

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
КАСПИЙСКИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГИИ И
ИНЖИНИРИНГА ИМ. Ш. ЕСЕНОВА
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА
КАФЕДРА «ЭНЕРГЕТИКА»**

Савельев В.Н.

**ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

(учебное пособие)

Актау - 2011

УДК 621.4 (075.8)
ББК 31.3 я73
Т 32

Рецензенты: д.т.н., профессор , зав.каф. «Строительство»
д.т.н., профессор, советник ген. директора
АО «НИПИМунайгаз» по науке
к.т.н., руководитель группы хим. контроля
отдела эксплуатации и ремонта РУ БН-350

Сугиров Ж.У.
Туркпенбаева Б.Ж.
Быстрицкий О.В.

Составители: Савельев В.Н.

Т 32. «Теория и техника теплотехнического эксперимента» :-Учебное пособие - Актау:
КГУТиИ, 2011.-64с.

ISBN 978-601-7276-62-1

Курс «Теория и техника теплотехнического эксперимента» является обязательным предметом для магистрантов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Теплоэнергетика».

В учебном пособии рассматриваются основы метрологии и измерительной техники, методы планирования и проведения научных исследований, приведены методы экспериментального изучения процессов тепло- и массообмена, теплотехнических свойств веществ и методы их экспериментальных исследований.

УДК 621.4 (075.8)
ББК 31.3 я73

Печатается по решению Учебно-методического Совета Каспийского Государственного Университета Технологии и Инжиниринга им. Ш. Есенова

© Каспийский Государственный Университет
Технологии и Инжиниринга им. Ш. Есенова,
2011

ВВЕДЕНИЕ.

Развитие науки и техники в XX столетии характерно не только большими темпами, но и такими яркими достижениями, как открытие и практическое использование ядерной энергии и лазерного излучения, выход человека в космическое пространство, создание электронно-вычислительных машин и телевидения. Это развитие представляет собой не просто научно-технический прогресс, а научно-техническую революцию. /1;2/

Научно-техническая революция стала возможной благодаря тесной связи науки и техники, их взаимному влиянию и обогащению. Фундаментальные научные открытия быстро становятся основой технических систем, машин и аппаратов. При этом реализация научных идей сопровождается выполнением большого числа прикладных исследований, которые проводятся не только в исследовательских институтах, но и в конструкторских бюро и на производстве.

Цель научных исследований в области техники — выявить объективные закономерности, определяющие протекание рабочих процессов в машинах и аппаратах, изучить физические и физико-химические явления, из которых состоят эти процессы, эффективно использовать полученные научные результаты для создания разрабатываемой конструкции, оптимальной с точки зрения экономичности, металлоемкости, ресурса эксплуатации или какого-либо другого важного качества.

Различают теоретические и экспериментальные исследования. Такое подразделение в наше время становится все более условным, так как в большинстве теоретических исследований привлекаются экспериментальные результаты, а при анализе и обобщении результатов эксперимента используются теоретические концепции. Результаты теоретического исследования обладают большей общностью, чем закономерности, выявленные экспериментально. Но при теоретическом исследовании изучается не само явление, а только его математическая модель, которая с той или иной степенью полноты отражает основные свойства изучаемого явления. Чем полнее и точнее модель описывает изучаемое явление, тем она сложнее и тем труднее решить уравнения, которые эту модель отражают. Поэтому в теоретических исследованиях часто используются упрощенные модели, расширяя круг доступных для теоретического решения задач, и при этом сужая область возможного использования полученных результатов.

Классический путь теоретического исследования физического явления состоит в том, что с помощью наблюдений и построенных на основе их гипотез устанавливаются основные законы, управляющие явлением. При этом привлекаются и известные к настоящему времени законы (например, закон сохранения энергии). Строится физическая модель явления, и на ее основе составляется система уравнений, описывающая изучаемое явление. Устанавливаются важные для изучаемого явления краевые условия (физические свойства тел, форма системы, в которой протекает явление, особенности протекания процессов на границах, начальное состояние системы). Система дифференциальных уравнений вместе с краевыми условиями представляет собой математическую формулировку задачи или математическую модель, которая подвергается теоретическому исследованию.

Иногда математическая модель оказывается незамкнутой. В этом случае при решении задачи приходится использовать дополнительные гипотезы или выявленные опытным путем связи.

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений после согласования его с краевыми условиями задачи приводит к расчетным

соотношениям, отражающим зависимость основных параметров явления от определяющих его факторов. Однако трудности математического характера ограничивают возможность получения аналитического решения, поэтому многие физические задачи, имеющие математическую формулировку, не решены пока аналитическим путем.

Возможен и другой путь решения систем дифференциальных уравнений — численный метод. Этот путь исследования также относится к категории теоретических, хотя и называется математическим экспериментом. Численное решение дифференциальных уравнений выполняется с помощью ЭВМ. При этом краевые условия задаются в виде чисел, а не в виде символов или уравнений, как это делается при аналитическом методе решения. Поэтому получаемое численным путем решение характеризует только одно из многих состояний системы или процессов в ней (при конкретных краевых условиях). Изменяя численные значения параметров, входящих в краевые условия, можно выявить влияние на изучаемое явление различных факторов. Следует заметить, что разработка методов численного решения сложной системы дифференциальных уравнений представляет собой самостоятельную научную работу, а реализация этих методов на ЭВМ связана с затратой значительного времени.

Для исследования физических явлений применяется также метод аналогий. В природе существуют явления, имеющие различную физическую сущность, но одинаковое математическое описание. Такие явления называют аналогичными. Аналогичными, например, являются процессы передачи тепла и электричества через твердое тело. Существует аналогия и между некоторыми другими физическими явлениями, но наиболее широко используется аналогия между электрическими и другими явлениями, так как она позволяет достаточно просто с помощью аналоговых устройств или машин с электрическими схемами получить информацию об исследуемом физическом процессе. Здесь математические уравнения, описывающие физические процессы, решаются с помощью электрических моделей. Поэтому метод аналогий объединяет в себе теоретическую постановку задачи с экспериментальным методом ее решения.

При использовании метода аналогий, так же как и при численном методе решения задач, удастся получить только дискретную информацию об изучаемом явлении при конкретных краевых условиях задачи.

Исследование элементарного явления или совокупности явлений, составляющих рабочий процесс в машине или аппарате или какую-либо стадию этого процесса, можно осуществить также с помощью теплотехнического эксперимента. Такой эксперимент выполняется на специально созданной для этих целей экспериментальной установке, рабочий участок которой устроен так, что позволяет изменять и измерять важные для процесса параметры. Иногда в качестве рабочего участка используется элемент машины или аппарата (например, активная зона ядерного реактора, камера сгорания газотурбинного двигателя).

В теплотехническом эксперименте исследованию подвергается само явление, протекающее в машине или аппарате, но чаще на экспериментальном участке воспроизводится только часть процессов, характеризующих явление. Например, при исследовании процессов теплообмена в активной зоне ядерного реактора на соответствующем экспериментальном стенде процесс тепловыделения в ядерном топливе моделируют тепловыделением в электрическом нагревателе. В этом случае погрешности получаемых результатов будут обусловлены отличием физической модели, реализованной в экспериментальном участке, от реального явления, а также точностью измерений.

Экспериментальные исследования существенно дороже теоретических, но они обычно позволяют получить конкретную и надежную информацию за достаточно короткое время. Теоретические методы пригодны для ограниченного круга задач, результаты теоретических исследований подвергаются экспериментальной проверке (когда это возможно). Вместе с тем есть проблемы, которые в настоящее время можно решить только теоретическим путем (например, исследование теплофизических свойств газов при очень высокой температуре).

При экспериментальном исследовании обычно выявляется зависимость основных характерных параметров явления от многих факторов. При достаточно широком диапазоне изменения этих факторов возникает необходимость проведения большого числа опытов при различном их сочетании. Математические методы планирования и анализа эксперимента позволяют выбрать для исследования минимальное число режимов, обеспечивающих получение надежной информации об изучаемом явлении.

Результаты экспериментального исследования после их обработки дают информацию о поведении важнейших характеристик системы при различном сочетании влияющих факторов или краевых условий (например, зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости жидкости, ее физических свойств и размеров системы). Обработка этих результатов на основе теории подобия или теории локального моделирования с последующей корреляцией обобщенных параметров (чисел подобия) позволяет получить зависимости, пригодные не только для исследованных режимов, но и для режимов, подобных изученным. Такая обработка расширяет область применения полученных результатов.

Полученные опытным путем данные имеют такой же частный характер, как и данные, полученные численным путем в результате математического эксперимента и на основе метода аналогии. Поэтому рассмотренные выше методы математического планирования эксперимента и обобщения опытных данных применимы также при численном и аналоговом методах исследования различных тепловых или физических явлений.

Закономерности явлений, определяющие рабочий процесс машины или аппарата, которые выявлены на основе теоретических или экспериментальных исследований, могут быть использованы для оптимизации конструктивных и режимных параметров разрабатываемых реальных аппаратов. Наивыгоднейшее сочетание параметров может быть найдено и экспериментальным путем на основе теории оптимального планирования эксперимента. Для отыскания экстремума критерия оптимальности конструкции разработан ряд методов (например, симплексный метод, метод наискорейшего спуска и др.), которые реализуются с помощью ЭВМ.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ.

1.1 Основные понятия метрологии

Метрология - наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. /3;4/

Единство измерений - такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Точность измерений характеризуется близостью их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Раздел метрологии, включающий общие правила, требования и нормы, нуждающиеся в государственной регламентации и контроле, называется законодательной метрологией.

Одним из важных направлений законодательной метрологии является разработка государственных и отраслевых стандартов (ГОСТов и ОСТов).

Измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Основные элементы процесса измерения: объект измерения, измеряемая величина, средства измерения, принцип измерений, метод измерений, условия измерений, результат измерений, погрешность измерения; (субъект измерения) человек - оператор, выполняющий измерения.

Объект измерения - это сложное, многогранное явление или процесс (например, электрические колебания на выходе автогенератора), характеризующийся множеством отдельных физических параметров, таких как: (амплитудой, частотой, фазой, формой, скважностью и т.д.).

Интересующий нас и подлежащий измерению один из этих параметров называется измеряемой физической величиной (например, частота колебаний автогенератора).

Средства измерений - это техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства (например, частотомер).

Установление номинальных значений и границ допускаемых отклонений реальных метрологических характеристик средств измерений от их номинальных значений - нормирование метрологических характеристик.

Принцип измерений - это совокупность физических явлений, на которых основано измерение (например, резонансный принцип измерения частоты, при настройке параллельного измерительного контура частотомера на частоту колебаний автогенератора наступает резонанс (увеличение) токов в контуре, что регистрируется максимальным отклонением стрелки амперметра).

Метод измерений представляет собой совокупность приемов использования принципов и средств измерений

Методика измерений в отличие от метода включает в себя детально разработанный порядок процесса измерений с использованием конкретных методов и средств измерений.

Методика: подать на вход " X " частоту f_x , на вход " Y " - f_y .

Условия измерений - это совокупность побочных физических явлений, влияющих на средства измерений или результат измерений (например, температура и влажность, атмосферное давление окружающей среды, вибрация, внешние электрические и магнитные поля и т.п.). Например: проведение очень тонких измерений в специально

экранированной от магнитных и электрических полей комнате. Влияние этих факторов на средства измерений должно быть изучено, учтено или, по возможности, исключено.

Результат измерений - значение физической величины, найденное путем ее измерения. Результат измерения может быть получен в процессе одного наблюдения или при обработке результатов нескольких наблюдений.

Под наблюдением понимают экспериментальную операцию, при которой получают одно числовое значение физической величины. Как бы тщательно ни проводилось измерение, его результат будет содержать некоторую неточность, которая характеризуется погрешностью.

Погрешность измерения - это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Под истинным значением понимают такое значение физической величины, которая идеальным образом отражала бы в качественном и количественном отношении соответствующее свойство объекта.

Таким образом, в метрологии приняты два важных постулата: о существовании истинного значения и неизбежности погрешностей.

(Лат. postulatum - допущение, не отличающееся самоочевидностью, но все же принимаемое в данной науке за исходное без доказательств..)

Греч. axioma - самоочевидная истина, не требующая доказательств, лежащая в основе доказательств других положений (теорем) научной теории.)

Поскольку определение истинного значения недостижимо, при оценке погрешностей вместо него используют действительное значение.

Действительное значение измеряемой физической величины - значение найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. За Д.З. принимается мат. ожидание или ср. арифм. большого числа измерений одной и той же величины.

Точность измерений характеризует качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению.

Кроме того, качество измерений характеризуется следующими понятиями:

правильность измерений - отражает близость к нулю систематической погрешности (т.е. таких погрешностей, которые остаются постоянными или закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины);

сходимость измерений - отражает близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях;

воспроизводимость измерений - отражает близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в разное время, в разных местах, разными методами и средствами).

В измерительном процессе человек - оператор (субъект измерения) с его психофизическими свойствами должен рассматриваться с учетом его субъективного восприятия и преобразования измерительной информации (опыта, уровня подготовка, аккуратности выполнения измерительных операций и т.п. факторов).

1.2 Классификация измерений.

Виды измерений. По способу нахождения числового значения физической величины измерения подразделяются на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямые измерения - измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (например, измерение тока амперметром путем отсчета значения величины по шкале прибора).

Косвенные измерения - измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой искомой величиной и другими величинами, определяемыми прямым измерением. (Например, определение значения

определения резистора $R = \frac{U}{I}$ "методом амперметра и вольтметра" по измеренным значениям напряжения U тока I). Скорости $V = \frac{S}{t}$.

Совокупные измерения - одновременные измерения несколько одноименных величин, при которых искомое значение величин находят решением системы уравнений, составленных из результатов различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения - производимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных (различных) величин для нахождения зависимости между ними. Число уравнений должно быть равно числу подлежащих определению величин

Методы измерений. Различают два метода измерения: непосредственной оценки и сравнения с мерой.

Метод непосредственной оценки - метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, заранее градуированного в единицах измеряемой физической величины. Поскольку данный метод прост, он и наиболее распространен, хотя точность его не высока.

Метод сравнения с мерой - метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод по сравнению с методом непосредственной оценки более точен, но более сложен.

Разновидности метода сравнения имеют следующие модификации: противопоставления, дифференциальный, нулевой, замещения, совпадения.

Метод противопоставления - метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействует на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами. Метод применяют при измерении ЭДС, напряжения, тока, частоты, параметров элементов схемы. Характерным является наличие двух источников энергии.

Дифференциальный метод - метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. (дифманометры)

Точность метода возрастает с уменьшением разности между значениями сравниваемых величин. Метод применяют при измерении параметров цепей (сопротивления, индуктивности, емкости), напряжения и др. (Пример: приборы с использованием компараторов и т.д.).

Разновидность этого метода - нулевой метод - метод сравнения с мерой, в котором результатирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводит до нуля (мостовые моторы).

Метод замещения - метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод замещения часто применяют при измерении параметров цепей (R,L,C).

Метод совпадения - метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов. Метод применяют при измерении частот, интервалов времени.

1.3 Единицы измерений.

Размер физической величины определяется соотношением $Q = q[Q]$,
где q - числовое значение этой величины,

[Q] - единица измерения физической величины (принято писать в квадратных скобках!)

Это соотношение называется основным уравнением измерения, так как целью измерения, по существу, является определением числа q .

Обеспечение единства измерений предполагает, прежде всего, повсеместное использование общепринятых и строго определенных единиц физических величин.

Единицы физических величин подразделяются на основные и производные единицы.

Совокупность выбранных основных единиц и образованных с их помощью единиц производных называется системой единиц.

Правила, по которым тот или иной комплекс единиц выбирается в качестве основного, не могут быть обоснованы теоретически. Аргументом в пользу выбора может служить лишь эффективность и целесообразность использования данной системы. За историю развития естественных наук таких систем было предложено несколько (СГС, МТС, МКС и т.д.).

Для практических целей измерения в качестве основных величин и единиц следует выбирать такие, которые могут быть воспроизведены с наибольшей точностью.

В механике это длина, масса и время, в термодинамике - температура, в электродинамике и фотометрии - сила электрического тока и сила света, в электрохимии - количество вещества.

В октябре 1958 г. Международный комитет законодательной метрологии в г.Париж объявляет об установлении Международной системы единиц измерения - СИ (SI-фр.Systeme International), в соответствии с которой осуществляется переход на Международную систему единиц СИ во всех областях наук, техники, народного хозяйства, а также в учебном процессе во всех учебных заведениях.

Таблица 1.1 Основных единиц измерения семь:

Величина	Обозначение размерности	Единица измерения	Обозначение	
			русск.	междуна р.
1. Длина	L	метр	м	м
2. Масса	M	килограмм	кг	kg
3. Время	T	секунда	с	s
4. Сила электрического тока	I	ампер	A	A
5. Термодинамическая температура	θ	кельвин	K	K
6. Сила света	J	кандела(свеча)	кд	cd
7. Количество вещества	N	моль	моль	mol

Производные единицы Международной системы, как правило, образуют с помощью простейших уравнений связи между физическими величинами, в которых числовые коэффициенты равны 1. Для образования производных единиц величины в уравнениях связи принимаются равными основным и дополнительным единицам СИ.

Пример: Единицу скорости образуют с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейно и равномерно движущейся точки

$$V = \frac{S}{t} = \frac{L}{T} \text{ м/с},$$

где V - скорость, S - длина пройденного пути, t - время движения точки.

Подстановка вместо S и t единиц СИ дает

$$[V] = 1\text{м} \cdot (1\text{с})^{-1} = 1\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$$

Следовательно, единицей скорости СИ является метр в секунду.

Таким образом для любой производной величины Q может быть определена ее размерность (анг. Dimension [di'menʃən]), отражающая ее связь с основными единицами системы, в виде

$$[Q] = \dim(Q) = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \theta^\varepsilon J^\eta N^\zeta \dots \quad (1.1)$$

где L, M, T, I, \dots - полный набор основных единиц системы,

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \dots$ - показатели степени для каждой конкретной производной физической величины находятся из уравнений, связывающий ее с основными величинами (часть этих показателей обычно оказывается равной нулю). Для рассмотренного выше примера

$$\alpha = 1, \gamma = -1, \beta = \delta = \varepsilon = \eta = \zeta = \dots = 0, \text{ т.е. } [V] = \dim(V) = [V] = LT^{-1}$$

Соотношение (1.1) называется формулой размерности.

Совместно с единицами системы СИ допускается использование кратных и дольных единиц, которые образуются путем добавления к названию единицы определенной приставки, означающей умножение данной единицы на 10^n , где n - целое положительное (для кратных единиц) или отрицательное (для дольных единиц).

Таблица 1.2 Показатели кратности и дольности единиц и их обозначения.

Множитель	Приставка	Обозначение	
		русск.	Межд.
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гига	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кило	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	декабрь	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санتي	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

Совместно с системой СИ допускается использование - там, где это целесообразно, - некоторых внесистемных единиц:

Таблица 1.3 Некоторые внесистемные единицы

Величина	Внесистемные единицы	Обозначение
Время	Минута, час, сутки	Мин, ч, сут.
Масса	тонна	т

Температура	Градус Цельсия	°C (Centigrade)
	Градус Фаренгейта	°F (Fahrenheit)
	$t^{\circ}C = T - T_0, \text{ где } T_0 = 273,16^{\circ}K$ $^{\circ}F = \frac{9}{5}t^{\circ}C + 32, ^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F - 32)$	

Кроме рассмотренных видов единиц широко применяются относительные и логарифмические величины. Они представляют собой соответственно отношение двух одноименных величин и логарифм этого отношения.

К относительным величинам, в частности, относятся атомные и молекулярные массы химических элементов.

Относительные величины могут выражаться 9‰ уксус (9 г уксуса в 100 г раствора) в безразмерных единицах, в процентах (1% \Rightarrow 0,01) или в промилле (1‰ \Rightarrow 0,001 \Rightarrow 0,1%).

Значения логарифмических величин выражается: в неперах (Нп) согласно формуле

$$N_{(Hn)} = \ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = 0,5 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

1.4. Основы теории погрешностей и обработки результатов измерения.

Виды погрешностей (классификация погрешностей) по следующим признакам /4 с 9/

- а) по способу оценки - абсолютная погрешность
- относительная погрешность
- б) в зависимости от причины возникновения
 - методическая
 - инструментальная
 - от внешних условий
 - субъективная
- в) от характера проявления - систематическая
- случайная
- г) по характеру зависимости от измеряемой величины
 - аддитивная
 - мультипликативная.

При любом измерении неизбежны обусловленные разнообразными причинами отклонения результатов измерения от истинного значения измеряемой величины.

Истинные значения физических величин - это значения, идеальным образом отражающие свойства данного объекта.

Погрешность измерения - отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Различают по способу оценки абсолютную и относительную погрешность измерения.

Абсолютная погрешность измерения Δ равна разности между результатом измерения X_i и истинным значением измеряемой величины Q

$$\Delta_i = X_i - Q$$

Но поскольку истинное значение Q измеряемой величины неизвестно, то вместо истинного значения подставляют так называемое действительное значение X_g , найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него

$$\Delta_i = X_i - X_g$$

Относительная погрешность измерения δ представляет собой отношение (в процентах) абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины или действительному значению

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} \approx \frac{\Delta}{X_g}; \quad \delta_{\%} = \frac{\Delta}{X_g} 100\%$$

Абсолютная погрешность измерения выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина, относительная погрешность безразмерна.

Существует также такой качественный показатель измерения, как точность измерения, отражающий

$$m = \frac{1}{\delta}$$

близость результата к истинному значению измеряемой величины.

Погрешности классифицируются по следующим признакам:

В зависимости от причин возникновения различаются: погрешности метода измерений (методическая погрешность), возникающая из-за несовершенства метода, принципа или методики измерения; инструментальные погрешности, зависящие от погрешностей средств измерения; погрешности, вызванные изменением внешних условий; субъективные погрешности, возникающие из-за недостаточно точного отсчитывания показаний средств измерения. От таких погрешностей нужно отличать промахи - неверные результаты измерения, получаемые в результате субъективной ошибки в измерении. При отработке результатов многократных наблюдений промахи должны быть выявлены и исключены из рассмотрения.

В зависимости от характера проявления (закономерности проявления) при повторении измерений различаются следующие виды погрешностей:

Систематическая погрешность Δ_s - это составляющая погрешности, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины (например, погрешность градуировки шкалы, температурная погрешность, погрешность установки статического и электрического "нуля" стрелочного прибора и т.д.).

Систематическая погрешность принципиально предсказуема и если она определена достаточно точно, то может быть исключена (вручную или автоматически) введением поправки (равной систематической погрешности с обратным знаком) или поправочного множителя.

Случайная погрешность $\overset{\circ}{\Delta}$ - это составляющая погрешности, которая изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины, Такого рода погрешность является следствием случайных процессов (закономерности которых установить не удастся) в измерительных цепях и во (влияющей) внешней среде.

Пример, погрешность, обусловленная собственными шумами средств измерений или дискретным характером показаний цифрового прибора.

Принципиальным отличием случайной погрешности от систематической является то, что ее значение для единичных наблюдений не может быть предсказано, Путем многократных измерений одной и той же величины и статистической обработки результатов значение случайной погрешности может быть найдено вероятностными методами.

В общем случае погрешность измерения состоит из суммы систематической и случайной погрешности

$$\Delta = \Delta_s + \overset{\circ}{\Delta}$$

Среди погрешностей средств измерения (инструментальных) различаются:

- статистическая погрешность $\Delta_{ст}$, имеющая место при измерении постоянной величины (или изменяющейся настолько медленно, что инерционные свойства средств измерения при этом не появляются);
- динамическая погрешность $\Delta_{дин}$, возникающая при измерении переменных величин за счет инерционных свойств средств измерений - разность между погрешностью при измерении переменной во времени величины и статистической погрешностью;
- основная погрешность $\Delta_{о\ c}$ - погрешность в нормальных условиях (устанавливаемых в стандартах и технических условиях на средства измерения данного вида);
- дополнительная погрешность $\Delta_{дон}$ - изменение погрешности вследствие отклонения одной из влияющих величин от нормального значения (например, изменения температуры окружающей среды от нормы);
- приведенная погрешность - выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению, за которое условно принимается либо верхний предел измерений, либо диапазон измерений, либо длина шкалы и т.п.

ГЛАВА 2. СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

2.1 Измерение температуры твердых тел, газов, жидкостей и движущегося потока /5-8/

Температура — физическая величина, характеризующая степень нагретости среды. Согласно молекулярно-кинетической теории абсолютная (термодинамическая) температура T идеального газа в кельвинах определяется уравнением Больцмана

$$T = \frac{2}{3k} \frac{m \bar{w}^2}{2},$$

где m —масса молекулы; w^2 —ее средняя квадратичная скорость; $k = 1,3806 \cdot 10^{-32}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

В соответствии с этим уравнением температура газа пропорциональна массе и средней кинетической энергии молекулы. Нуль абсолютной температуры газа соответствует такому его состоянию, при котором прекращается поступательное движение молекул.

С 1 января 1982 г. введен в действие государственный стандарт ГОСТ 8.417—81, согласно которому термодинамическая температура выражается в кельвинах. Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды, где в равновесном состоянии находятся лед, вода и водяной пар. Допускается также применение температуры Цельсия. Международная практическая шкала Цельсия (обозначение °С) связана с термодинамической шкалой равенством $t^{\circ}\text{C} = T - 273,15$, причем по размеру градус Цельсия равен кельвину.

В Англии, США и других странах для измерения температуры используются шкалы Фаренгейта ($t^{\circ}\text{F}$), Ранкина ($t^{\circ}\text{Ra}$) и Реомюра ($t^{\circ}\text{R}$). Для пересчета числовых значений температуры из одной шкалы в другую можно воспользоваться соотношением

$$\begin{aligned} T &= t^{\circ}\text{C} + 273,15 = \frac{5}{9} t^{\circ}\text{F} + 255,37 = \\ &= \frac{5}{9} t^{\circ}\text{Ra} = 1,25 t^{\circ}\text{R} + 273,15. \end{aligned}$$

Вся область наиболее часто измеряемых температур разделяется на термометрию (до 600 °С) и пирометрию (свыше 600 °С). В зависимости от интервала измерения используются следующие методы и средства: термометры расширения; термоэлектрические термометры; электрические термометры сопротивления; пирометры излучения.

Термометры расширения. Принцип их действия основан на свойстве газов, жидкостей и твердых тел изменять свой объем или линейные размеры при изменении их температуры. Наиболее часто в теплотехнических измерениях (научных и промышленных) используются стеклянные, манометрические, дилатометрические и биметаллические термометры.

Стеклянные термометры применяются для измерения температур от— 200 до+750°С. В качестве рабочего тела используются ртуть (от —35 до +750 °С), этиловый спирт (от —80до+70°С), керосин, пентан, толуол и т. д. В зависимости от назначения жидкостные термометры подразделяются на *образцовые, лабораторные и специального назначения, технические, бытовые* и т. д.

Принцип действия *манометрического термометра* основан на зависимости между температурой и давлением рабочего вещества в замкнутой герметической системе. Такие термометры являются техническими приборами и подразделяются на *газовые, жидкостные и компенсационные*. Они применяются для измерения температуры в интервале от 150 до 600 °С, а при использовании специальных заполнителей—до 1000°С. Схема показывающего манометрического термометра изображена на рис. 2.1 Термобаллон 1 погружается в среду, температура которой измеряется; при этом давление газа в замкнутой герметической системе изменяется, что приводит к деформации пружины 2 и перемещению указателя 3. В манометрических

термометрах используются пружины овального, двуховального (как на рис. 2.1) и других профилей.

Действие *дилатометрических* и *биметаллических термометров*, которые применяются для измерений в специальных условиях, основано на свойстве твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении его температуры. Дилатометрическими термометрами измеряют температуру в интервале от—30 до 1000 °С, биметаллическими — от —60 до 300 С. В последних используется разница коэффициентов линейного расширения пластин различной физической природы, сваренных между собой по всей длине.

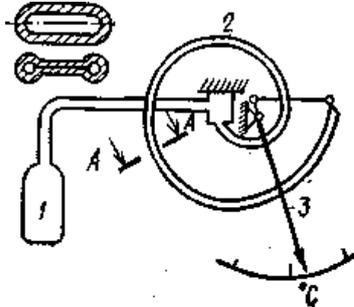


Рис. 2.1 Схема показывающего манометрического термометра

Термоэлектрические термометры (термопары).

Принцип действия этих приборов основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-э. д. с.) термопары от температуры. Термометр такого типа включает в себя термопару, изготовленную из двух разнородных металлов, термопровод 1 и гальванометр 3. При различных температурах «горячего» 2 и «холодного» 4 спаев возникает термо-э. д. с., которая возрастает с увеличением разности температур $\Delta t = t - t_H$. Обычно при измерениях «холодный» спай находится в сосуде Дьюара с тающим льдом ($t_H = 0$ °С), а «горячий» — в среде, температуру которой надо измерить. Термопары широко применяются в теплоэнергетике для измерения температуры твердых тел, газов и жидкостей вплоть до 2500 °С.

Выбор материалов для изготовления термопар определяется требованием обеспечения наибольшего значения термо-э. д. с. в заданном интервале изменения температуры. При очень высоких температурах используются материалы, имеющие высокую температуру плавления, — вольфрам, рений, тантал. Вследствие хрупкости рения на практике чаще всего применяется сплав вольфрама с рением. Термопары с медным электродом из-за быстрой окисляемости меди при нагреве используются только при невысоких температурах.

Наиболее широко в теплоэнергетике применяются следующие пары металлов: платина и платинородий — до 1600 °С, хромель и алюмель — до 900—1000 °С, хромель и копель — до 600 °С, медь и копель — до 350 °С, медь и константан — до 350 °С.

Диаметр термопарной проволоки обычно составляет 0,1 — 2 мм, а электроды соединяются пайкой или сваркой. В качестве припоя используются олово, серебро и другие металлы. При измерениях температуры твердого тела важно обеспечить надежный контакт термопары с исследуемым образцом.

Градуировка (тарировка) термопар состоит в сличении показаний изготовленной термопары с показаниями эталонной и осуществляется в лабораторных условиях или в специальных учреждениях. На основании данных тарировки строятся графики, составляются таблицы или аппроксимирующие уравнения, характеризующие зависимость термо-э. д. с. термопары от температуры.

В производственной практике, наиболее часто используют технологические термопары с термоэлектродами пяти типов (табл. 2.1).

Таблица 2.1 Технологические термопары и допустимые отклонения термо-э. д. с.

Обозначение		Пределы применения, °С			Отклонение термо-э. д. с. от градуировочных таблиц, мВ	
термопары	градуировки	нижний	верхний		t ≤ 300 °С	t > 300 °С
			длительный	кратковременный		
ТПП	ПП-1	-20	1300	1600	0,01	0,01 + 2,5 · 10 ⁻⁵ (t - 300)
ТПР	ПР30/Б	300	1600	1800	—	0,01 + 3,3 · 10 ⁻⁵ (t - 300)
ТХА	ХА	-50	1000	1300	0,16	0,16 + 2 · 10 ⁻⁴ (t - 300)
ТХК	ХК	-50	600	800	0,20	0,2 + 6 · 10 ⁻⁴ (t - 300)
ТНС	НС	300	1000	1000	0,12	0,15 для t ≥ 400 °С

Для вывода «холодного» спая из зоны высоких температур используются компенсационные провода. В том случае, когда температура точки присоединения компенсационного провода к термопаре («холодный» спай) будет больше 0 °С, необходимо ввести поправку на температуру свободных концов. Компенсационные провода имеют ту же характеристику по термо-э. д. с, что и термоэлектроды. Для термопар типов ТПП и ТХА компенсационные провода изготавливают из меди, для ТХК — из хромеля. Термопары типов ТНС и ТПР введения поправок на температуру «холодного» спая не требуют.

Электрические термометры сопротивления. Действие термометров сопротивления основано на свойстве веществ изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Они применяются для измерения температуры в интервале от —260 до 750 °С, в отдельных случаях — до 1000 °С.

Термометр сопротивления состоит из преобразователя (электрическое сопротивление), указателя (чувствительный электрический прибор), источника электрического тока и медных соединительных проводов. Для изготовления преобразователя применяются материалы, сопротивление которых существенно меняется с изменением температуры (45—50 Ом). К таким материалам относятся платина (до 660 °С), медь (до 200 °С), железо (до 150 °С). При более высоких температурах используется вольфрам, а для уменьшения окислительных процессов вводятся специальные покрытия (лак, термостойкий цемент и т. д.).

Чувствительный элемент термометра сопротивления при измерениях температуры поверхности крепится к ней конденсаторной сваркой или клеем. Градуировка термометров сопротивления проводится организациями Госстандарта. В лабораторных условиях выполняется только периодическая проверка сопротивления преобразователя при t = 0 °С.

В специальных случаях преобразователь изготавливается из полупроводниковых материалов (термисторы) и применяется для измерения температуры в интервале от 1,3 до 400 К. В таком преобразователе используется эффект изменения сопротивления полупроводника при изменении его температуры.

Пирометры излучения. Принцип их действия основан на определении излучаемой телом энергии, которая согласно закону Стефана—Больцмана пропорциональна термодинамической температуре поверхности в четвертой степени. Они используются для измерения температуры до 6000 °С.

Измерение температуры движущегося потока. Термодинамическую температуру движущегося потока газа или жидкости измерить невозможно. Поэтому измеряют полную температуру потока T_п, а статическую T_{ст} рассчитывают с помощью таблиц газодинамических функций или каким-либо другим методом. При скорости потока, меньшей чем 50—70 м/с, статическая и полная

температуры потока различаются между собой не более, чем на 0,5 %. Для измерения температуры потока чаще всего используются стеклянные и термоэлектрические термометры, а также термометры сопротивления.

При измерениях температуры стеклянным термометром в потоках с высоким давлением термометр устанавливается в специальной гильзе. Для увеличения чувствительности термометра зазор между гильзой и хвостовой частью термометра заполняется компрессорным маслом ($t < 200\text{ }^\circ\text{C}$), ртутью ($t = 200 - 300\text{ }^\circ\text{C}$) или медными опилками ($t = 300 - 600\text{ }^\circ\text{C}$), а при измерении отрицательных температур — глицерином. В обычных условиях термометр устанавливается в поток незащищенным.

При монтаже термометров сопротивления в трубопроводах необходимо чувствительный элемент размещать в середине потока, причем глубина погружения термометра в поток должна быть не менее 150 мм. Выступающая часть термометра должна быть теплоизолированной для уменьшения утечек и притоков теплоты. В отдельных случаях преобразователь термометра сопротивления может регистрировать среднюю температуру потока.

При измерениях температуры высокоскоростного потока используются термоприемники с камерой торможения (рис. 2.2). Торможение потока осуществляется во внутренней части термоприемника, где расположен спай термопары 1. При этом диаметр вентиляционного отверстия 2 должен обеспечивать истечение поступающего через отверстие 5 потока со скоростью звука. Цифрой 3 на рис. 2.2 обозначены выводы термоприемника, 4 — изоляция, 6 — гильза (экран).

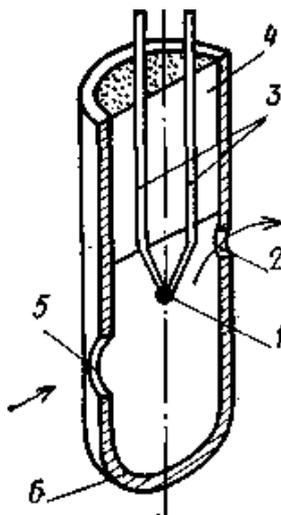


Рис. 2.2 Термоприемник с камерой торможения

Если теплообмен между термоприемником и местом его крепления отсутствует (идеальная теплоизоляция), то спай термопары будет регистрировать температуру

восстановления T_r , определяемую уравнением
$$T_r = T_f \left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

где r — коэффициент восстановления температуры, k — показатель адиабаты, M — число Маха для потока. В действительности вследствие теплообмена спай термопары регистрирует температуру T_c отличающуюся от T_r .

Качество термоприемника определяется коэффициентом восстановления

$$\xi = \frac{T_c - T_f}{T_d - T_f}$$

которым учитывают тепловые потери (в том числе излучением), конструктивные особенности термоприемника, материал, из которого он изготовлен, и т. д.

Коэффициент восстановления определяется для каждого преобразователя специальной тарировкой в аэродинамической трубе. При известных значениях T_d и ξ можно рассчитать полную температуру потока:

$$T_R = T_c \left[\frac{1 - \frac{k-1}{2} M^2 (1-\xi)}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right]$$

Для преобразователя с открытым спаем термопары коэффициент восстановления $\xi = 0,68 \pm 0,07$. Сравнительно небольшое значение ξ обусловлено потерями из-за радиационного теплообмена и теплопроводности. Коэффициент восстановления экранированного преобразователя достигает 0,98.

2.2 Измерение расхода вещества

Расход движущейся среды представляет собой объем или количество вещества, проходящего через определенное сечение в единицу времени. В связи с этим в технике различают *объемный* (Q , м³/с) и *массовый* (G , кг/с) расходы жидкости и газа.

Измерение расхода в каналах выполняется с помощью специальных устройств, которые называются *расходомерами*. При этом в теплоэнергетике и других отраслях техники используются следующие основные приборы: расходомеры переменного перепада давления; расходомеры пневматического типа; расходомеры постоянного перепада давления; тахометрические расходомеры; электромагнитные и ультразвуковые расходомеры.

Кроме названных, находят применение и некоторые другие методы измерения расхода вещества.

Расходомеры переменного перепада давления. Принцип действия расходомеров данного типа основан на измерении перепада давления на сужающемся устройстве, которое устанавливается на прямолинейном участке канала. Вследствие уменьшения проходного сечения скорость потока в сужающемся устройстве возрастает, а давление уменьшается. При этом создается перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$ (рис. 2.3, а), зависящий от скорости потока, а следовательно, и расхода вещества, протекающего в канале,

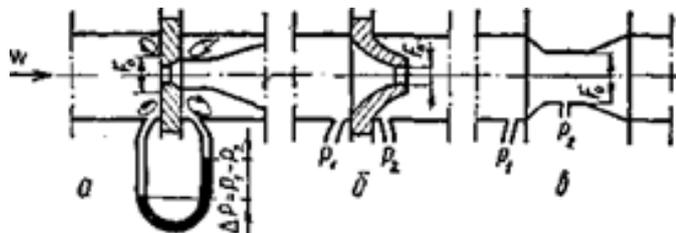


Рис. 2.3. Сужающиеся устройства для измерения расхода вещества

Таким образом, перепад давления, создаваемый сужающимся устройством, служит мерой расхода вещества в канале. Этот метод наиболее распространен в технике и лабораторных условиях. Он широко применяется для измерения расхода воды и пара, газовых потоков в элементах теплоэнергетических машин и установок.

В качестве сужающихся устройств для измерения расхода жидкости, газа и пара служат стандартные плоские диафрагмы (рис. 2.3, а), сужающиеся сопла (рис. 2.3., б) и сопла Вентури (рис. 2.3., в). Стандартные устройства могут применяться с регистрирующим прибором без индивидуальной тарировки. В некоторых случаях могут использоваться ненормализованные типы сужающихся устройств, требующие индивидуальной тарировки.

Для вычисления массового расхода, измеряемого с помощью сужающегося устройства в том случае, когда скорость в нем не достигает местной скорости звука, используется выражение:

$$G = \alpha F_0 \varepsilon \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)},$$

где F_0 — площадь отверстия сужающегося устройства; ε — поправочный множитель на сжимаемость вещества, расход которого измеряется; ρ — плотность потока перед сужающимся устройством; $p_1 - p_2$ — перепад статического давления на сужающемся устройстве.

Стандартные размеры диафрагм и графики для определения коэффициентов α и ε приведены в специальной литературе. Значение ρ находится расчетным методом по значениям p_1 и T_1 перед диафрагмой: $\rho = p_1/(RT_1)$. Таким образом, для определения расхода вещества в этом случае требуется измерить три величины: p_1 и T_1 и Δp . Перепад давления Δp измеряется дифманометром; при этом отбор давлений осуществляется до и после диафрагмы в углах, образуемых ее плоскостью и внутренней поверхностью трубы (рис. 2.3, а). Для измерения малых расходов используются последовательно установленные (сдвоенные) диафрагмы с разным диаметром отверстия.

Сужающееся сопло (рис. 2.3, б) выполняется в виде насадка с концентрическим отверстием, имеющим, плавно сужающуюся часть на входе и развитую цилиндрическую часть на выходе. Отбор давлений p_1 и p_2 осуществляется так же, как и у диафрагмы. Иногда расход вещества измеряется с помощью сопла, работающего при сверхкритическом перепаде давления на расходомере. В этом случае в основные уравнения, полученные для сужающихся устройств, подставляется $p_2 = p_{кр}$ (критическое давление).

Сопло Вентури (см. рис. 2.3, в) состоит из цилиндрического участка, сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок, и расширяющейся конической части (диффузора). Отбор давлений производится с помощью двух кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью сопла Вентури группой равномерно расположенных по окружности отверстий.

При установке диафрагм, сужающихся сопел и сопел Вентури в трубопроводах диаметром более 500 мм дополнительной тарировки не требуется; эти устройства рассчитываются по определенной методике и называются *стандартными*. Если диаметр трубопровода меньше 50 мм, то вводится поправка на шероховатость канала, а при числах Рейнольдса, меньших граничных, — поправка на вязкость вещества.

При установке сужающихся устройств необходимо соблюдать ряд требований. Участки трубопровода до и после расходомера должны быть прямолинейными, а измеряемое вещество должно оставаться однофазным при прохождении через измерительное устройство. Необходимые наименьшие длины этих участков при различных условиях приведены в специальной литературе. Перед сужающимся устройством не должны накапливаться грязь, пыль, конденсат и другие отложения.

Расходомеры пневматического типа. Пневмометрическое определение расхода вещества основано на измерении местных скоростей потока насадками статического и полного давлений с последующим определением скорости по сечению канала и вычислением расхода.

При измерении расхода в круглой трубе на участке гидродинамической стабилизации потока соотношение между скоростью потока на оси канала w_{max} и его средней скоростью w однозначно зависит от числа Рейнольдса:

Re_d	$2,3 \cdot 10^3$	10^4	10^5	10^6	10^7
$k_p = w_{max}/\bar{w}$	2,000	1,275	1,195	1,155	1,130

Это позволяет по известной скорости потока на оси канала вычислить объемный и массовый расходы вещества по формулам

$$Q = \frac{\pi d^2 v_{\text{max}}}{4k_p}; \quad G = \frac{\pi d^2 v_{\text{max}}}{4k_p} \rho_{\text{ср}}$$

где d — диаметр канала; $\rho_{\text{ср}}$ — средняя плотность потока.

При определении расхода в гидродинамическом начальном участке, а также в каналах некруглого сечения местную скорость потока измеряют в отдельных точках по радиусу, с последующим численным интегрированием профиля скорости. Для упрощения расчетов рекомендуется разбивать сечение канала на равновеликие площади число которых n зависит от диаметра канала d :

$d, \text{ мм}$	300	350	400	500	600	700	800	1000
n	5	6	7	8	10	12	14	16

Давления измеряются в центре равновеликих участков трубопровода прямоугольного сечения, а при кольцевой форме участков (круглая труба) — в двух или четырех диаметрально противоположных точках каждого из сечений на расстоянии r_m от центра канала. При этом значение r_m определяется выражением

$$r_m = \frac{d}{2} \sqrt{(2m-1)/n},$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ — номер участка; n — число участков. При таком способе разбиения сечения канала среднее полное давление по этому сечению, необходимое для расчета средней скорости потока и расхода вещества, определяется уравнением

$$\bar{p}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{di}$$

где p_{di} — полное давление в i -й точке канала.

При определении расхода неизотермических потоков вещества дополнительно измеряют распределение температуры по сечению канала, чтобы установить закон изменения плотности потока по радиусу.

Расходомеры постоянного перепада давления. Принцип их работы основан на уравновешивании массы чувствительного элемента, находящегося в канале переменного сечения, силой, возникающей при его обтекании веществом, расход которого измеряется.

Чувствительным элементом расходомера данного типа является подвижное тело, выполненное в форме поршня или ротора, которое под воздействием гидродинамических сил перемещается вверх по каналу переменного сечения. Зная это перемещение, можно определить расход вещества.

В зависимости от формы чувствительного элемента различают *ротаметры*, *поплавковые и поршневые расходомеры*. Ротаметры могут использоваться для измерения очень малых объемных расходов вещества — порядка $0,0025 \text{ м}^3/\text{с}$ по воде и $0,006 \text{ м}^3/\text{ч}$ — по воздуху. Они нашли широкое применение в теплоэнергетике при измерении расходов чистых и слабо загрязненных жидкостей и газов с дисперсными включениями инородных частиц: используются ротаметры типов РС-3А, РС-3, РС-5 и РС-7, работающие при давлениях, не превышающих $0,6 \text{ МПа}$ для жидкостей и $0,4 \text{ МПа}$ для газов.

Тахометрические расходомеры. Их действие основано на зависимости угловой скорости рабочего элемента прибора (вертушки-турбинки, крыльчатки и т. д.) от средней скорости измеряемого вещества. Вращение рабочего элемента прибора передается через редуктор на счетный механизм, где имеется шкала, отградуированная в единицах расхода.

Расходомеры данного типа широко применяются в теплоэнергетике для измерения расхода и количества различных жидкостей при давлениях до $1,6 \text{ МПа}$. По принципу действия они подразделяются на *скоростные* и *объемные*. Первые выпускаются двух типов: с вертикальной вертушкой-турбинкой ($Q = 0,04$ - $9,5 \text{ м}^3/\text{ч}$) и с горизонтальной турбинкой ($Q = 1,6$ - $150 \text{ м}^3/\text{ч}$). В последнее время появились скоростные турбинные и шариковые счетчики-расходомеры с бесконтактным преобразованием частоты вращения

рабочего элемента в электрические импульсы. Эти приборы используются для измерения малых (до 0,015 м³/ч) и больших (до 2500 м³/ч) объемных расходов жидкости.

Электромагнитные и ультразвуковые расходомеры. Относятся к числу приборов, измеряющих расход электропроводящих веществ. Ультразвуковые расходомеры вследствие малой инерционности дают возможность регистрировать расход в нестационарных условиях.

Принцип действия электромагнитного расходомера основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым наведенная в проводнике э. д. с. пропорциональна скорости перемещения его в магнитном поле. Они позволяют измерять расход электропроводящих жидкостей, растворов и пульп при температуре не выше 423 К. Серийно выпускаемые расходомеры охватывают диапазон объемных расходов от 1 до 25 000 м³/ч.

В основу работы ультразвукового расходомера положено физическое явление смещения звуковых колебаний движущимся веществом. Различают *фазовые, время-импульсные* и *частотно-импульсные* ультразвуковые расходомеры. Наибольшее распространение получили первые два типа их.

2.3 Основы контроля влажности газов, твердых и сыпучих материалов.

Задача анализа может быть связана с задачей определения содержания одного какого-либо компонента смеси либо двух и более компонентов смеси. Большое многообразие анализируемых компонентов и еще большее многообразие их смесей, находящихся в самых различных условиях, определяют большое разнообразие номенклатуры аналитических приборов.

Приборы для анализа состава и свойств вещества в теплоэнергетических процессах принято называть анализаторами.

Если анализатор предназначен только для определения одного компонента в смеси, то его часто называют *концентратомером*.

Анализаторы, предназначенные для анализа состава газовых смесей, называют *газоанализаторами*.

Анализаторы делятся на лабораторные (неавтоматические) и промышленные (автоматические). Автоматические анализаторы все операции по определению состава и качества вещества выполняют в автоматическом режиме без участия человека. Кроме того, анализаторы бывают непрерывного действия, когда анализ осуществляется непрерывно,

и циклического действия, когда анализ осуществляется с определенной циклическостью. Для определения состава и свойств вещества в настоящее время применяют косвенные методы анализа: физические, физико-химические и химические.

Косвенные методы анализа – это такие методы анализа, при которых для определения искомого параметра используется его известная взаимосвязь с каким-либо физическим или физико-химическим свойством определяемого компонента.

2.3.1 Измерение влажности газов и сыпучих материалов

Под влажностью газа или сыпучего материала понимают содержание влаги в единице объема. Основная единица измерения абсолютной влажности - килограмм на метр кубический (кг/м³).

Под относительной влажностью понимают отношение массы водяного пара, содержащегося в 1 м³ газа, к максимально возможной массе водяного пара в 1 м³ того же газа при той же температуре и давлении. Единица измерения относительной влажности - %.

Автоматическое измерение влажности газов производится психрометрическим методом, методом точки росы и сорбционным методом.

Автоматические психрометры для измерения влажности газа используют психрометрический эффект: при испарении влаги с увлажненной поверхности термометра (влажный термометр) температура его снижается. Между «сухим» и «влажным» термометром создается разность температур, называемая психрометрической разностью.

Зависимость относительной влажности ϕ (%) от психрометрической разности имеет вид

$$\phi = \frac{P_b - A(t_c - t_b)}{P_c} 100, \quad (2.1)$$

где P_b - давление паров, насыщающих анализируемую газовую смесь при температуре «влажного» термометра t_b ; P_c - давление паров, насыщающих анализируемую газовую смесь при температуре «сухого» термометра t_c ; A - психрометрический коэффициент, зависящий от конструкции психрометра, скорости обдувания влажного термометра газом и давления газа.

Измерительная схема автоматического психрометра построена на базе двух неуравновешенных мостов (рис. 2.4). Один мост образован резисторами R_1 , R_2 , R_3 и R_c ; в измерительную диагональ ab включен реохорд R_p . Другой мост образован резисторами R_1 , R_3 , R_4 и R_b . Таким образом, разность потенциалов на вершинах a и b пропорциональна температуре «сухого» термометра сопротивления, а разность потенциалов на вершинах a и c пропорциональна температуре «влажного» термометра сопротивления. Мосты включены встречно. В связи с этим падение напряжения между вершинами b и c пропорционально разности температур «сухого» и «влажного» термометров. Напряжение небаланса компенсируется частью падения напряжения на реохорде R_p , поэтому каждому положению движка реохорда R_p в состоянии равновесия будет соответствовать определенная психрометрическая разность. При изменении влажности анализируемой среды на входе электронного усилителя появится напряжение небаланса, электронный усилитель ЭУ включит реверсивный двигатель РД, выходной вал которого переместит движок реохорда R_p до состояния равновесия. Одновременно перемещается стрелка вторичного прибора. Основная абсолютная погрешность влагомера - 3 %. При охлаждении анализируемого газа наступает насыщение паров влаги (точка росы). При постоянном давлении точка росы не зависит от температуры газа, а зависит только от влажности.

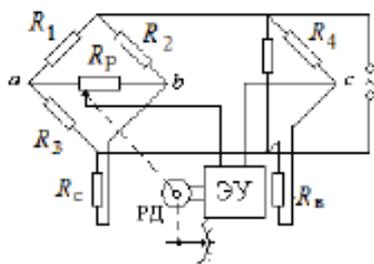


Рис. 2.4. Схема автоматического психрометра

Сорбционные методы основаны на поглощении влаги из анализируемой газовой смеси каким-либо гигроскопическим веществом. При этом может меняться электрическая проводимость пленки; изменяется количество электричества, затрачиваемого на электролиз влаги; изменяется частота собственных колебаний кварцевого резонатора от массы вещества, нанесенного на поверхность кварцевой пластины; изменяется масса поглотителя влаги и т. д.

Для определения влажности сыпучих материалов используются прямые методы высушивания, экстракционные и химические. Эти методы неавтоматические, требующие длительного времени для анализа. Их используют в лабораторной практике.

Косвенные методы позволяют быстро определить влажность, но дают большую погрешность. Достоинство состоит в том, что эти методы позволяют автоматизировать процесс измерения влажности.

Кондуктометрический метод использует зависимость электрических свойств капиллярно-пористых материалов от влагосодержания. Электрическое сопротивление R_x таких материалов определяется по выражению

$$R_x = A/W^n \quad (2.2.)$$

где A - постоянная, зависящая от материала; W - влажность материала в % по массе; n - показатель степени, зависящий от структуры и природы материала.

Кондуктометрический метод пригоден для создания сигнализаторов и индикаторов, не обеспечивающих высокую точность измерения. Электрическое сопротивление материала измеряется с помощью мостовых схем.

Диэлькометрический метод основан на зависимости электрической емкости преобразователя, выполненного в виде двух пластин или двух соосных цилиндров и заполненного анализируемым материалом, от влажности. Измерительные схемы строятся на основе неуравновешенных мостов.

2.3.2 Измерение уровня

В настоящее время существует большое число методов измерения уровня жидкостей и сыпучих тел. Одним из наиболее распространенных методов измерения уровня жидкостей является измерение гидростатического давления столба жидкости, осуществляемое водомерными стеклами и их разновидностями, а также манометрическими или пневмометрическими устройствами. Во всех этих методах, как правило, главной является погрешность за счет изменения плотности измеряемой жидкости от температуры. Для исключения или уменьшения этой погрешности создаются сложные измерительные системы, одновременно измеряющие гидростатическое давление жидкости и ее плотность и корректирующие затем показания уровнемера в соответствии с плотностью. Естественно, что усложнение измерительной системы уменьшает ее надежность. Все системы измерения уровня жидкостей гидростатическим методом требуют тщательного анализа измерительной системы, соединительных линий, их температурного режима, особенностей работы измерительных преобразователей системы. Например, для одной и той же схемы измерения уровня в барабане парогенератора гидростатическим методом применение мембранных дифманометров вместо поплавковых существенно уменьшает возможные погрешности измерения уровня. Это объясняется тем, что объем жидкости, перемещающейся в мембранных дифманометрах при изменении измеряемого уровня, значительно меньше, чем в поплавковых.

Пневмометрический метод измерения уровня основан на измерении давления воздуха (инертного газа), уравновешивающего гидростатическое давление столба жидкости. Поэтому кроме недостатков и особенностей гидростатического метода измерения здесь добавляется специфика пневмометрической системы.

Одними из наиболее простых и надежных являются уровнемеры. Однако они практически не могут применяться при высоких давлениях. Некоторый прогресс в этом

отношении представляют буйковые уровнемеры, которые могут работать и при значительных давлениях. Но применение как поплавковых, так и буйковых уровнемеров затруднено в агрессивных жидкостях и в средах с выпадающими осадками.

Емкостные уровнемеры могут применяться для измерения как непроводящих, так и проводящих жидкостей. Они пригодны для измерения уровня в широком диапазоне давлений и температур измеряемых сред, как агрессивных, так и неагрессивных. Показания их зависят от диэлектрической проницаемости среды, которая может изменяться с температурой. Применение компенсационных емкостей позволяет существенно уменьшить это влияние, но не исключает его полностью. Схемное исполнение электронной части емкостных уровнемеров достаточно сложно, что ограничивает их широкое распространение. Радиоизотопные уровнемеры, как правило, применяются в тех случаях, когда непосредственный контакт с измеряемой средой по каким-либо причинам нежелателен (например, уровень жидкого хлора, шихты в доменной печи и т. д.). Следует иметь в виду, что на показания радиоизотопных уровнемеров практически не влияет изменение плотности измеряемой среды (для принципиальных схем, принятых в серийных приборах).

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ НАУЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Планирование научно-исследовательской работы имеет важное значение для ее рациональной организации. /9-11/

Научно-исследовательские организации и образовательные учреждения разрабатывают планы работы на год на основе целевых комплексных программ, долгосрочных научных и научно-технических программ, хозяйственных договоров и заявок на исследования, представленных заказчиками.

Научная работа кафедр учебных заведений организуется и проводится в соответствии с планами работы на учебный год. Профессора, преподаватели и аспиранты, магистранты выполняют научно-исследовательские работы по индивидуальным планам.

Планируется и научно-исследовательская работа студентов и магистрантов. Планы работы учебных заведений и кафедр могут содержать соответствующий раздел о НИРС. По планам работают студенческие научные кружки и проблемные группы.

В научно-исследовательских и образовательных учреждениях по темам научно-исследовательских работ составляются рабочие программы и планы-графики их выполнения. При подготовке монографий, учебников, учебных пособий и лекций разрабатываются планы-проспекты этих работ.

Рабочая программа - это изложение общей концепции исследования в соответствии с его целями и гипотезами. Она состоит, как правило, из двух разделов: методологического и экспериментального.

Методологический раздел включает:

- 1) формулировку проблемы или темы;
- 2) определение объекта и предмета исследования;
- 3) определение цели и постановку задач исследования;
- 4) интерпретацию основных понятий;
- 5) формулировку рабочих гипотез.

Формулировка проблемы (темы) - это определение задачи, которая требует решения. Проблемы бывают технические и научные. Техническая проблема - это противоречие в развитии технической системы или отдельных ее элементов. К таким проблемам можно отнести недостаточную эффективность выполнения отдельных функций системы - перерасход топлива, низкий КПД, большие выбросы окислов азота в окружающую среду и т.д.

Научная (гносеологическая) проблема - это противоречие между знаниями о какой эффект должен быть достигнут и незнанием путей и средств его реализации. Такие проблемы решаются путем создания теории, выработки практических рекомендаций. Например, научной проблемой является разработка теоретических основ борьбы с накипеобразованием.

Определение объекта и предмета исследования. Объект исследования - это то техническое явление (процесс), которое содержит противоречие и порождает проблемную ситуацию. Предмет исследования - это те наиболее значимые с точки зрения практики и теории свойства, стороны, особенности объекта, которые подлежат изучению. Например, если тема научной работы посвящена исследованиям потерь тепла в теплоэнергетической установке, то объектом исследования является теплоэнергетическая установка (парогенератор, паровая или газовая турбина, система регенеративного подогрева), а предметом — основные ее свойства, причины и условия, особенности конструкции, сопутствующие условия, способствующие увеличению потерь тепла, и другие факторы.

Определение цели и задач исследования. Цель исследования - это общая его направленность на конечный результат. Задачи исследования — это то, что требует решения в процессе исследования; вопросы, на которые должен быть получен ответ. Например, в диссертации посвященной исследованию взаимодействию пара и жидкости в горизонтально-трубных пленочных теплообменниках сформулированы следующие цели и задачи. Научная цель – экспериментальное изучение теплообмена и гидродинамики течения жидкости по наружной поверхности теплообменных горизонтальных труб при динамическом воздействии спутного потока пара. Прикладная цель – разработать методику расчета теплообменных пучков дистилляционных опреснительных установок с целью их дальнейшей оптимизации. Этим целям соответствуют задачи: 1) получение экспериментальных данных по поверхностному коэффициенту теплоотдачи при различной скорости спутного потока пара и плотности орошения труб; 2) получение данных по изменению коэффициента гидравлического сопротивления горизонтального ряда при обтекании его потоком пара в присутствии плёнки жидкости; 3) разработка методики расчета трубного пучка испарителя; 4) обоснование и разработка методики определения оптимального размещения теплообменных труб в горизонтально-плёночных испарителях.

Формулировка рабочих гипотез. Гипотеза как научное предположение, выдвигаемое для объяснения каких-либо фактов, явлений и процессов, является важным инструментом успешного решения исследовательских задач. Программа исследования может быть ориентирована на одну или несколько гипотез. Различают гипотезы: описательные, объяснительные и прогнозные, основные и неосновные, первичные и вторичные, гипотезы-основания и гипотезы-следствия.

Экспериментальный раздел рабочей программы включает:

- 1) принципиальный план исследования;
- 2) изложение основных процедур сбора и анализа эмпирического материала.

Конкретное научное исследование осуществляется по *принципиальному плану*, который строится в зависимости от количества информации об объекте исследования. Планы бывают разведывательные, аналитические (описательные) и экспериментальные.

Разведывательный план применяется, если об объекте и предмете исследования нет ясных представлений и трудно выдвинуть рабочую гипотезу. Цель составления такого плана — уточнение темы (проблемы) и формулировка гипотезы. Обычно он применяется, когда по теме отсутствует литература или ее очень мало.

Описательный план используется тогда, когда можно выделить объект и предмет исследования и сформулировать описательную гипотезу. Цель плана — проверить эту гипотезу, описать факты, характеризующие объект исследования.

Экспериментальный план включает проведение технического эксперимента. Он применяется тогда, когда сформулированы научная проблема и объяснительная гипотеза. Цель плана - определение причинно-следственных связей в исследуемом объекте.

В экспериментальной части программы обосновывается выбор методов исследования, показывается связь данных методов с целями, задачами и гипотезами исследования. При выборе того или иного метода следует учитывать, что он должен быть: а) эффективным, т.е. обеспечивающим достижение поставленной цели и необходимую степень точности получения экспериментальных данных; б) экономичным, т.е. позволяющим сэкономить время, силы и средства исследователя; в) простым, т.е. доступным исследователю соответствующей квалификации; г)

безопасным для здоровья и жизни людей; д) допустимым с точки зрения морали и правовых норм; е) научным, т.е. имеющим прочную научную основу.

- Научно исследовательская программа магистратуры должна:
- Быть актуальной, содержать научную новизну и практическую значимость;
- Основываться на современных теоретических, методических и технологических достижениях отечественной и зарубежной науки и практики;
- Использовать современные методики научных исследований;
- Базироваться на современных методах обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий;
- Содержать теоретические (методические, практические) разделы, согласованные с научными положениями, защищаемыми в диссертации.

В отличие от студентов вузов магистранты разрабатывают рабочие программы научных исследований. План магистерской диссертации должен содержать введение, основную часть, разбитую на главы и параграфы (вопросы), и заключение. Он может быть простым или сложным. Простой план содержит перечень основных вопросов. В сложном плане каждая глава разбивается на параграфы. Иногда составляют комбинированный план, где одни главы разбиваются на параграфы, а другие оставляют без дополнительной рубрикации.

При составлении плана следует стремиться, чтобы: а) вопросы соответствовали выбранной теме и не выходили за ее пределы; б) вопросы темы располагались в логической последовательности; в) в него обязательно были включены вопросы темы, отражающие основные аспекты исследования; г) тема была исследована всесторонне.

План не является окончательным и в процессе исследования может меняться, т.к. могут быть найдены новые аспекты изучения объекта и решения научной задачи.

Чтобы упорядочить основные этапы научно-исследовательской работы в соответствии с планом (программой) исследования, календарными сроками, материальными затратами, составляется рабочий план (план-график) выполнения работ.

Магистрант должен уметь так выстроить логическую очередность выполнения работ, чтобы она в установленные сроки привела к достижению поставленной цели и решению научной задачи. В работе необходимо выделить главное, на чем следует сосредоточить внимание в данный момент, но вместе с тем нельзя упускать из поля зрения детали. «Научиться не только смотреть, но и видеть, замечать важные частности, большое - в малом, не уклоняясь от намеченной главной линии исследования, - это очень важное качество ученого» (Приходько П.Т. Тропой науки. М., 1989. С. 22).

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ И АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.

4.1 Пассивный и активный эксперимент

Любое, даже самое простое исследование необходимо планировать. Изменения условий эксперимента, которые могут привести к ошибочным результатам, должны учитываться до проведения измерений. В таком учете всех возможных внешних и внутренних причин, влияющих на результат, заключается обычное понимание планирования эксперимента, если речь идет о собственно научной стороне исследования. Можно планировать эксперимент с целью уменьшения стоимости испытаний, сокращения времени на проведение опытов и т. д. /1,9/

Планирование эксперимента в обычном, классическом его понимании имеет субъективный характер. Поскольку изменение условий проведения опытов может проявиться в самых неожиданных ситуациях, правильность выбора плана эксперимента во многом зависит от квалификации исследователя, его эрудиции, знания методики измерений, аппаратуры и т. п. Как правило, в основу стратегии классического экспериментирования при исследовании сложного явления или процесса, зависящего от большого числа переменных (будем называть их *факторами*), закладываются принципы здравого смысла, а тактикой служит *метод проб и ошибок*. Его сущность заключается в некотором переборе различных условий проведения эксперимента и в субъективной оценке его результатов. Обычно исследуется один из факторов, а все остальные экспериментатор стремится поддерживать в это время постоянными. Следуя такой стратегии и тактике, исследователь фактически не имеет объективных критериев правильности проведения эксперимента, а также информации о степени его завершенности (если речь идет об эксперименте по оптимизации какого-либо процесса). Разумеется, при такой ситуации опытный ученый с «золотыми руками» может спланировать эксперимент более эффективно, чем рядовой исследователь, так как количественное и качественное содержание «здравого смысла» у них неравноценно.

Приведенные соображения заставляют задуматься: может быть, классические методы экспериментирования принципиально непригодны для исследования сложных систем, явлений, процессов, протекающих в условиях влияния большого числа случайных и постоянно действующих факторов? Чем должен руководствоваться начинающий исследователь при планировании эксперимента? Существуют ли какие-то рациональные стандартные стратегия и тактика экспериментирования? Наконец, каковы те объективные критерии, на основании которых должны приниматься решения после получения результатов?

При наличии многих влияющих факторов единственно возможным оказывается статистический подход к эксперименту и его планированию. В отличие от классического пассивного эксперимента, здесь исследованию подвергаются все влияющие факторы одновременно. Появляется возможность активно воздействовать на исследование, провести планирование опытов так, чтобы при измерениях получить максимально возможную информацию при минимальных затратах. Поэтому мы будем в дальнейшем называть эксперимент, основанный на математико-статистических представлениях, *активным экспериментом*. Введем несколько определений, необходимых для дальнейшего изложения.

Будем называть *экспериментом* любое воздействие (пассивное или активное), на объект исследования, в результате которого исследователь получает новую информацию.

Эксперимент должен отвечать на конкретно поставленный вопрос. От правильности формулировки этого вопроса зависит едва ли не половина дела. Например, определение марки стали — совсем иная задача, чем исследование

процессов диффузии, происходящих в этой же стали под действием термической обработки, хотя в обоих случаях можно исследовать химический состав стали с помощью количественного спектрального анализа. Но для исследования процессов диффузии, как методика отбора пробы, так и требования к обработке результатов иные, чем для определения марки.

Приведем определение цели эксперимента, исходя из терминологии теории планирования эксперимента:

Целью эксперимента является изучение зависимости некоторых количественно измеряемых свойств объекта исследования от параметров (факторов), которые по мнению исследователя влияют на эти свойства.

Поскольку выбор тех или иных параметров диктуется самим экспериментатором, это определение указывает на субъективный характер цели эксперимента. Экспериментатор, основываясь на априорных данных и теории явления (литературных источниках, наукометрических исследованиях и т. п.), создает свою собственную математическую модель, адекватность которой проверяется по экспериментальным данным.

Наиболее важными вопросами при подготовке эксперимента является воспроизводимость и правильность результатов измерений, возможность строгого соблюдения условий проведения опытов. В зависимости от цели эксперимента как слишком чувствительная, так и слишком грубая установки могут оказаться в одинаковой степени непригодными. Не следует стремиться к повышению воспроизводимости результатов (например, путем увеличения числа параллельных измерений), если снижение уровня случайных помех не отражается на окончательных решениях (например, если систематическая погрешность значительно превышает случайную).

В ходе собственно эксперимента проводится измерение некоторых величин, которые характеризуют сущность изучаемого процесса или явления. Такие величины называются *параметрами оптимизации*, *функциями отклика* или просто *откликами*. Эксперимент предъявляет к отклику следующие требования: отклик должен однозначно характеризовать изучаемый объект или процесс, быть количественно измеримым и статистически эффективным.

Измерения значений функций отклика в эксперименте производятся в зависимости от условий проведения опытов. Эти условия определяются качественными или количественными параметрами, которые мы ранее назвали факторами. В каждом из опытов измеряется действие факторов (*эффект факторов*); в течение всего времени измерения факторы необходимо поддерживать постоянными на нескольких дискретных значениях, которые носят название *уровней-факторов*.

Активные методы экспериментирования связаны с созданием и изучением математических моделей — уравнений регрессии. Исследователь предлагает вид модели, а последним этапом эксперимента является анализ адекватности модели и принятие решений.

Процесс планирования начинается с выбора функций отклика и факторов. При этом основными являются требования об отсутствии корреляций между факторами и о максимальном числе исследуемых факторов. Лучше затратить время на исследование любого разумного числа несущественных факторов, чем упустить из виду хотя бы один существенный.

4.2 Рандомизация

При проведении точных измерений исследователь часто имеет дело с систематическими погрешностями, которые связаны с различными специфическими лабораторными эффектами. Например, при химическом эксперименте -время

приготовления растворов, сроки хранения реактивов, влажность и состав атмосферы лаборатории, отклонения в калибровке мерной посуды, способ промывания осадков на фильтре, поступление ионов щелочных и щелочноземельных металлов из стеклянной посуды и т. п. Когда эти и подобные им эффекты не учтены, они могут проявиться как временное, т. е. действующие на протяжении некоторого короткого или более продолжительного промежутка времени.

Если искусственно создать условия случайности в процессе проведения эксперимента, то появляется возможность применения статистических критериев также и к систематически действующим факторам, в том числе и упомянутым временным. Таким же образом можно создать условия, при которых совокупность систематических погрешностей рассматривается как некоторая случайная выборка.

Процедура искусственного создания случайных условий — *рандомизация* (от английского random — случайный) заключается в том, что, применяя различные способы, основанные на вероятностных предположениях, выборку, в которой наблюдается (или может наблюдаться) некоторая закономерность, превращают в выборку случайных величин.

Для рандомизации результатов можно пользоваться вытягиванием номеров из тиражных барабанов, подбрасыванием монеты (если имеется только две группы условий) и т. п. В настоящее время наиболее употребительны для целей рандомизации специальные таблицы случайных чисел. Кроме того, в большинстве ЭВМ имеются программы для их генерации.

Рандомизация эксперимента приводит к тому, что решающим обстоятельством оказывается не физическая природа фактора, а постановка задачи и условия проведения эксперимента. Ценность рандомизации не только в том, что она создает случайные условия проведения исследований, но и в ограждении эксперимента от субъективных факторов, от которых не свободен ни один исследователь.

Конечно, требование проведения эксперимента в случайных условиях не очень удобно. Однако, если нет уверенности в идентичности условий проведения опытов по отношению к неучитываемым факторам, ответственность за применение статистических критериев к результатам и за последующие выводы лежит на экспериментаторе, применившем рандомизацию или отказавшемся от нее.

4.3 Модель эксперимента. Кодирование факторов

Преимущества методов статистического планирования эксперимента перед традиционными заключаются в возможности четкой и наглядной аналитической и геометрической интерпретации самого эксперимента.

С аналитической точки зрения эксперимент представляет собой выявление связи отклика y с рядом независимых переменных x_1, x_2, \dots, x_k . Эта связь выражается с помощью уравнения регрессии (математической модели эксперимента или просто модели);

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad 4.1$$

Это выражение, написанное в явном виде, является уравнением некоторой поверхности отклика в пространстве $(k+1)$ -мерного измерения. Таким образом, если все параметры правой части определены, мы имеем полную информацию о виде и свойствах поверхности отклика, что является предпосылкой для начала оптимизации функции y .

Для N различных условий измерений (N опытов) в пространстве факторов каждый из наборов точек $(x'_1, x'_2, \dots, x'_k); (x''_1, x''_2, \dots, x''_k); (x^n_1, x^n_2, \dots, x^n_k)$; представляет собой эти изменения условий. Следовательно, в геометрической интерпретации эксперимент — набор точек в факторном пространстве, каждая из которых характеризует условия проведения опыта.

Планирование эксперимента при этом заключается в выборе оптимального количества точек (опытов) и размещении их в пространстве факторов таким образом, чтобы уравнение поверхности было определено с наименьшей погрешностью. Кроме того, каждая из точек должна быть выбрана по возможности случайным образом и во времени, и в пространстве. Это означает, что как последовательность проведения опытов, так и соответствующие им точки на поверхности отклика должны быть рандомизированы.

4.4 Полный факторный эксперимент

Основной принцип одного из видов активного эксперимента, который называется *полным факторным экспериментом (ПФЭ)*, заключается в том, что каждый уровень какого-либо фактора в эксперименте исследователь варьирует вместе со всеми уровнями остальных факторов. Этот метод статистического планирования основан на регрессионном анализе. Для того чтобы исследовать k факторов на m уровнях, требуется выполнить m^k опытов. Обычно простейшие методы планирования предполагают изменение каждого из факторов на двух уровнях. В последнем случае общее число опытов (без параллельных измерений) для k факторов равно $N = 2^k$. Такие планы называются *двухуровневым ПФЭ*. Они позволяют максимально формализовать процедуру планирования и значительно ее упростить. Основной задачей является преобразование натуральных значений факторов, к тому же отличающихся друг от друга физической природой, в такую форму, которая была бы одинаковой, несмотря на различие факторов. Для этого натуральные значения уровней факторов X заменяют безразмерными x . Независимые безразмерные переменные получаются из натуральных значений путем кодирования следующим образом. Один из двух уровней с меньшим натуральным значением (нижний уровень) при таком кодировании полагается равным -1 , а уровень с большим значением (верхний уровень) — равным $+1$. Такое кодирование легко проводится путем преобразования

$$x_i = (X_i - \bar{X}_i) / \Delta X_i, \quad (4.2.)$$

где X_i — натуральное значение i -го фактора (в единицах измерения для количественного изменяющегося уровня и самого фактора); \bar{X}_i — среднее значение фактора:

$$\bar{X}_i = (X_{i(-)} + X_{i(+)}) / 2 \quad (4.3.)$$

индексы $(-)$ и $(+)$ означают натуральные значения фактора на нижнем и верхнем уровне, соответственно; величина ΔX , равная

$$\Delta X = \bar{X} - X_{i(-)} = X_{i(+)} - \bar{X} = (X_{i(+)} - X_{i(-)}) / 2, \quad (4.4)$$

носит название *интервала варьирования*.

Таким образом, согласно (4.2) значение независимой переменной x_i , есть не что иное как выраженное в единицах интервала варьирования значение отклонения фактора от среднего. Очевидно, что самому натуральному значению этого среднего будет соответствовать $x_i = 0$. Точка с координатами $x_1 = 0$; $x_2 = 0$; ...; $x_k = 0$ соответствует месту на поверхности отклика, которое носит название центра эксперимента. Как правило, центр эксперимента соответствует проведению опыта в условиях, которые исследователь считает исходными; часто это условия, выполняющиеся при повседневной работе или (если речь идет об исследовании производственного процесса) — при налаженном процессе.

Матрица планирования. Расчет коэффициентов модели

Поскольку теория планирования эксперимента предполагает использовать такие модели, которые были бы пригодны для любых экспериментов, т. е. для любых откликов и факторов, вид модели должен отражать возможность такого унифицированного ее применения. Наиболее всеобъемлющей моделью эксперимента является отрезок ряда Тейлора вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i^R b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (4.5)$$

где b — коэффициенты регрессии.

Примером модели ПФЭ типа 2^3 служит уравнение, не учитывающее квадратичные эффекты:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (4.6)$$

Интерпретация и оптимизация функции отклика сильно упрощается, если модель является линейной. При полном отсутствии взаимодействия (корреляций) между факторами такая модель может стать адекватной. Для трехфакторного эксперимента нелинейная модель (4.5) в этом случае перейдет в линейную вида

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3.$$

Для вычисления четырех коэффициентов регрессии в уравнении (4.6) по МПК достаточно провести уже только четыре опыта, соответствующих различным условиям, тогда как для определения восьми коэффициентов в (4.5) число таких опытов следует увеличить до восьми.

Число взаимных сочетаний уровней ($2^3 = 8$) можно представить табл. 4.1.

Подобные таблицы называются *матрицами планирования*. Строки соответствуют условиям проведения опытов, а графы — исследуемым факторам и их произведениям. Величина X_0 во второй графе — вспомогательная переменная для вычисления коэффициента b_0 модели. Значения обоих уровней факторов в таблице обозначены единичными векторами —1 и +1. В графе 11 приведены значения измерений функции отклика в условных единицах для численного примера. Таблица 4.1.

Матрица планирования полного факторного эксперимента типа 2^3

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	Отклик		Полуре-плика
									$y_{пл}$	(условное численное значение y)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_1	7	A
II	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2	5	
III	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3	10	
IV	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_4	20	
V	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_5	10	B
VI	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6	30	
VII	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7	2	
VIII	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_8	7	

Свойства матрицы планирования позволяют, пользуясь МНК, вычислить любые коэффициенты регрессии независимо друг от друга по результатам всех опытов. Формулы для этих вычислений имеют вид:

$$b_0 = \sum_{u=1}^N x_0 y_u / N = \bar{y}, \quad (4.7.)$$

$$b_i = \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u / \sum_{u=1}^N x_{iu}^2, \quad (4.8)$$

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u / N, \quad (4.9)$$

где x_{iu} и X/u — единичные векторы — кодированные значения i -го и j -го факторов в u -м опыте; y_u — значение функции отклика в этом же опыте.

Для определения коэффициентов в суммы выражений (4.7) — (4.9) подставляются единичные векторы, взятые из табл.4.1, Так, коэффициент b_1 , согласно данным граф 3 и 11, рассчитывается следующим образом:

$$b_1 = \frac{(-1) \cdot 7 + 1 \cdot 5 + (-1) \cdot 10 + 1 \cdot 20 + (-1) \cdot 10 + 1 \cdot 30 + (-1) \cdot 2 + 1 \cdot 7}{8} = 4,125.$$

Таким же образом можно вычислять остальные коэффициенты модели (4.5):

$$\begin{aligned} b_0 &= 11,375; & b_2 &= -1,625; & b_3 &= 3,125; \\ b_{12} &= -0,375; & b_{13} &= 6,125; & b_{23} &= 2,125; \\ b_{123} &= -0,875. \end{aligned}$$

Подставляя эти коэффициенты в модель, получим в окончательном виде:

$$y = 11,4 + 4,1x_1 - 1,6x_2 + 3,1x_3 - 0,4x_1x_2 + 6,1x_1x_3 - 2,1x_2x_3 - 0,9x_1x_2x_3$$

(значения всех коэффициентов округлены до 0,1).

Если в каждом из восьми опытов приведенного в примере эксперимента произвести по несколько параллельных измерений, то представляется возможность вычисления значимости коэффициентов и оценки адекватности модели.

Оптимизация функций отклика. метод Бокса — Уилсона

Когда основные этапы планирования выполнены (созданы модель и матрица планирования, проведен эксперимент и проверена адекватность модели), возникает вопрос о путях движения к оптимуму. Наиболее простой способ — метод Бокса — Уилсона — крутое восхождение по поверхности отклика.

Поскольку моделью является уравнение поверхности отклика, совершенно естественно предположить, что уже самый вид модели определяет пути для оптимизации. Так, если адекватная модель линейна, то, увеличивая или уменьшая (в соответствии со знаками коэффициентов регрессии) значения факторов, теоретически можно изменить значение отклика в любых пределах. Однако два обстоятельства препятствуют безграничному изменению отклика.

Во-первых, экспериментатор связан принципиальными и техническими ограничениями. Например, фактор массового содержания какого-либо вещества не может быть установлен на уровне выше 100 %, а температура не может быть поднята выше температуры плавления материала установки и т. д.

Во-вторых, любая модель, и в первую очередь линейная, справедлива только в пределах ограниченной области факторного пространства вокруг центра эксперимента. За пределами этой области адекватной **будет** уже другая, более сложная модель,

По Боксу—Уилсону, для оптимизации отклика нужно поступать согласно следующему правилу: движение в направлении градиента при линейном уравнении осуществляется последовательными шагами, которые пропорциональны

произведению коэффициента регрессии каждого фактора на значение его интервала варьирования; это движение необходимо осуществлять обязательно из центра эксперимента.

Шаг эксперимента для i -го фактора равен

$$h_i = b_i \Delta X_i.$$

Здесь интервал варьирования выражается в натуральных единицах.

4.5. Корреляционный анализ.

Под *корреляцией* понимается всякая связь между двумя или несколькими исследуемыми явлениями. Она может быть детерминистической или случайной (вероятностной). Первый тип связи определяется строгими закономерностями, обычно описываемыми физико-химическими формулами. Так, закон Ома в его тривиальной форме определяет жесткую связь между разностью потенциалов, силой тока и электрическим сопротивлением. Предметом обсуждения в настоящей главе является второй тип связи, когда эта связь между явлениями только предполагается и отсутствуют теоретические предпосылки, свидетельствующие о наличии такой связи.

В отличие от методов регрессионного анализа, методами корреляционного анализа исследуют случайную связь между независимыми переменными. Предлагая то или иное уравнение регрессии, исследователь тем самым определяет как само существование зависимости между независимыми переменными, так и математический вид этой зависимости. При корреляционном же анализе проверяется лишь сам факт, т. е. статистическая гипотеза об отсутствии (или наличии) связи. Сама природа величин, между которыми такая случайная связь предполагается, позволяет судить о ней как о вероятностной.

Результат корреляционного анализа носит статистический характер, так как заключение о наличии или отсутствии связи принимается с некоторой наперед заданной доверительной вероятностью.

Примером задачи корреляционного анализа может служить поиск статистических связей между различными химическими элементами в геохимии. Разнообразие условий возникновения тех или иных горных пород настолько велико, что даже для близких по свойствам элементов (например, калия и рубидия) найти геохимическую связь можно только статистическими методами.

Более простой пример — исследование влияния температурного режима на выход какого-либо химического продукта в сложном технологическом процессе. При этом с увеличением температуры возможно не только повышение скорости исследуемой реакции, но и протекание побочных реакций, а также и обратная реакция разложения продукта. Поэтому связь между температурой и выходом можно охарактеризовать только как случайную.

Обычно при корреляционном анализе исследуются только линейные связи между величинами, а статистические критерии свидетельствуют о наличии или отсутствии предполагаемой линейной связи. Поэтому отрицательный ответ при проверке гипотезы о корреляции может означать не только отсутствие связи, но и возможное наличие нелинейной зависимости между исследуемыми величинами.

Корреляционные методы наиболее широко распространены при количественных оценках в таких *описательных областях* науки, как психология и педагогика, и биологических и медицинских экспериментах, в геохимии. Эти методы в одинаковой мере необходимы и при других исследованиях как естественно-научных, так и социологических.

Коэффициент линейной корреляции двух исследуемых величин

Наглядной формой определения коэффициента линейной корреляции является так называемая *диаграмма рассеивания* — график в координатах x, y , на котором откладываются точки (x_i, y_i) . рис.4.1

Если корреляционная связь идеальна в том смысле, что между x и y с высокой степенью вероятности.

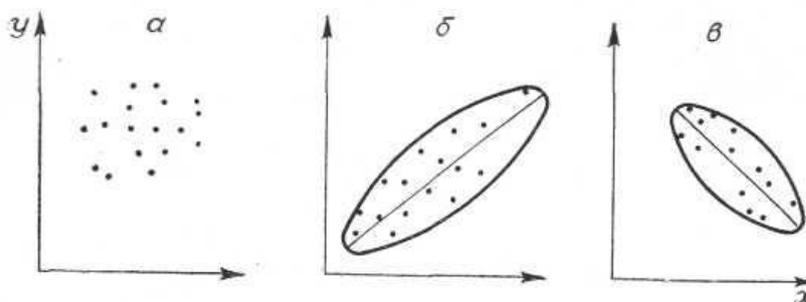


Рис.4.1 Корреляционная зависимость между случайными величинами x и y

существует линейная зависимость, а случайное рассеяние обеих величин пренебрежимо мало, то на диаграмме связь изобразится в виде прямой линии. Однако, поскольку всегда случайное рассеяние имеет место, точки будут располагаться на графике в некоторой конечной области, имеющей форму эллипса. Наоборот, если связь отсутствует или не является линейной, разброс точек на диаграмме рассеивания будет иметь вид хаотической области, близкой к кругу.

Графическое представление корреляции наглядно, однако это всего-навсего качественная оценка. Поэтому она должна быть дополнена статистическими расчетами, которые позволяют оценить силу связи уже количественно.

Первым шагом для такого расчета является вычисление ковариации. Для n пар точек ковариация равна

$$\begin{aligned} \text{cov}(x, y) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \\ &= \frac{1}{n-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y} \right]. \end{aligned}$$

Ковариация имеет смысл смешанной дисперсии, связанной с наличием корреляционной связи между величинами x и y . Связь называют *положительной*, если при росте одной из величин возрастает другая и наоборот. *Отрицательной* называют связь, когда при увеличении значений одной из величин другая уменьшается. Соответственно ковариация положительна, если связь положительна, а отрицательна в противоположном случае (напомним, что одномерная дисперсия — всегда положительная величина).

Для количественной оценки линейной корреляции пользуются выборочным коэффициентом парной корреляции r_{xy} — безразмерной величиной, нормированной к значениям средних квадратических отклонений исследуемых величин s_x и s_y :

или

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y) / s_x s_y}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

Коэффициент корреляции может принимать следующие значения:

- 1) $r_{xy}=0$; этот случай соответствует отсутствию связи между x и y (рис. 4.1, а);
- 2) $r_{xy}= +1$; между x и y существует строгая положительная линейная связь (рис. 4.1,б);
- 3) $r_{xy}=-1$; между x и y существует строгая отрицательная связь (рис. 4.1, в);
- 4) $-1 < r_{xy} < +1$; это наиболее часто встречающийся случай, и здесь о корреляции судят уже лишь с точки зрения большей или меньшей вероятности.

Силу связи оценивают методом статистической проверки гипотез. При этом предполагается, что нулевой гипотезой H_0 является условие $\rho_{xy} = 0$ (здесь символом ρ_{xy} обозначен истинный коэффициент корреляции для генеральных совокупностей величин x и y), т. е. отсутствие связи.

Статистическая проверка гипотезы об отсутствии корреляционной связи проводится с использованием таблиц теоретических значений распределения коэффициента корреляции.

ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА.

5.1 Классификация методов экспериментальных исследований

Натурные исследования проводятся на действующем объекте с целью изучения его характеристик или отдельных частей под влиянием всей совокупности протекающих в нем и в окружающей среде процессов. Модельные исследования проводятся на специально создаваемых стендах — экспериментальных установках (ЭУ) с целью детального изучения отдельных процессов, протекающих в реальных объектах. В особо ответственных случаях (например, при изучении надежности ядерных энергетических реакторов) создаются крупномасштабные ЭУ, максимально приближенные к натурным объектам. Опытный участок (ОУ) или ячейка — основная часть ЭУ, в которой реализуется исследуемый процесс тепло- или массообмена./11-14/

Моделирование подразделяется на физическое и по методу аналогий. По отношению к процессам в натурных объектах в ОУ осуществляется их моделирование на основе правил подобия: 1) процессы в ОУ и в натурном объекте должны быть одинаковой физической природы (при физическом моделировании) или же могут быть разной физической природы, но должны описываться одинаковыми математическими уравнениями (при моделировании по методу аналогий); 2) условия однозначности для процессов в ОУ и в натурном объекте должны быть подобными; 3) безразмерные комплексы, составленные из размерных величин, входящих в описание условий однозначности, должны быть равны или изменяться в одинаковых пределах.

Модельная жидкость (МЖ), заменяющая рабочую среду натурального объекта, подбирается из соображений удобства при соблюдении правил моделирования. Учитывается доступность, не токсичность, хорошая изученность теплофизических свойств. Во многих случаях в качестве МЖ используется вода. Если для изучаемого процесса характерна существенная зависимость от индивидуальных особенностей рабочей жидкости в сочетании со свойствами поверхности обтекаемого тела (например, при кипении), то при проведении таких исследований используют рабочую жидкость и материал поверхности натурального объекта.

Метод аналогий применяют в случае, когда удастся подобрать процесс, существенно легче осуществляемый экспериментально, чем натурный, и когда экспериментальные измерения проводят с большей точностью, чем в натуральных условиях. Так, для исследования температурных полей в твердых телах и неподвижных жидкостях широкое распространение получили электрические модели (электроинтеграторы). Решение таких задач в строгой математической постановке осуществляется с использованием ЭВМ. На электрических моделях можно получить предварительные сведения об изучаемых полях. Результаты измерений можно также использовать в итерационных расчетах на ЭВМ в качестве первого приближения.

5.2 Электротепловая аналогия для задач теплопроводности

Электротепловая аналогия (ЭТА) - экспериментальный метод решения уравнений теплопроводности, осуществляемый на электрических моделях. Наиболее распространены модели для решения стационарных двумерных задач, в которых теплопроводящая область заменяется геометрически подобной областью из графитизированной бумаги или металлической фольги (рис, 5.1). В электрической модели измеряется распределение электрических потенциалов v и токов I , а по ним путем пересчета находят распределение температуры T и тепловых потоков Q . Пересчет осуществляется на основе применения третьего правила подобия к уравнениям тепло- и электропроводности в неподвижной среде, записанным

применительно к рассматриваемой задаче с безразмерной форме. Для сходственных точек (т. е. при одинаковых значениях $X = x/L = x^3/L^3$ и $Y = y/L = y^3/L^3$) выполняется равенство

$$(T - T_{\min})/\Delta T = (v - v_{\min})/\Delta v, \quad (5.1)$$

где L и L' — масштабные линейные размеры; ΔT и Δv - масштабные разности температуры и электрических потенциалов; обычно используются разности между максимальными (T_{\max} , v_{\max}) и минимальными (T_{\min} , v_{\min}) величинами в конкретной задаче.

Задание температуры на границах теплопроводящей области имитируется заданием электрических потенциалов на соответствующих границах электропроводящей области. На эти участки накладываются электрические шины. Конвективный теплообмен между поверхностью тела и рабочей жидкостью, характеризуемый коэффициентом термического сопротивления теплоотдачи R_x имитируется протеканием электрического тока по электрическим сопротивлениям R^3_x , присоединенным к соответствующим участкам контура модели.

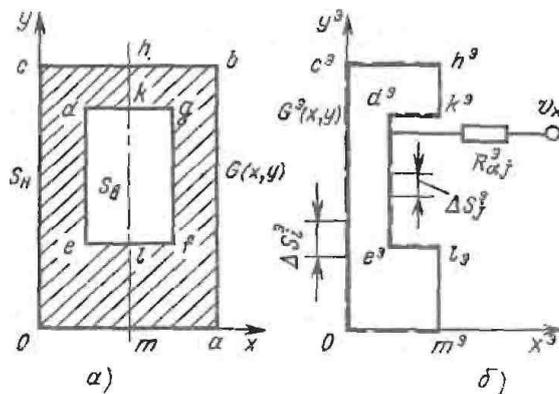


Рис. 5.1. Электромоделирование стационарного поля температуры в стенках канала:

- а) область поперечного сечения канала, $G(x, y)$ с симметрией по оси h - m ; S_H и S_B — наружный и внутренний контуры;
- б) — электропроводная область $G^3(x, y)$; i и j - номера участков ΔS^3_i ; и ΔS^3_j с наложенными шинами; $v_{\text{ж}} = v_{\text{мини}}$ - электрический потенциал, соответствующий температуре $T_{\text{ж}}$

Значение R^3_x определяется из соотношения

$$R_x = \frac{\lambda}{\alpha \Delta s \delta \gamma} \quad (5.2)$$

где λ - теплопроводность рабочей жидкости; α - коэффициент теплоотдачи на участке контура тела Δs ; δ - толщина проводящего листа модели; γ — его удельная электрическая проводимость.

5.3 Электрогидродинамическая аналогия

Электрогидродинамическая аналогия (ЭГДА) - экспериментальный метод решения задач гидродинамики на электрических моделях. Наиболее распространены модели для исследования обтекания тел плоским двумерным безвихревым потоком идеальной жидкости, в которых область течения заменяется графитизированной бумагой. Модель обтекаемого тела выполняется с соблюдением геометрического подобия либо в виде выреза в проводящей бумаге (1-й метод), либо из хорошего электрического проводника (2-й метод). По первому методу используется аналогия между распределением электрических потенциалов v и потенциалов скорости

φ , по второму — между распределением v и функцией тока ψ . Для сходственных точек выполняются равенства

$$V = \frac{\Delta v}{\Delta v_0} = \frac{\varphi - \varphi_{i\bar{i}}}{w_\infty L_x} \equiv \hat{O} \quad (5.3)$$

$$V = \frac{\Delta v}{\Delta v_0} = \frac{\psi - \psi_{i\bar{i}}}{w_\infty L_\delta} \equiv \Psi \quad (5.4)$$

где Δv - измеряемая разность электрических потенциалов по отношению к потенциалу одной из шин; Δv_0 — разность потенциалов между шинами; $\varphi_{i\bar{i}}$ и $\psi_{i\bar{i}}$ — минимальные величины на границах области течения, которые в силу произвольного выбора начала отсчета для φ и ψ принимаются равными нулю; w_∞ — скорость набегающего потока. На модели измеряется распределение величин $V = \Phi$ (по первому методу) или $V = \Psi^*$ (по второму методу). По методу ЭГДА можно найти распределение скорости при стабилизированном течении вязкой жидкости в каналах сложного поперечного сечения, а также коэффициенты сопротивления трения.

5.4 Диффузионно-тепловая аналогия

Диффузионно-тепловая аналогия (ДТА) — экспериментальный метод решения задач конвективного теплообмена, при котором используется аналогия между процессами конвективного теплообмена и массообмена. В модельную жидкость (воду или воздух) вводят специальные примеси с малой концентрацией ($c \ll 1$) и исследуется их выпадение на стенку обтекаемого тела (или удаление с нее). Особенность ДТА состоит в том, что на модели механизм конвективного переноса массы примеси имеет ту же природу, что и при конвективном теплопереносе; процессы молекулярной теплопроводности заменяются процессами молекулярной концентрационной диффузии.

Применение ДТА ограничено задачами теплообмена при постоянных физических свойствах рабочей жидкости. В опытном участке, выполняемом с учетом геометрического подобия, организуется процесс адиабатного массообмена, для чего осуществляются процессы поглощения поступающей к стенке примеси (или, наоборот, выделения ее в поток). В опытах определяются плотности потока массы примеси j_c для участка поверхности модели, а по ним путем пересчета — коэффициенты теплоотдачи α :

$$\alpha = \frac{j_c \lambda (L^M / L)}{\rho^M c_\infty D} \quad (5.5)$$

где λ — теплопроводность жидкости для моделируемого процесса теплообмена; L^M и L — характерные линейные размеры для диффузионной и тепловой задач; c_∞ — относительная массовая концентрация примеси в набегающем на тело потоке модельной жидкости; D — коэффициент диффузии примеси в модельной жидкости; ρ^M — плотность модельной жидкости. Наибольшее распространение получил *электрохимический* вариант ДТА. В этом случае в качестве модельной жидкости используется слабый электролит

5.5. Измерение стационарных тепловых потоков

Тепломеры, датчики теплового потока, вставки — специальные устройства для измерения тепловых потоков, размещаемые на поверхности тела или внутри него. Выполняются они либо из теплоизолятора, либо из материала теплопередающей поверхности и содержат термоэлектрические преобразователи (часто многоспайные), измеряющие разность температур в слое тепломера, пропорциональную проходящему через тепломер (датчик) тепловому потоку. Характеристики тепломеров определяются в градуировочных опытах. Конструкции разнообразных датчиков тепловых потоков и специальные *вставки* для измерения тепловых потоков в стенках труб паровых котлов описаны в [4доп].

При *прямом электрическом* обогреве круглой трубы диаметром d и длиной L местные на поверхности теплообмена плотности теплового потока q_c определяются по формуле:

$$q_c = [I^2 R(T_c) - Q_{\text{пот}}] / \pi d L, \quad (5.6)$$

где I — электрический ток; $R(T_c)$ — электрическое сопротивление стенок трубы, определяемое при температуре стенки трубы T_c в месте расчета q_c ; $Q_{\text{пот}}$ — тепловые потери. При *косвенном электрическом* обогреве определяется среднее для участка трубы ΔL значение \bar{q}_c :

$$\bar{q}_c = (I \Delta U - Q_{\text{пот}}) / \pi d \Delta L \quad (5.7)$$

Здесь I и ΔU — электрический ток и падение напряжения в нагревателе на участке трубы ΔL ; $Q_{\text{пот}}$ — тепловые потери.

Средние для участка поверхности теплообмена значения \bar{q}_c при жидкостном обогреве (охлаждении) рассчитывают по изменению энтальпии h вспомогательной жидкости и ее расходу G :

$$\bar{q}_c = (G \Delta h - Q_{\text{пот}}) / (\Delta F) \quad (5.8)$$

Здесь $Q_{\text{пот}}$ — тепловые потери для рассматриваемого участка ΔF , для круглой трубы $\Delta F = \pi d \Delta L$.

Местные по длине трубы значения плотности теплового потока q_c при жидкостном обогреве (охлаждении) определяются по *методу толстостенной трубы*. В стенках трубы размещаются термоэлектрические преобразователи вблизи внутренней и на наружной поверхностях, и в опытах определяется распределение температур внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{н}}$ поверхностей по длине трубы. По этим данным с учетом условий на торцах трубы на ЭВМ решается уравнение теплопроводности $\nabla^2 T = 0$. Решение дает температурное поле в стенках трубы $T(r, x)$ и значение $q_c = \lambda (\partial T / \partial r)_{\text{вн}}$. Приближенное решение можно получить методами электромоделирования.

Часто способ определения q_c по методу толстостенной трубы можно упростить, если в результате решения (или электромоделирования) выясняется, что влиянием тепловых растечек в осевом направлении можно пренебречь. Тогда труба с заложенными в нее термоэлектрическими преобразователями используется как тепломер, и значения теплового потока q_c рассчитываются по формуле

$$q_c = A(x, T) \Delta T, \quad (5.9)$$

где $A(x, T)$ — коэффициент; ΔT — разность температур в рассматриваемом поперечном сечении трубы, определяемая по показаниям термоэлектрических преобразователей, заложенных вблизи внутренней и на наружной поверхностях. Значения коэффициента

A определяются индивидуально для каждого сечения трубы с заложенными термоэлектрическими преобразователями путем специальных градуировочных опытов.

5.6 Источники ошибок при измерении тепловых потоков и способы их устранения

При применении метода толстостенной трубы основными источниками ошибок являются неучет тепловых растечек в осевом направлении и нарушение однородности температурного поля при закладке термо-электрических преобразователей вблизи внутренней поверхности трубы. Влияние осевых растечек выясняется (и по необходимости учитывается) в результате расчета температурного поля в стенке трубы на ЭВМ. Влияние нарушения однородности температурного поля при закладке термо-электрических преобразователей косвенным образом учитывается в коэффициентах A в (8.4), определяемых в градуировочных опытах. Внутри трубы располагается электрический нагреватель (при отсутствии в ней рабочей жидкости), а снаружи труба охлаждается вспомогательной жидкостью (например, водой). Нагреватель может располагаться также снаружи трубы, тогда внутри движется охлаждающая вспомогательная жидкость. Значения $\langle u_s \rangle$ определяются по выделяемой в нагревателе электрической мощности [формула (5.7)]. Значения A рассчитываются по этим значениям $\langle u_s \rangle$ и измеренным значениям ΔT по (5.9).

При определении q_s по (5.8.) для жидкостного обогрева (или охлаждения) основным источником ошибок являются ошибки в измерении среднemasсовых температур на входе и выходе из участка, по которым определяются соответствующие им энтальпии вспомогательной жидкости. Снижение ошибок достигается применением смесительных устройств, обеспечивающих полноту смешения. Тепловые потери (теплопритоки) возникают в результате теплообмена между опытным участком и окружающей его средой. При электрическом обогреве тепловые потери складываются из потерь путем теплопроводности по токоподводящим шинам (проводам) и потерь от опытного участка в окружающую среду путем конвекции и теплового излучения. Порядок потерь оценивается расчетом по формулам теплопроводности для охлаждаемого стержня, а также для свободной конвекции и теплового излучения применительно к конструкции опытного участка. Тепловые потери по шинам устраняются с помощью охранных электрических нагревателей, располагаемых на шинах, а теплопритоки (в частности, от выделения джоулевой теплоты в шинах) — путем охлаждения участков шин. Отсутствие потерь (или теплопритоков) контролируется по показаниям термопар, при этом участок шипы используется в качестве тепломера.

Тепловые потери в окружающую среду путем конвекции и теплового излучения определяют в градуировочных опытах. При пропускании через опытный участок в адиабатных условиях рабочей (или вспомогательной) жидкости измеряется температура на входе и выходе из нее и расход, по которым расчетным путем определяются тепловые потери. При электрическом обогреве измеряется подводимая электрическая мощность, которая при отсутствии движения рабочей жидкости равна тепловым потерям. Результаты опытов представляют в виде зависимости тепловых потерь от температуры поверхности теплообмена или наружной поверхности опытного участка

ГЛАВА 6. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ.

6.1 Классификация теплофизических свойств

Теплофизические свойства принято делить на несколько групп. Первую группу составляют равновесные теплофизические свойства веществ, являющиеся функциями состояния физических тел. К этой группе принято относить так называемые *термодинамические* свойства, которые в свою очередь подразделяются на *термические* и *калорические*. /7,10,11,13/

К термическим свойствам относится плотность вещества ρ (или удельный объем v), выраженная как функция давления p и температуры T . Наиболее общим выражением этой зависимости является термическое уравнение состояния

$$F(p, v, T) = 0.$$

К термическим свойствам относят также и любые частные производные, составленные из этих трех величин.

К термическим свойствам с некоторой условностью относят поверхностное натяжение.

К калорическим свойствам относятся внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, энергии Гиббса и Гельмгольца, теплоемкости.

Ко второй группе теплофизических свойств веществ относятся *транспортные*, или *переносные*, свойства. Эти свойства характеризуют неравновесные процессы в физических средах. К ним относятся теплопроводность, вязкость, диффузия и так называемые перекрестные эффекты — термодиффузия и концентрационная теплопроводность. Среди названных наиболее важными являются первые два.

В рамках допущений феноменологических теорий коэффициенты переноса однозначно определяются физической природой вещества и параметрами состояния. С этой точки зрения они являются свойствами веществ.

Методы определения термических свойств веществ

Определение плотности и линейного расширения твердых тел

В соответствии с определением плотность ρ равна:

$$\rho = m/V, \quad (6.1)$$

где V — полный объем, занимаемый веществом; m — его масса.

Величина, обратная плотности, называется удельным объемом: $v = 1/\rho$.

При определении плотности методом гидростатического взвешивания выполняются три взвешивания. Образец подвешивается на весах на тонкой проволоке. При первом взвешивании определяется вес образца в воздухе G_1 , при втором — вес образца G_2 , в жидкости (обычно в воде), при третьем — вес проволоки G_3 , погруженной в ту же жидкость. Плотность образца равна:

$$\rho_{\text{обр}} = \frac{G_1}{G_1 + G_3 - G_2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{возд}}) + \rho_{\text{возд}}. \quad (6.2)$$

Ошибка при тщательных измерениях не превышает 0,001 - 0,0001 %.

Метод пикнометра широко применяется для определения плотности сыпучих материалов, нерастворимых в жидкости. Пикнометр — сосуд (стеклянный, кварцевый и др.) с трубкой для заполнения его жидкостью. На трубке обычно наносится риска, фиксирующая некоторый объем пикнометра. Для массовых лабораторных измерений разработаны пикнометры вместимостью от 1 до 100 см³ (ГОСТ 22524-77), данные о которых приведены на рис. 6.1.

При использовании метода пикнометра выполняются три взвешивания. При первом взвешивании определяется вес исследуемого сыпучего материала G , в воздухе, при втором — вес пикнометра G_2 , заполненного жидкостью до риски. Перед третьим взвешиванием исследуемый сыпучий материал загружается в пикнометр, а излишки

жидкости удаляются так, чтобы ее уровень находился напротив риски; затем определяется вес сыпучего материала

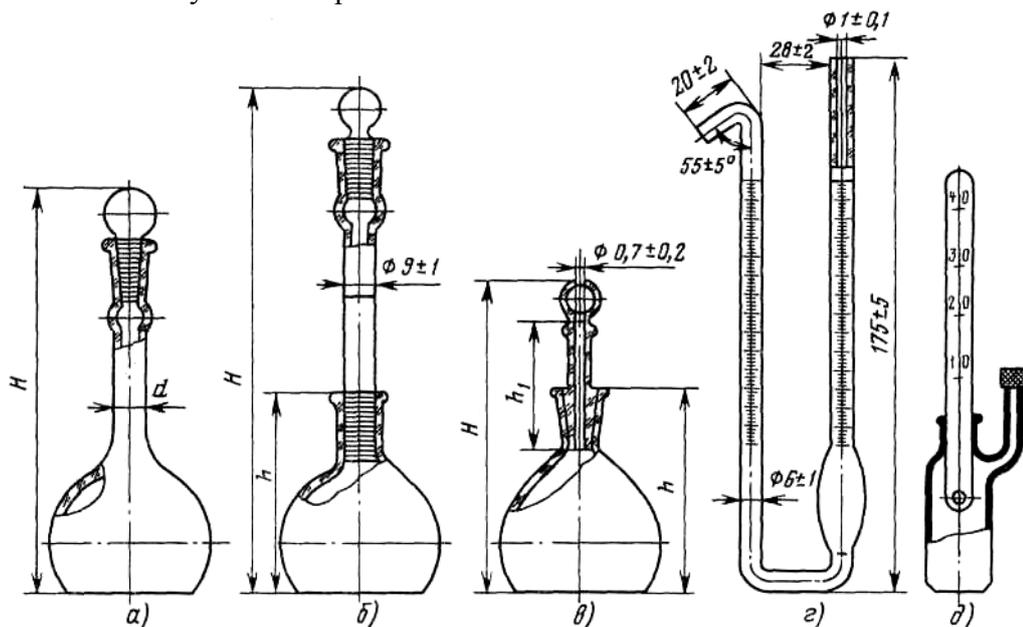


Рис. 6.1. Пикнометры для жидкостей и твердых тел:

а — в — колбообразные шаровидные; г — U-образный; д — цилиндрический с капиллярной трубкой и термометром

Методы определения коэффициента линейного расширения различаются, главным образом, способами измерения удлинений образца.

Схема *относительного метода кварцевого дилатометра* (метод Генинга) изображена на рис. 6.2. Исследуемый образец 1 помещен в кварцевую трубку 2. Относительные расширения образца при изменении температуры, создаваемой печью 4, измеряются при помощи микроскопа 6 и регистрируются по шкале 5, соединенной с кварцевым толкателем 3. В качестве измерителя удлинений образца удобно использовать длинномеры, например ИЗВ-1, ИЗВ-2. Дилатометр, выполненный по этому методу, может работать при температурах до 1300 К. Обычно применяются образцы длиной от 100 до 200 мм. Погрешности при измерении коэффициента линейного расширения не превышают 1 %

Промышленность выпускает кварцевый дилатометр ДКС-900Д, схема которого показана на рис. 6.3. Он рассчитан для работы при температурах 273 — 1173 К с образцами размером 12 мм.

Интерферометрический метод исследования коэффициента линейного расширения является абсолютным. В этом методе для измерения удлинений используется явление интерференции. Схема метода изображена на рис. 6.4.

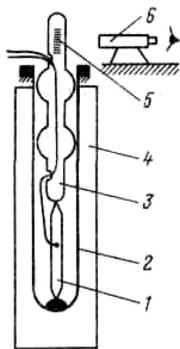


Рис.6.2 Схема кварцевого dilatометра

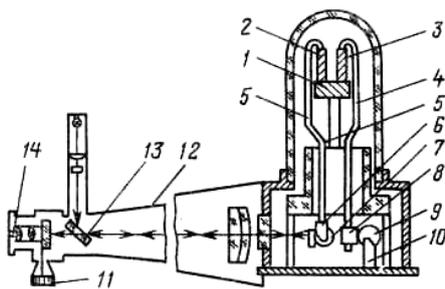


Рис. 6.3. Схема dilatометра ДКС-900Д

1 — кварцевый столик; 2 — образец; 3 — эталон;
4, 5 — кварцевые толкатели; 6, 10 — кронштейны;
7, 9 — ролики; 8 — магнит; 11 — окулярный микрометр;
12 — оптическая трубка; 13 — полупрозрачное зеркало;
14 — окуляр

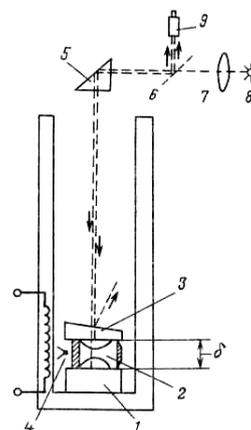


Рис. 6.4. Схема dilatометра интерферометрического;

Исследуемый образец 2 (изображен в разрезе) покоится на кварцевой опоре 1, верхняя поверхность которой оптически плоская. На образце сверху располагается клиновидная кварцевая пластина 4. Нижняя поверхность клиновидной пластины и верхняя поверхность опоры 1 расположены строго параллельно и образуют интерференционный зазор 6. Источником света является монохроматор 8 или лазерный луч. Луч проходит через линзу 7. Интерферометрическая картина, возникающая в зазоре 5, а затем отраженная призмой 5 и полупрозрачным зеркалом 6, наблюдается в микроскопе 9. При изменении длины образца 2 (изменении зазора 6) в поле зрения микроскопа наблюдается смещение интерферометрических полос. Смещение картины на одну полосу соответствует изменению длины образца на величину $8/2$, где 8 — длина волны монохроматического излучения. Температура образца измеряется термоэлектрическим преобразователем 3.

Средний коэффициент линейного расширения вычисляется по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l_0} \frac{n\lambda}{2(T - T_0)}, \quad (6.3)$$

где α — число полос, переместившихся в поле зрения микроскопа, при изменении температуры от T_0 до T . Точность метода — 1 %.

Метод компаратора также является абсолютным. Схема метода представлена на рис. 6.5, а.

Образец 1 располагается в высокотемпературной печи 2. Изменение длины образца регистрируется специальным микроскопом-компаратором 4. Наблюдение за образцом осуществляется через смотровые окна 3, размещенные в корпусе печи. Микроскоп позволяет измерять смещение обоих концов образца, т. е. непосредственно удлинение образца, что повышает точность эксперимента. В поле зрения микроскопа наблюдается картина, изображенная на рис. 5.5,б. Штриховой линией показано положение концов образца при исходной температуре T_0 , сплошной контур — положение концов при температуре опыта T . Метод может быть использован до 3000 К с точностью не менее 1%

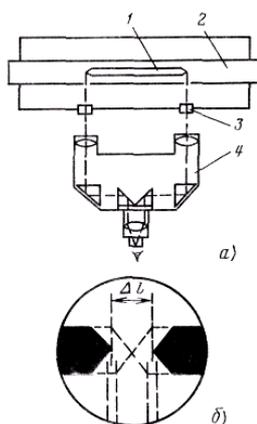


Рис. 6.5. Схема дилатометра-компаратора: Δl — удлинение образца

6.2. Определение плотности жидкостей и газов

Плотность жидкостей и газов исследуется как функция температуры и давления.

Метод гидростатического взвешивания для жидкостей основан на определении веса твердого тела (поплавка) в воздухе, воде и исследуемой жидкости. Плотность исследуемой жидкости рассчитывается по формуле

$$\rho_{ж} = \frac{G_1 + G_3 - G_2}{G_1 + G_5 - G_4} (\rho_{воды} - \rho_{возд}) + \rho_{возд}, \quad (6.4)$$

где G_1 ; —вес твердого тела в воздухе; G_2 — вес твердого тела с подвесом из проволоки в исследуемой жидкости; G_3 — вес подвеса из проволоки в исследуемой жидкости; G_4 — вес твердого тела с подвесом из проволоки в воде; G_5 — вес подвеса из проволоки в воде. Точность определения плотности жидкости этим методом не менее 0,001 %.

При методе пикнометра плотность исследуемой жидкости рассчитывается по формуле

$$\rho_{ж} = \frac{G_{пик2} - G_{пик1}}{G_{пик3} - G_{пик1}} (\rho_{воды} - \rho_{возд}) + \rho_{возд}, \quad (6.5)$$

где $G_{пик1}$ — вес пустого пикнометра; $G_{пик2}$ — вес пикнометра, заполненного исследуемой жидкостью; $G_{пик3}$ — вес пикнометра, заполненного водой. Конструкции используемых пикнометров представлены на рис. 6.1. Схема метода применительно к высоким давлениям изображена на рис. 6.6.

Для измерения плотности жидкостей используются также ареометры (денситометры)— приборы, принцип действия которых основан на зависимости выталкивающей силы жидкости от ее плотности.

Для технических измерений используются ареометры двух типов: ареометры постоянного и переменного объема. Ареометр постоянного объема при измерениях вытесняет всегда один и тот же объем жидкости. В жидкостях с различной плотностью при этом необходима различная масса ареометра. Таким образом, масса ареометра однозначно связывается с плотностью

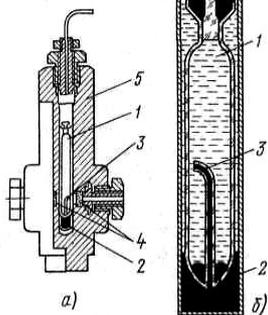


Рис. 6.6. Схема пикнометра:
a — пикнометр в сосуде давления:
 1 — корпус пикнометра; 2 — ртуть;
 3 — капилляр; 4 — смотровые окна;
 5 — сосуд давления;
б — пикнометр в сборе:
 1 — исследуемая жидкость;
 2 — ртуть; 3 — капилляр

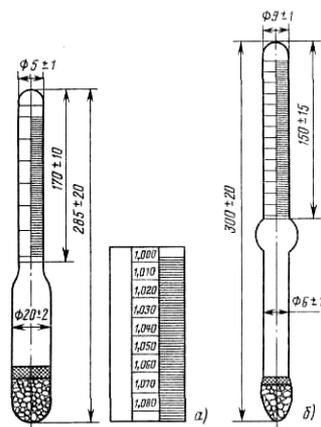


Рис. 6.7. Ареометры (денситометры)
 общего назначения:
a — колбообразный;
б — палочный

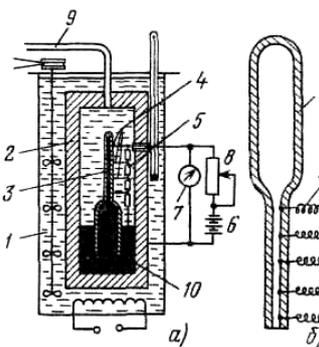


Рис. 6.8. Схема пьезометра перем. объема:
a — принципиальная схема установки: 1 — термостат
 2 — корпус; 3 — пьезометр; 4 — контакты;
 5 — сопротивления; б — батарея; 7 — вольтметр;
 8 — реостат; 9 — линия давления; 10 — ртуть;
б — пьезометр для малосжимаемых жидкостей:
 1 — сосуд пьезометра; 2 — контакты

В ареометрах переменного объема масса ареометра остается постоянной, но в жидкостях различной плотности он погружается на различную глубину, вытесняя различный объем. Объем вытесненной жидкости однозначно связан с плотностью исследуемой жидкости.

Для ареометров с постоянной массой используются два типа градуировок: для определения плотности чистых жидкостей шкала градуируется в единицах плотности, для определения концентрации жидких растворов шкала градуируется в процентах (в объемных или массовых долях). Выпускаются ареометры различного назначения: для определения плотности нефтей, молока, морской воды, растворов кислот, щелочей, солей и др. На рис. 6.7 показан ареометр общего назначения.

Метод пьезометра переменного объема относится к хорошо разработанным и широко используемым в исследовательской практике. Пьезометр — сосуд, способный выдерживать полное давление в опыте. Обычно объем пьезометра точно измеряется. Наиболее совершенный вариант этого метода был разработан для исследования сжимаемости газов. Однако он пригоден и для исследования плотности жидкости. Суть метода сводится к следующему. Определенная масса жидкости m изотермически сжимается в пьезометре до точно известного объема $V_{ж}$

Плотность жидкости определится по формуле

$$\rho = m/V_{ж} \quad (6.6)$$

Количество жидкости в пьезометре во время опыта остается постоянным; объем, занимаемый жидкостью, изменяется с изменением давления. Принципиальная схема установки изображена на рис. 6.8, а. В пьезометр 3 заключено исследуемое вещество. По каналу (линии давления) создаваемое прессом давление передается на ртуть, которая сжимает вещество в пьезометре. Уровень ртути фиксируется по изменению показания вольтметра в момент замыкания одного из контактов ртутью. Объем пьезометра до каждого из контактов точно измерен.

В случае исследования жидкости вдали от критической точки лучше применять пьезометр, изображенный на рис. 6.8, б. Жидкость в этом случае имеет малую сжимаемость, и для заметного изменения объема необходимо брать большую начальную массу ее. Применяется метод, в котором поршень, передающий давление на жидкость, изменяет объем пьезометра. Схема поршневого пьезометра изображена на рис. 6.9. Пьезометр 3 окружен нагревателем 1. Температура пьезометра контролируется термопарой 2. Поршень 4, тщательно притертый к стенкам

пъезометра, сжимает жидкость в пъезометре. О перемещении поршня судят по изменению сопротивления размещенной в корпусе 5 константановой проволоочки 7, часть которой шунтируется контактами 6. Пъезометр переменного объема, выполненный из сильфона, показан на рис. 6.10. Внутри сильфона вводится известное количество жидкости. Изменение длины сильфона при воздействии на него внешнего давления однозначно связано с изменением его внутреннего объема. Предварительная градуировка изменения объема в зависимости от его длины производится в отдельных опытах.

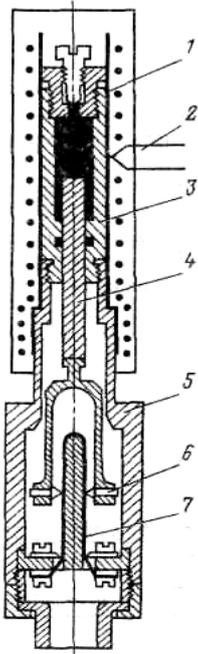


Рис.6.9. Поршневой пъезометр переменного объема

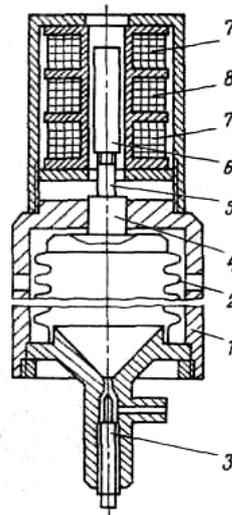


Рис. 6.10. Сильфонный пъезометр переменного объема
1 — стакан; 2 — сильфон; 3 — клапан;
4 — направляющая гильза; 5 — стержень;
6 — сердечник; 7 — вторичная обмотка датчика; 8 — первичная обмотка датчика

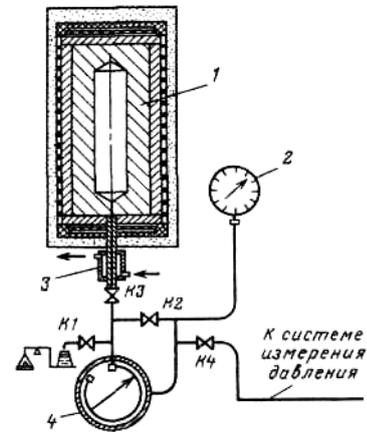


Рис. 6.11. Схема установки для определения удельных объемов жидкостей и газов:
1 — пъезометр; 2 — манометр
3 — холодильник; 4 — дифференциальный манометр-разделитель; K1 — K4 — клапаны

Изменение длины сильфона измеряется индукционным методом. На установке выполнялись измерения плотности при давлениях до 200 МПа с погрешностью примерно 0,08%.

В соответствии с методом пъезометра постоянного объема в сосуд известного постоянного объема $V_{\text{п}}$ вводят известное количество жидкости $m_{\text{ж}}$ при заданных давлении P и температуре T . Эти измерения позволяют определить плотность, как $\rho = m_{\text{ж}}/V_{\text{п}}$ и отнести полученный результат к давлению и температуре опыта. Переход к новому состоянию вещества осуществляют путем последовательных выпусков части его массы $\Delta m_{i, \text{вып}}$. В новом равновесном состоянии масса вещества

$$m_{i\text{ж}} = m_{\text{ж}} - \sum_{i=1}^{i=n} \Delta m_{i \text{ вып}} \quad (6.7)$$

и плотность $\rho_{i\text{ж}} = m_{i\text{ж}}/V_{\text{п}}$. Часто начальное количество вещества $m_{\text{ж}}$ неизвестно. Оно находится как сумма масс всех выпусков плюс остаточное количество вещества в пъезометре. Метод требует внесения поправок на изменение объема пъезометра с температурой и давлением (если пъезометр не разгружен от давления). Существенной особенностью метода является внесение поправки на выпуск части жидкости не только из пъезометра, но и из соединительных коммуникаций (поправка на балластный объем).

На рис. 6.11 показана экспериментальная установка, выполненная по методу В. А. Кириллина, — разновидность пьезометра постоянного объема. Исследуемое вещество находится в толстостенном пьезометре. Пьезометр соединен с внутренней полостью пружинного манометра при помощи толстостенного стального капилляра. Наполнение пьезометра исследуемым веществом перед опытом и выпуск части вещества в опытах производятся через клапан К1. В корпусе манометра поддерживается давление на несколько бар меньше, чем в пьезометре. Разность давлений фиксируется по показаниям стрелки манометра. Манометр служит для разделения исследуемого вещества и вещества системы создания и измерения давления (масла). Точное измерение давления исследуемого вещества осуществляется поршневым манометром

ГЛАВА 7. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ, СКОРОСТИ, ПЛОТНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИЙ.

7.1 Измерение полей температуры в потоках жидкости и газа

Измерение полей температуры производится в основном подвижными зондами, на конце которых располагаются датчики температуры: термоэлектрические преобразователи, термопреобразователи. Чувствительный элемент датчика (спай термоэлектрического преобразователя, нить или пленка термопреобразователя сопротивления) находится в контакте с исследуемой жидкостью. /12,14/

Форма и размер чувствительного элемента определяются особенностями исследуемого поля температуры. Конструкции типичных датчиков температуры показаны на рис. 7.1. Размер чувствительного элемента датчика δl связан с градиентом температуры в исследуемой области течения соотношением:

$$\delta l \leq |\delta T / (\text{grad} T)| \quad (7.1)$$

где δT — допустимая погрешность измерения температуры

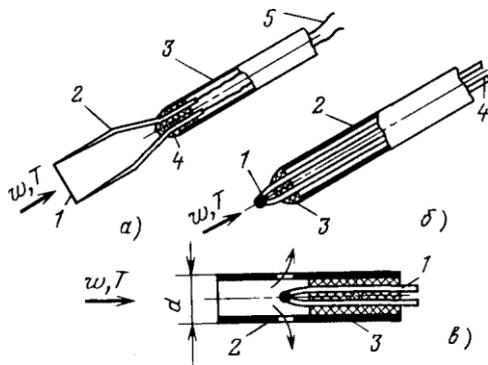


Рис. 7.1. Зонды для измерения полей температуры в потоке жидкости: а — с термометром сопротивления: 1 — нить; 2 — вилка; 3 — трубка; 4 — эпоксидная смола; 5 — провода; б — с термопарой: 1 — спай; 2 — трубка; 3 — эпоксидная смола; 4 — провода; в — с экранированием спая: 1 — термоэлектрический преобразователь; 2 — трубка с вентиляционными отверстиями; 3 — изоляция

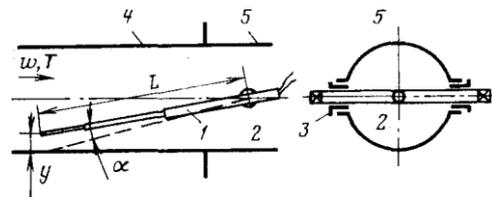


Рис. 7.2. Подвижный зонд для измерения поля температуры или скорости: 1 - тело зонда; 2 — поворотный вал; 3 — система уплотнения; 4 — труба; 5 — камера зонда

Зонды вводятся в поток либо через стенку рабочей камеры, в которой расположено обтекаемое тело, либо через стенку трубы или ее выходной торец (рис. 7.2). Место ввода герметизируют уплотнениями сальникового типа или с помощью сильфонов. Перемещение зонда и определение положения в потоке его чувствительного элемента осуществляются с помощью координатного устройства, снабженного микрометрическим винтом или стандартными механическими индикаторами. Допустимая погрешность определения координаты расположения чувствительного элемента δy связана с допустимой погрешностью измерения температуры δT соотношением (7.1), в котором вместо величины δl подставляется величина δy .

По сигналу от чувствительного элемента (например, термо-ЭДС от спая термоэлектрического преобразователя) определяют собственную температуру элемента $T_{\text{изм}}$, которая в общем случае не равна температуре исследуемой среды T в месте расположения чувствительного элемента. Для термоэлектрического преобразователя, находящегося в цилиндрическом капилляре, введенном в поток, и измеряющего температуру его свободного конца, значение $\delta T = T - T_{\text{изм}}$ вследствие отвода теплоты по капилляру длиной l может быть оценено как $\delta T = (T - T_0) / [ch(ml)]$, а вследствие теплообмена излучением между измерителем температуры и стенками трубы (без учета отвода теплоты по капилляру) — как $\delta T = (\varepsilon C_0 / \alpha) [(T_{\text{изм}}/100)^4 - (T_0/100)^4]$. Здесь

T_0 — температура закрепленного конца капилляра; $m = \sqrt{\alpha/(\lambda\delta)}$; α — коэффициент теплоотдачи между жидкостью (газом) и капилляром; λ — теплопроводность стенок капилляра толщиной δ ; ε — приведенный коэффициент теплового излучения; $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; T_c — температура стенки трубы.

Требуемая точность измерения температуры обеспечивается созданием условий, при которых разность δT снижается до допустимых значений. Применяют провода малого диаметра с низкой теплопроводностью, конструктивные элементы зонда располагают в изотермических плоскостях. Влияние теплового излучения снижают путем уменьшения размеров чувствительного элемента, покрытия его материалами с низкой излучательной способностью, применения экранирования. В скоростных газовых потоках (при числах Маха $M > 0,3$) температура датчика T_r выше термодинамической температуры T в месте его расположения: $T_r = T + rw^2/(2c_p)$, где r — коэффициент восстановления температуры; w и c_p — скорость и удельная теплоемкость набегающего газового потока. Для измерения полей температуры в топочных камерах паровых котлов применяют отсасывающие термоэлектрические преобразователи, которые располагают в охлаждаемых трубах (штангах), вводимых в топку через смотровые лючки. Через внутреннюю трубу, в которой расположен термоэлектрический преобразователь, производится отсос газа с целью улучшения теплообмена между ним и спаем термопары. Оптическими пирометрами измеряется средняя по ходу светового луча температура газовой среды. Наблюдения ведутся через смотровые окна с использованием световодов.

7.2 Фондовые методы измерения полей давления в потоках жидкости и газа

Для измерения полей *статического* давления используют продольно обтекаемые трубки, клинья или шайбы с отборами давления (отверстиями) на боковой поверхности, параллельной линиям тока набегающего потока. В потоках с однородным полем давления отборы выполняют в стенках труб или рабочих камер. Ось отбора давления должна быть перпендикулярна их поверхности (рис. 7.3.). Радиусы отверстий должны быть не более 0,1 радиусов кривизны поверхности тела в данной точке во избежание образования вторичных течений в области приемного отверстия, но не менее 0,2 мм.

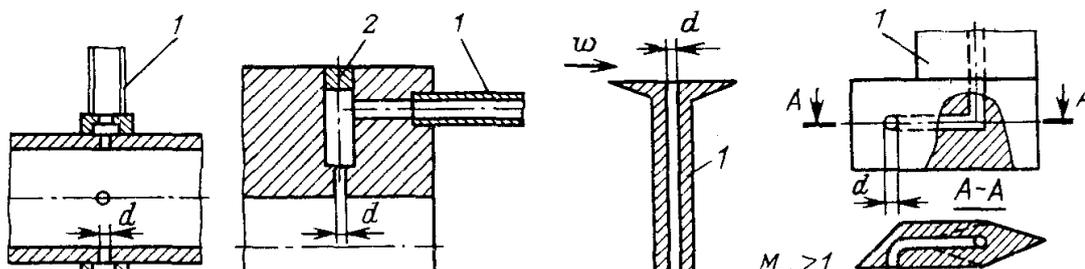


Рис. 7.3 Отборы статического давления диаметром d с импульсными трубками

Минимальные размеры ограничены ростом гидравлического сопротивления отборов, через которые к измерителю давления перетекает часть рабочей жидкости. Это ограничение особенно существенно при измерении нестационарных давлений.

Полное давление p_0 (давление торможения) измеряется с помощью передвижных зондов с приемным отверстием, установленным навстречу потоку. Обычно используют продольно обтекаемые трубки круглого поперечного сечения или со сплюсненным концом (рис. 7.4). Для таких трубок допустимо отклонение оси от направления течения в пределах $\pm 10^\circ$. Измеряемое давление $p_{изм}$ не равно в точности давлению p_0 ; в области

расположения приемного отверстия вследствие гидродинамических эффектов, возникающих при обтекании трубки. Для круглой трубки в потоке несжимаемой жидкости это отклонение можно оценить по эмпирической формуле:

$$\frac{\delta_{\text{эци}} - \delta_0}{(pw^2/2)} = 1 + \frac{5.6}{\text{Re}} \quad (7.2)$$

где $\text{Re} = wd/\nu$ — число Рейнольдса, определяемое по скорости набегающего потока w и наружному диаметру трубки d ; p и ν — плотность и кинематическая вязкость жидкости (газа).

Перемещение трубок полного давления и определение координат положения приемного отверстия производят с помощью координатных устройств типа показанных на рис. 7.5,

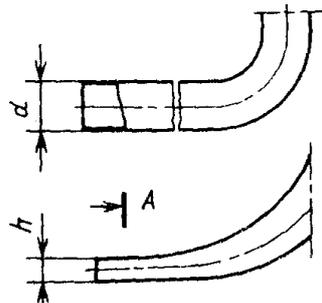


Рис. 7.4 Трубки для измерения полного давления «центра» $u_{\text{эф}}$
А – трубка со сплюснутым концом

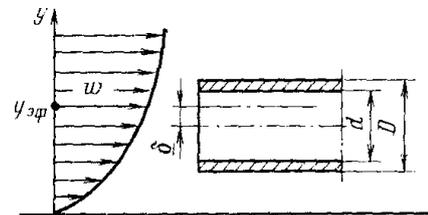


Рис.7.5 Смещения координаты «эффективного

при измерении полного давления в пограничном

слое
Форма и размер приемного отверстия трубки определяются особенностями исследуемого поля давления p_0 . При измерениях в пограничном слое на поверхности обтекаемого тела с большими градиентами скорости размер трубки δl в направлении изменения скорости должен соответствовать соотношению

$$\delta l \leq |\delta p_0 / (\text{grad} p_0)| \quad (7.3)$$

где δp_0 — допустимая погрешность измерения p_0 , принимаемая равной изменению p_0 на расстоянии δl . В плоских пограничных слоях необходимые малые величины δl без возрастания гидравлического сопротивления отбора давления достигаются сплющиванием приемного отверстия. Для повышения точности измерений трубки предварительно градуируют.

Измеренное значение давления относят обычно к координате расположения геометрического центра приемного отверстия. В потоках с большими градиентами скорости измеренное значение давления относят к координате «эффективного центра», смещенного от геометрического в сторону большей скорости на расстояние δ (рис. 7.5). Для несжимаемой жидкости значения δ можно оценить по эмпирической формуле:

$$\frac{\delta}{D} = 0.131 + 0.082 \frac{d}{D} \quad (7.4)$$

где D и d — наружный и внутренний диаметры трубки.

ГЛАВА 8. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.

Тепловая изоляция в современной теплоэнергетике и промышленности играет важную роль. С ее помощью решают вопросы жизнеобеспечения, организации технологических процессов, экономии энергоресурсов. Теплоизоляционные конструкции являются неотъемлемой частью защитных элементов промышленного оборудования, трубопроводов, частей жилых, общественных и промышленных зданий. Благодаря изоляции значительно повышаются надежность, долговечность и эффективность эксплуатации зданий, сооружений и оборудования. /15/

Волокнистые теплоизоляционные материалы

Основой промышленности теплоизоляционных материалов является производство теплоизоляционных изделий из минеральной ваты. К новым волокнистым теплоизоляционным материалам, в последние годы, следует отнести пластмигран и волокнистые изделия на кожевенных отходах.

Пластмигран представляет собой материал, состоящий из минераловатных гранул и пыли полистирола.

Теплозвукоизоляционные и теплоогнезащитные материалы

Многие теплоизоляционные материалы имеют двойное, тройное назначение и используются для звукопоглощения и в огнезащите. В связи с этим при разработке новых теплоизоляционных материалов следует по возможности больше внимания уделять этим направлениям применения утеплителей. В частности, с этих позиций оптимизированы свойства такого нового материала, каким является пластмигран, описанный выше.

На опытном заводе освоено производство нового огнезащитного материала — *термофобсита*, который представляет собой неорганический материал плотностью 400—800 кг/м³ с интегрально-пористой структурой, обеспечивающей ему низкую теплопроводность вплоть до 1200 °С. Такой материал найдет применение при строительстве хранилищ, цехов и зданий для огнеопасных производств, лифтов, для огнезащиты электрических кабелей, металлических и других несущих конструкций. К вопросу рационального использования современных утеплителей тесно примыкает проблема производства и использования качественных защитно-покровных материалов тепловой изоляции. Результаты обследования и эксплуатации теплоизолированных объектов показывают, что срок службы изоляции в первую очередь зависит от того, насколько надежно защищена сама тепловая изоляция от внешних воздействий, как решена вся теплоизоляционная конструкция.

В настоящее время в изоляционных конструкциях применяются различные виды защитных покрытий. Это листовые покрытия, выполненные из оцинкованной стали, алюминиевых сплавов, рулонные и листовые стеклопластики, фольгированные и дублированные материалы, стеклоцемент и др. Применение того или иного вида защитного покрытия определяется условиями эксплуатации утеплителя. В обычных условиях наибольшей долговечностью (10—12 лет) характеризуются металлические защитные покрытия из оцинкованной стали и алюминиевых сплавов. Однако на энергетических предприятиях при воздействии химически агрессивных сред срок службы металлических защитных покрытий часто не превышает 2—3 лет. В этих условиях более долговечными являются покрытия на основе полимерных материалов. Однако надо иметь в виду, что применение даже наиболее эффективных теплоизоляционных материалов не решает проблему долговечности.

8.1 Теплоизоляционная конструкция и ее основные элементы

Теплоизоляционная конструкция представляет собой комплекс, отвечающий совокупности требований, определяемых внутренними условиями работы изолируемого объекта и внешними условиями эксплуатации конструкции.

Условия работы тепловой изоляции, а следовательно, и выбор той или иной теплоизоляционной конструкции во многом зависят от типа изолируемого объекта.

К основным типам изолируемых объектов следует отнести:

- оборудование и трубопроводы технологических установок и энергетических систем, холодильных установок; теплофикационные сети;
- промышленные печи и дымовые трубы;
- жилые и промышленные здания и сооружения;
- транспортные средства.

Объекты тепловой изоляции в нефтяной и химической промышленности — ректификационные колонны, регенераторы, скрубберы, реакторы, калориферы, теплообменники, емкости для хранения нефтепродуктов, конденсатные сборники и др.

В энергетических системах тепловая изоляция выполняется на оборудовании и трубопроводах теплоэлектростанций, котельных местного значения. Тепловой изоляции подлежат паровые котлы, паровые и газовые турбины, подогреватели, испарители, деаэраторы, баки, бойлеры, насосы, дымососы, газоходы, вентиляторы, сепараторы, циклоны и др.

В промышленных тепловых агрегатах изолируются доменные, нагревательные, термические, стекловаренные, вращающиеся печи, электропечи, промышленные сушила, тоннельные и нагревательные печи, котлы-утилизаторы, подогреватели, воздухонагреватели, металлические, кирпичные и железобетонные дымовые трубы.

В зависимости от температуры изолируемых объектов они подразделяются на объекты с положительной и отрицательной температурой поверхности.

По форме и размерам объектов тепловой изоляции конструкции бывают:

- плоские (стены, перекрытия промышленных и жилых зданий, холодильников; стены, полы, своды теплотехнических установок, поверхности технологических аппаратов);
- поверхности большого радиуса кривизны (вертикальные и горизонтальные технологические аппараты, колонны, емкости диаметром более 1600 мм);
- поверхности оборудования и трубопроводов диаметром 500—1600 мм; трубопроводы диаметром до 500 мм;
- поверхности сложной конфигурации (фланцевые соединения трубопроводов и аппаратов, запорная арматура, компенсаторы, отводы, повороты, тройники).

Существует еще целый ряд признаков, характеризующих теплоизоляционные конструкции: высота и длина, вертикальное или горизонтальное расположение.

Теплоизоляционные конструкции состоят из следующих основных элементов:

- теплоизоляционного слоя;
- кровного слоя, предохраняющего основной от атмосферных осадков, механических повреждений, воздействия агрессивных сред;
- пароизоляционного слоя, защищающего изоляцию от атмосферной влаги;
- крепежных деталей, которыми крепят теплоизоляционный и кровный слои между собой и к изолируемой поверхности, а также обеспечивают жесткость конструкции.

Теплоизоляционный слой, как правило, непосредственно примыкает к изолируемой поверхности и выполняет теплозащитную функцию. В ряде случаев производят антикоррозийную обработку объекта, если выбранный тип изоляции сам не несет функций защиты от коррозии.

8.2 Свойства теплоизоляционных материалов и конструкций, методы их контроля

Для того чтобы успешно решить задачу, поставленную при создании и возведении теплоизоляционной конструкции, необходимо, чтобы выбранные теплоизоляционные материалы отвечали определенным требованиям. Среди наиболее значимых требований — низкая и постоянная в течение всего времени эксплуатации теплопроводность, способность не разрушаться под воздействием атмосферных явлений и температуры изолируемого объекта, не вызывать коррозии и разрушения изолированного объекта, не препятствовать температурным деформациям изолированного объекта. Срок службы изоляции, как правило, не должен быть ниже срока службы изолированного объекта.

Суждение по этим и другим свойствам теплоизоляционных материалов можно вынести после рассмотрения совокупности свойств, определенных общепринятыми методами.

Плотность — величина, равная отношению массы вещества к занимаемому им объему (без учета пор и пустот). Плотность определяют (г/см^3 , кг/м^3 , т/м^3) по формуле $\rho = m/V$,

где m — масса материала, кг; V — объем, занимаемый этим материалом, м^3 .

Средняя плотность — величина, определяемая отношением массы m тела или вещества ко всему занимаемому объему V , включая имеющиеся поры и пустоты. Среднюю плотность ρ (г/см^3 , кг/м^3) для штучных изделий, рулонных и шнуровых материалов, изделий и материалов с плоской поверхностью в состоянии естественной влажности вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{m}{V(1 + 0,01W)}$$

где W — массовая влажность изделия или материала, %.

Знание плотностной характеристики теплоизоляционного материала дает массу информации о его теплоизоляционных и прочностных свойствах. Чем меньше средняя плотность материала, тем меньше его теплопроводность. Однако, чем меньше этот показатель, тем хуже его монтажная прочность и часто больше водопоглощение, а следовательно, такая конструкция может быть менее долговечна. Для различных теплоизоляционных материалов в условиях работы в конкретной конструкции имеется свой оптимум по средней плотности.

Для определения средней плотности необходимо знать массу материала в состоянии естественной влажности, его объем и влажность. Массу материала находят взвешиванием, а влажность — высушиванием образца при температуре $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$. Объем образца материала определяют одним из следующих методов.

Объем штучных, рулонных и шнуровых изделий вычисляют по формулам на основании линейных размеров. Толщину уплотняющих минераловатных и стекловолоконистых изделий измеряют толщиномером (рис. 8.1).

Масса диска 4 с трубкой 3 толщиномером создает удельные нагрузки, предусмотренные соответствующими стандартами (ГОСТами) или техническими условиями (ТУ) на эти материалы. Так, для изделий, не содержащих связующее вещество, удельная нагрузка равна 0,0001 МПа. Для изделий, содержащих связующее вещество и имеющих плотность не более 175 кг/м^3 , — 0,0005 МПа. Для изделий, содержащих связующее вещество и имеющих плотность более 175 кг/м^3 , удельная нагрузка равна 0,002 МПа.

Объем рыхлых волокнистых материалов (минеральной и стеклянной ваты) определяют на специальном приборе (рис. 8.2), который металлическим диском 2, создающим удельное давление 0,002 МПа, уплотняет материал. В цилиндре / прибора помещают горизонтальными слоями испытуемый материал массой 0,5 кг; на него с помощью подъемного устройства допускают металлический диск и выдерживают в

таком состоянии в течение 5 минут. Затем по шкале, нанесенной на стержень 3, измеряют высоту h и подсчитывают объем V по формуле $V = \pi R^2 h$, где R — радиус цилиндра, м; h — высота сжатого слоя материала в цилиндре, м.

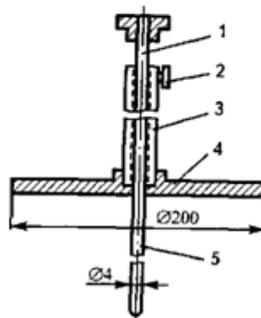


Рис. 8.1. Игольчатый толщиномер:

1 — стержень; 2 — зажимный винт; 3 — трубка; 4 - диск; 5 – игла

Плотность сыпучих зернистых материалов (вспученных перлитов, вермикулита, и др.) определяют отношением массы материала, засыпанного в мерный сосуд, к объему этого сосуда.

Пробу материала насыпают через воронку (рис. 8.3) с высоты 10 см в предварительно взвешенный сосуд до образования над его верхом конуса, который удаляют без уплотнения вровень с краями сосуда линейкой. Этот сосуд с материалом взвешивают.

Плотность пробы ρ , кг/м³, вычисляют по формуле $\rho = \frac{m_2 - m_1}{V(1 + 0,01W)}$,

где m_1 — масса мерного сосуда, кг; m_2 — то же с пробой, кг; V — объем мерного сосуда, м³; W — влажность пробы материала, %.

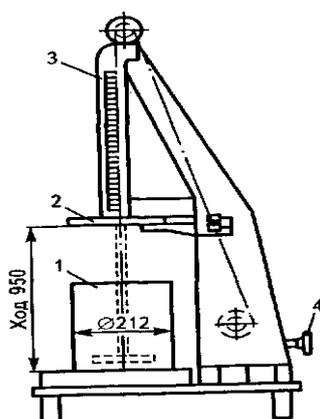


Рис. 8.2. Прибор для определения средней плотности рыхлых волокнистых материалов:

1 - цилиндр; 2 - диск; 3 - стержень со шкалой;

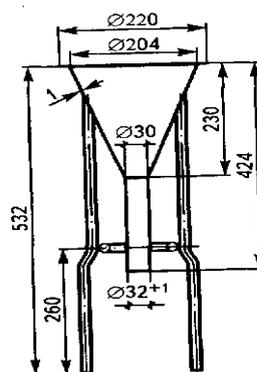


Рис.8.3. Воронка

Пористость — степень заполнения объема материала порами. Истинной, или общей, пористостью изделия $P_{И}$ (%) называют отношение объема пор $V_{пор}$ к полному объему изделия:

$$\dot{I}_{\dot{E}} = \frac{V_{\dot{И}\dot{D}}}{V} 100$$

Известно, что чем меньше средняя плотность материала, тем лучше его теплоизоляционные свойства при средней температуре (20—25 °С) слоя. Это определяется высокой пористостью материалов, т. е. наличием большого количества воздуха в порах, у которого очень низкая теплопроводность (0,027 Вт/(м • К) при температуре 20 °С в спокойном состоянии).

Теплоизоляционные свойства материалов зависят не только от числового значения пористости, но и от вида материала, структуры пор, их размеров и формы, степени равномерности расположения пор в материале, а также от того, являются ли поры закрытыми или сообщаются одна с другой и с окружающим воздухом (открытая пористость).

Теплопроводность — способность материала передавать через свою толщину тепловой поток, возникающий вследствие разности температур на противоположных поверхностях. Различные материалы проводят теплоту по-разному: одни быстрее (например, металлы), другие медленнее (теплоизоляционные материалы).

Теплопроводность характеризуется количеством теплоты (Дж), проходящей в течение 1 ч через образец материала толщиной 1 м, площадью 1 м², при разности температур на противоположных плоскопараллельных поверхностях в 1 К. Теплопроводность обозначают буквой λ , (лямбда) и выражают в Вт/(м • К). К теплоизоляционным относят материалы с теплопроводностью не более 0,175 Вт/(м • К) при средней температуре слоя 298 К и влажностью, нормированной ГОСТами или ТУ.

Теплопроводность зависит от средней плотности материала (с увеличением средней плотности теплопроводность возрастает), его структуры, пористости, влажности и средней температуры слоя материала. Чем выше пористость (меньше средняя плотность) материала, тем ниже теплопроводность. С увеличением влажности материала теплопроводность резко возрастает, при этом понижаются его теплоизоляционные свойства. Поэтому все теплоизоляционные материалы хранят в помещении или под навесом, а в теплоизоляционной конструкции защищают от попадания влаги покровным слоем.

Зависимость теплопроводности λ от средней температуры теплоизоляционного слоя можно выразить в виде линейной функции

$$\lambda = \lambda_0 + b t_{\text{ср}}$$

где λ_0 — теплопроводность при 273 К, Вт/(м • К); b — постоянная для данного материала величина, показывающая изменение теплопроводности при увеличении температуры на 1 К (принимается по справочным данным); $t_{\text{ср}} = (t_1 - t_2)/2$ — средняя температура теплоизоляционного слоя, К; t_1 , t_2 — температура соответственно наружной и внутренней поверхностей теплоизоляционного слоя, К.

Из формулы видно, что с увеличением средней температуры теплоизоляционного слоя и постоянной b теплопроводность материала возрастает. Чем меньше плотность теплоизоляционного материала, тем больше значение b .

Теплопроводность определяют на специальном приборе (рис. 8.4). Между термостатированными плитами 1 и 3, при помощи которых создают и поддерживают необходимую разность температур, устанавливают образец 2 размером 250 x 250 мм, толщиной 10—50 мм. Между образцом и нижней плитой 1 помещают тепломер 5 — измеритель теплового потока. Температуру на поверхностях образца измеряют термоэлектрическими преобразователями (по две термопары (4) на каждую сторону образца). Поток теплоты создается сверху вниз. При испытании образец 2 укладывают на тепломер и плотно прижимают верхней термостатированной плитой 3, устанавливают температуру верхней и нижних плит 1,3 в зависимости от условий эксплуатации материала и затем вычисляют теплопроводность по формуле

$$\lambda = \frac{q \delta}{t_1 - t_2}$$

где q —тепловой поток, проходящий через образец площадью 1 м^2 , Вт/м^2 ; δ —толщина образца, м; t_1, t_2 —температура соответственно верхней и нижней поверхностей образца, К.

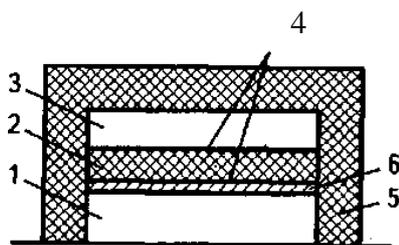


Рис. 8.4. Прибор для определения теплопроводности

1,3 – термостатированные плиты, 2- образец, 4- термоэлектрические преобразователи, 5- тепломер, 6- теплоизолированный кожух

Полученное значение теплопроводности относится к средней температуре t_{cp} испытаний. Теплопроводность конструкции выше, чем теплопроводность самого материала, за счет наличия крепежных деталей, увеличения средней плотности вследствие уплотнения (для волокнистых материалов) и т. д.

Теплоемкость — способность материала при нагревании поглощать теплоту. Теплоемкость определяется отношением количества теплоты, сообщаемого телу, к соответствующему изменению температуры:

$$C = Q/T,$$

где C — теплоемкость тела, Дж/К; Q — количество теплоты, сообщаемое телу, Дж; T — изменение температуры при нагревании тела, К.

Удельной теплоемкостью называется отношение теплоемкости к массе тела:

$$c = C/m,$$

где c — удельная теплоемкость тела, Дж/(кг*К); m — масса тела, кг.

8.3 Теплоустойчивость

Теплоустойчивость — способность материалов сохранять свои основные свойства при воздействии положительных (температуростойкость, температуроустойчивость, теплостойкость) или отрицательных (хрупкость, морозостойкость) температур.

Температуростойкость (предельная положительная температура применения) — способность материала сохранять свои свойства (структуру, прочность, теплопроводность и т. д.) при повышенной температуре. Температуростойкость различных теплоизоляционных материалов различна. Так, для пенопластов температуростойкость составляет 60—150°C, а для диатомитовых изделий — 900°C.

Способ определения температуростойкости теплоизоляционных материалов зависит от их формы и структуры и устанавливается в каждом случае соответствующими ГОСТами или ТУ. Так, температуростойкость минеральной ваты (рыхлого волокнистого материала) определяют специальным прибором, представляющим собой цилиндр с крышкой в виде поршня заданной массы.

Перед началом испытания линейкой измеряют высоту расположения поршня. Затем цилиндр помещают в печь и нагревают, постепенно повышая температуру. В процессе испытания определяют температуру, при которой начинается перемещение поршня вниз. Этот момент соответствует началу разрушения волокон, а определенная температура характеризует их температуростойкость. Предельная температура применения теплоизоляционных материалов приведена в ГОСТах или ТУ на материалы.

Температуроустойчивость гидроизоляционных рулонных материалов (ГОСТ 2678—94) характеризуется максимальной температурой, при которой отсутствует смещение

покровного слоя или вздутие. Температуроустойчивость определяют путем осмотра образцов после выдержки их в сушильном шкафу в течение двух часов при заданной температуре. Материалы, применяемые для гидроизоляционных конструкций, должны не терять свои свойства (размягчаться, расслаиваться) при повышенных температурах или не быть хрупкими при отрицательных температурах. Так, температуроустойчивость должна быть не ниже 40 °С (для гидроизоляционных конструкций), а для надземных конструкций и кровли — не ниже 60—70 °С.

Теплостойкость — способность теплоизоляционных материалов выдерживать без изменения структуры и разрушения периодические колебания температуры. Теплостойкость измеряется числом теплосмен, т. е. числом резких изменений воздействующей на материал температуры, которая, как правило, бывает ниже температуры применения. Например, предельная температура применения минеральной ваты 700°С, теплостойкость же ее значительно ниже и в зависимости от числа теплосмен может понижаться до 200 °С.

При резком колебании температур материал разрушается за счет возникающих в нем вследствие быстрого нагрева и охлаждения внутренних напряжений и, следовательно, неравномерного нагрева материала по всей его массе.

Морозостойкость — способность материала в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без признаков разрушения. Вода, находящаяся в порах материала, при замерзании увеличивается в объеме, и образующийся лед давит на стенки пор материала. При этом в материале возникают большие внутренние напряжения, которые постепенно разрушают его. Морозостойкость определяют на образцах-кубиках, вырезанных из жестких материалов. Образцы погружают в воду, выдерживают до полного насыщения, а затем подвергают попеременному замораживанию при температуре -20 °С в морозильной камере в течение шести часов и оттаиванию при комнатной температуре в течение пяти часов. Число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое должен выдержать материал без разрушения, характеризует его морозостойкость. По морозостойкости материалы подразделяют на следующие марки: Мрз 10, 15, 25, 35, 50, 100, 150, 200 и более.

Атмосфероустойчивость материалов — способность гидроизоляционных материалов выдерживать колебания температуры окружающей среды от минусовой до плюсовой и наоборот. Эту величину измеряют коэффициентом атмосфероустойчивости K_a , соответствующим 500 циклам колебаний температуры. Этот коэффициент не должен быть менее 0,9 для надземных и 0,7—0,5 для подземных и гидротехнических сооружений.

8.4 Паропроницаемость, водонепроницаемость, водоустойчивость

Паропроницаемость—способность материалов пропускать водяные пары, содержащиеся в воздухе, под действием разности их парциальных давлений на противоположных поверхностях слоя материала.

Парциальное давление — часть общего давления составляющих парогазовой смеси. Парциальное давление водяного пара равно давлению, которое он оказывал бы, занимая весь объем смеси и находясь при температуре смеси.

Парциальное давление водяных паров с повышением температуры возрастает. Таким образом, водяные пары стремятся попасть в область меньшего давления, т. е. на сторону слоя материала с меньшей температурой. Этим объясняется увлажнение изоляции, применяемой для поверхностей с отрицательными температурами. Влага, проникая в слой изоляции с теплой стороны, увлажняет изоляцию, а при температуре ниже нуля замерзает. Это вызывает ухудшение свойств изоляции и ее разрушение.

Паропроницаемость характеризуется коэффициентом паропроницаемости, который определяется количеством водяных паров в мг, проходящих через слой материала площадью 1 м^2 , толщиной 1 м в течение 1 ч при разности давлений водяного пара на противоположных поверхностях слоя 133,3 Па (1 мм рт. ст.). Размерность этого коэффициента — мг/(Па • м • ч).

Как было сказано выше, при устройстве теплоизоляционной конструкции важно защитить теплоизоляционный материал от увлажнения. В этой связи важно знать такие свойства покрытия тепловой изоляции, как водонепроницаемость и водостойчивость. Ряд теплоизоляционных материалов также обладают этими качествами.

Водонепроницаемость — способность покрытий тепловой изоляции либо самого теплоизоляционного материала не пропускать воду под воздействием гидростатического давления. Водонепроницаемость характеризуется временем, в течение которого образец не пропускает воду при постоянном гидростатическом давлении, или гидростатическим давлением, выдерживаемым образцом в течение определенного промежутка времени. Гидростатическое давление (в м или мм) указывается в нормативно-техническом документе на испытуемый материал или конструкцию.

Водостойчивость — важнейшее свойство покрытий тепловой изоляции не терять свои свойства в результате поглощения воды. Так, при воздействии воды некоторые мастичные материалы набухают и разрушаются, листовые материалы — отслаиваются либо расслаиваются. Водостойчивость (набухание), измеряемая в процентах по объему, не должна превышать для гидротехнических сооружений 0,5 %, для кровли — 1,5 %.

ГЛАВА 9. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Важнейшая часть научных исследований — эксперимент. Научные эксперименты выполняются на специально сконструированных установках и стендах. Рассмотрим показательный пример очень трудоемкого эксперимента по исследованию кризиса теплообмена в канале. Это модель охлаждения ТВЭЛОВ в канальных реакторах. Модель канала

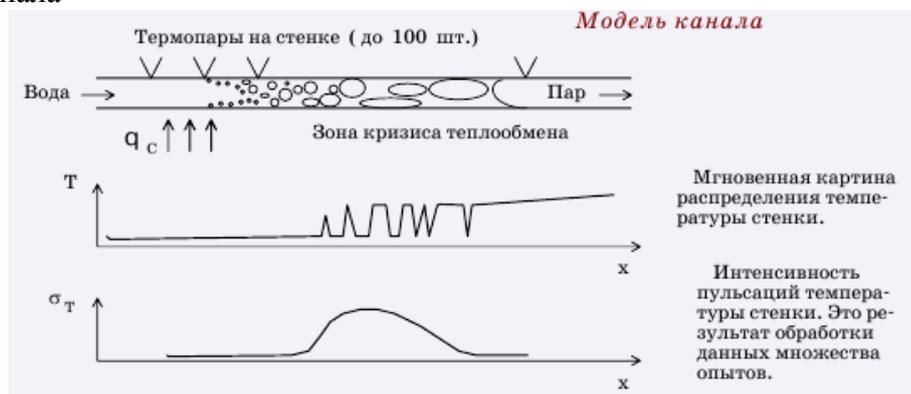


Рис. 9.1. Исследование кризиса теплообмена в канале

Кризис теплообмена возникает при осушении стенки. Начало зоны кризиса обнаруживается по росту интенсивности пульсаций температуры стенки.

Опыты выполняются многократно. Очевидно, что вручную снимать показания множества термопар и затем обрабатывать огромный массив данных — труд гигантский.

Такие эксперименты надо обязательно автоматизировать. /15,17/

Для повышения эффективности научного эксперимента и анализа экспериментальных данных создаются автоматизированные системы научных исследований (АСНИ).

Что можно автоматизировать в эксперименте ?

Рассмотрим основные этапы эксперимента.

а) Идея эксперимента, разработка его методики. Проектирование и изготовление экспериментальной установки. Это безусловно творческий процесс. Автоматизации нет.

б) Проведение собственно эксперимента. Сбор опытных данных, их запись на магнитные носители. Контроль параметров, простая первичная обработка данных. На этом этапе все операции выполняются по заранее известному алгоритму. Этап полностью автоматизируется.

в) Вторичная обработка данных. Выработка математических моделей, подбор формул, оценивание погрешности эксперимента. Создание баз данных. Подготовка отчетов. Этап автоматизируется частично, в основном при математической обработке, при этом тип математической модели и программа обработки выбираются самим экспериментатором.

г) Анализ результатов. Принятие решения о завершении эксперимента или о коррекции плана нового эксперимента. На этом этапе требуется в конечном итоге экспертная оценка.

Очевидно, что средства автоматизации эксперимента не только помогают выполнить массу рутинной работы, но и поднимают исследования на качественно новый уровень. АСНИ — это эффективное орудие труда в сфере научных исследований.

На практике АСНИ определяется, как аппаратно-программный комплекс, который всесторонне ориентирован на получение новых знаний о свойствах объекта исследования.

Главная область применения АСНИ — лабораторный эксперимент. Именно исследовательская ориентация отличает АСНИ от других классов автоматизированных систем, например, от автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

Системы автоматического регулирования и управления, применяемые в производстве, функционируют в рамках заведомо известных закономерностей работы объекта. Состав аппаратуры, все соединения и компьютерные программы строго определены и документированы, кнопки нажимают обученные операторы.

В отличие от них АСНИ служит для исследования неизвестных свойств изучаемого объекта. Изначально предполагается творческий подход к технике, методике и программе эксперимента. Поэтому допускаются любые перестройки структуры и аппаратурного состава системы по усмотрению самого экспериментатора.

Главные элементы АСНИ:

- Экспериментальная установка. Но не простая, а оснащенная датчиками, измерительными устройствами для дистанционных измерений и, если необходимо, исполнительными устройствами для дистанционного управления.

- Аппаратура. Измерительная и управляющая. Какие будут применяться приборы — зависит от выполняемого эксперимента.

- Линии связи экспериментальной установки с аппаратурой. По ним передаются измерительные и управляющие сигналы.

- ЭВМ.

- Интерфейс. Это средство связи ЭВМ с аппаратурой. По интерфейсу осуществляется прием/передача данных и команд.

- Методика проведения автоматизированного эксперимента. Обязательно учитывает увеличение скорости сбора данных и объема данных, ориентируется на новые методы анализа данных.

- Программа на ЭВМ.

Существенно, что состав аппаратуры и программы, применяемые в АСНИ, не являются универсальными.

Каждое новое исследование наверняка потребует изменения аппаратурного состава АСНИ, будет проводиться по индивидуальной методике и потребует разработки своей компьютерной программы сбора и обработки опытных данных.

В практике АСНИ обычное дело — использование аппаратуры.

Проведение автоматизированного эксперимента на безукоризненно работающей АСНИ — это окончательный итог многих проб и ошибок, результат большой работы, в которой соединены теория и практика экспериментальной науки, метрологии, вычислительной техники и программирования.

Обычно автоматизируются только два этапа эксперимента.

Этап 1.

Процесс эксперимента (полного объема данных еще нет)

Управление приборами. Сбор данных. Простейшая первичная обработка данных. Запись данных на магнитный носитель для последующей обработки.

Здесь от ЭВМ требуется только способность управлять приборами в реальном времени. Но объем памяти и быстродействие для большинства экспериментов на этом этапе не критичны. Продуктивная активность ЭВМ сводится к посылке на прибор команды запуска процесса измерения, ожиданию готовности данных и, наконец, к приему от прибора уже готовых данных.

Этап 2.

Вторичная обработка данных (объем данных уже полный).

Выработка математических моделей. Описание опытных данных формулами. Создание базы данных. Использование данных в разработке теоретических моделей изучаемого процесса.

Здесь от ЭВМ не требуется способность управлять приборами. Однако появляется необходимость в высоком быстродействии и достаточном объеме памяти.

Назначение элементов АСНИ:

- ПЭВМ. В конечном итоге осуществляет сбор первичных данных. Выполняет управление аппаратурой по магистрали интерфейса, по заданной программе. Возможность работы с интерфейсом появляется, когда внутрь корпуса ПЭВМ вставлена специальная печатная плата адаптера приборного интерфейса.

- Цифровой вольтметр. Измерительный прибор высокого класса, пригодный для прямого измерения э.д.с. термопар (т.е. без предварительного усиления). Разрешающая способность 1- 10 мкВ.

- Коммутатор измерительных сигналов. По командам ПЭВМ выборочно подключает измерительные линии на вход вольтметра. Прибор высокого класса, с малой паразитной термо-э.д.с. контактов. Вносимая погрешность около 3 мкВ.

- Приборный интерфейс. Осуществляет связь ПЭВМ с аппаратурой. Магистраль в виде гибкого кабеля, по которой передаются команды и данные в цифровом виде.

- Система модульной электроники. В составе модулей есть измерительные и управляющие.

- Другие приборы. Расширяют возможности АСНИ. Легко подключаются к магистрали приборного интерфейса. Это придает системе функциональную гибкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1982. 376 С.
2. Приходько П.Т. Тропой науки. М., 1969. 22 С.
3. Никифоров А.Д., Башева Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация.-М.: Высшая школа, 2002.-422 с.
4. А.В. Блохин Теория эксперимента – Минск, 2003, ч.1,70с.
5. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. Учебник для вузов.-М.: Энергия, 1978-704 с.
6. Кушковский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 448 С.
7. Иванова Г.М. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: издательство МЭИ, 2005.-460 с.
8. Н.Д.Кузнецов, В.С. Чистяков Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам – М.: Энергоиздат, 2000. – 320с.
9. Ахназаров С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии.- М.: ВШ, 1985
10. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов.-М.: Мир. 1977
11. А.В.Блохин Теория эксперимента – Минск, 2003,ч.2,65с.
12. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям – М.: Энергоатомиздат. 1990.-320 с.
- 13.
14. Матюнин В.М. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 214 С.
15. Русинов Л.А. Автоматизация аналитических систем определения состава и качества веществ-Л.: Химия,1984.-160 с.
16. Банк тестовых вопросов по дисциплине «Теория и техника теплотехнического (научного) эксперимента»
17. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник. Под. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина-М.: издательство МЭИ, 2001.-564 с.
18. Геращенко О.А. Основы теплотехники. Киев.: Наукова думка, 1981.
19. Капиев Р.Э. Измерительно-вычислительные комплексы.-Энергоатомиздат, 1988.-176 с.
20. Геращенко О.А. Основы теплотехники. Киев.: Наукова думка, 1981.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ.....	6
1.1. Основные понятия метрологии.....	6
1.2.Классификация измерений.....	7
1.3. Единицы измерений.....	8
1.4. Основы теории погрешностей и обработки результатов измерения.....	11
ГЛАВА 2. СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ.....	14
2.1 Измерение температуры твердых тел, газов, жидкостей и движущегося потока.....	14
2.2.Измерение расхода вещества.....	18
2.3.Основы контроля влажности газов, твердых и сыпучих материалов.....	21
2.3.1.Измерение влажности газов и сыпучих материалов.....	21
2.3.2. Измерения уровня.....	23
ГЛАВА 3.ОСНОВЫ НАУЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	25
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ И АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	28
4.1. Пассивный и активный эксперимент.....	28
4.2. Рандомизация.....	29
4.3. Модель эксперимента. Кодирование факторов.....	30
4.4 Полный факторный эксперимент.....	31
4.5. Корреляционный анализ.....	34
ГЛАВА 5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО-И МАССООБМЕНА.....	37
5.1. Классификация методов экспериментальных исследований.....	37
5.2. Электротепловая аналогия для задач теплопроводности.....	37
5.3. Электродинамическая аналогия.....	38
5.4. Диффузионно-тепловая аналогия.....	39
5.5. Измерение стационарных тепловых потоков.....	40
5.6. Источники ошибок при измерении тепловых потоков и способы их устранения.....	41
ГЛАВА 6. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ.....	42
6.1.Классификация теплофизических свойств.....	42
6.2. Определение плотности жидкостей и газов.....	45
ГЛАВА 7. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ, СКОРОСТИ, ПЛОТНОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИЙ.....	49
7.1. Измерение полей температуры в потоках жидкости и газа.....	49
7.2. Фондовые методы измерения полей давления в потоках жидкости и газа.....	50
ГЛАВА 8. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	52
8.1. Теплоизоляционная конструкция и ее основные элементы.....	53
8.2. Свойства теплоизоляционных материалов и конструкций, методы их контроля.....	54
8.3. Теплоустойчивость.....	57
8.4. Паропроницаемость, водонепроницаемость, водоустойчивость.....	58

ГЛАВА 9. АВТОМАТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	60
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	63