

Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет»
Факультет инженерных систем и экологии
Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

В.Г.Новосельцев

« 28 » 03 2025 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

О.П.Мешик

« 28 » 03 2025 г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
«ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБО-
ТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ»**

7-06-0732-01 Строительство

Профилизация: Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воз-
душного бассейна

Составители: Новосельцев Владимир Геннадьевич, доцент, к.т.н., зав. кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции;

Новосельцева Дина Владимировна, доцент, к.т.н., доцент кафедры природообу-
стройства

Рассмотрено и утверждено на заседании Научно-методического Совета
протокол № 3 от 31.03 2025г.

пр. п. 4222 24/05-212(a)

Пояснительная записка

Актуальность изучения дисциплины

Учебная дисциплина «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных» профилизации «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» относится к модулю «Специальные разделы естественнонаучных и общеобразовательных дисциплин» компонента учреждения высшего образования учебного плана магистратуры.

Цель преподавания учебной дисциплины:

Целью освоения учебной дисциплины «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных» профилизации «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» является формирование у магистрантов представления о месте методов математической статистики и теории планирования эксперимента в современных научных и технологических исследованиях, а также о принципах и методах планирования и оптимизации эксперимента.

Задачи учебной дисциплины:

Выработать у магистрантов навыки применения основных методов статистической обработки результатов экспериментальных исследований, планирования экспериментов.

В результате изучения дисциплины магистрант должен:

знать методы статистической обработки экспериментальных данных и планирования эксперимента.

уметь планировать и проводить теоретические и экспериментальные научные исследования; проводить с помощью современных вычислительных средств статистическую обработку результатов измерений.

владеть методами математического планирования, оптимизации эксперимента и формирования математических моделей.

ЭУМК разработан на основании Образовательного стандарта для специальности 7-06-0732-01 «Строительство» и предназначен для реализации требований учебной программы по учебной дисциплине «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных» для специальности 7-06-0732-01 «Строительство» (профилизации «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»). ЭУМК разработан в полном соответствии с утвержденной учебной программой по учебной дисциплине компонента учреждения высшего образования «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных».

Цели ЭУМК:

- обеспечение качественного методического сопровождения процесса обучения;

- организация эффективной самостоятельной работы студентов.

Содержание и объем ЭУМК полностью соответствуют образовательным стандартам высшего образования специальности 7-06-0732-01 «Строительство»

(профилизации «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»), а также учебно-программной документации образовательных программ высшего образования.

Материал представлен на требуемом методическом уровне и адаптирован к современным образовательным технологиям.

Структура электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных»:

Теоретический раздел ЭУМК содержит материалы для теоретического изучения учебной дисциплины и представлен конспектом лекций.

Практический раздел ЭУМК содержит материалы для проведения практических учебных занятий.

Раздел контроля знаний ЭУМК содержит материалы для экзамена, позволяющие определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательных стандартов высшего образования и учебно-программной документации образовательных программ высшего образования.

Вспомогательный раздел включает учебные программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных», список основной и дополнительной литературы.

Рекомендации по организации работы с ЭУМК:

- лекции проводятся с использованием персонального компьютера и мультимедийного проектора;
- при подготовке к экзамену используется конспект лекций, техническая основная и вспомогательная литература;
- практические занятия проводятся с использованием представленных в ЭУМК методических указаний;
- экзамен проводится в письменном виде, вопросы для экзамена приведены в разделе контроля знаний.

ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ В КОМПЛЕКСЕ

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Тема 1 Классификация, принципы и определения экспериментальных методов исследований

Тема 2 Цель, задачи и основные понятия экспериментальных исследований

Тема 3 Физические величины и системы единиц измерения

Тема 4 Основные этапы планирования и проведения эксперимента

Тема 5 Основы анализа данных экспериментальных исследований

II ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Основы статистической обработки результатов измерений

III РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Вопросы к экзамену

IV ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

І ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ТЕМА 1 КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИНЦИПЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Виды экспериментов

В литературе можно найти достаточно много подходов к классификации экспериментов. Из основных разновидностей экспериментов можно отметить:

- ☐ по условиям проведения – естественные и искусственные;
- ☐ по форме представления результатов – качественные и количественные;
- ☐ по целям исследования – преобразующие, модельные, экстремальные, контролирующие, констатирующие, поисковые, сравнительные, решающие и др.;
- ☐ по количеству факторов – однофакторные и многофакторные;
- ☐ по степени контролируемости факторов – активные и пассивные (регистрирующие).

Рассмотрим некоторые виды классификации экспериментов подробнее.

По условиям проведения.

Естественный эксперимент предполагает изучение объекта в реальных условиях его существования и чаще применяется в биологических науках (например, исследование люминесцентных излучений живых клеток). В физике это может быть, например, исследование излучения Вселенной, падающего на поверхность Земли, разряда молний, полярного сияния и других плазменных явлений в атмосфере. В технических науках такой эксперимент используется, например, для испытания изготовленных объектов, в этом случае его называют натурным.

Искусственный эксперимент требует для своего проведения специально создаваемой обстановки и чаще используется в физике, позволяя достичь заданных параметров (например, энергия частиц), обеспечить достаточные условия для устранения побочных факторов, эффективно использовать время и ресурсы. Такие исследования выполняются, например, на ускорителях ионов и электронов.

По форме представления результатов.

Качественный эксперимент дает общее представление о действии тех или иных факторов на исследуемый процесс и обычно используется на этапе поиска, для предварительной оценки. При проведении качественных экспериментов устанавливается факт существования каких-либо явлений, но количественные характеристики при этом не даются. Любой эксперимент заканчивается представлением результатов, формулировкой выводов, выдачей рекомендаций. Эта информация может быть представлена в виде графиков, чертежей, таблиц, формул, статистических данных или словесных описаний. Качественный эксперимент, как правило, предусматривает именно словесное описание.

Однако только словесное описание не позволяет дать количественные рекомендации, анализировать свойства объекта в иных условиях, решать задачи его управления.

Количественный эксперимент подразумевает достаточно точное измерение всех существенных факторов, подробное и точное изучение эффектов.

Позволяет не только фиксировать существование того или иного явления, но и устанавливать количественные взаимосвязи между факторами, определяющими протекание процесса, а также устанавливать математическую модель влияния этих факторов на то или иное явление.

Часто качественные и количественные эксперименты являются этапами одного общего исследования.

По целям исследования.

Преобразующий эксперимент предполагает активное изменение структуры и функций изучаемого объекта, преднамеренное создание условий, которые должны способствовать появлению его новых качеств.

Модельный эксперимент проводится с целью построения теоретической (лабораторной) модели изучаемого объекта.

Экстремальный эксперимент направлен на решение задач оптимизации. Его целью является нахождение таких сочетаний факторов, которые соответствуют оптимальным значениям целевой функции (например, выявление оптимальных режимов, оптимальных составов или конструктивных параметров).

Контролирующий эксперимент решает задачу обеспечения контроля над изучаемым объектом, управления объектом с помощью воздействующих факторов с одновременным изучением изменений его состояния в зависимости от воздействия.

Констатирующий эксперимент представляет собой процедуру проверки какого-либо исходного предположения; целью данного эксперимента является фиксация наличия или отсутствия определенных свойств, отношений, эффектов, состояний и т. п.

Поисковый эксперимент не имеет систематического характера; часто он является лишь начальной стадией в серии экспериментальных исследований. Проводится в тех ситуациях, когда недостаточно известен комплекс факторов, влияющих на изучаемый объект. Такой эксперимент носит поисковый, предварительный характер.

Сравнительный эксперимент преследует обычно весьма простую цель: произвести оценку наличия различий между двумя исследуемыми группами. Также сравнительный эксперимент может проводиться с целью оценки влияния различных факторов на процесс ранжирования их по степени влияния на интересующий показатель процесса.

Важным видом эксперимента является решающий, или критический, эксперимент – эксперимент, исход которого однозначно определяет, является ли конкретная теория или гипотеза непротиворечивой. Этот эксперимент должен дать предсказанный результат, который не может быть выведен из других, общепринятых гипотез и теорий. Для его проведения характерна ситуация, когда две или несколько гипотез примерно в равной степени согласуются с имеющимся

эмпирическим базисом и конкурируют друг с другом, претендуя на роль ведущей. В этом случае решающим экспериментом становится такой, результаты которого однозначно свидетельствуют в пользу одной теоретической системы и опровергают альтернативную ей систему. Для этого, конечно, сам эксперимент должен быть спланирован так, чтобы основной вопрос, решаемый в ходе экспериментального исследования, был сформулирован дихотомически, т. е. чтобы он допускал только два возможных ответа: да или нет.

Примерами решающих экспериментов могут служить: знаменитый маятник Фуко, благодаря которому Ж. Б. Л. Фуко продемонстрировал вращение Земли, доказав справедливость теории Коперника и опровергнув теорию Птолемея; эксперимент И. Ньютона по интерференции света; опыт О. Ж. Френеля с открытием белого пятна в тени диска, благодаря которому была открыта дифракция света и поддержана волновая теория света в противовес корпускулярной. При этом следует заметить, что вопрос о действительной роли решающих экспериментов в развитии научного знания весьма непросто. Далеко не всегда решающий эксперимент расценивается современниками как именно решающий; часто это удается понять лишь намного позже.

По количеству факторов.

Однофакторный, или классический, эксперимент – это эксперимент с одной независимой и одной зависимой переменными. Это понятие базируется на допущении, что исследователь имеет возможность варьировать факторы в исследовательской ситуации и способен выделить изучаемую зависимость в чистом виде.

Однофакторный пассивный эксперимент проводится путем выполнения определенного количества измерений единственного входного параметра и соответствующих значений выходного параметра в дискретные моменты времени. Аналитическая зависимость между этими параметрами вследствие случайного характера возмущающих воздействий рассматривается в виде зависимости математического ожидания¹ от значениях, носящей название регрессионной. Целью однофакторного пассивного эксперимента является построение регрессионной модели – установление зависимости $y = f(x)$. Доля однофакторных экспериментов в современной экспериментальной физике невелика и составляет около 2 %.

Многофакторный эксперимент – это эксперимент с несколькими независимыми и обычно одной зависимой переменными. Многофакторный пассивный эксперимент проводится при контроле значений нескольких входных параметров, и его целью является установление зависимости выходного параметра от двух или более переменных: $y = f(x_1, x_2, \dots)$. К его преимуществам относятся эффективность использования времени и средств (что может выражаться в сокращении числа опытов, необходимых для решения исследовательской задачи), а также значительная информативность эксперимента (так как получаемый результат показывает удельный вес каждого фактора в их совокупном действии).

По степени контролируемости факторов.

Активный эксперимент – это такой эксперимент, когда уровень (значение) фактора для каждого опыта задает исследователь. Он целенаправленно изменяет

условия функционирования процесса и наблюдает результаты. Такой эксперимент можно планировать.

Активный эксперимент предполагает возможность существенного управления независимыми переменными в соответствии с планом, отвечающим определенным требованиям. К активному планируемому эксперименту относят исследования, которые состоят из нескольких этапов, связанных между собой таким образом, что результаты обработки эксперимента, выполненного на предыдущем этапе, используются для разработки стратегии опытов последующего этапа.

Но не всегда независимая переменная хорошо контролируема. Иногда исследователь может лишь констатировать изменение переменной, не имея возможности целенаправленно воздействовать на нее. В этом случае имеет место ситуация пассивного, или регистрирующего, эксперимента.

Пассивный эксперимент - это эксперимент, в котором исследователь регистрирует уровень факторов в каждом опыте, но не задает его значение. Здесь экспериментатор наблюдает за поведением зависимой переменной, стараясь извлечь максимум информации об изучаемых взаимосвязях. В дальнейшем он обрабатывает результаты такой регистрации и пытается их интерпретировать. По существу такой эксперимент является научным наблюдением. Помимо перечисленных в методологии науки называют и другие виды экспериментов. Приведем несколько примеров. Отсеивающий эксперимент позволяет отобрать основные, наиболее значимые факторы, влияющие на процесс или явление, без установления количественных соотношений между ними.

Экстраполирующий эксперимент – эксперимент, поставленный с целью предсказания явления, оценки его протекания в дальнейшем (экономическое прогнозирование, предсказание погоды, предсказание нагрузки электросистем).

Творческий эксперимент обычно предполагает своей целью открытие нового явления, объяснение неизвестного ранее эффекта.

Компьютерный (численный) эксперимент – это эксперимент над математической моделью объекта исследования на ЭВМ, который состоит в том, что по одним параметрам модели вычисляют другие ее параметры и на этой основе делают выводы о свойствах объекта, описываемого математической моделью. Данный вид эксперимента можно лишь условно отнести к эксперименту, потому как он не отражает природные явления, а лишь является численной реализацией созданной человеком математической модели. Действительно, при некорректности математической модели ее численное решение может расходиться с физическим экспериментом. Этот вид эксперимента также называют математическим, или вычислительным, экспериментом, так как на основе компьютерной обработки введенных данных получают результат в виде математического решения той или иной задачи. К преимуществам математического эксперимента, способствовавшим его широкому применению в современной науке, относится помимо высокой точности проводимых расчетов то, что в таком исследовании каждый участвующий фактор можно свободно варьировать без риска катастрофических последствий, который может возникнуть в натурном эксперименте. Типичные эксперименты, выполняемые с помощью суперкомпьютеров, – это моде-

лирование глобальных явлений в атмосфере и предсказание погоды, моделирование извержений вулканов и океанических штормов, атакже ядерных взрывов.

[вернуться к оглавлению](#)

ТЕМА 2 ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целями эксперимента обычно являются:

- получение новых эмпирических данных, подлежащих дальнейшему обобщению;
- выявление согласования или противоречия с имеющимися гипотезами или теориями.

Можно выделить две функции эксперимента:

- исследовательскую, когда эксперимент является источником теории;
- проверочную, когда эксперимент выступает как критерий истинности.

Из важнейших требований, предъявляемых к постановке эксперимента, можно отметить следующие:

- чистота, т. е. такая постановка опыта, чтобы на изучаемый процесс не накладывались посторонние связи;
- воспроизводимость – эксперимент должен быть осуществлен и описан так, чтобы он мог быть повторен другими исследователями;
- точность – эксперимент должен соответствовать поставленной задаче.

В экспериментальной физике данные о параметрах исследуемого объекта получают из измерений. Таким образом, в основе эксперимента – измерение параметров объекта при определенных на него воздействиях. Одной из задач проведения эксперимента является поиск таких параметров физических явлений, которые можно измерить, получив числовые значения. Между этими измеренными значениями можно установить определенную функциональную зависимость. Свойства физических объектов и процессов, которые можно прямо или косвенно измерить, называют физическими величинами. Значение физической величины представляет собой оценку размера этой величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Физические законы, связывающие между собой эти величины, представляют в виде математических уравнений.

При измерении физической величины ее значение G сравнивают с единицей измерения $[G]$. Число, которое получается при измерениях, называют числовым значением $\{G\}$ физической величины. Поэтому любую физическую величину можно представить в виде выражения

Физическая величина – это одно из свойств физического объекта (физической системы или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Единица измерения физической величины – это физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

Значение физической величины – это оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Измерение - это получение количественных значений измеряемых физических величин в виде зависимостей параметров объекта от координат и времени в условиях воздействия. Путем измерений сопоставляются две группы факторов:

- предсказанные теорией;
- найденные в результате измерений.

Измерить непосредственно интересующие параметры объекта бывает очень сложно. Поэтому выделяют два вида измерений – прямые и косвенные

Прямое измерение – это измерение, при котором значение измеряемой величины непосредственно считывается со шкалы прибора, проградуированного в соответствующих единицах измерения. Уравнение прямого измерения имеет вид, где x – значение измеряемой величины; C – цена деления шкалы прибора в единицах измеряемой величины; n – отсчет по индикаторному устройству в делениях шкалы.

В качестве примеров прямого измерения можно привести измерение длины предмета с помощью линейки или микрометра, измерение силы тока амперметром, измерение температуры термометром и т. д..

Косвенным называется измерение, результат которого определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Уравнение косвенного измерения имеет вид

где y - искомая величина, являющаяся функцией величин $x_1, x_2, \dots, x_n$, измеряемых прямым методом.

Примерами таких измерений можно назвать определение объема тела по прямым измерениям его геометрических размеров, нахождение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

Косвенные измерения распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение дает менее точный результат. Роль их особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению (например, размеров астрономического или внутриатомного порядка).

Измерения классифицируются, в частности, по точности – равноточные и неравноточные; по числу измерений – однократные и многократные; по характеру изменения измеряемой величины – статические и динамические; по метрологическому назначению – метрологические и технические; по общим приемам получения результатов – прямые, косвенные, совместные и совокупн.

Под методом измерений понимают совокупность физических явлений, устанавливающих связи между параметрами исследуемого объекта и измеряемыми величинами.

Способ измерения – совокупность операций, выполняемых при осуществлении измерений. Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

[вернуться к оглавлению](#)

ТЕМА 3 ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

Размерность физической величины показывает, как связана данная величина с основными физическими величинами, поэтому нет нужды отдельно определять единицу измерения для каждой физической величины: они выражаются через произведение основных физических единиц с целыми показателями степени и численных множителей. Следует отметить, что физическая величина и ее размерность – разные понятия. Одинаковую размерность могут иметь совершенно разные по своей природе физические величины; например, работа и вращающий момент или сила электрического тока и напряженность магнитного поля. Размерность не содержит информации о том, является ли данная физическая величина скаляром, вектором или тензором. Однако размерность важна для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

Многие физические величины связаны между собой математическими уравнениями, но можно выделить несколько независимых величин, которые не сводятся одна к другой. Их называют основными физическими величинами.

В 1960 г. было заключено международное соглашение о выборе основных физических величин. Эти величины, а также производные физические величины составляют основу Международной системы единиц СИ (Système International d'Unités), Международная система единиц – система единиц, основанная на Международной системе величин, вместе с наименованиями и обозначениями, а также набором приставок и их наименованиями и обозначениями вместе с правилами их применения, принятая XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г., последующие конференции внесли в СИ ряд изменений.

СИ определяет семь основных и производные единицы физических величин, а также набор приставок. Установлены стандартные сокращенные обозначения для единиц и правила записи производных единиц.

Основными единицами физических величин являются: килограмм, метр, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела. В рамках СИ считается, что эти единицы имеют независимую размерность, т. е. ни одна из основных единиц не может быть получена из других.

Производные единицы определяются из основных через алгебраические действия, такие, как произведение и деление основных величин. Наиболее важные из них имеют собственные названия и краткие обозначения (например, радиан).

Приставки можно использовать перед названиями единиц; они означают, что единицу нужно умножить или разделить на определенное целое число, являющееся степенью числа 10. Например, приставка «кило» означает умножение на 1000 (1 километр = 1000 метров). Приставки СИ называют также десятичными приставками, с их помощью обозначают кратные (единицы, которые в целое число раз превышают основную единицу измерения некоторой физической величины) и дольные (составляют определенную долю от установленной единицы измерения величины) единицы. Для кратных единиц используют такие приставки: гекто-, кило-, тера-; для дольных – фемто-, нано-, деци- и пр.

[вернуться к оглавлению](#)

ТЕМА 4 ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим основные этапы эксперимента:

- ☐ постановка задачи;
- ☐ предварительное изучение объекта исследования;
- ☐ выбор метода и/или разработка методики исследования;
- ☐ проведение экспериментальных исследований;
- ☐ обработка полученных экспериментальных результатов;
- ☐ оформление полученных данных и формулировка выводов.

Первым шагом при проведении экспериментальных исследований является постановка физической задачи, которая формулируется на базе анализа априорной информации. Это один из наиболее важных и сложных этапов исследования. Правильная постановка задачи в значительной мере предопределяет успех всей проводимой работы.

Второй этап – анализ, выбор и правильная подготовка объекта исследования, что также является неотъемлемой частью постановки эксперимента.

Стадия предварительного изучения объекта исследования важна, так как только после изучения его известных свойств и характеристик можно составить представление о работе и дальнейшем исследовании объекта.

Стандартизация процедуры подготовки образцов при проведении серии измерений оказывает существенное влияние на полученные результаты и минимизацию случайных ошибок.

Следующим ответственным этапом является выбор методов и/или разработка методики измерений. Каждая оригинальная экспериментальная работа выполнена с использованием своей методики, т. е. рационального набора средств измерений, составленных определенным образом и предназначенных для исследования конкретного объекта или явления. Экспериментатору важно выбрать и разработать методику, позволяющую изучить свойства или параметры системы, исследование которых было запланировано при постановке задачи.

При этом необходимо минимизировать воздействие на измерительный процесс внешних факторов, влияние которых не изучается при решении данной задачи.

Для проведения экспериментальных исследований обычно используется экспериментальная установка – совокупность средств измерения, представляющая собой единую конструкцию и предназначенная для измерения определенной физической величины или изучения процесса.

Экспериментальная установка должна пройти этап апробации и тестирования (а при необходимости - и сертификации) ее наиболее ответственных узлов. Поэтому в начале работы обычно проводятся контрольные измерения. Основные принципы обработки экспериментальных данных и оформления результатов рассмотрены в следующих разделах.

[вернуться к оглавлению](#)

ТЕМА 5 ОСНОВЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении экспериментальных исследований одной из важных задач является краткое и грамотное описание полученных данных с оценкой статистической значимости различий и проверкой выдвинутых гипотез. Далее будут рассмотрены основные типы ошибок и базовые принципы обработки и представления результатов измерений.

Ошибки измерений

В результате измерений экспериментатор получает числовые значения нужной физической величины. При прямых измерениях эти значения получаются непосредственно, а при косвенных измерениях вначале определяют одну или несколько исходных физических величин, а затем по их значениям вычисляют нужную величину.

При многократном повторении одного и того же измерения получают числовые значения, отличающиеся друг от друга в каком-то диапазоне. Поэтому возникает вопрос об истинном значении изучаемой физической величины, а также о точности, с которой его можно определить по имеющимся данным.

Отклонения результатов измерения x от «истинного» значения x_0 (определение «истинного» значения будет рассмотрено далее) называют ошибками измерения e : $e = x - x_0$.

Ошибки измерений физических величин необходимо проанализировать, попытаться установить их причину и свести их к минимуму.

Ошибки измерений можно разделить на три основные группы:

- ☐ систематические;
- ☐ случайные (или статистические);
- ☐ грубые.

Перечисленные виды ошибок можно проиллюстрировать условной схемой, представленной на рис.3.1. Систематические ошибки приводят к смещению группы полученных значений относительно истинного. Случайные ошибки определяют разброс значений относительно «истинного» значения.

Систематические ошибки – это ошибки, которые вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. Наглядным примером такой ошибки можно назвать измерение роста группы студентов в обуви – в таком случае полученный результат будет отличаться от истинного на толщину подошвы. Систематические ошибки имеют множество причин, и их обычно трудно обнаружить, поскольку при повторении измерений они, как правило, сохраняют свое значение. Прибор может давать очень малый разброс показаний, но результат будет неверным вследствие наличия систематической ошибки.

Типичными источниками систематических ошибок можно назвать:

- ☐ несовершенство используемой измерительной аппаратуры (ошибки линейности, градуировки, калибровки, дрейф нулевой точки и т. п.);
- ☐ несовершенство используемого метода измерений;
- ☐ плохая настройка измерительной аппаратуры;

- ☐ недостаточная стабильность условий опыта;
- ☐ влияние окружающей среды;
- ☐ постоянные ошибки экспериментатора;
- ☐ неучтенные влияния других параметров.

Наличие систематических погрешностей может быть обнаружено путем анализа условий измерения одного и того же значения измеряемой величины разными методами или приборами. Систематические погрешности нельзя уменьшить увеличением числа проводимых измерений. Должны устраняться вызывающие их причины. Общим методом выявления причин систематических погрешностей является калибровка (поверка), которая представляет собой поверку прибора во всем диапазоне измеряемой величины с помощью известного эталона. Следует отметить, что постоянное совершенствование экспериментальной техники во многих случаях позволяет избежать систематических ошибок. Например, в прошлом исследования атомных и молекулярных частиц были сильно затруднены взаимодействием этих частиц с молекулами остаточных газов, но после внедрения безмасляных мембранных и турбомолекулярных насосов проведение опытов в сверхвысоком вакууме позволило почти полностью исключить систематические ошибки такого рода.

Систематическая погрешность может оставаться постоянной или закономерно меняться при повторных измерениях одной и той же физической величины. Примером переменной систематической погрешности может быть погрешность измерения напряжения источника питания, если результат измерения зависит от напряжения. Отличительной особенностью систематических ошибок является то, что при их обнаружении они могут быть почти полностью устранены или учтены введением соответствующей поправки, однако их нахождение является сложной задачей. Источники подобных ошибок всегда стараются устранить, однако в эксперименте всегда остается вероятность неучтенной систематической ошибки.

Случайные ошибки – это неустранимые флуктуации измеряемых величин на уровне их малых значений, они всегда присутствуют в эксперименте и являются причиной разброса результатов повторных измерений как между собой, так и относительно «истинного» значения измеряемой величины. Случайный характер таких ошибок является постулатом. Значение этой погрешности не может быть определено в каждом эксперименте, поэтому измерения повторяются определенное количество раз, а полученная совокупность данных обрабатывается с помощью методов теории вероятностей и математической статистики. Увеличивая число измерений, можно получить достаточно точную оценку случайной ошибки. В экспериментальной физике случайным ошибкам уделяют наибольшее внимание.

К ошибкам третьего типа относят грубые ошибки, или промахи, которые возникают вследствие непредвиденного изменения условий эксперимента, низкого качества измерений, поломок прибора, ошибок экспериментатора, механических ударов прибора, неправильной регистрации показаний прибора, отключения источника питания и т. п. Результат, содержащий грубую ошибку,

резко отличается от остальных измерений. Такие результаты должны быть исключены из рассмотрения до обработки результатов эксперимента.

Существует следующая трактовка влияния разных видов ошибок:

- ☐ систематические ошибки влияют на правильность результата;
- ☐ случайные ошибки влияют на точность измерений;
- ☐ грубые ошибки дают «выпадающие» из общего диапазона значения, которые следует удалять.

Точность эксперимента, отражающая близость полученных результатов к «истинному» значению искомой величины, тем выше, чем меньше его погрешность. Следует отметить, что истинных значений экспериментально измеряемых величин не бывает. Некоторые авторы говорят о возможности применения термина «истинное значение» только к таким фундаментальным физическим постоянным, как скорость света, заряд электрона и другим, которые, вероятно, имеют точные значения, а приводимый разброс связан с ограничением точности измерений.

Истинное значение всех остальных экспериментально измеряемых величин может быть определено только как некоторое математическое ожидание (среднее значение случайной величины в теории вероятностей).

Истинное значение величины, определяемой в результате эксперимента, всегда остается неизвестным, поэтому и погрешности эксперимента могут быть оценены лишь приближенно.

Отклонение измеренного значения x определяемой величины от истинного ее значения называется погрешностью Δx i -го измерения. Полная погрешность измерений является суммой указанных составляющих и может быть представлена в абсолютном, относительном или нормированном виде.

В качестве нормирующего значения используют некоторое постоянное условно принятое значение величины, имеющее размерность измеряемой величины. В качестве нормирующего множителя может выступать, например, верхний предел показаний прибора или абсолютное значение разности верхнего и нижнего пределов шкалы.

Понятие ошибки измерения имеет прямое отношение к таким вопросам, как цель эксперимента, его метод и значимость. Важно планировать и проводить эксперимент так, чтобы точность окончательного результата соответствовала его цели.

В качестве наглядного примера неудачной интерпретации экспериментальных данных по причине ошибочного представления погрешности эксперимента можно привести «открытие» холодного ядерного синтеза в 1989 г. .

Исследователи из университета г. Юта (США) Стенли Понс и Мартин Флейшман объявили, что им удалось осуществить ядерный синтез на установке, состоящей из палладиевых цилиндров, погруженных в сосуд с дейтерием.

Ученые установили, что их прибор испускает нейтроны и гамма-лучи, что является свидетельством ядерной, а не химической реакции. Это заявление вызвало огромный интерес в научном мире и прессе. Говорилось о начале новой эры дешевой и неограниченной энергии для всего человечества. Однако эти утверждения оказались неверными. Наряду с другими экспериментальными по-

грешностями Понс и Флейшман пренебрегли простой процедурой оценки ошибок экспериментальных данных. Зафиксированные ими результаты не превышали обычного фона излучения в университете.

[вернуться к оглавлению](#)

II ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

После получения результатов измерений перед экспериментатором встает задача описания и представления данных эксперимента. При решении большинства задач, связанных с обработкой экспериментальных данных, исследователю приходится обрабатывать результаты, имеющие заведомо вероятностный характер.

Систематические ошибки и промахи должны быть обнаружены и ликвидированы (либо учтены внесением поправок в данные). Оставшиеся необнаруженными систематические ошибки вносят в результаты измерений неизвестный сдвиг относительно истинного значения (чаще всего именно из-за наличия систематических ошибок измерения разных исследователей могут не совпадать).

После минимизации систематических ошибок и удаления промахов точность измерений определяется случайными погрешностями. В этом случае к полученным данным применяют методы статистического анализа. Статистическое описание результатов наблюдений, построение и проверка различных математических моделей, использующих понятие вероятности, составляют основное содержание математической статистики, для более глубокого изучения которой существует множество литературных источников. В данном разделе кратко рассмотрены лишь базовые принципы анализа наиболее распространенных видов экспериментальных данных.

Фундаментальными понятиями статистической теории являются понятия генеральной совокупности и выборки. Генеральной совокупностью называют полный набор (совокупность) всех возможных значений, которые может принимать случайная величина при бесконечном числе испытаний. Смысл этого понятия заключается в том, что предполагается существование некоторых вполне определенных свойств, неслучайных закономерностей, присущих данной совокупности. Генеральная совокупность состоит из всех объектов, которые имеют качества и свойства, интересующие исследователя.

Выборка – это конечный набор значений случайной величины, получаемый в ходе наблюдений. Число элементов выборки называется ее объемом.

Выборка называется репрезентативной (представительной), если она достаточно полно характеризует генеральную совокупность. Назначение статистических методов заключается в том, чтобы по выборке ограниченного объема, т. е. по некоторой части генеральной совокупности, высказать обоснованное суждение о ее свойствах в целом. Подобное суждение может быть сформулировано путем построения эмпирических (выборочных) аналогов вероятностных характеристик исследуемой случайной величины. Целью статистической обработки набора полученных величин является как можно более точное описание характеристик генеральной совокупности по отдельной выборке.

Так, если бы перед исследователем стояла задача определить средний рост людей на Земле, то генеральной совокупностью являлся бы набор значений,

соответствующих росту всех живущих на данный момент жителей планеты – от младенцев до стариков. Но так как существует возможность получить сведения только об ограниченном числе людей, то совокупность полученных данных и будет представлять собой выборку, по которой исследователь будет пытаться найти «истинное» значение – математическое ожидание (среднее значение). Для того чтобы выборка была представительной, люди должны быть случайно выбраны из всех человеческих групп, т. е. выборка должна включать в себя представителей всех наций, различных возрастов, представителей разных сословий и культурных слоев, обоих полов и т. п. (пропорционально их доле в составе человечества). Данный пример показывает, что в ряде исследований подбор репрезентативной выборки является отдельной задачей.

Кривая распределения результатов. На практике при наиболее распространенном подходе одна и та же величина измеряется n раз, полученный набор значений величины x является выборкой. Весь диапазон полученных значений можно разделить на несколько интервалов одинаковой ширины и посчитать, сколько раз измеренная величина попадет в каждый интервал. Ширину интервалов можно выбирать произвольно, исходя из удобства расчета. Такое частотное распределение можно представить с помощью гистограммы.

Используя это распределение, можно построить функцию распределения непрерывных величин, если устремить количество значений переменной x к бесконечности. Ступеньки гистограммы сольются, получится гладкая кривая, которая называется кривой распределения.

Для удобства вводят функцию $f(x)$, называемую плотностью распределения, смысл которой состоит в том, что произведение $f(x)dx$ дает долю полного числа отсчетов N , приходящуюся на интервал от x до $x + dx$. Иначе говоря, произведение $f(x)dx$ есть вероятность того, что отдельное случайно выбранное значение измеренной величины окажется в интервале от x до $x + dx$.

Бесконечные пределы интегрирования берут из соображений математического удобства, но сильного противоречия с экспериментальными данными не возникает, так как функция плотности распределения $f(x)$ становится очень малой при увеличении разности между измеренным и средним значениями величины.

Если полученная кривая характеризуется тем, что значения измеряемой переменной у большинства объектов близки к их среднему и с равной вероятностью отклоняются от него в большую или меньшую сторону, то такое распределение называется нормальным распределением или распределением Гаусса и представляет собой распределение вероятностей, которое в одномерном случае задается функцией плотности распределения вероятности вида

Нормальное распределение часто встречается в практике измерений – ему подчиняются физические величины, случайность которых обусловлена действием множества независимых (или слабо зависимых) малых аддитивных факторов, результат воздействия каждого из которых мал по сравнению с их суммарным воздействием.

[вернуться к оглавлению](#)

III РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Статистический анализ экспериментальных данных.
2. Первичная обработка результатов эксперимента.
3. Предмет и задачи математической статистики.
4. Элементы регрессионного анализа.
5. Полный и дробный факторные эксперименты.
6. Экспериментальные методы поиска оптимальных условий.
7. Задача оптимизации в экспериментальных исследованиях.
8. Оценка погрешностей результатов эксперимента.
9. Основные понятия теории погрешностей.
10. Ошибки измерений: систематические, случайные, промахи.
11. Абсолютная и относительная погрешность. Математическое выражение погрешностей.
12. Теория планирования эксперимента.
13. Основные понятия и определения теории планирования эксперимента.
14. Целевая функция, выбор варьируемых переменных, план эксперимента.
15. Основы теории построения эмпирических зависимостей по экспериментальным данным.

[вернуться к оглавлению](#)

IV ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор БрГТУ

_____ М.В.Нерода

« » _____ 2023 г.

Регистрационный № УД- _____ /уч.

Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных

Учебная программа учреждения высшего образования по учебной дисциплине
для специальности

7-06-0732-01 Строительство

Профилизация: Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна

2023 г.

Учебная программа составлена на основе учебного плана высшего образования второй ступени (магистратуры) по специальности 7-06-0732-01 Строительство (профилизация «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна»).

СОСТАВИТЕЛЬ:

Новосельцев В.Г., заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, кандидат технических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Новик Ю.Н., главный эксперт отдела экспертизы инженерного обеспечения управления экспертизы проектно-сметной документации дочернего республиканского унитарного предприятия «Госстройэкспертиза по Брестской области»
Шостак Д.Ю., главный специалист теплоснабжения и вентиляции ОАО «Брестпроект».

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции
Заведующий кафедрой *подпись* В.Г.Новосельцев
(протокол № _____ от _____ 20 ____);

Методической комиссией факультета инженерных систем и экологии
Председатель методической комиссии *подпись* В.Г.Новосельцев
(протокол № _____ от _____ 20 ____);

Научно-методическим советом БрГТУ (протокол № _____ от _____ 20 ____)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Место учебной дисциплины.

Учебная дисциплина «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных» профилизации «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» относится к модулю «Методология устойчивого развития систем теплогазоснабжения и вентиляции» компонента учреждения высшего образования учебного плана магистратуры.

Цель преподавания учебной дисциплины:

Целью освоения учебной дисциплины «Планирование эксперимента и статистическая обработка экспериментальных данных» профилизации «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» является формирование у магистрантов представления о месте методов математической статистики и теории планирования эксперимента в современных научных и технологических исследованиях, а также о принципах и методах планирования и оптимизации эксперимента.

Задачи учебной дисциплины:

Выработать у магистрантов навыки применения основных методов статистической обработки результатов экспериментальных исследований, планирования экспериментов.

В результате изучения учебной дисциплины формируются следующие компетенции:

СК-6: Быть способным к прогнозированию условий реализации профессиональной деятельности и решению профессиональных задач в условиях неопределенности.

УК-6: Использовать методы планирования эксперимента, математической статистики, математического анализа и моделирования, применять полученные знания в научно-исследовательской работе.

В результате изучения дисциплины магистрант должен:

знать методы статистической обработки экспериментальных данных и планирования эксперимента.

уметь планировать и проводить теоретические и экспериментальные научные исследования; проводить с помощью современных вычислительных средств статистическую обработку результатов измерений.

владеть методами математического планирования, оптимизации эксперимента и формирования математических моделей.

План учебной дисциплины для дневной формы получения высшего образования

Код специальности (направления специальности)	Наименование специальности (направления специальности)	Курс	Семестр	Всего учебных часов	Количество зачетных единиц	Аудиторных часов (в соответствии с учебным планом УВО)					Академических часов на курсовой проект (работу)	Форма текущей аттестации
						Всего	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинары		
7-06-0732-01	Строительство (ТГВиОВБ)	1	2	240	6	72	36	36				экзамен

План учебной дисциплины для заочной формы получения высшего образования

Код специальности (направления специальности)	Наименование специальности (направления специальности)	Курс	Семестр	Всего учебных часов	Количество зачетных единиц	Аудиторных часов (в соответствии с учебным планом УВО)					Академических часов на курсовой проект (работу)	Форма текущей аттестации
						Всего	Лекции	Лабораторные занятия	Практические занятия	Семинары		
7-06-0732-01	Строительство (ТГВиОВБ)	1	2	240	6	16	8	8				экзамен

1. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1.1. ЛЕКЦИОННЫЕ ЗАНЯТИЯ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

1.1.1 Статистический анализ экспериментальных данных. Первичная обработка результатов эксперимента. Предмет и задачи математической статистики.

1.1.2. Элементы регрессионного анализа. Полный и дробный факторные эксперименты. Планирование 2-го порядка.

1.1.3. Экспериментальные методы поиска оптимальных условий. Задача оп-

тимизации в экспериментальных исследованиях.

1.1.4. Оценка погрешностей результатов эксперимента. Основные понятия теории погрешностей. Ошибки измерений: систематические, случайные, промахи. Абсолютная и относительная погрешность. Математическое выражение погрешностей.

1.1.5. Теория планирования эксперимента. Основные понятия и определения теории планирования эксперимента. Целевая функция, выбор варьируемых переменных, план эксперимента. Основы теории построения эмпирических зависимостей по экспериментальным данным.

1.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ, ИХ СОДЕРЖАНИЕ

1.2.1 Первичная обработка результатов эксперимента.

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

2.1 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

для дневной формы получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самостоятельной работы	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Семинарские занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Статистический анализ экспериментальных данных	10	6				Устный экзамен
2	Теория планирования эксперимента. Элементы регрессионного анализа.	20	16				Устный экзамен
3	Оценка погрешностей результатов эксперимента.	6	14				Устный экзамен
	Итого	36	36				

2.2 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ для заочной формы получения образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов самостоятельной работы	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Семинарские занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Статистический анализ экспериментальных данных	2	2				Устный экзамен
2	Теория планирования эксперимента. Элементы регрессионного анализа.	4	4				Устный экзамен
3	Оценка погрешностей результатов эксперимента.	2	2				Устный экзамен
	Итого	8	2				

3. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Перечень литературы

Основная

1. Теория и практика научного эксперимента: учебное пособие / И.К. Будникова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 132 с.
3. Жарский, И. М. Планирование и организация эксперимента: Учебное пособие / И. М. Жарский, Б. А. Каледин, И. Ф. Кузьмицкий. – Мн.: БГТУ, 2003.

Дополнительная

1. Рогов, В. А. Методика и практика технических экспериментов : учеб. пос. / Г. Г. Позняк. - М. : Академия, 2005. - 288 с.
2. Рожков, Н. Ф. Планирование и организация измерительного эксперимента: учеб. пособие / Н. Ф. Рожков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2009. – 132 с.

3.2. Перечень средств диагностики результатов учебной деятельности

Для диагностики результатов учебной деятельности используется устный экзамен.

3.3. Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы обучающихся по учебной дисциплине.

Для поведения самостоятельной работы магистрантами используются литературные источники, приведенные в п.3.1.

№ п/п	Название раздела, темы	Номер литературы из списка
1	Статистический анализ экспериментальных данных	Основная: 1 Дополнительная: 1
2	Теория планирования эксперимента. Элементы регрессионного анализа.	Основная: 1, 2 Дополнительная: 1,2
3	Оценка погрешностей результатов эксперимента.	Основная: 1, 2 Дополнительная: 1, 2

[вернуться к оглавлению](#)