измерений $M(x)$ есть неслучайная величина, относительно которой рассеиваются другие значения погрешностей при повторных измерениях. Как числовая характеристика погрешности математическое ожидание показывает на сколько смещены результаты измерения относительно истинного значения измеряемой величины [21]

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \varphi(x) dx,$$

где $\varphi(x)$ – плотность распределения вероятности погрешности x .

Дисперсия погрешности $D(x)$ характеризует степень рассеивания (разброса) отдельных значений погрешности относительно математического ожидания

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - M(x)]^2 \cdot \varphi(x) dx$$

Очевидно, что чем меньше дисперсия, тем меньше разброс и тем точнее были выполнены измерения. Следовательно, дисперсия может служить характеристикой точности проведенных измерений. С другой стороны, дисперсия измеряется в единицах погрешности в квадрате. Это не совсем удобно, поэтому в качестве числовой характеристики точности измерений используют квадратный корень из дисперсии, который именуется *средним квадратическим отклонением*

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}.$$

4.2.2 Определение доверительного интервала

Доверительный интервал является интервальной оценкой точности измерений. По величине доверительного интервала можно судить насколько стабильна полученная величина.

Смысл вычисления доверительного интервала заключается в построении такого интервала, чтобы с заданной вероятностью можно было утверждать, что значение оцениваемого параметра находится в этом интервале (рисунок 4.4)



Рисунок 4.4 – Понятие доверительного интервала

Определение доверительного интервала проходит по схеме, представленной на рисунке 4.5.

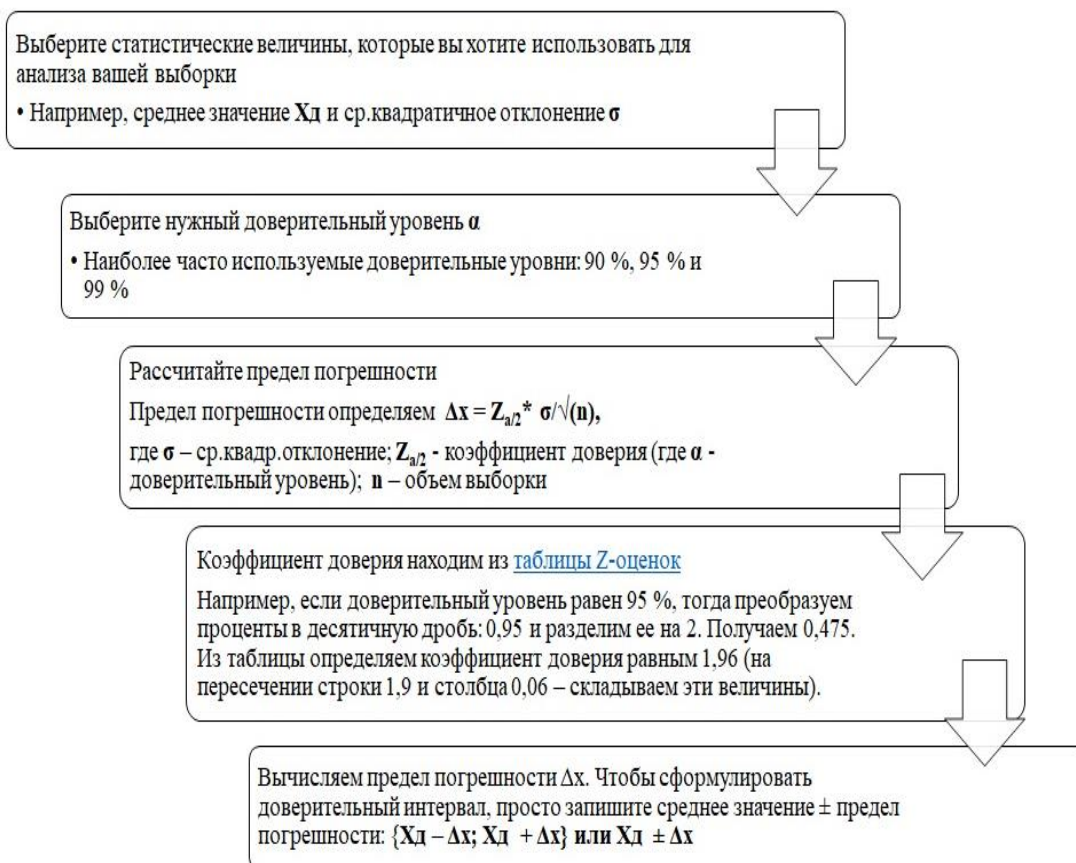


Рисунок 4.5 – Определение доверительного интервала

Контрольные вопросы

1. Чем занимается математическая статистика, ее задачи?
2. Дайте понятие генеральной совокупности и выборки
3. Приведите примеры генеральной совокупности и выборки.
4. Каковы требования к точечным оценкам погрешности измерений?
5. Приведите примеры точечных оценок.
6. Что из себя представляет математическое ожидание?
7. Дисперсия, что характеризует и как ее определить?
8. Что такое среднее квадратичное отклонение?
9. Интервальная оценка в виде доверительного интервала, ее характеристики? Как находят доверительный интервал?

Тесты

1. Математическая статистика – наука, занимающаяся

А. методами обработки экспериментальных данных, полученных в результате наблюдений над случайными явлениями;

В. закономерностями случайных явлений: случайные события, случайные величины, их свойства и операции над ними;

С. выбором числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью;

Д. взаимоотношением субъекта и объекта в процессе познавательной деятельности;

Е. отношением знания к действительности, возможностями познания мира человеком, критериями истинности и достоверности знания.

2. Найдите неверный ответ: «Задачи математической статистики:

А. описание явлений;

В. анализ и прогноз явлений;

С. выработка оптимальных решений;

Д. проверка правдоподобности гипотез;

Е. выбор числа и условий проведения опытов.

3. Из статистических соображений рекомендуется, чтобы число случаев составляло

А. не менее 30 – 35;

В. не более 20 – 35;

С. не менее 40 – 45;

- D. не менее 20 – 25;
- E. не менее 10 – 15.

4. Статистическое оценивание - один из основных разделов математической статистики, посвященный

A. оцениванию по случайным выборочным наблюдениям тех или иных признаков (случайных величин) параметров их генерального распределения;

B. выбором числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью;

C. взаимоотношениям субъекта и объекта в процессе познавательной деятельности;

D. отношениям знания к действительности, возможностями познания мира человеком, критериями истинности и достоверности знания;

E. закономерностями случайных явлений: случайные события, случайные величины, их свойства и операции над ними.

5. Найдите неверный ответ: «К статистическим оценкам параметров распределения относятся:

- A. точечные оценки;
- B. интервальные оценки;
- C. оценки ожидания;
- D. доверительный интервал для математического ожидания;
- E. доверительный интервал для оценки дисперсии.

6. Продолжите предложение: «Метод моментов ...

A. состоит в приравнивании теоретических моментов соответствующим эмпирическим моментам того же порядка;

B. сводится к отысканию максимума функции одного или нескольких оцениваемых параметров;

C. отличается сложностью;

D. полученные этим методом оценки всегда являются эффективными;

E. получаемые методом оценки бывают смещенными.

7. Метод максимального правдоподобия ...

A. состоит в приравнивании теоретических моментов соответствующим эмпирическим моментам того же порядка;

B. сводится к отысканию максимума функции одного или нескольких оцениваемых параметров;

C. отличается сложностью;

Д. полученные этим методом оценки всегда являются эффективными;

Е. получаемые методом оценки бывают смещенными.

7. Найдите верное утверждение

А. Чем меньше дисперсия, тем меньше разброс, тем точнее выполнены измерения;

В. Чем меньше дисперсия, тем больше разброс, тем точнее выполнены измерения;

С. Чем больше дисперсия, тем меньше разброс, тем точнее выполнены измерения;

Д. Чем меньше дисперсия, тем меньше разброс, тем грубее выполнены измерения;

Е. Дисперсия не влияет на точность измерений.

8. Найдите неверное утверждение

А. Чем меньше дисперсия, тем меньше разброс, тем точнее выполнены измерения;

В. Дисперсия может служить характеристикой точности проведенных измерений;

С. Дисперсия выражается в единицах погрешности в квадрате;

Д. Дисперсия характеризует степень разброса отдельных значений погрешности относительно математического ожидания;

Е. Дисперсия показывает на смещенность результатов измерения относительно истинного значения измеряемой величины.

9. Математическое ожидание:

А. Чем меньше математическое ожидание, тем меньше разброс, тем точнее выполнены измерения;

В. неслучайная величина, относительно которой рассеиваются другие значения погрешностей при повторных измерениях;

С. выражается в единицах погрешности в квадрате;

Д. характеризует степень разброса отдельных значений погрешности относительно математического ожидания;

Е. показывает на смещенность результатов измерения относительно истинного значения измеряемой величины.

10. Простым, удобным для практического применения в качестве функции регрессии является:

А. класс полиномиальных функций;

В. класс степенных функций;

С. класс логарифмических функций;

Д. класс экспоненциальных функций;

Е. класс линейных функций.

5 Теплотехнические измерения и приборы

5.1 Основные способы измерения температуры. Средства измерения температуры контактным способом

5.1.1 Основные способы определения температуры

Как известно, непосредственно измерить температуру тела невозможно. Температура измеряется только косвенным методом с использованием температурной зависимости какого-либо физического свойства тела (вещества). В качестве такого тела используют вещества, у которых имеются физические свойства, удобные для непосредственного измерения и однозначно зависящие от температуры.

Классификация термометров приведена на рисунке 5.1.

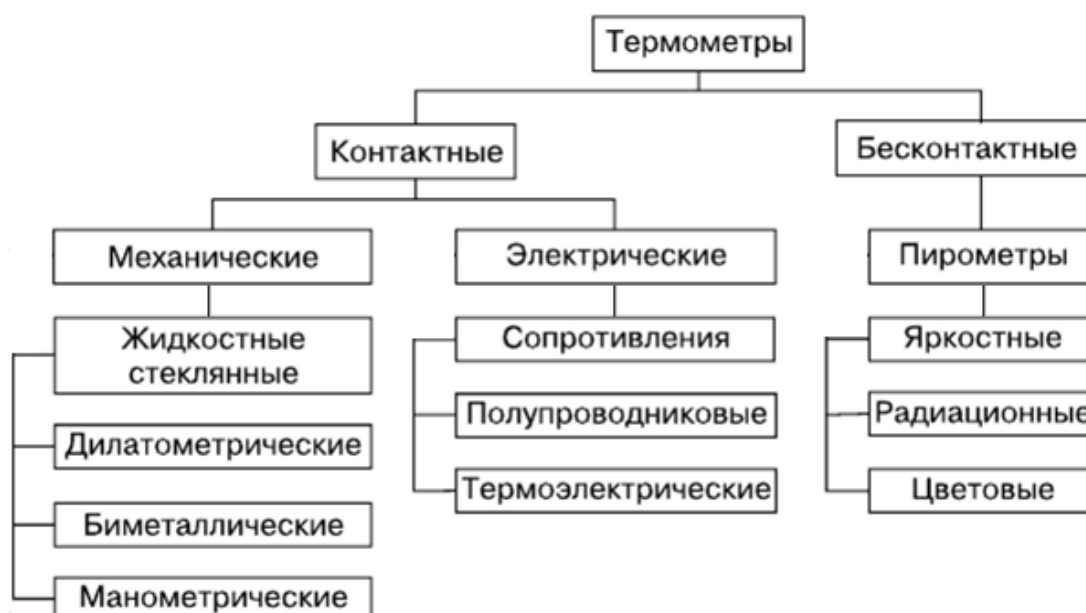


Рисунок 5.1 – Классификация термометров

Различают контактные и бесконтактные, способы измерения температуры.

Контактные термометры, в свою очередь, имеют разный принцип действия. Поэтому различают термометры, основанные:

а) на тепловом расширении вещества - это жидкостно-стеклянные термометры и термометры с твердым термометрическим телом: дилатометрические и биметаллические;

В) на измерении давления вещества - манометрические термометры, представляющие собой замкнутую герметичную термосистему, состоящую из термобаллона, манометрической пружины и соединяющего их капилляра; (диапазон от – 150 °С до + 600 °С);

С) на температурной зависимости термо-эдс – термоэлектрические термометры (термопары);

Д) на температурной зависимости электрического сопротивления вещества - электрические термометры сопротивления.

Бесконтактные измерения осуществляются оптическими методами (пирометры и тепловизоры).

У всех перечисленных средств измерения температуры имеются пределы применения. В таблице 5.1 указаны пределы применения промышленных средств измерения температуры.

Таблица 5.1 - Пределы применения промышленных средств измерения температуры [22]

Тип средства измерения	Разновидность средства измерения	Пределы длительного применения	
		нижний, °С	верхний, °С
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные термометры	-200	600
	Манометрические термометры	-200	1000
Термометры сопротивления	Металлические (проводниковые) термометры сопротивления	-260	1100
	Полупроводниковые термометры сопротивления	-272	600
Термоэлектрические термометры	Термоэлектрические термометры	-200	2200
Пирометры	Квазимонохроматические	700	6000
	Спектрального отношения	300	2800
	Полного излучения	-50	3500

5.1.2 Средства измерения температуры контактным способом

5.1.2.1 Термометры расширения

Устройство жидкостных стеклянных термометров достаточно известно. Достоинства их - высокая точность, простота и дешевизна. Недостатки - недостаточная видимость шкалы, невозможность

автоматической регистрации показаний и невозможность ремонта. В качестве рабочей жидкости могут выступать различные жидкости: ртуть, подкрашенные спирт или керосин.

Существуют ртутные электроконтактные термометры для поддержания постоянной температуры или сигнализации заданной температуры в диапазоне от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термометры выпускаются с постоянным рабочим и с подвижным рабочим контактами, которые могут быть установлены на любом значении температуры в пределах шкалы.

Манометрические термометры предназначены для измерения температуры жидких и газообразных сред в стационарных условиях. При этом исследуемое вещество должно быть нейтрально к материалу измерительного термобаллона. Измерение может происходить местно и дистанционно.

В случае манометрических термометров принцип их действия основывается на измерении зависимости давления (объема) рабочего вещества в замкнутом объеме от температуры. Термометр состоит из следующих конструктивных элементов: термобаллон, капилляр и деформационный манометрический преобразователь, связанный со стрелкой прибора.

Манометрические термометры бывают: газовые (от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$), специальные – от $-267\text{ }^{\circ}\text{C}$; жидкостные (от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$); конденсационные (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$), где в качестве рабочей среды могут выступать фреон-22, пропилен, хлористый метил, спирт, ацетон и этилбензол. Гелий используется для измерения сверхнизких температур от $0,8\text{ К}$. Газовые и жидкостные термометры имеют класс точности 1; 1,5 и 2,5; конденсационные - 1,5; 2,5 и 4.

Преимуществом манометрических термометров является: возможность измерения температуры без использования источников питания; простота конструкции; виброустойчивость; взрывобезопасность; нечувствительность к внешним магнитным полям и доступная цена. К недостаткам можно отнести: относительно невысокая точность измерения; трудность ремонта при разгерметизации измерительной системы; низкая прочность капилляра и небольшое расстояние дистанционной передачи показаний; значительная инертность [23].

5.1.2.2 Термометры сопротивления

Электрические термометры сопротивления основаны на температурной зависимости электрического сопротивления термометрического вещества и широко применяются в диапазоне температур от $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Другими словами,

термометр сопротивления представляет собой терморезистор, включенный в измерительную цепь по двухпроводной или трехпроводной схеме

Трехпроводная схема позволяет снизить погрешность от изменения сопротивления соединительных проводов (рисунок 5.2).

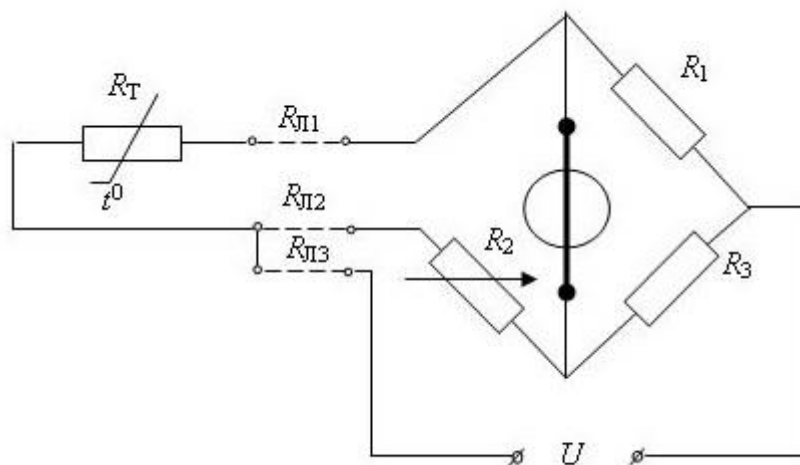


Рисунок 5.2 – Трехпроводная схема включения термометра сопротивления

Принцип терморезистора может быть использован для измерения температуры твердых тел, особенно если они нагреваются электрическим током.

5.1.2.3 Термоэлектрические термометры

Принцип работы термоэлектрических термометров основывается на зависимости термо ЭДС, возникающей в замкнутой цепи, от разности температур горячего и холодного спаев разнородных металлов или сплавов.

Преимуществом термоэлектрических термометров является возможность измерения температуры в отдельно взятых точках объекта; малая тепловая инерция; простота изготовления. Различные схемы подключения показаны на рисунке 5.3.

В схеме (а) температуры t' и t'' могут быть любыми, но обязательно одинаковыми ($t' = t''$). В схеме (В) необходимо добиться условия, чтобы $t'_0 = t''_0$ и были близки к температуре холодного спаея.

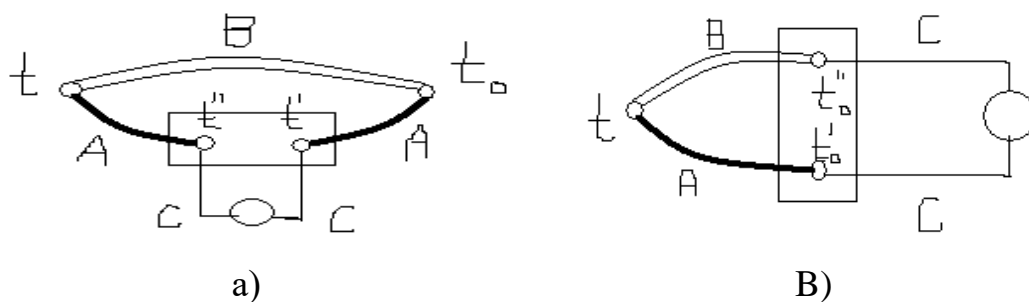


Рисунок 5.3 – Схемы подключения измерительного прибора к термопарной цепи

В качестве недостатка термопар можно привести наличие методической погрешности при подключении к термопаре милливольтметра. Она обусловлена падением потенциала в измерительной цепи из-за протекания по ней электрического тока. Стандартные термоэлектрические термометры представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Стандартные термопары

Тип термопары	Материалы электродов термопар	ТермоЭДС (при $t_{p,k}=100^{\circ}\text{C}$, $t_{c,k}=0^{\circ}\text{C}$), мВ	Верхний предел измеряемой температуры, $^{\circ}\text{C}$	
			длительно	кратковременно
ТПП	Платинородий (10% родия) - платина	0,64	1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия) - платинородий (6% родия)	13,81 (при $t_{p,k}=1800^{\circ}\text{C}$)	1600	1800
ТХА	Хромель (90% Ni+10% Cr) - альюмель (94,83% Ni + 2% Al + 2% Mn + 1% Si+ 0.17 Fe)	4,10	1000	1300
ТХК	Хромель - копель (56% Cu + 44% Ni)	6,90	600	800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения) - вольфрамрений (20% рения)	1,33	2200	2500

5.2 Измерение скорости. Измерение расхода

5.2.1 Измерение скорости

Основным параметром, характеризующим движение потока жидкости или газа, являются его расход и скорость. В основе измерения расхода лежат различные физические эффекты. Измерение скорости происходит по косвенным характеристикам: вначале определяется расход среды, затем вычисляется ее скорость. Для этого применяют

разнообразные чувствительные элементы: механические, оптические, электромагнитные, ультразвуковые и т.п.

В тепловых расходомерах измерения производятся либо по охлаждению нагретого тела, помещенного в поток (термоанемометры), либо по переносу тепловой энергии между двумя расположенными вдоль потока точками (калориметрические расходомеры).

5.2.1.1 Термоанемометр представляет собой прибор для измерения скорости потока жидкости или газа, принцип действия которого основан на зависимости между скоростью потока v и теплоотдачей нагревательного элемента (например, нити или пластины), помещенного в поток [24].

Основной частью данного прибора является измерительный мост (рисунок 5.4). Например, в одно плечо моста может быть включен чувствительный элемент в виде нити из никеля, вольфрама или из платины длиной 3-12 мм и диаметром 0,005-0,15 мм, укрепленной на тонких электропроводных стержнях.

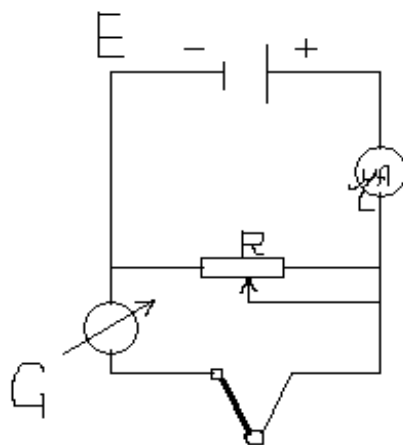


Рисунок 5.4 – Измерительный мост

Когда поток жидкости отсутствует, температура нагревательного элемента не меняется, а при наличии потока нагреватель начинает отдавать тепло внешней среде (рисунок 5.5). Количество тепла, передаваемое нагретой провололочкой потоку жидкости (газа), зависит от многих факторов: от начальной разности температур нагревателя и среды, от параметров трубы и от скорости среды, геометрии и ориентации проволоочки. С увеличением температуры проволоочки чувствительность термоанемометра увеличивается.

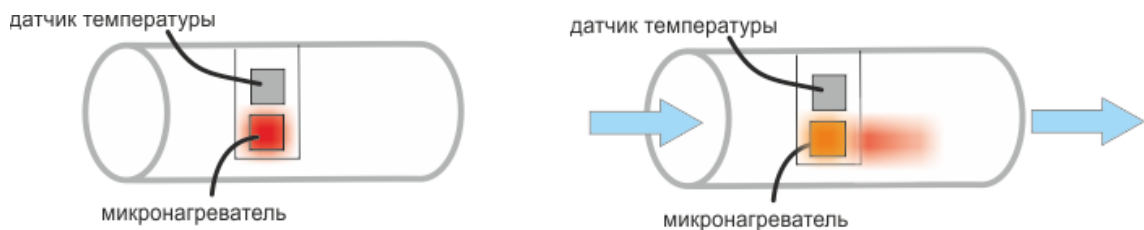


Рисунок 5.5 – Принцип действия термоанемометра

Благодаря малой инерционности, высокой чувствительности, точности и компактности термоанемометр широко применяется при изучении неустановившихся движений и течений в пограничном слое вблизи стенки, для определения направления скорости потока (двух- и трёхниточные термоанемометры) и, главным образом, турбулентности воздушных потоков.

Основным недостатком термоанемометров, построенных по классическим схемам (термоанемометр постоянного тока, термоанемометр постоянной температуры), является сильная зависимость показаний прибора от температуры контролируемой среды. Кроме этого, термоанемометры не позволяют определить направление потока.

5.2.1.2 Калориметрические расходомеры предназначены для потоков газа с небольшими скоростями и с переменным направлением движения среды. Прибор содержит три элемента – микронагреватель и два датчика, предназначенных для измерения температуры потока до и после микронагревателя (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Принцип действия калориметрического расходомера

Если поток не движется, то и тепловое пятно от микронагревателя будет неподвижным. По этой причине среда справа и слева от нагревателя имеет одинаковую температуру. При движении потока жидкости тепловое пятно начинает двигаться в соответствии с направлением и скоростью среды. Если известны характеристики трубы и самой движущейся среды, тогда скорость потока может быть измерена по разности показаний датчиков температуры.

При больших скоростях потока этот принцип работы датчика не применим (рисунок 5.7). В этом случае тепловое пятно «сдвигается» слишком далеко, и оценить скорость потока по разности показателей правого и левого датчиков уже не представляется возможным.

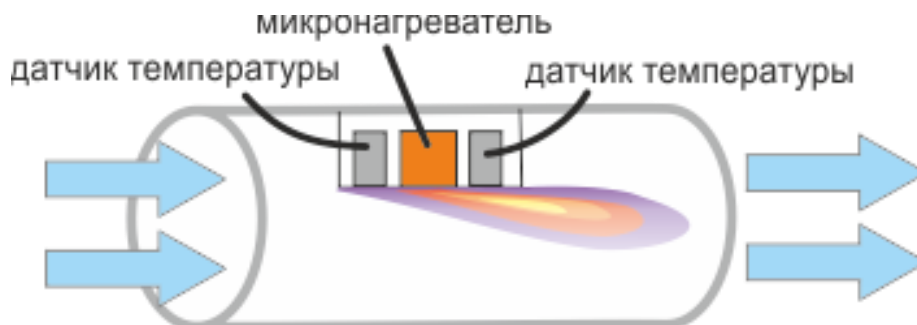


Рисунок 5.7

5.2.2 Измерение расхода

Приборы для измерения расхода по количеству разделяются на две группы: приборы для измерения расхода – расходомеры и приборы для измерения количества – счетчики количества. В каждой из этих групп существует разделение приборов на типы по принципу их действия.

Существует три основных метода измерения расхода:

- методом скоростного напора;
- методом переменного перепада;
- методом постоянного перепада.

Счетчики количества вещества можно разделить по следующим признакам (рисунок 5.8).

Кроме того, известны расходомеры, основанные на других принципах действия: резонансные, оптические, ионизационные, меточные и др. Однако многие из них находятся в стадии разработки и широкого применения пока не получили [25].

Наибольшее распространение получили расходомеры переменного и постоянного перепада давления. К расходомерам переменного перепада давления относятся дифманометры, при использовании которых перепад давления в трубопроводе создается сужающими устройствами (диафрагмами, соплами, трубой Вентури и т.п.).



Рисунок 5.9 – Классификация счетчиков количества

В расходомерах постоянного перепада давления изменяется площадь проходного сечения, а перепад до и после него остаётся неизменным. Такого типа расходомеры выполняются с погруженным поплавком или поршнем.

Недостатком этих способов является необходимость в сверхчувствительном электронном манометре.

В некоторых случаях, когда невозможно применять расходомер, скорость потока измеряют с помощью напорных трубок, гидравлических вертушек и анемометров и вычисляют скорость потока в каком-либо его сечении. Объёмный расход определяют, умножая скорость на площадь сечения.

Во всех отраслях промышленности широко применяются тахометрические расходомеры. Принцип их действия основан на использовании зависимостей скорости движения тел – чувствительных элементов, помещаемых в поток, от расхода веществ, протекающих через эти расходомеры. Из этой группы расходомеров наиболее часто на практике применяются турбинные, шариковые и камерные.

Для измерения скорости и (или) расхода проводящего вещества могут применяться электромагнитные расходомеры. В основу работы электромагнитных расходомеров положена зависимость ЭДС, индуцируемой в электропроводящей среде, движущейся в электромагнитном поле. Конструктивно преобразователь электромагнитного расходомера представляет собой участок трубопровода, выполненного из немагнитного материала, в который вмонтированы два электрода. В месте расположения электродов вне трубопровода размещаются магнитная система или полюса магнита. Основным недостатком этих приборов является невозможность измерения расхода непроводящих сред.

Если необходимо измерять расход загрязненных жидкостей, известкового молока, диффузионного сока, сушла-самотека и т. п., то обычно применяются расходомеры переменного уровня. Принцип действия приборов основан на зависимости уровня жидкости в сосуде от расхода при свободном истечении ее через калиброванное отверстие (щель) в дне или боковой стенке сосуда.

В настоящее время разработаны и имеют весьма широкие перспективы применения вихревые расходомеры, принцип действия которых основан на зависимости от расхода частоты колебаний давления среды, возникающих в потоке в процессе вихреобразования.

Все большее распространение получают акустические расходомеры. Принцип действия таких расходомеров основан на зависимости акустического эффекта в потоке вещества от его скорости. Широкому распространению акустических расходомеров способствует возможность их применения для измерения расходов загрязненных и агрессивных сред, безинерционность, бесконтактность измерений, отсутствие движущихся частей в потоке, отсутствие потерь давления в трубопроводах и др

5.3 Измерение давления

Приборы для измерения давления в общем случае называются манометрами. В том случае, если манометры предназначены для измерения атмосферного давления, их называют барометрами. Если необходимо измерить давление ниже атмосферного, такие манометры называют вакууметрами.

Манометры по принципу действия делятся на жидкостные, пружинные и электрические.

Вакуумметры делятся на жидкостные, деформационные, компрессионные, радиометрические, вязкостные, тепловые, ионизационные, магнито-разрядные и радиоизотопные.

5.3.1 Жидкостные манометры или вакуумметры представляют собой устройства, в которых давление среды уравнивается давлением столба жидкости, налитой в манометр. Манометр имеет вид U-образной трубки (рисунок 5.9), в которую налита манометрическая жидкость - вода, масло или ртуть. Один из концов манометра присоединяется к измеряемому объему, второй конец манометра либо запаян, либо подсоединяется к объему с известным давлением. В этом случае манометр называется дифференциальным, т.к. измеряет разность давлений в различных объемах.

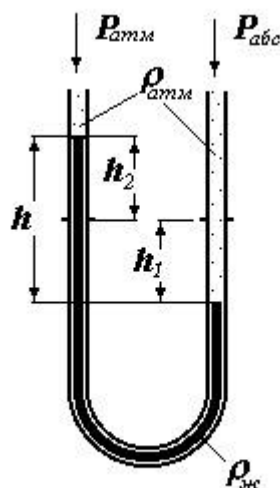


Рисунок 5.9 – Схема стеклянного жидкостного манометра

В жидкостном манометре давление определяется по разности уровней жидкости в трубках при известной плотности жидкости ρ , налитой в манометр

$$P = \rho gh, \quad (5.1)$$

где h – разность уровней жидкости;
 g – ускорение свободного падения.

Разновидностями жидкостных манометров являются вакуумметр Мак-Леода, трубки Пито и трубки Вентури.

Дифференциальный манометр в виде трубки Пито позволяет измерять разность давлений между точкой потока, в которой жидкость не двигается, и точкой, где жидкость имеет максимальную скорость. Схема трубки Пито дана на рисунке 5.10.

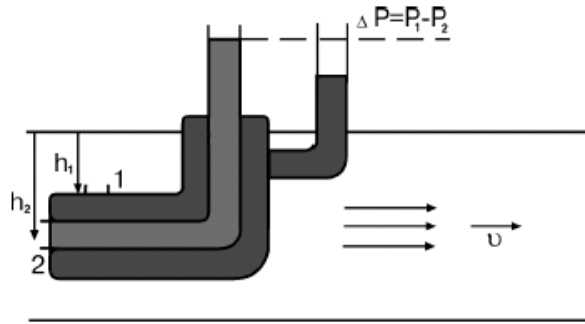


Рисунок 5.10 – Дифференциальный манометр (трубка Пито)

Трубка Вентури представляет собой два колена жидкостного манометра, разделенные мембраной с малым относительно основной трубы отверстием (рисунок 5.11).

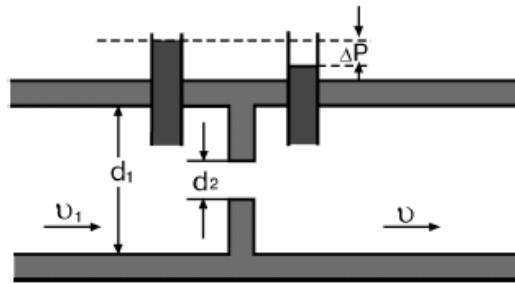


Рисунок 5.11 – Схема дифференциального манометра (трубка Вентури)

Используя уравнения Бернулли и неразрывности, можно получить зависимость между перепадом давления ΔP и скоростью потока

$$\Delta P = P_1 - P_2 = S \cdot \rho \cdot v_1^2 \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right], \quad (5.2)$$

где d_1 – диаметр трубы;

d_2 – диаметр отверстия в диафрагме.

Расход жидкости Q определяют из соотношения

$$Q = a \cdot \frac{\pi d^4}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5.3)$$

5.3.2 Пружинные манометры или вакуумметры представляют собой подвижную часть, размеры которой зависят от давления (так называемую «улитку»). Подвижная часть каким-либо образом соединяется с индикатором положения «улитки» (рисунок 5.12).

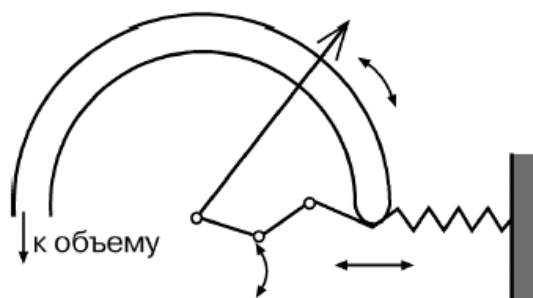


Рисунок 5.12 – Схема пружинного манометра

Пружинные манометры являются самым распространенным измерительным устройством при определении давления. Эти манометры просты в исполнении, надежны, не содержат жидкостных наполнений и при тщательной калибровке могут давать достаточно точные результаты.

5.3.3 Электрические манометры представляют собой устройства, в которых данные о давлении вещества получаются на основании изменения электрических свойств чувствительных элементов, например, сопротивления, разности потенциалов, емкости или заряда.

Различают три типа электрических датчиков давления:

- емкостные, где в качестве чувствительного элемента используется конденсатор с переменным зазором, в котором при изменении давления возникает смещение подвижного электрода мембраны, что приводит к изменению емкости конденсатора;

- пьезоэлектрические, в которых в зависимости от измерения давления происходит изменение резонансной частоты или заряда пьезокристаллов (кварц, турмалин и т.д.);

- тензорезисторные, в которых применяется зависимость изменения свойств проводников (полупроводников) от степени их деформации [26].

Достоинства и недостатки электрических датчиков представлены на рисунке 5.13.



Рисунок 5.13 – Достоинства и недостатки электрических датчиков

5.4 Методы измерения и датчики тепловых потоков

Измерение тепловых потоков является необходимой частью некоторых исследований и практических замеров. Особенно актуальным данный вид измерений будет при исследовании рабочих процессов машин и аппаратов, при оценке тепловых потерь и исследовании теплообмена поверхностей с потоками газа или жидкости.

Методы измерения тепловых потоков и реализующие их устройства чрезвычайно разнообразны. В соответствии с принципами измерения теплового потока все такие методы можно делить на две группы: энтальпийные и методы, основанные на решении прямой задачи теплопроводности.

5.4.1 Энтальпийные методы

Плотность теплового потока при энтальпийном методе определяется по изменению энтальпии тела, воспринимающего теплоту.

По способу фиксирования изменения энтальпии энтальпийные методы в свою очередь делятся на следующие виды:

- калориметрический метод;

- электрометрический метод;
- метод, использующий энергию изменения агрегатного состояния вещества;
- термоэлектрический метод;
- пневматический метод и др.

Калориметрический метод основан на том, что измеряемый тепловой поток подводится к какому-либо телу и расходуется на изменение его энтальпии, которое может быть измерено по изменению температуры тела. В качестве тепловоспринимающего тела чаще всего используются: среди газов это воздух, среди жидкостей – вода, среди твердых тел – медь.

Особенностью этого метода является необходимость корректного измерения среднеинтегральной температуры T . Это связано с определенными трудностями, так как в процессе теплообмена температура неизбежно распределена неравномерно.

5.4.2 Методы, основанные на решении прямой задачи теплопроводности

Прямая задача теплопроводности заключается в отыскании температуры тела, удовлетворяющей дифференциальному уравнению теплопроводности и условиям однозначности.

В этих методах плотность теплового потока определяется по градиенту температуры на поверхности тела. Среди методов этой группы различают:

- метод вспомогательной стенки;
- тепломеры с поперечной составляющей потока;
- градиентный метод.

Кроме методов двух указанных групп применяются и другие методы измерения теплового потока, основанные на разнообразных физических явлениях и эффектах. Это и методы, основанные на фотоэлектрических и радиометрических эффектах, и оптический метод, основанный на определении конвективного теплового потока по углу отклонения луча, пропорциональному градиенту температуры в вязком подслое, и методы, основанные на решении обратной задачи теплопроводности.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные методы измерения тепловых потоков. Перед рассмотрением методов необходимо отметить, что при измерении тепловых потоков с помощью датчиков тепловых потоков значения этих потоков определяются с некоторой погрешностью. Составляющие этой погрешности обусловлены:

- конкретными особенностями датчика,

- его конструктивным несовершенством,
- искажениями, вносимыми самим датчиком в значения измеряемого теплового потока, например, из-за изменения температуры поверхности датчика по сравнению с температурой поверхности стенки.

Первые две составляющие погрешности индивидуальны для каждого метода и датчика теплового потока, а последняя носит общий характер.

Необходимым условием проведения теплотехнических исследований ограждающих конструкций зданий является измерение величины тепловых потоков, проходящих через них. Определение тепловых потоков дает возможность оценить теплозащитные свойства обследуемых ограждений и качество тепловой изоляции.

Для измерения тепловых потоков часто применяют тепломеры, основанные на принципе дополнительной стенки [27]. Тепломеры, устроенные по этому принципу, как правило, состоят из трех пластин: двух защитных дисков с наружных сторон и средней рабочей пластины, на которой установлены термопары по двойной архимедовой спирали. Средняя пластина тепломера имеет две зоны – рабочую в центре диска и защитную кольцевую шириной не менее 1/4 части центральной рабочей зоны. В рабочей зоне смонтирована батарея термопар, соединенных последовательно. Термопары батарей расположены с обеих сторон рабочего диска. При прохождении теплового потока через тепломер на обеих сторонах рабочей пластины возникает термо-ЭДС вследствие разности температур на ее поверхностях.

Если коэффициент теплопроводности дополнительной стенки известен, то для определения теплового потока достаточно измерить разность температур на ее поверхности.

Если коэффициент теплопроводности дополнительной стенки не известен, то производят тарировку тепломера при помощи другого тепломера, характеристика которого заранее известна.

Если тепломер установлен на наружной поверхности здания, тогда он определяет тепловой поток от наружной поверхностью ограждения к наружному воздуху. В случае установки тепломера на внутренней поверхности можно оценить тепловой поток, который проходит через внутренние поверхности ограждения.

Контрольные вопросы

1. Классификация методов измерения температуры.
2. Термоэлектрический метод измерения температур.
3. Термометры сопротивления.
4. Измерение температуры тел по их тепловому излучению. Пирометры излучения. Методика применения пирометров излучения.
5. Измерение давления и перепада давления. Жидкостные приборы давления.
6. Измерение расхода и количества жидкостей, газа, пара и тепла.
7. Расходомеры переменного перепада давления. Стандартные сужающие устройства.
8. Расходомеры пневматического типа. Расходомеры постоянного перепада давления
9. Тахометрические расходомеры. Электромагнитные и ультразвуковые расходомеры
10. Измерение влажности газов и сыпучих материалов. Методы измерений: психрометрический, сорбционный
11. Измерение влажности газов и сыпучих материалов. Методы измерений: кондуктометрический, диэлькометрический
12. Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел. Механические уровнемеры.
13. Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел. Емкостные, акустические и ультразвуковые уровнемеры.

Тесты

- 1. Недостатки каких термометров приведены далее - плохая видимость шкалы, невозможность ремонта и передачи показаний на расстояние, невозможность автоматической записи показаний?**
 - A) жидкостных стеклянных;
 - B) манометрических;
 - C) термометров сопротивления;
 - D) термоэлектрических;
 - E) пирометров.
- 2. Работа жидкостных стеклянных термометров основана на свойстве**
 - A) теплового расширения вещества;
 - B) самопроизвольного перехода тепла от более нагретого тела к менее нагретому;

- С) самопроизвольного перехода тепла от менее нагретого тела к более нагретому;
- Д) ртути проводить электрический ток;
- Е) сжатия вещества под действием атмосферного давления.

3. Почему ртуть широко используется как рабочая жидкость в жидкостных стеклянных термометрах?

- А) ртуть не смачивает стенок капилляра;
- В) ртуть имеет подходящую плотность;
- С) ртуть легко различима человеческим глазом;
- Д) ртуть легко получить на производстве, потому она так распространена;
- Е) всё вышеперечисленное верно.

4. Принцип действия манометрического термометра основан на...

- А) зависимости давления герметично замкнутого вещества от температуры;
- В) зависимости температуры от атмосферного давления;
- С) законе сохранения энергии;
- Д) первом законе термодинамики;
- Е) зависимости температуры герметично замкнутого вещества от давления.

5. Принцип работы биметаллических и дилатометрических термометров основан на...

- А) свойстве теплового расширения различных твёрдых тел;
- В) свойстве возникновения термо ЭДС между двумя проводниками;
- С) зависимости давления термометрического герметично-замкнутого вещества от температуры;
- Д) зависимости температуры от атмосферного давления;
- Е) свойстве противоположно заряженных частиц притягиваться.

6. В каком случае может возникнуть термо ЭДС в термопреобразователе?

- А) при двух разнородных термоэлектродах и различных температурах рабочего и свободного концов;
- В) при двух разнородных термоэлектродах и одинаковых температурах рабочего и свободного концов;

С) при двух однородных термоэлектродах и различных температурах рабочего и свободного концов;

Д) при двух однородных термоэлектродах и одинаковых температурах рабочего и свободного концов;

Е) при трех разнородных термоэлектродах и различных температурах рабочего и свободного концов.

7. Удлинительные компенсационные провода в термоэлектрических термометрах применяют ...

А) для уменьшения влияния температуры свободных концов на показания;

В) для удлинения свободных концов;

С) для удобства подключения термопары к милливольтметру;

Д) компенсационные провода вообще не применяют в паре с термоэлектрическим термометром;

Е) для компенсации возникающих термических напряжений.

8. Показания жидкостных стеклянных термометров зависят от

А) изменения объёма жидкости и изменения объёма стеклянного резервуара для жидкости;

В) изменения объёма жидкости;

С) только от изменения объёма стеклянного резервуара для жидкости;

Д) давления среды, в которой замеряется температура;

Е) завода изготовителя самого прибора.

9. Температуру какой среды можно измерить манометрическим термометром?

А) жидкой и газообразной;

В) только жидкой;

С) только газообразной;

Д) твёрдой, жидкой и газообразной;

Е) только твёрдой.

10. Какое вещество наиболее часто используется как рабочее в манометрических термометрах

А) азот;

В) водород;

С) этиловый спирт;

Д) дистиллированная вода;

Е) ртуть.

11. Термоэлектрический метод измерения температуры основан на...

- А) строгой зависимости Термо ЭДС термопары от температуры;
- В) свойстве теплового расширения различных твёрдых тел;
- С) свойстве противоположно заряженных частиц притягиваться;
- Д) свойстве вещества изменять своё электрическое сопротивление с изменением температуры;
- Е) не строгой зависимости Термо ЭДС термопары от температуры.

12. Какое основное требование из предъявляемых к термопарам?

- А) высокая чувствительность;
- В) однозначная зависимость ТЭДС от температуры;
- С) механическая прочность;
- Д) жаропрочность;
- Е) стабильность и воспроизводимость термоэлектрической характеристики.

13. Удлинительные компенсационные провода в термоэлектрических термометрах применяют ...

- А) для компенсации возникающих термических напряжений;
- В) для удлинения свободных концов;
- С) для удобства подключения термопары к милливольтметру;
- Д) компенсационные провода вообще не применяют в паре с термоэлектрическим термометром;
- Е) для переноса свободных концов в зону с постоянной температурой.

6 Экспериментальные исследования теплофизических свойств веществ

6.1 Измерение коэффициентов теплопроводности веществ методом стационарного теплового потока

Исследование теплопроводности материалов выполняются в широком диапазоне температур. Для исследования используют две группы методов: стационарные и нестационарные [28].

В основе стационарных методов лежит исследование температурных полей, значение которых остается неизменным с течением времени. Все стационарные методы измерения коэффициентов теплопроводности основаны на пропускании теплового потока через исследуемую структуру. В ходе эксперимента проводят измерение температур между гранями исследуемого образца. Далее по известным расчетным формулам с учетом измеренных температур вычисляется коэффициент теплопроводности.

Стационарные методы являются простыми в реализации, но не обладает высокой точностью: наименьшая погрешность метода может составлять около 10%.

К стационарным методам определения коэффициента теплопроводности относятся так называемые методы плоского, цилиндрического и шарового слоя.

Как известно, теплопроводность характеризует процесс теплопереноса в однородном теле с определёнными габаритными размерами за счет разницы температур в нем. Поэтому вне зависимости от формы исследуемого образца (плоская, цилиндрическая или шаровая) исходными параметрами для эксперимента служат:

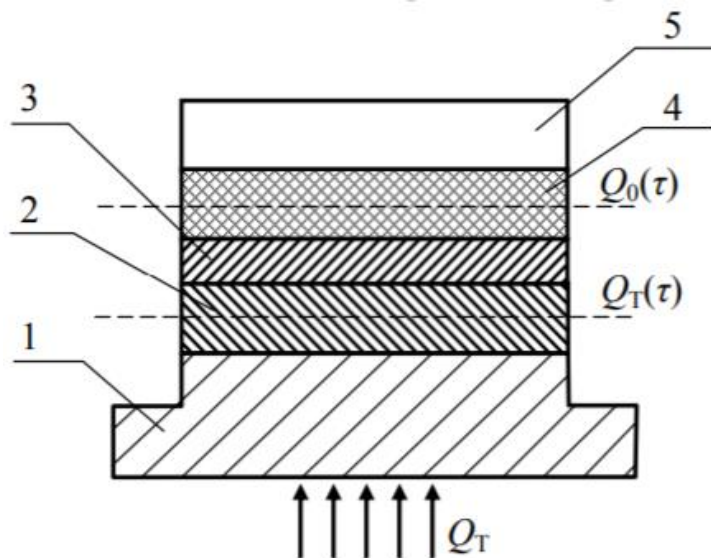
- 1) площадь поверхности в направлении, перпендикулярном направлению теплового потока;
- 2) время, в течение которого происходит перенос тепловой энергии;
- 3) температурный перепад между отдельными, наиболее удалёнными друг от друга частями исследуемого образца;
- 4) мощность теплового источника.

6.1.1 Теплопроводность твёрдых материалов

6.1.1.1 Стационарный метод плоского слоя

Для определения коэффициента теплопроводности твёрдых материалов используется метод динамического калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой [28]. Схема установки приведена на рисунке 6.1. Исследуемому образцу 4 придается плоская форма, образец помещается между опорным медным стержнем 5 и

медной контактной пластиной 3. Часть поступающего через тепломер теплового потока Q_T расходуется на нагрев образца (Q_0).



1 – основание; 2 – пластина; 3 – контактная пластина; 4 – исследуемый образец; 5 – стержень

Рисунок 6.1 – Схема установки для определения коэффициента теплопроводности твердых материалов

Температурное поле в образце 4 и пластине 2 можно считать линейным.

Коэффициент теплопроводности образца определяется по формуле

$$\lambda = \frac{h}{R \cdot S},$$

где h , S , R – высота, площадь поперечного сечения и термическое сопротивление образца.

Величина термического сопротивления R рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\Delta T \cdot (1 + k)}{\Delta T_1 \cdot K(t)} - R_k,$$

где ΔT , ΔT_1 – перепад температуры на образце и пластине 2;

$K(T)$ – тепловая проводимость тепломера;

R_k – поправка, учитывающая тепловые сопротивления контакта между стержнем 5 и пластиной 3, а также контактов термопар с поверхностями;

k – поправка, учитывающая влияние теплоемкости образца.

Для повышения точности результатов исследования необходимо провести не менее пяти дублирующих опытов. Тепловая проводимость тепломера определяется по формуле

$$K(t) = \frac{c_B \cdot m_B}{t - t_a},$$

где c_e, m_e – удельная теплоемкость и масса эталонного образца. Величина k определяется по формуле:

$$k = \frac{c \cdot m}{2(c \cdot m + c_B \cdot m_B)}.$$

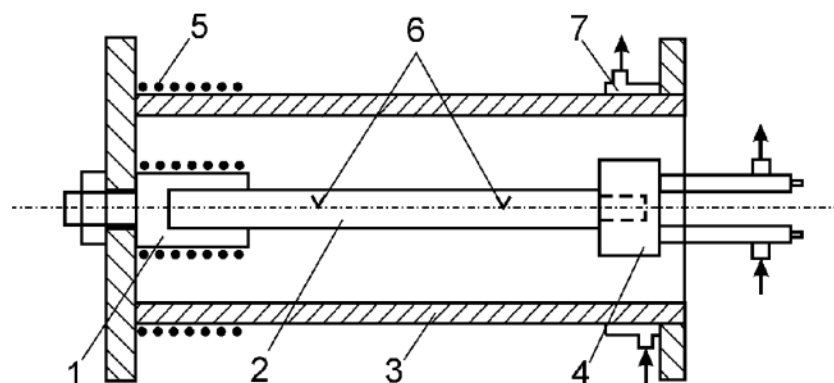
6.1.1.2 Метод продольного теплового потока

Для материалов с высокой теплопроводностью более эффективным является метод продольного теплового потока. Образцу придается цилиндрическая форма с площадью поперечного сечения S , на одном из торцов которого создается равномерный тепловой поток Q . Суть метода заключается в определении разности температур между двумя сечениями образца, расположенными на расстоянии l один от другого. Если считать, что боковых тепловых потерь нет, то теплопроводность образца определяется по формуле

$$\lambda = \frac{Q \cdot l}{S \cdot (t_1 - t_2)}.$$

Создать одномерный осевой тепловой поток и избежать тепловых потерь с боковой поверхности образца в данном методе достаточно сложно.

Для исключения тепловых потерь с боковых поверхностей образца используют охранный цилиндр (рисунок 6.2), вдоль которого создается температурное поле, повторяющее поле образца [29].



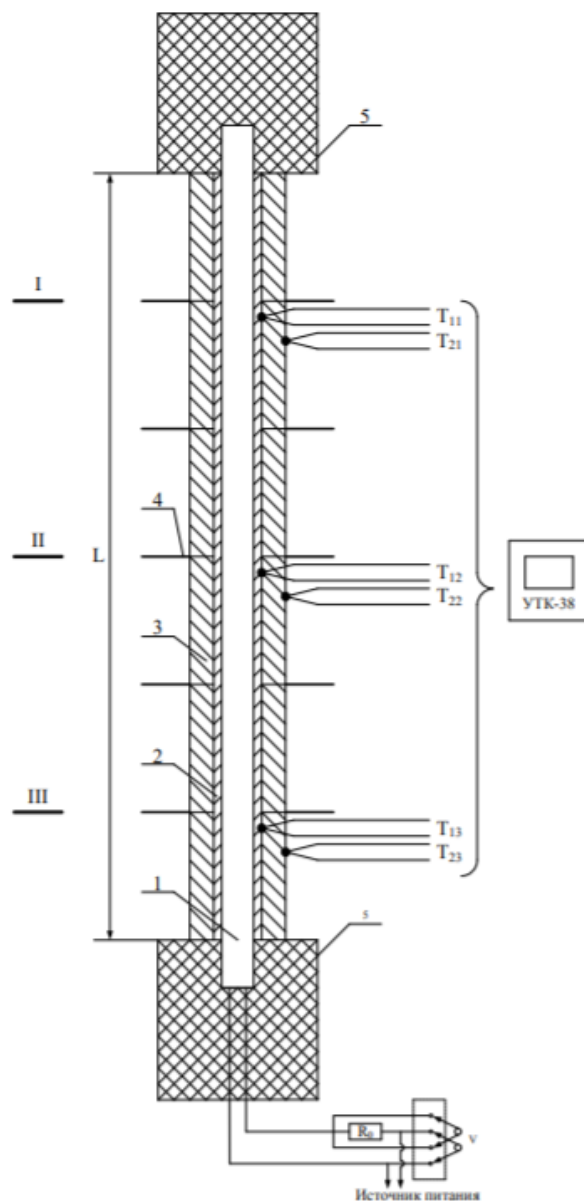
1 – блок нагревателя; 2 – образец; 3 – охранный цилиндр; 4, 7 – холодильники; 5 – нагреватель охранный цилиндра; 6 – термопары

Рисунок 6.2 – Схема установки по определению коэффициента теплопроводности методом продольного теплового потока

6.1.1.3 Стационарный метод цилиндрического слоя

На рисунке 6.3 представлена схема установки для определения коэффициента теплопроводности методом цилиндрического слоя.

Исследуемому материалу 3 придается форма цилиндрической трубки, внутри которой расположен цилиндрический нагреватель 1 и медная термостатирующая трубка 2. Тонкие пластины 4, расположенные перпендикулярно восходящему потоку воздуха необходимы для снижения вертикальных конвективных потоков воздуха около нагретого образца. Теплоизолирующие втулки 5, выполненные из теплоизоляционного материала, позволяют снизить тепловые потери на торцах образца. Электропитание к нагревателю подводится от источника питания 1. На внутренней и наружной поверхностях исследуемого образца расположены шесть хромель-копелевых термопар (по три термопары на каждой поверхности), которые позволяют определить температуры в трёх сечениях по высоте образца.



1 – нагреватель; 2 – медная термостатирующая трубка;
 3 – исследуемый образец; 4 – пластины для уменьшения конвективных потоков; 5 – теплоизолирующие втулки

Рисунок 6.3 – Схема установки для определения коэффициента теплопроводности методом цилиндрического слоя

Теплопроводность исследуемого материала можно вычислить зная геометрические параметры цилиндрической стенки (радиусы r_1, r_2 , длину l), температуры внутренней и наружной поверхности t_1, t_2 и поток теплоты Q .

$$\lambda = Q \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi l (t_1 - t_2)}$$

6.1.2 Теплопроводность жидкостей и газов

Для измерения теплопроводности жидкостей и газов используются некоторые методы, применяемые для твёрдых тел, и ряд специфических методов непосредственно для жидких веществ.

6.1.2.1 Метод плоского слоя

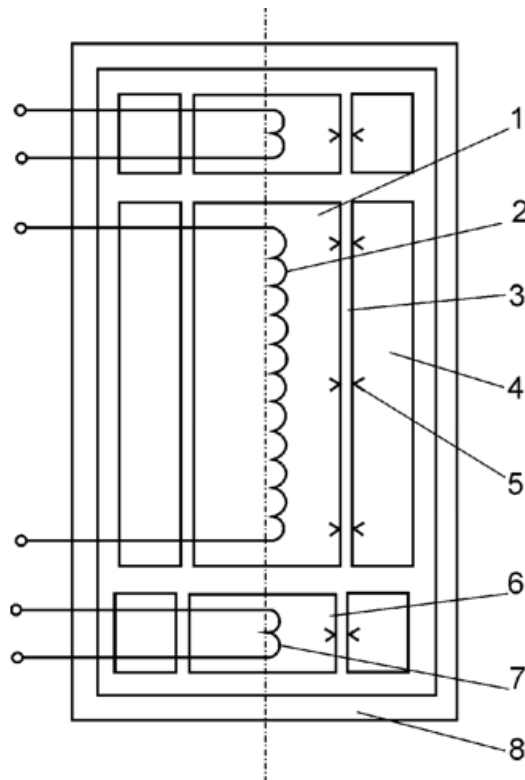
Конструкция установки, используемой для определения теплопроводности жидкостей методом плоского слоя, аналогична конструкции установки, изображенной на рисунке 6.1 [28].

Реализация метода плоского слоя для жидкостей имеет свою особенность. Как известно, в жидкости при ее нагреве возникает конвекция. Для исключения появления конвекции следует обеспечить горизонтальное расположение рабочих поверхностей и подвод теплоты к исследуемому слою жидкости только сверху.

Также для измерения теплопроводности жидкостей может быть использован метод продольного теплового потока (рисунок 6.2). В этом случае исследуемая жидкость заполняет тонкостенную металлическую трубку, и вдоль нее создается тепловой поток.

6.1.2.2 Метод коаксиальных цилиндров

В методе коаксиальных цилиндров исследуемое вещество (жидкость или газ) заполняет цилиндрический зазор (рисунок 6.4) между двумя коаксиально расположенными цилиндрами. Основной нагреватель 2 мощностью Q располагается во внутреннем цилиндре. Внутренний цилиндр 1 имеет диаметр d_1 и длину l , наружный цилиндр 4 имеет внутренний диаметр d_2 . Разность температур $\Delta t_1 = t_1 - t_2$ измеряется термопарами 5. Охранные цилиндры 6 с охранными нагревателями 7 предназначены для исключения тепловых потерь с торцов цилиндра. Вся измерительная ячейка размещается в корпусе 8, рассчитанном на полное давление опыта.



1 – внутренний цилиндр; 2 – основной нагреватель; 3 – исследуемое вещество; 4 – наружный цилиндр; 5 – термопары; 6 – охранные цилиндры; 7 – охранные нагреватели; 8 – корпус

Рисунок 6.4 – Схема измерительной ячейки

Теплопроводность жидкости или газа можно определить по известной формуле

$$\lambda = Q \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi l (t_1 - t_2)},$$

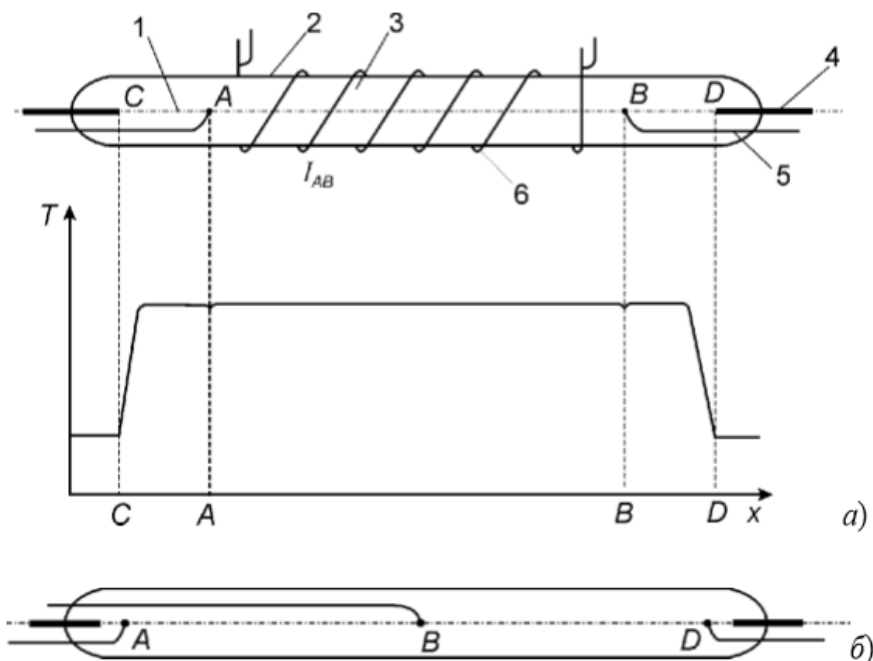
где t_1 , t_2 – температуры внешней поверхности внутреннего цилиндра и внутренней поверхности внешнего цилиндра.

6.1.2.3 Метод нагретой проволоочки

В данном методе вместо внутреннего цилиндра с нагревателем используется нагретая проволоочка, которая одновременно служит источником теплоты Q и термометром сопротивления для измерения температуры t [28]. В данном случае отношение длины нагревателя l к его диаметру d_1 резко увеличивается по сравнению с методом

коаксиальных цилиндров и это позволяет снизить потери теплоты с торцов установки.

Суть метода заключается в следующем. Измерительная проволока 1 (рисунок 6.5) диаметром d_1 и длиной l размещается коаксиально в трубке (капилляре) 2. Исследуемое вещество 3 находится в зазоре между ними. Через проволоку с помощью токоподводов 4 пропускают электрический ток I . Тепловую мощность Q определяют по току I и падению напряжения U_{AB} на длине проволоки l_{AB} , измеряемому с помощью потенциальных отводов 5. Температуру внутренней поверхности трубки t_2 определяют с помощью наружного термометра 6 с учётом поправки на перепад температур в стенке трубки. В целях устранения этой поправки в ряде случаев вместо стеклянной или кварцевой трубки используют тонкостенный металлический капилляр, служащий одновременно и термометром сопротивления.



1 – проволока; 2 – трубка; 3 – исследуемое вещество; 4 – токоподводы; 5 – потенциальные отводы; 6 – наружный термометр

Рисунок 6.5 – Схема измерительной ячейки без среднего потенциального отвода (а), со средним потенциальным отводом (б)

Если принять, что весь тепловой поток движется только радиально благодаря теплопроводности вещества и коэффициент

теплопроводности постоянен ($\lambda = \text{const}$), то теплопроводность исследуемого вещества рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{I \cdot U_{AB} \ln(d_2/d_1)}{2\pi l_{AB} (t_1 - t_2)}.$$

6.2 Измерения коэффициента теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости материалов, основанные на нестационарном тепловом режиме

Нестационарные методы основаны на исследовании меняющихся во времени по определенному закону температурных полей. Они более сложны в реализации. Основная трудность состоит в том, что в эксперименте сложно реализовать условия, заложенные в теории метода. Однако нестационарные методы позволяют помимо данных о теплопроводности получить информацию о температуропроводности и теплоёмкости вещества.

Нестационарные методы определения теплопроводности, как правило, позволяют непосредственно измерить температуропроводность, а искомая величина вычисляется с учётом известных значений теплоемкости и плотности.

6.3 Определение плотности твердых тел, жидкостей и газов

Плотность веществ определяют с помощью пикнометров, ареометров и гидростатических весов.

Пикнометрами можно определять плотность газов, жидкостей и твердых тел. Это стеклянные тонкостенные сосуды с меткой на горловине или с капиллярным отверстием в пробке, закрывающей горловину пикнометра. Пикнометры для определения плотности газов имеют несколько иную форму.

6.3.1 Определение плотности жидкостей

Пикнометр для перед проведением исследования просушивают до постоянной массы и затем охлаждают до комнатной температуры. В этом состоянии его взвешивают с точностью до 0,0002 г и заполняют дистиллированной водой немного выше метки или доверху (в зависимости от марки пикнометра). При необходимости избыток воды удаляют фильтровальной бумагой, прибор закрывают пробкой.

Пикнометр для поддержания в нем постоянной температуры выдерживают в течение 20 минут в водяном термостате при температуре 20 °С с точностью $\pm 0,1$ °С. В ходе выдержки уровень воды в пикнометре доводят до метки. После коррекции уровня воды

пикнометр снова выдерживают в термостате дополнительно еще 10 мин. После извлечения пикнометра из термостата, его вытирают снаружи досуха и оставляют под стеклом аналитических весов в течение 20 минут. Затем происходит взвешивание прибора на весах с точностью до 0,0002 г. Следующим этапом является освобождение пикнометра от воды, просушивание, ополаскивание этиловым спиртом, а затем диэтиловым эфиром и заполнение его исследуемой жидкостью. Далее проводятся те же самые операции, что и с дистиллированной водой.

Плотность испытуемой жидкости в г/см³ вычисляют по формуле

$$\rho_{20} = \frac{(m_2 - m) \cdot 0,99823}{m_1 - m},$$

где m – масса пустого пикнометра, г;

m_1 – масса пикнометра с дистиллированной водой, г;

m_2 – масса пикнометра с испытуемой жидкостью, г;

0,99823 - значение плотности воды при 20 °С, г/см³.

6.3.2 Определение плотности твердого тела

Для определения плотности твердого тела проводят процедуры взвешивания самого твердого тела, пикнометра со вспомогательной жидкостью и пикнометра с опущенным в жидкость твердым телом.

В качестве вспомогательной жидкости используют главным образом воду. Другие жидкости (толуол, ксилол, бензин, керосин, спирт) применяют в случае, если исследуемое твердое тело растворимо в воде или взаимодействует с ней. При этом проводят предварительное определение плотности вспомогательной жидкости способом по п.6.3.1. Твердое вещество вносят в пикнометр в виде порошка или крупных кристаллов.

Возможен и другой порядок определения. В качестве примера приводим определение плотности огнеупорных материалов по [30].

Первым этапом является взвешивание чистого сухого пикнометра. Затем происходит взвешивание пикнометра вместе с помещенной в него аналитической пробы массой 5-8 г. Разность этих масс и будет представлять собой массу аналитической пробы. Следующим этапом будет выдержка пикнометра с насыщающей жидкостью (на 3-5 мм выше уровня пробы) не менее одного часа для более полного смачивания.

Таким образом заполненный пикнометр вакуумируют не менее 30 мин. Давление в системе должно соответствовать парциальному

давлению паров насыщающей жидкости. Затем в пикнометр доливают насыщающую жидкость до уровня на 0,5-1,0 см ниже края пикнометра.

Следующим этапом будет выдерживание пикнометра в термостате не менее 30 мин при температуре на 2 °С – 5 °С выше температуры окружающей среды. Пикнометр извлекают и протирают насухо фильтровальной бумагой, затем взвешивают.

На завершающем этапе необходимо определить массу пикнометра, заполненного насыщающей жидкостью. Для этого жидкость наливают в сухой, чистый, предварительно взвешенный пикнометр, и проводят аналогичные действия. Если используют насыщающую жидкость, отличную от дистиллированной воды, дополнительно определяют массу пикнометра, заполненного дистиллированной водой.

Истинную плотность в г/см³ вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{m\rho_{ж}}{m - (m_1 - m_2)},$$

где m - масса аналитической пробы, г;

$\rho_{ж}$ – плотность насыщающей жидкости при температуре термостатирования, г/см³;

m_1 – масса пикнометра с аналитической пробой и насыщающей жидкостью, г;

m_2 – масса пикнометра с насыщающей жидкостью, г.

Плотность насыщающей жидкости вычисляют по формуле

$$\rho_{ж} = \frac{(m_2 - m_3)0,998}{(m_1 - m_2)},$$

где m_1 – масса сухого пикнометра, г;

m_3 – масса пикнометра с водой, г;

m_2 – масса пикнометра с жидкостью, г.

6.4 Определение теплоты сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива

Определение теплоты сгорания твердого топлива происходит в соответствии с [31].

Сущность метода заключается в полном сжигании навески твердого топлива в атмосфере сжатого кислорода (3 МПа) в герметически закрытом металлическом сосуде – калориметрической бомбе, которую погружают в определенный объем (или массу) воды,

находящейся в калориметрическом сосуде. По увеличению температуры воды в калориметрическом сосуде устанавливают количество теплоты, выделившейся при сгорании топлива и вспомогательных веществ, а также при образовании водных растворов азотной и серной кислот в условиях испытания.

Прибор для определения теплоты сгорания называют **калориметрической установкой или калориметром.**

Определение высшей теплоты сгорания топлива методом сжигания в калориметрической бомбе состоит из двух отдельных процедур [31]:

- сжигание стандартного вещества (эталонной бензойной кислоты) для определения энергетического эквивалента калориметра (режим градуировки);

- сжигание навески топлива (рабочий режим).

Исправленный подъем температуры определяют, измеряя температуру воды в калориметрическом сосуде до, во время и после сжигания навески анализируемого вещества. Продолжительность и частота наблюдений зависят от типа калориметра.

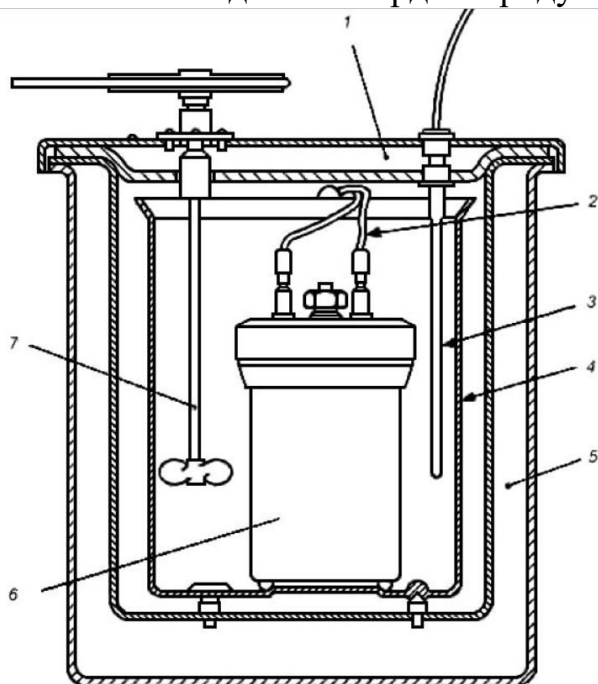
До начала определения в бомбу добавляют воду, чтобы еще до сжигания создать газовую среду, насыщенную водяными парами. Это способствует полной конденсации воды, которая образуется из водорода и влаги пробы (жидкая фаза продуктов сгорания).

Высшую теплоту сгорания при постоянном объеме вычисляют по исправленному подъему температуры и энергетическому эквиваленту калориметра с учетом выделения тепла при сгорании части запальной проволоки (и хлопчатобумажной нити), а также при образовании и растворении в воде азотной кислоты. При вычислении высшей теплоты сгорания вводят также поправку на теплоту образования водного раствора серной кислоты из диоксида серы и жидкой воды.

Высшую теплоту сгорания при постоянном давлении определяют расчетным путем, исходя из высшей теплоты сгорания при постоянном объеме – экспериментальной величины, получаемой при сжигании пробы в калориметрической бомбе (рисунок 6.6).

Бомба калориметрическая для сжигания в сборе представляет собой цилиндрический стакан с завинчивающейся крышкой из кислотоупорной нержавеющей стали, вместимостью 250-360 см³ [ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009) Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет высшей теплоты сгорания (с Поправкой)], выдерживающий давление, которое создается при сжигании навески топлива (до 10,8 МПа). В крышку бомбы вмонтированы клапаны для впуска и выпуска кислорода, а также

электроды для подводки тока к запальной проволоке, причем один электрод является одновременно газопроводящей трубкой, а второй - держателем для тигля с навеской. Конструкция бомбы позволяет без затруднений удалять из нее жидкие и твердые продукты сгорания.



1 – крышка термостата; 2 – контактные провода цепи зажигания; 3 – измеритель температуры; 4 – калориметрический сосуд; 5 – термостат; 6 – калориметрическая бомба; 7 – мешалка

Рисунок 6.6 – Калориметр классического типа с термостатом и бомбой для сжигания

Для расчета высшей теплоты сгорания при постоянном давлении требуются данные о содержании водорода, азота и кислорода в анализируемой пробе.

Низшую теплоту сгорания при постоянном объеме и при постоянном давлении определяют расчетным путем, исходя из высшей теплоты сгорания при постоянном объеме, полученной при испытании угля в калориметрической бомбе.

Для расчета низшей теплоты сгорания рабочего топлива при постоянном давлении требуются данные о содержании общей влаги, водорода, азота и кислорода в пробе.

Для расчета низшей теплоты сгорания рабочего топлива при постоянном объеме необходимы данные о содержании водорода и общей влаги в пробе.

6.5 Определение вязкости. Вискозиметры

В научной деятельности часто возникает необходимость определения коэффициента вязкости жидкости (вискозиметрия – это измерение вязкости).

Существует четыре способа определения значения вязкости жидкости:

1) Капиллярный метод. Для его проведения необходимо иметь два сосуда, соединенных стеклянным каналом небольшого диаметра известной длины. Также нужно знать значения давления в одном сосуде и в другом. Жидкость помещается в стеклянный канал, и за определенный промежуток времени она перетекает из одной колбы в другую (рисунок 6.6).

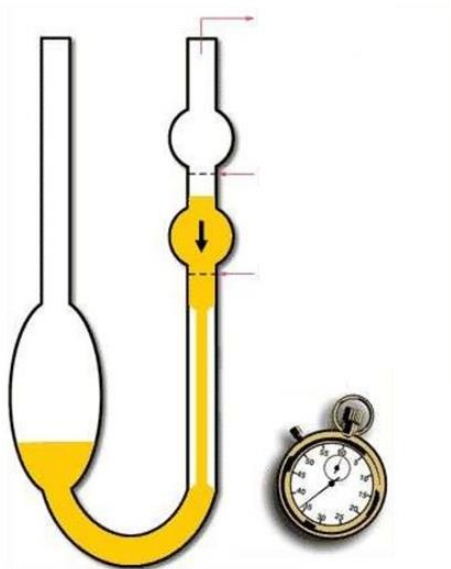


Рисунок 6.7 – Капиллярный вискозиметр

Дальнейшие подсчеты производятся с помощью формулы Пуазейля для нахождения значения коэффициента вязкости жидкости.

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8 \eta l},$$

где Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

l - длина трубы, м;
 r – радиус трубы, м;
 Δp – разность давлений на ее концах, Па.

2) Медицинский метод по Гессе. Чтобы рассчитать вязкость жидкости таким способом, необходимо иметь не одну, а две идентичные капиллярные установки 1 и 2 (рисунок 6.8). Один из капилляров имеет кран 3. Оба капилляра соединены с тройником 4, далее идет резиновая трубка 5. В один из капилляров помещают среду с заранее известным значением внутреннего трения, а в другую – исследуемую жидкость. Далее измеряют два значения времени и составляют пропорцию, по которой выходят на нужное число.

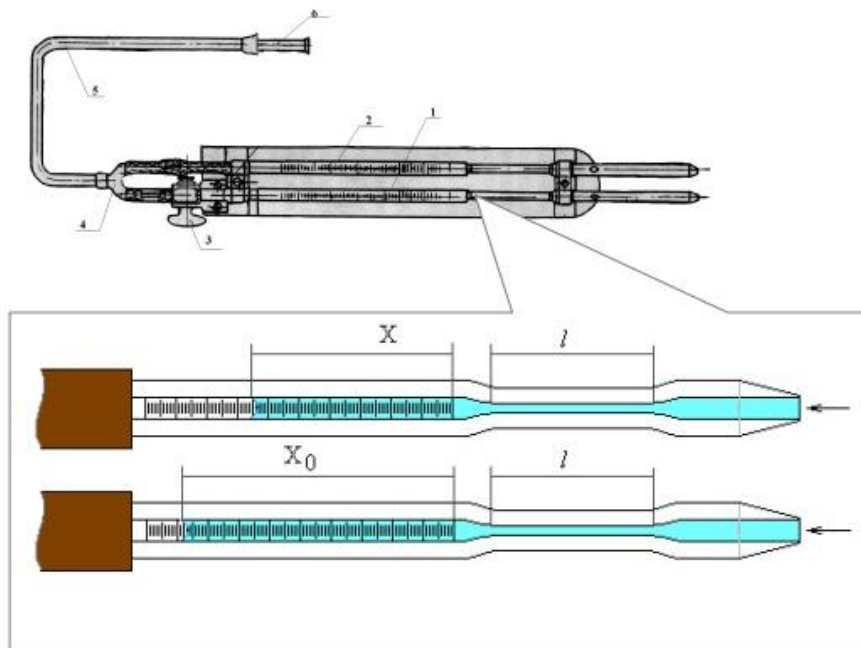


Рисунок 6.8 – Капиллярная установка по методу Гесса

3) Ротационный метод. Для его проведения необходимо иметь конструкцию из двух соосных цилиндров (рисунок 6.9). Это значит, что один из них должен быть внутри другого. В промежуток между ними заливают жидкость, а затем придают скорость внутреннему цилиндру. Эта угловая скорость также сообщается жидкости. Разница в силе момента позволяет вычислить вязкость среды.

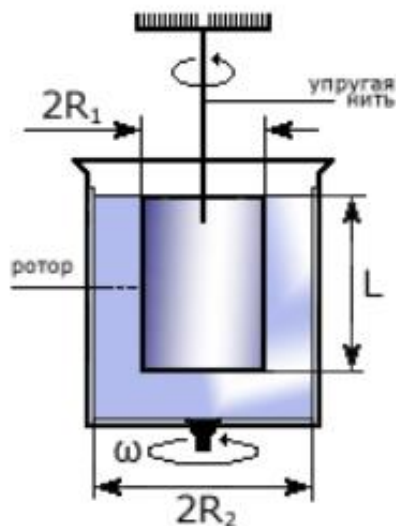


Рисунок 6.8 – Схема ротационного вискозиметра

4) Определение вязкости жидкости методом Стокса. Для проведения этого опыта необходимо иметь вискозиметр Гепплера, который представляет собой цилиндр, заполненный жидкостью (рисунок 6.9). Перед началом эксперимента делают две пометки на цилиндре и измеряют длину между ними. Затем берут шарик определенного радиуса R и опускают его в жидкую среду. Чтобы определить скорость его падения, находят время передвижения объекта от одной метки до другой. Зная скорость движения шарика, можно вычислить вязкость жидкости.

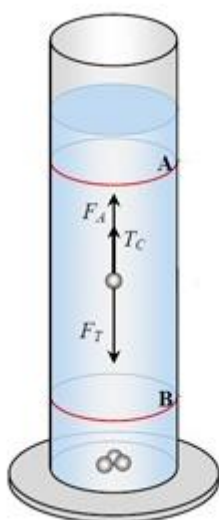


Рисунок 6.9 – Установка по определению вязкости методом Стокса

Контрольные вопросы

1. Измерение коэффициентов теплопроводности методом стационарного теплового потока (плоского слоя).
2. Измерение коэффициентов теплопроводности методом стационарного теплового потока (цилиндрического слоя).
3. Измерение коэффициентов теплопроводности жидкостей и газов.
4. Определение теплоты сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива.
5. Определение плотности твердых тел, жидкостей и газов.
6. Определение вязкости. Вискозиметры.

Тесты

1. Все стационарные методы измерения коэффициентов теплопроводности основаны на:

- A) пропускании электрического тока через исследуемую структуру;
- B) пропускании теплового потока через исследуемую структуру;
- C) пропускании магнитного потока через исследуемую структуру;
- E) пропускании светового потока через исследуемую структуру;
- E) пропускании ультрафиолетового потока через исследуемую структуру.

2. Наименьшая погрешность метода может составлять:

- A) около 5 %;
- B) около 8 %;
- C) около 10 %;
- E) около 12 %;
- E) около 15 %.

3. Коэффициент теплопроводности образца определяется по формуле:

- A) $\lambda = \frac{h}{R \cdot S}$;
- B) $\lambda = \frac{R}{h \cdot S}$;
- C) $\lambda = \frac{S}{R \cdot h}$;
- E) $\lambda = \frac{h}{R \cdot S^2}$;
- E) $\lambda = \frac{h^2}{R \cdot S}$.

4. Для повышения точности результатов исследования необходимо провести не менее:

- А) двух дублирующих опытов;
- В) трех дублирующих опытов;
- С) четырех дублирующих опытов;
- Е) пяти дублирующих опытов;
- Е) шести дублирующих опытов.

5. Выберите верный ответ: «Теплопроводность исследуемого материала можно вычислить, зная:

А) геометрические параметры цилиндрической стенки (радиусы r_1, r_2 , длину l), температуры внутренней и наружной поверхности t_1, t_2 и поток теплоты Q ;

В) геометрические параметры цилиндрической стенки (длину l), температуры внутренней и наружной поверхности t_1, t_2 и поток теплоты Q ;

С) геометрические параметры цилиндрической стенки (радиусы r_1, r_2), температуры внутренней и наружной поверхности t_1, t_2 и поток теплоты Q ;

Е) геометрические параметры цилиндрической стенки (радиусы r_1, r_2 , длину l), температуру внутренней поверхности t_1 и поток теплоты Q ;

Е) геометрические параметры цилиндрической стенки (радиусы r_1, r_2 , длину l), температуру наружной поверхности t_2 и поток теплоты Q .

6. В методе коаксиальных цилиндров теплопроводность жидкости или газа можно определить по формуле:

А) $\lambda = Q \frac{\ln(d_1/d_2)}{2\pi l (t_1 - t_2)}$;

В) $\lambda = Q \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi l (t_1 - t_2)}$;

С) $\lambda = Q \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi l (t_1 + t_2)}$;

Е) $\lambda = Q \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi (t_1 - t_2)}$;

Е) $\lambda = Q \frac{\ln(d_2/d_1)}{\pi l (t_1 - t_2)}$.

7. Основная трудность нестационарных методов состоит в том, что:

- А) сложно исключить тепловые потери;
- В) сложно реализовать условия, заложенные в теории метода;
- С) трудно придать телу необходимую форму;
- Е) сложности с созданием одномерного теплового потока;
- Е) сложности с созданием двумерного теплового потока.

8. Количество теплоты, выделившейся при сгорании топлива в калориметрической бомбе устанавливают:

- А) по увеличению объема воды в калориметрическом сосуде;
- В) по увеличению теплопроводности воды в калориметрическом сосуде;
- С) по увеличению теплоемкости воды в калориметрическом сосуде;
- Е) по увеличению температуры воды в калориметрическом сосуде;
- Е) по увеличению электропроводности воды в калориметрическом сосуде.

9. Формула Пуазейля для нахождения значения коэффициента вязкости жидкости:

- А) $Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta l}$;
- В) $Q = \frac{\pi r^2 \Delta p}{8\eta l}$;
- С) $Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{\eta l}$;
- Е) $Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{4\eta l}$;
- Е) $Q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{\eta l}$.

7 Основы теории планирования эксперимента

7.1 Основные понятия

Под *теорией планирования эксперимента* понимается наука о способах составления таких экспериментальных планов, которые позволяют извлекать наибольшее количество информации об объекте, а также о способах проведения эксперимента, обработки экспериментальных данных и использовании полученных результатов для оптимизации параметров исследуемых объектов [32].

В основе теории планирования эксперимента лежат методы математической статистики и методы решения экстремальных задач.

Выделяют две основные задачи теории планирования эксперимента. Первая задача – построение математической модели изучаемого явления, процесса, объекта. Вторая задача – оптимизация, т.е. нахождение такой комбинации влияющих независимых переменных, при которой выбранный показатель оптимальности принимает экстремальное значение.

В планировании эксперимента в зависимости от источника исходной информации математические модели эксперимента делятся на *статистические* (или эмпирические) и *аналитические* (или теоретические) модели. Характеристики этих моделей приведены на рисунке 7.1.

<i>Статистические модели</i>	<i>Теоретические модели</i>
<ul style="list-style-type: none">• это обширные и длительные исследования процессов и явлений• описываются математически сложно• позволяют достаточно точно представить процессы, связанные с функционированием объекта исследования	<ul style="list-style-type: none">• строятся на основе собранных и статистически обработанных данных• описываются полиномами той или иной степени• область применения ограничивается ближайшей окрестностью рабочих точек

Рисунок 7.1 – Математические модели

При проведении опытных исследований различают пассивный и активный эксперимент.

Суть методики проведения пассивного эксперимента заключается в проведении большой серии опытов, в ходе которых входная переменная варьируется в определенном промежутке и проводится обработка результатов измерений выходной переменной.

В отличие от пассивного эксперимента активный эксперимент организовывается и проводится по заранее составленному плану. Согласно плану эксперимента, необходимо определить оптимальные условия его проведения и оптимизировать сам ход исследования.

Выходную (зависимую) переменную в таком эксперименте называют функцией отклика, а входные (независимые) переменные именуется факторами.

Активный эксперимент характеризуется возможностью обработки его результатов методами регрессионного и корреляционного анализа. Достоинства активного эксперимента представлены на рисунке 7.2.



Рисунок 7.2 – Достоинства активного эксперимента

7.2 Модель объекта исследования

При описании объекта исследования часто называют «черным ящиком» — «объектом исследования» (рисунок 7.3).

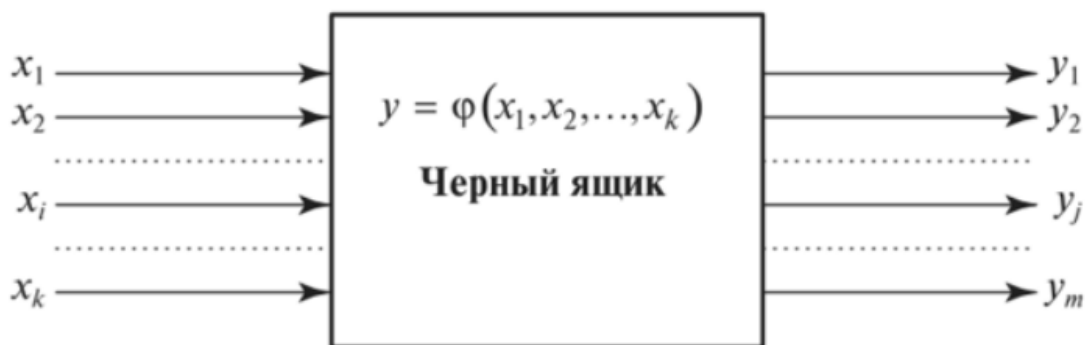


Рисунок 7.3 – Модель объекта исследования

Для проведения эксперимента необходимо иметь возможность влиять на поведение «черного ящика» (выходные параметры). Способы этого воздействия называются факторами эксперимента и на рисунке они обозначены буквой x . Иначе их еще называют входными параметрами.

Таким образом, в активном эксперименте имеются группы параметров:

- 1) входные параметры x_i , которые называются факторами эксперимента;
- 2) выходные параметры y_i , которые называются параметрами состояния.

Для описания объекта исследования в ходе планировании эксперимента применяются математические модели. В качестве математической модели используются уравнение, которое определяют связь между параметром состояния с факторами эксперимента. В общем виде такое уравнение имеет вид

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (7.1)$$

где φ – это целевая функция или функцией отклика;

x_1, x_2, \dots, x_n – факторы эксперимента, оказывающие влияние на ход процесса.

Функции отклика y в факторном пространстве x (x_1, x_2, \dots, x_n) геометрически представляется в виде поверхности отклика.

Если исследуется влияние на y лишь одного фактора x_i , то нахождение функции отклика достаточно простая задача (рисунок 7.4,

a). В результате опытов определяем значения y при разных значениях фактора x_1, x_2, \dots, x_n получаем график $y = f(x)$ (рисунок 7.4, B).

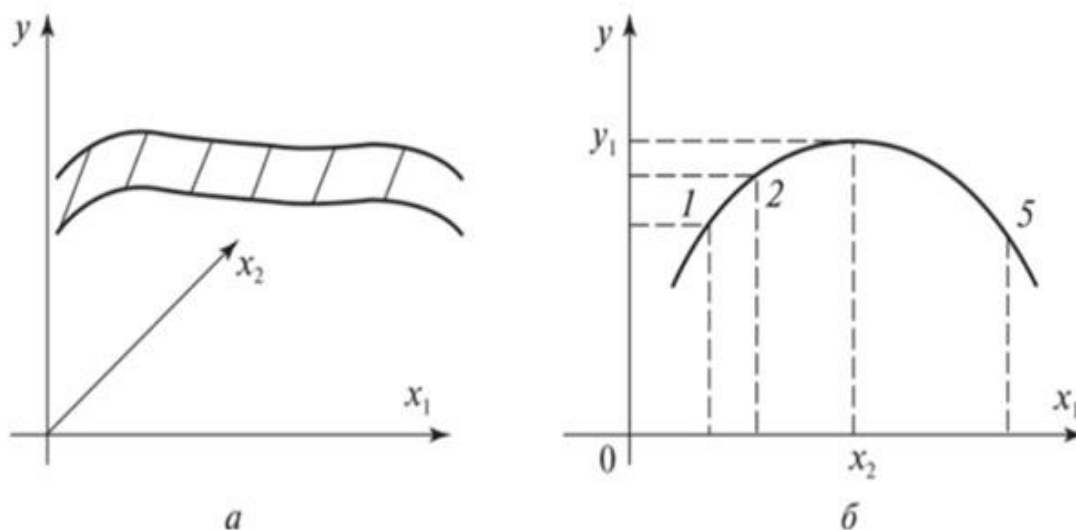


Рисунок 7.4 – Поверхности отклика однофакторного эксперимента

В случае наличия двух факторов необходимо провести несколько опытов при разных значениях этих факторов (рисунок 7.5).

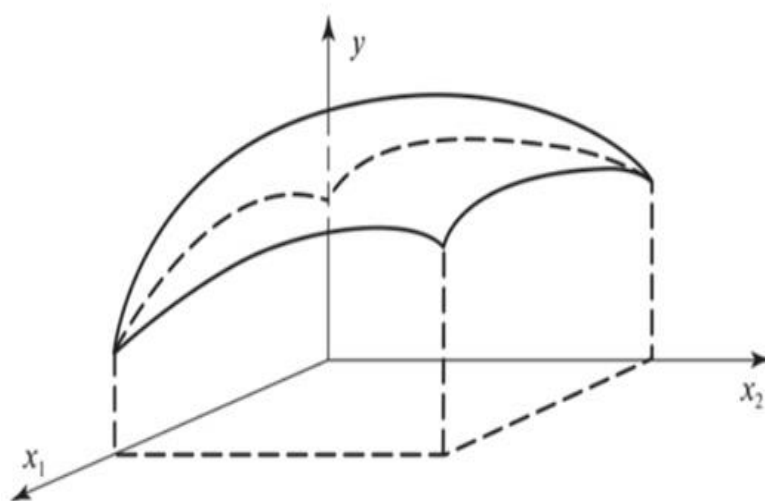


Рисунок 7.5 – Поверхности отклика двухфакторного эксперимента

В случае двухфакторного эксперимента чаще всего функция (7.1) представляет собой полином

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (7.2)$$

или

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2. \quad (7.3)$$

7.3 Постановка задачи регрессионного анализа

7.3.1 Задачи регрессионного анализа

Основной задачей обработки полученных экспериментальных данных является выявление количественной зависимости отклика объекта от его параметров и внешних воздействий.

Как известно, именно корреляционный анализ дает возможность установить степень взаимосвязи двух и более случайных величин. Вместе с тем, хотелось бы уметь предсказывать значение выходной величины по имеющимся значениям входных параметров. Такую возможность дает модель этой связи. Методы решения таких задач носят название «регрессионный анализ». Таким образом, основная задача корреляционного анализа – выявление и оценка связи между случайными величинами, основная задача регрессионного анализа – установление формы и изучение зависимости между случайными величинами (рисунок 7.6) [33].

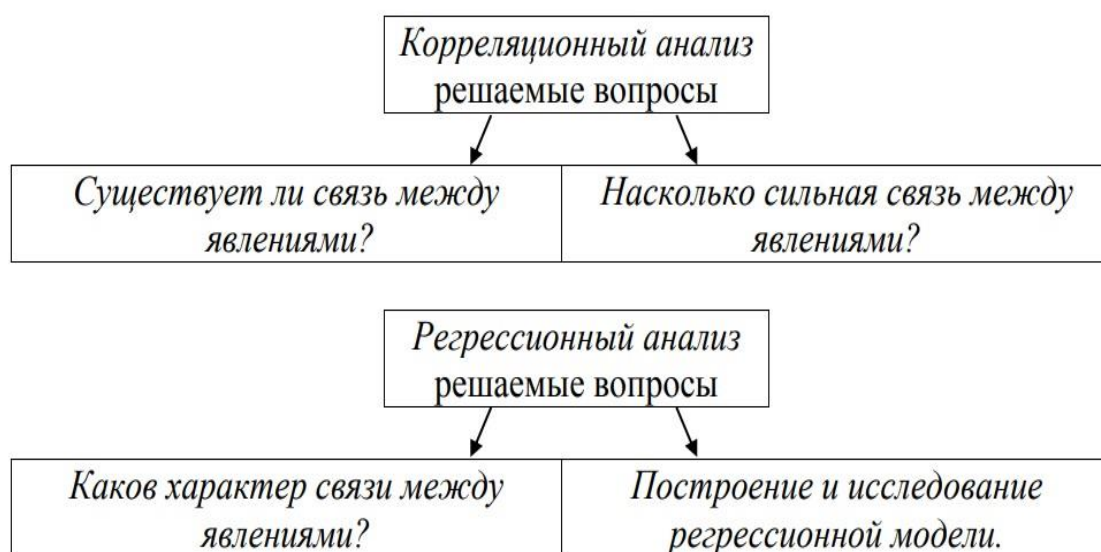


Рисунок 7.6 – Вопросы, решаемые корреляционным и регрессионным анализами

Постановка задачи регрессионного анализа формулируется следующим образом.

Имеется: некоторое множество результатов наблюдений. Некоторый столбец из этого множества x_1 соответствует показателю, для которого необходимо выявить зависимость с входными параметрами объекта и внешними параметрами среды. Эти параметры представлены в имеющемся множестве оставшимися столбцами x_2, x_3, \dots, x_n . Требуется: установить количественную взаимосвязь между показателем и факторами. Задача регрессионного анализа понимается как задача выявления такой функциональной зависимости $y = f(x_2, x_3, \dots, x_n)$, которая наилучшим образом описывает имеющиеся экспериментальные данные.

Функция $f(x_2, x_3, \dots, x_n)$, описывающая зависимость показателя от параметров, называется **уравнением (функцией) регрессии**.

Решение задачи регрессионного анализа целесообразно разбить на несколько этапов:

- 1) предварительная обработка экспериментальных данных;
- 2) выбор вида уравнений регрессии;
- 3) вычисление коэффициентов уравнения регрессии;
- 4) проверка адекватности построенной функции результатам наблюдений.

К функции f выдвигается ряд требований:

- 1) она должна быть такой, чтобы ошибка была минимальна;
- 2) функция должна обладать достаточно «гладкой», т.е. «незначительные» изменения значений аргументов должны вызывать «незначительные» изменения значений функции.

Указанным требованиям с достаточной степенью удовлетворяет полиномиальная функция. Она проста и удобна для практического использования

$$y = a_0 + \sum_{j=2}^m a_j x_j + \sum_{j=2}^{m-1} \sum_{k=j+1}^m a_{jk} x_j x_k + \sum_{j=2}^m a_{jj} x_j^2 + \dots + \varepsilon. \quad (7.4)$$

В этом случае задача выбора вида уравнения регрессии сводится к задаче выбора значений коэффициентов $a_0, a_j, a_{jk}, \dots, a_{jj}, \dots$

7.3.1 Вычисление оценок коэффициентов линейной регрессии методом наименьших квадратов.

Выбор коэффициентов регрессии должен отвечать требованию минимизации ошибки аппроксимации. В качестве оценки ошибок аппроксимации достаточно часто используют среднеквадратическую ошибку. Существует метод оценки коэффициентов уравнений регрессии, который основан на такой оценке. Этот метод называется методом наименьших квадратов (МНК). Данному методу характерно следующее:

1) МНК позволяет получить оценки максимального правдоподобия искомых коэффициентов регрессии при нормальном распределении факторов;

2) МНК можно применять и при любом другом распределении факторов эксперимента.

3) в основе МНК лежат следующие положения:

- значения величин ошибок и факторов независимы;
- математическое ожидание ошибки должно быть равно нулю;
- выборочная оценка дисперсии ошибки должна быть минимальна.

7.4 Этапы планирования эксперимента

На первом этапе планирования эксперимента необходимо выбрать область определения факторов эксперимента x_i . Область определения факторов выбирается исходя из имеющейся информации. Значения x_i называются уровнями управляющего параметра [34]. В случае линейной модели достаточно выбрать основной уровень и интервал варьирования управляющего параметра x_i .

Для линейной модели интервал варьирования находится следующим образом

$$I = \frac{x_{max} - x_{min}}{2},$$

а основной (нулевой) уровень определяется среднеарифметическое

$$x_0 = \frac{x_{max} + x_{min}}{2}.$$

На втором этапе составляется матрица планирования эксперимента. Рассмотрим полный факторный эксперимент на примере линейной модели.

Если число факторов k , то для проведения полного факторного эксперимента нужно $N = 2^k$ опытов, где 2 – число уровней, которого достаточно для построения линейной модели. Для проведения этого эксперимента составляется матрица планирования (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Матрица планирования эксперимента при k=2

Номер опыта	x_1	x_2	у
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Для большего числа факторов ($k > 2$) необходимо разработать правила построения таких матриц. Например, при появлении фактора x_3 в таблице 7.1 произойдут следующие изменения (таблица 7.2): при появлении нового столбца каждая комбинация уровней исходной таблицы проявится дважды.

Таблица 7.2 – Матрица планирования эксперимента при k>2

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	у
1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	+1	y_2
3	-1	+1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	y_4
5	+1	+1	-1	y_5
6	+1	+1	-1	y_6
7	+1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	-1	y_8

Это не единственный способ расширения матрицы планирования. Используют также перемножение столбцов, правило чередования знаков.

Расчет коэффициентов регрессии ведется по следующим формулам

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j x_i^j, \quad i = 0, \dots, n$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j x_i^j \dots x_\mu^j, \quad i, \mu = 1, \dots, n$$

где y_j – значение среднего выхода процесса в j-ом варианте;

X_j^j – значение фактора в j -ом варианте.

Завершающим этапом является проверка значимости коэффициентов регрессии и адекватности модели.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии необходимо найти их выборочную дисперсию $S^2[b]$. Значимость коэффициентов регрессии определяется по неравенству

$$b > S[b] \cdot t_p(f),$$

где $t_p(f)$ – коэффициент Стьюдента для заданной достоверности p и числа степеней свободы $f = (v-1) \cdot N$.

Для проверки адекватности полученной модели необходимо провести оценку дисперсий ошибок наблюдений, которую вычислим с помощью суммы квадратов ошибок (критерий Фишера). Уравнение регрессии считается адекватным, если оно корректно описывает результаты эксперимента. Это проверяется следующим условием: $F < F_{кр}$, где $F_{кр}$ – табличное значение критерия Фишера для принятого уровня значимости и числа степеней свободы. Если модель не адекватна, тогда необходимо вернуться к первому этапу и выбрать более сложную модель. необходимо или повторить цикл экспериментов с меньшим интервалом варьирования факторов. [35].

Если гипотеза об адекватности модели верна, то можно утверждать, что математическая модель исследуемого процесса может быть достаточно точно описана с помощью интерполяционной формулы (7.4).

Контрольные вопросы

1. Какие задачи решает корреляционный анализ?
2. Какие задачи решает регрессионный анализ?
3. Как построить уравнения линейной регрессии?
4. Назовите этапы проведения регрессионного анализа.
5. Как определяется интервал варьирования факторов эксперимента?
6. Каким образом строится матрица планирования эксперимента?
7. Как проводится оценка значимости коэффициентов регрессии?
8. Каким образом проверяется адекватность выбранной математической модели?

9. В чем заключается субъективность процесса регрессионного анализа?

10. Как определяется коэффициент Стьюдента?

11. Как определяется количество степеней свободы?

12. Как рассчитываются коэффициенты регрессии?

Тесты

1. В основе теории планирования эксперимента лежат:

А) методы математического анализа;

В) методы математической статистики;

С) численные методы;

Д) методы теории вероятности;

Е) методы линейной алгебры.

2. Что характерно для пассивного эксперимента?

А) организовывается и проводится по заранее составленному плану;

В) возможность обработки результатов методами регрессионного анализа;

С) возможность обработки результатов методами корреляционного анализа;

Д) варьируется входная переменная и проводится обработка результатов измерений выходной переменной;

Е) возможность определения количества опытов.

3. Основная задача корреляционного анализа:

А) установление формы зависимости между случайными величинами;

В) изучение зависимости между случайными величинами;

С) выявление и оценка связи между случайными величинами;

Д) предварительная обработка экспериментальных данных;

Е) проверка адекватности построенной функции.

4. Основная задача регрессионного анализа:

А) установление формы и изучение зависимости между случайными величинами;

В) выбор вида уравнений регрессии;

С) выявление и оценка связи между случайными величинами;

Д) предварительная обработка экспериментальных данных;

Е) проверка адекватности построенной функции.

5. Требованиям к функции регрессии с достаточной степенью удовлетворяет:

- A) полиномиальная функция;
- B) тригонометрическая функция;
- C) линейная функция;
- D) экспоненциальная функция;
- E) степенная функция.

6. На втором этапе процесса регрессионного анализа:

- A) обрабатываются результаты эксперимента;
- B) выбирается область определения факторов эксперимента;
- C) проверяется значимость коэффициентов регрессии;
- D) проверяется адекватность полученной модели;
- E) составляется матрица планирования эксперимента.

Литература

- 1 Спирин Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : учебное пособие / Н. А. Спирин [и др.]; под ред. Н. А. Спирина. – УПИ : – Екатеринбург, 2003. – 260 с.
- 2 ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М., 1980.
- 3 Методология научных исследований : учеб. пособие / А.Б. Пономарев, Э.А. Пикулева. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 186 с.
- 4 Экспериментальные методы исследований [Электронный ресурс] - <http://repo.ssau.ru/bitstream/>
- 5 Барвинок В. А. Методы экспериментальных исследований технологических процессов в производстве летательных аппаратов [Электронный ресурс] : электрон, учеб. пособие. – Самара : СГФУ им. С. П. Королева, 2012.
- 6 Ляшков В. И. Инженерный эксперимент : учебное пособие / сост. В. И. Ляшков. – Тамбов : ТГТУ, 2014. – 81 с.
- 7 Ганжа О. А., Соловьева Т. В. Основы научных исследований [Электронный ресурс] : учебное пособие. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2013,
- 8 Морозов В. В., Сobotковский Б. Е., Шейнман И. Л. Методы обработки результатов физического эксперимента : учебное пособие. – СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 62 с.
- 9 Пазушкина О. В. Основы метрологии, стандартизации, сертификации и контроля качества : учебное пособие / О. В. Пазушкина. – Ульяновск : УлГТУ, 2015. – 148 с.
- 10 Хан С. Г. Метрология и измерения. Конспект лекций (для студентов всех форм обучения специальности В5070200 – Автоматизация и управление). – Алматы : АУЭС, 2010. – 66 с.
- 11 Неверов А. Н. Основные понятия метрологии : учебно-методическое пособие по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация» / А. Н. Неверов. – М. : МАДИ, 2021. – 76 с.
- 12 РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения.
- 13 Комбаев К. К. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для студентов специальностей 5В071200–Машиностроение, 5В090100–Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта, 5В073100–Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды, 5В071300–Транспорт, транспортная техника и технология, 5В071600–Приборостроение, 5В072400–Технологические

машины и оборудование / К. К. Комбаев.
– Усть-Каменогорск, 2015. – 129 с.

14 Рубцова С. В., Охрименко О. И., Алейникова О. А. Основы теории погрешностей : учебно-метод. пособие. – Шахты : ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2019. – 66 с.

15 Степанова Е. А. Основы обработки результатов измерений : учебное пособие / Е. А. Степанова, Н. А. Скулкина, А. С. Волегов ; [под общ. ред. Е. А. Степановой]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 95 с.

16 Сергеев В. Основы метрологии и средства измерения : Учебник / В. Сергеев, В. Юрченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Астана : Фолиант, 2016. – 192 с.

17 Трофимова Е. А. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / Е. А. Трофимова, Н. В. Кисляк, Д. В. Гилёв [под общ. ред. Е. А. Трофимовой]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 160 с.

18 Дмитриева М. В. Теория вероятностей и математическая статистика. Методические указания для студентов экологического факультета. – Ульяновск : УлГУ, 2011.

19 Чен Б. Б. и др. Основы теории погрешностей измерений. Автоматизированная обработка результатов эксперимента : учебное пособие / Б. Б. Чен, П. В. Козлов, Г. С. Денисов. – Б. : КРСУ, 2005. – 141 с.

20 Московский С. Б. Основы статистической обработки результатов измерений : уч.-ме. пособие / С. Б. Московский, А. Н. Сергеев. – Ярославль : ЯрГУ, 2018. – 68 с.

21 Дмитриева М. В. Теория вероятностей и математическая статистика. Методические указания для студентов экологического факультета. – Ульяновск : УлГУ, 2011.

22 Джаманкулова Н. О. Теплотехнические измерения и контроль : учебное пособие. – Алматы : АУЭС, 2009. – 103 с.

23 Устройство манометрических термометров: принцип действия, классификация. [Электронный ресурс] - <https://thermarket.ru/blog/ustroistvo-manometrisheskih-termometrov>

24 Попов С. Г. Измерение воздушных потоков. – М. : Гостехиздат, 1947. – 296 с.

25 Средства измерения расхода и количества. [Электронный ресурс] - <http://www.5ka.ru/69/16577/1.html>

26 Средства измерения, контроля и регулирования технологического процесса. [Электронный ресурс] - <https://www.tdteplocontrol.ru/info/articles/manometry-elektricheskie>

27 Теплотехнические обследования. [Электронный ресурс] - <https://obsledovatel.ru/index.php/statyi/303-teplotehneskie-obsledovanija>

28 Коротких А. Г. Теплопроводность материалов : учебное пособие. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.

29 Пелецкий В. Э., Тимрот Д. Л., Воскресенский В. Ю. Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводимости твёрдых тел. – М. : Энергия, 1971. – 192 с.

30 ГОСТ 2211-2020. Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения истинной плотности.

31 ГОСТ 147-2013 (ISO 1928:2009). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания.

32 Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие / Н. А. Спирина, В. В. Лавров, Л. А. Зайнуллин, А. Р. Бондин, А. А. Бурыкин; Под общ. ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург : ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.

33 Корреляционный анализ и регрессионный анализ данных. [Электронный ресурс] - <https://michael983.narod.ru/t/11.htm>

34 Шкляр В. Н. Планирование эксперимента и обработка результатов. Конспект лекций для магистров по направлению 220200 «Автоматизация и управление в технических (мехатронных) системах». – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 90 с.

35 Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М. : Мир, 1977. – 552 с.

Содержание

	Введение	3
1	Эксперимент как предмет исследования	4
1.1	Понятие эксперимента	4
1.2	Виды экспериментов	5
1.3	Основные характеристики эксперимента	9
1.4	Организация проведения эксперимента	11
2	Общие сведения об измерениях и средствах измерений	17
2.1	Виды, методы и средства измерений	17
2.1.1	Основные понятия, используемые при проведении измерений	17
2.1.2	Классификация видов измерений	18
2.2	Средства измерений	21
2.3	Метрологические свойства и характеристики средств измерений	26
3	Оценка и учет погрешностей при технических измерениях	32
3.1	Общие сведения из теории погрешности измерений	32
3.2	Классификация погрешностей измерений	34
3.3	Принципы оценивания погрешностей	40
3.4	Обработка результатов измерений. Доверительный интервал	43
3.4.1	Оценка погрешности при прямых измерениях	43
4	Элементы теории вероятностей и математической статистики	51
4.1	Генеральная совокупность и выборка	51
4.2	Статистическое оценивание. Состоятельность, несмещенность и эффективность оценок	52
5	Теплотехнические измерения и приборы	61
5.1	Основные способы измерения температуры. Средства измерения температуры контактным способом	61
5.1.1	Основные способы определения температуры	61
5.1.2	Средства измерения температуры контактным способом	62
5.2	Измерение скорости. Измерение расхода	65
5.2.1	Измерение скорости	65
5.2.2	Измерение расхода	68
5.3	Измерение давления	70
5.3.1	Жидкостные манометры	71
5.3.2	Пружинные манометры	73

5.3.2	Электрические манометры	73
5.4	Методы измерения и датчики тепловых потоков	74
5.4.1	Энтальпийные методы	74
5.4.2	Методы, основанные на решении прямой задачи теплопроводности	75
6	Экспериментальные исследования теплофизических свойств веществ	81
6.1	Измерение коэффициентов теплопроводности веществ методом стационарного теплового потока	81
6.1.1	Теплопроводность твёрдых материалов	81
6.1.2	Теплопроводность жидкостей и газов	86
6.2	Измерения коэффициента теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости материалов, основанные на нестационарном тепловом режиме	88
6.3	Определение плотности твердых тел, жидкостей и газов	88
6.3.1	Определение плотности жидкостей	88
6.3.2	Определение плотности твердого тела	90
6.4	Определение теплоты сгорания твердого, жидкого и газообразного топлива	91
6.5	Определение вязкости. Вискозиметры	94
7	Основы теории планирования эксперимента	100
7.1	Основные понятия	100
7.2	Модель объекта исследования	102
7.3	Постановка задачи регрессионного анализа	104
7.4	Этапы планирования эксперимента	106
	Литература	110

А. К. Кинжибекова

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Учебное пособие

Технический редактор А. Р. Омарова
Ответственный секретарь Ж. К. Сапенова

Подписано в печать 07.10.2024 г.
Гарнитура Times.
Формат 29,7 x 42 ¼. Бумага офсетная.
Усл.печ.л.6,6 Тираж 300 экз.
Заказ № 4284

Toraighyrov University
140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64