

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Бабиюк Г.В.

**ОСНОВЫ
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Курс лекций для студентов специальности
"Шахтное и подземное строительство"**

Рекомендовано
Ученым советом ДонГТУ

Алчевск, 2007

www.7knig.net

УДК 622.001.5

ББК _____

Б

Рецензенты:

Р.А. Фрумкин – докт. техн. наук, проф., заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых (Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск)

Н.Р. Шевцов – докт. техн. наук, проф., заведующий кафедрой строительства шахт и подземных сооружений (Донецкий национальный технический университет, г. Донецк)

Б **Бабиюк Г.В.** Основы научных исследований: Курс лекций. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – 247 с.

ISBN _____

В курсе лекций изложены общие сведения о науке и научно-исследовательской работе в высших учебных заведениях, вопросы поиска и обработки научно-технической информации, методология теоретических и экспериментальных исследований в горной науке, методы обработки результатов исследований, правила оформления и использования результатов исследований. Кроме того, в пособии приведен пример решения научной задачи комплексным методом.

Б **Бабиюк Г.В.** Основи наукових досліджень: Курс лекцій. – Алчевськ: ДонДТУ, 2007. – 247 с.

В курсі лекцій викладені загальні відомості про науку і наукові дослідження, принципи організації науково-дослідної роботи у вищих навчальних закладах, питання пошуку і обробки науково-технічної інформації, методологія теоретичних і експериментальних досліджень, правила оформлення і використання результатів досліджень. Крім того, у посібнику наведено приклад розв'язання наукової задачі комплексним методом.

Табл. 16

Ил. 47

Библиогр. назв.

УДК 622.001.5

ББК _____

©Г.В. Бабиюк, 2007

©ДонДТУ, 2007

ISBN _____

ПРЕДИСЛОВИЕ

Во всем мире признано, что наилучшей формой подготовки специалистов высшей квалификации является их непосредственное участие в научных исследованиях. Поэтому перед высшей школой поставлена задача, чтобы за время обучения в вузе каждый студент получил бы навыки исследователя и умел бы их применять на практике при решении сложнейших проблем современного производства. В связи с повышенными требованиями к качеству подготовки специалистов (магистров), отвечающих потребностям развития страны, научно-исследовательская работа студентов (НИРС) выдвигается в число важнейших факторов совершенствования всей системы высшего образования. Непременное участие студентов в научных исследованиях, реальных проектных и конструкторско-технологических разработках должно стать одним из основных способов развития творческого мышления.

В связи с этим "Основы научных исследований" занимает особое место в системе подготовки студентов. Его основная цель состоит в освоение студентами элементов методологии научных исследований и развитии у них рационального творческого мышления. Отсюда вытекают задачи курса, которые сводятся к следующему:

- дать студентам общие сведения о научных исследованиях по профилю специальности, освоить элементы методологии исследований и их организацию;

- научить студентов формулировать цели и задачи исследований, проводить самостоятельные теоретические и экспериментальные научные исследования, анализировать их результаты и оформлять в надлежащем виде.

Курс базируется на глубоком знании всех без исключения общеобразовательных и инженерных дисциплин. Следует подчеркнуть, что перед курсом не стоит цель изложить все многообразие научных методов, используемых в горной науке, что в принципе невозможно. Основное его назначение заключается в формировании у студентов навыков использования научных знаний для решения конкретных за-

дач горной практики.

В результате изучения данного курса студент должен уметь выполнять в различных формах учебного процесса (под руководством преподавателя) те или иные индивидуальные исследования, лабораторные работы, индивидуальное задание на практику, курсовой и дипломный проекты, квалификационную работу магистра, диссертацию.

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с программой одноименной дисциплины для студентов специальности "Шахтное и подземное строительство", которая читается в Донбасском государственном техническом университете. Пособие представляет собой попытку систематизированного изложения базовых методов научных исследований по профилю специальности на основе обобщения рекомендаций ведущих вузов и научно-исследовательских организаций, а также многолетнего опыта автора.

В настоящее время студенты шахтостроители при изучении курса используют преимущественно учебное пособие, изданное коллективом авторов Днепропетровского горного института, еще в 1984 году для всех горных специальностей, а также учебное пособие проф. Фрумкина Р.А., подготовленное для студентов специальности "Разработка месторождений полезных ископаемых". Настоящее пособие лучше отражает специфику исследований в подземном строительстве и содержит, кроме того, пример комплексного выполнения научного исследования различными методами. Это позволит повысить эффективность проведения НИРС на профилирующих кафедрах. Учебное пособие будет также полезным для магистров и аспирантов, занимающихся исследованиями в рамках горной науки.

ЛЕКЦИЯ 1

ТЕМА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

1.1 Основные понятия и определения

Прежде всего, выясним, что же такое *наука*. В литературе Вы можете встретить очень много определений, от серьезных до шуточных. В одних случаях определение звучит так: "Наука – непрерывно развивающаяся система знаний об объективных законах природы, общества и мышления". В других: "Наука – это род человеческой деятельности, направленный на познание человеком законов окружающей природы и общества". Широко известно и шуточное определение понятия науки ученого-физика Арцимовича Л. А., который сказал, что наука – это лучший современный способ удовлетворения любопытства отдельных лиц за счет государства.

Фундаментальный анализ понятия науки дан в философских трудах. В них изложен диалектический подход к пониманию функций науки. (Диалектика – наука о всеобщих законах движения, изменения, обновления и развития природы, общества и мышления). *Наука* – это одновременно специфическая форма общественного сознания с определенной системой знаний; процесс познания закономерностей объективного мира; процесс производства знаний и их использования на практике; вид общественного разделения труда.

В соответствии с приведенным определением одна из основных функций науки состоит в познании объективного мира. Процесс познания – основа любого научного исследования. В процессе познания человек осваивает мир, преобразовывая его для улучшения условий своей жизни. Движущей силой и конечной целью является практика, преобразующая мир на основе его собственных законов.

Путь научного познания начинается с накопления *фактов*. Однако, хотя факты – это воздух ученого, как говорил знаменитый физиолог Павлов И.П., сами по себе они еще не наука. Факты становятся составной частью научных знаний, если они представляются в систематизированном, обобщенном виде. Любое научное исследование развивается

в следующем порядке: факты → абстракция → теория → законы.

Факты систематизируются и обобщаются с помощью простейших **абстракций** (категорий, представлений, понятий). Абстракция – это формирование образов реальности посредством отвлечения и пополнения, т.е. осмысления того, с чем мы имеем дело. Образование абстракции есть средство достижения нового, конкретного знания. Движение в мышлении от чувственно-конкретного через абстрактное и опять к конкретному является законом развития теоретического познания.

В качестве примера знакомых Вам абстрактных категорий, которые помогают изучать явления, происходящие в массиве горных пород, можно привести напряжение σ и деформацию ε . Эти абстрактные категории позволяют судить о механическом состоянии горных пород.

Наиболее высокой формой обобщения и систематизации знаний является **теория**. Под теорией понимают учение об обобщенном опыте (практике), формирующее научные принципы и методы, которые позволяют обобщить, познать процессы и явления, проанализировать действие на них различных факторов и предложить рекомендации по их использованию в практической деятельности людей. Теория обычно строится на результатах, полученных при экспериментировании, а проверяется она также экспериментом.

Важнейшим звеном в системе научных знаний являются **научные законы**, которые отражают наиболее существенные, устойчивые, повторяющиеся, объективные, внутренние связи в природе, обществе и мышлении. Обычно законы выступают в форме определенного соотношения понятий. Например, закон Гука: $s = E \cdot e$, где E – модуль Юнга, с помощью которого описывается связь между напряжениями и деформациями в пределах упругого поведения горных пород.

Деятельность, направленная на получение новых знаний, называется **научным исследованием**, т.е. изучение явлений и процессов, влияния на них различных факторов, а также анализ взаимодействия между явлениями с целью получить убедительно доказанные и полезные для науки и практики результаты.

Различают четыре уровня научных исследований: эмпирический; экспериментально-теоретический; теоретический; метатеорети-

ческий. Если на нижних уровнях посредством наблюдений устанавливаются новые данные и на основе их обобщения формируются выводы, то на высших уровнях выдвигаются общие для данной области теоретические закономерности, позволяющие объяснить ранее открытые факты и эмпирические закономерности, предвидеть будущие события и явления.

Каждое научное исследование имеет свой **объект (предмет)**, на познание которого оно направлено. Между собой объект и предмет исследования соотносятся как общее и частное. Объект исследования – это то, что порождает проблемную ситуацию и выбрано для изучения. Объектом исследования может быть предмет материального мира (например, массив горных пород), процесс (разрушение горных пород вокруг выработки), явление (ползучесть горных пород), свойства (прочность горных пород), а также связь между явлениями и свойствами. В пределах объекта исследования выделяется та его часть, которая является предметом исследования. Именно на него направлено основное внимание исследователя, поскольку предмет определяет тему научного исследования.

Цель научного исследования – определение конкретного объекта (предмета) и всестороннее, достоверное изучение его структуры, характеристик, связей с помощью разработанных в науке методов познания, а также получение полезных для деятельности человека результатов и внедрение их в производство.

1.2 Методология научного исследования

Основными инструментами научного исследования являются методы исследования (рис. 1.1). Под **методом** понимают способ теоретического или экспериментального изучения какого-либо явления или процесса, способствующий открытию объективных законов (закономерностей) действительности. Применяемый в научных исследованиях метод зависит от характера исследуемого объекта (предмета).

Наиболее **общим** является диалектический метод. Для изучения конкретного процесса (явления) используют **частный** метод. Совокупность общего и частного методов позволяет получить ответ на вопросы:

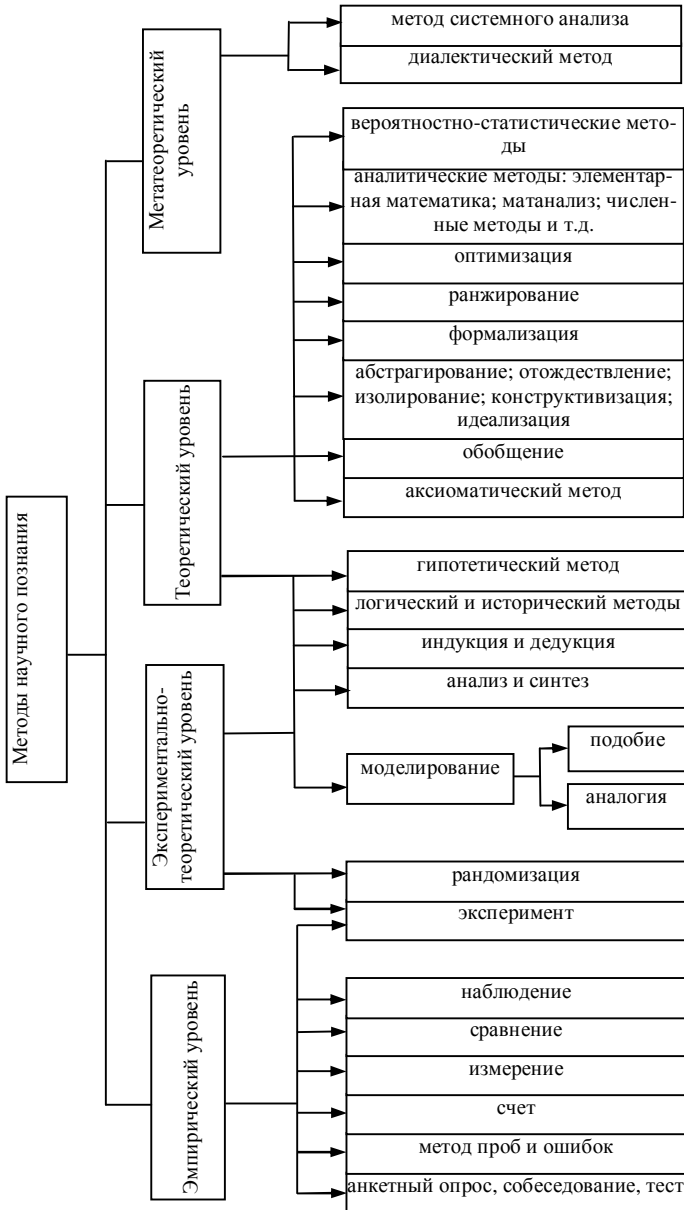


Рисунок 1.1 – Классификация методов научного познания

С чего надо начинать исследования? Как относиться к фактам? Как их обобщать? Каким путем идти к выводам? Совокупность методов, способов, приемов, их последовательность или схема, принятая при проведении научного исследования, представляют собой *методологию*, которая является основой каждого научного исследования.

Методология также может быть общей и частной. Общая методология – это принципы диалектики, с ее помощью исследуются законы развития научного познания в целом. Частная методология основывается на законах отдельных наук и связана с частными методами исследований.

Важную роль в научном исследовании играют *задачи*, на решение которых оно направлено. Эти задачи, а также методы исследований, привлекаемые для их решения, обычно подразделяют на теоретические и эмпирические.

Теоретические задачи направлены на выявление причин, связей, зависимостей, позволяющих установить поведение объекта, определить и изучить его структуру, дать его характеристику на основе используемых в данной области науки принципов, методов и способов. В теоретических исследованиях возможны два подхода: *логический и исторический*.

Логический подход основан на логике (логика – наука о законах мышления) и включает в себя гипотетический (гипотеза – предложение) и аксиоматический (аксиома – исходное положение без доказательств) методы.

Гипотетический метод основан на разработке гипотезы, которая используется в качестве средства достижения научных результатов, когда ученые не располагают достаточным фактическим материалом. *Гипотеза* – это научно обоснованное предположение, содержащие элементы новизны и оригинальности и выдвигаемое для объяснения какого-либо процесса (явления). После проверки гипотеза может оказаться истинной или ложной. Гипотеза выступает часто как черновой вариант устанавливаемых закономерностей и открываемых законов. Большинство научных законов и теорий было сформулировано на основе ранее высказанных гипотез.

Аксиоматический метод основан на очевидных положениях (аксиомах), принимаемых без доказательств (например, аксиомы Евклидовой геометрии). Аксиомы являются начальной формой систематизации знаний и получили распространение в теоретических науках.

Исторический подход позволяет исследовать возникновение, формирование и развитие процессов и событий в хронологической последовательности с целью изучения внутренних и внешних связей, закономерностей и противоречий. Данный метод исследования используется преимущественно в общественных науках. В естественных и прикладных науках он применяется при изучении развития и формирования тех или иных областей знания (обзорах, классификациях). Между логическим и историческим подходами существует единство, основанное на том, что любое логическое познание должно рассматриваться в историческом аспекте.

Основным методом теоретических исследований в прикладных науках является гипотетический метод (например, гипотеза проф. М.М. Протоद्याконова об образовании свода естественного равновесия в кровле выработки). Гипотеза составляет методологический стержень теоретических исследований, определяет их направление и объем. Сформулировать рабочую (первоначальную) гипотезу, как правило, трудно. Успех, прежде всего, зависит от полноты собранной информации, глубины творческого анализа, стройности выводов, сформулированных целей и задач исследований. Выдвигаемые первоначально гипотезы в процессе исследования подвергаются анализу, критике и уточнению, в результате чего они становятся более достоверными. Рабочая гипотеза должна подвергаться экспериментальной проверке. Если гипотеза полностью подтверждается, то она превращается в научную теорию.

Теория – это система знаний, объясняющая совокупность явлений в некоторой области. С помощью теории отдельные результаты упорядочиваются, обобщаются, приводятся в стройную систему, объединенную общей идеей. Теория должна быть эвристичной, конструктивной и простой. Первое свойство наделяет теорию прогностическими возможностями, т.е. она должна позволять делать точные количе-

ственные предсказания. Конструктивность теории состоит в проверяемости ее положений. Простота теории достигается путем представления информации при помощи общеупотребляемых символов. Критерием истинности теории является практика.

В ряде случаев выдвижение гипотезы происходит интуитивно (*интуиция* – способность постижения истины путем прямого ее усмотрения без обоснования с помощью доказательств). Следует отметить, что интуиции бывает достаточно для формулирования гипотезы, но ее недостаточно, чтобы убедить в истине других и самого себя. Для этого необходимо доказательство, на что и направлено исследование.

В процессе мышления при выдвижении гипотез у исследователя возникают идеи (*идея* – мысль, достигшая высокой степени объективности, полноты и конкретности, и направленная на практическую реализацию). Генерация идей является неотъемлемой особенностью мышления исследователя, так как без новых идей невозможно движение вперед. По подсчетам американских ученых, на каждый используемый в производстве результат приходится 8 патентов, 98 технических решений и 540 идей.

Особую роль в теоретических исследованиях играют общенаучные методы познания: анализ и синтез; дедукция и индукция; идеализация; абстрагирование; ранжирование; формализация и пр.

Анализ – это способ научного познания, при котором объект расчленяется на составные части. *Синтез* – противоположный анализу метод, заключающийся в исследовании объекта в целом, на основе объединения связанных друг с другом элементов. Эти способы взаимосвязаны, так как без анализа нет синтеза. Так, например, при исследовании технологии, выделяя из ее состава отдельные процессы, применяют анализ, а, изучая технологию как систему, состоящую из отдельных процессов, используют синтез.

Важное место в исследованиях занимают дедукция и индукция.

Дедуктивный способ – это такой способ умозаключения, при котором частные положения выводятся из общих. Так, на основе общих законов механики сплошной среды получают уравнения для определения размеров зоны неупругих деформаций вокруг выработки.

Этот способ, базирующийся на известных логических связях, за пределами которых он не может быть использован, определяет конечный результат исследования. Это является недостатком дедуктивного метода, так как, например, чтобы исследовать процессы деформирования пород вокруг выработки с максимальным приближением к действительности, необходимо учитывать новые факторы, выходящие за пределы исходных положений.

Индуктивный способ – это такой способ умозаключения, при котором по частным фактам устанавливаются общие принципы и законы (например, периодический закон Д.И. Менделеева). Научная индукция позволяет определить причинную связь параметров изучаемого объекта.

В теоретических исследованиях используют как индукцию, так и дедукцию. Так, например, обосновывая ту или иную гипотезу, прежде всего, устанавливают ее соответствие с общим законом диалектики и естествознания, т.е. применяют способ дедукции. В то же время гипотезу формируют на основе частных фактов, полученных из эксперимента.

При анализе явлений и процессов возникает потребность в применении и других способов. Для упрощения исследуемому объекту часто присваивают несуществующие, нереальные свойства (но в допустимых пределах), т.е. прибегают к **идеализации**, например, модель идеального упругого или пластичного тела при описании процесса деформирования пород.

При анализе большого количества фактов важно уметь выделить главное. В этом случае применяют способ **абстрагирования**, т.е. отвлечение от второстепенных факторов с целью сосредоточения на важнейших особенностях изучаемого явления. Так, при исследовании процессов деформирования пород часто принимают постоянную температуру, не учитывают влажность, трещиноватость и пр. Абстрагирование осуществляется в две стадии. На первой факторы ранжируются по степени значимости, а на второй стадии объект заменяется другим, более простым, который выступает в качестве "модели" первого.

Для описания взаимосвязей между основными параметрами модели применяют способ **формализации**, т.е. представление абстракт-

ных категорий в виде формул и другой символики, присущей тому или иному математическому методу.

Эмпирические задачи направлены на выявление, точное описание и тщательное изучение различных факторов изучаемых явлений и процессов. В научных исследованиях эти задачи решаются такими методами, как наблюдение, сравнение, измерение и эксперимент.

Наблюдение – это пассивный метод познания, при котором объект изучают без вмешательства в него, но с соблюдением принципов целенаправленности, планомерности, преднамеренности и систематичности.

Сравнение – это процесс установления сходства или различия предметов и явлений действительности, а также нахождения общего, что присуще двум или нескольким объектам. Объекты могут сравниваться непосредственно или опосредственно через их сравнение с каким-либо эталоном. В первом случае получают качественные результаты (больше, меньше). Сравнение же объектов с эталоном дает количественные характеристики. Такое сравнение называют измерением.

Измерение – это определение численного значения некоторой величины с помощью средств измерения. Оно предполагает наличие следующих основных элементов: объекта измерения, эталона, измерительных приборов, метода измерения.

Эксперимент – это наиболее общий активный метод познания (научно поставленный опыт), при котором производят не только наблюдения и измерения, но и изменяют условия проведения исследования для выявления влияния одного фактора на другой (другие). К нему прибегают при необходимости изучения у объекта ранее неизвестных свойств, а также при проверке правильности теоретических предпосылок.

Эксперимент и теория тесно взаимосвязаны между собой. Игнорирование экспериментальных данных неизбежно ведет к ошибкам. Правильная постановка эксперимента – важнейший этап исследования, позволяющий подтвердить предварительные теоретические предпосылки и сделать объективные выводы.

Основным методом современных исследований, который применяется как на теоретическом, так и на эмпирическом уровнях, явля-

ется **моделирование**. Это метод, основывающийся на использовании модели в качестве средства исследования. Под **моделью** понимают искусственную систему, отображающую с определенной степенью точности основные свойства реального объекта (оригинала). Модель состоит в определенном соотношении (аналогия, подобие) с изучаемым объектом, заменяет его при исследовании и позволяет получить наиболее достоверную информацию. Различают макетирование, физическое, аналоговое и математическое моделирование.

Макетирование или геометрическое моделирование основано на соблюдении между объектом и моделью только геометрического подобия и является грубым приближением к реальным явлениям и процессам. Опыты М. Файоля, М.М. Протодяконова и др., основанные на соблюдении геометрического подобия, сыграли значительную роль в становлении горной науки и привели к широкому применению моделирования.

Физическое моделирование предусматривает воссоздание в модели тех же самых физических полей, которые действуют в объекте, но измененных по своим абсолютным значениям в соответствии с масштабом моделирования (критерием подобия). Задачи горной науки решают с помощью следующих методов физического моделирования (метод эквивалентных материалов, метод фотоупругости и фотопластичности, центробежный метод, метод структурных моделей).

Аналоговое моделирование предусматривает замену в модели по сравнению с объектом одних физических полей другими. При этом используется среда, которая ведет себя аналогично реальному объекту и описывается аналогичными математическими зависимостями. В качестве примера можно привести метод электрогидравлических аналогов, основанный на математической аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и ламинарным движением жидкости в пористой породе.

Математическое моделирование является методом изучения процессов и явлений, для которых известно математическое описание. Оно базируется на общих законах природы и применении формы записи (формализации) этих законов для конкретного явления или процес-

са. Моделирование состоит в воспроизведении состояния системы с сохранением логической структуры взаимосвязи элементов, их физической структуры и последовательности смены состояний во времени.

Используемые в горной науке математические модели можно подразделить на аналитические, численные, статистические и имитационные. Аналитические модели основываются на установлении математических зависимостей в явном виде между параметрами, характеризующими состояние системы. Чтобы аналитическое решение было возможным, неизбежно приходится принимать ряд допущений, идеализирующих задачу настолько, что ее решение оказывается весьма далеким от реальности. Если математическую модель невозможно преобразовать к конечному виду, а упрощения приводят к грубым результатам, более рационально использовать численные методы, которые особенно эффективны при применении вычислительных машин.

В задачах с большим числом влияющих факторов и случайными связями между элементами эффективны методы, реализуемые на основе статистического моделирования. Суть его состоит в воспроизведении на ЭВМ с помощью рандомизации случайного явления или процесса для накопления материала, обрабатываемого методами математической статистики. Недостатком таких моделей является их громоздкость и трудоемкость, а также сложность осмысления результатов.

При исследовании сложных систем используется имитационное моделирование на ЭВМ, которое синтезирует все виды моделирования и позволяет объединить имитацию исследуемого явления и планирование эксперимента. Имитационное моделирование представляет собой своеобразное экспериментирование с моделью реальной системы.

Заканчивая рассматривать методологические основы научного познания можно еще раз подчеркнуть следующее. Процесс познания идет от сбора, изучения и систематизации фактов, обобщения и раскрытия отдельных закономерностей к логически стройной системе знаний (теории), позволяющей объяснить неизвестные понятия и предсказать новые.

ЛЕКЦИЯ 2

1.3 Основные закономерности, проблемы и противоречия развития науки

Наука развивается как по общим для всего общества законам, так и по специфическим внутренним законам.

Общие законы связывают научное знание с другими социальными процессами. К ним следует отнести диалектические законы эволюции посредством возникновения и разрешения противоречий, отрицания, перехода количественных изменений в качественные. Сюда же следует отнести и социальные законы, определяющие отношения науки и материального производства.

Внутренние законы выражают относительную самостоятельность науки как обособленного вида общественного разделения труда, ее особое качество и раскрываются через историческое обобщение и анализ особенностей накопления научного знания. Внутренние законы дополняют и конкретизируют общие, они раскрывают глубинные механизмы прогресса, путь создания достоверных обобщений и доказательств.

В своем развитии все области науки проходят через ряд этапов:

- описательный, связанный со сбором фактов и их систематизацией;
- логико-аналитический, основанный на качественном анализе объектов исследования;
- сочетания, объединяющий качественные и количественные методы научного познания.

Проблемы, противоречия и закономерности развития науки изучаются в рамках новой науки, зародившейся в последнее время и получившей название **науковедение**. Ее предметом является структура науки и законы ее развития; динамика научной деятельности; экономика, планирование и организация науки; формы взаимодействия науки с другими сферами материальной и духовной жизни общества.

К настоящему времени сформулирован целый ряд внутренних законов. Прежде всего, это **закон экспоненциального** (ускоряющегося, лавинообразного) развития, проявившийся в последние 250 лет. Его суть сводится к тому, что на современном этапе объем научных знаний

удваивается каждые 10...15 лет. Это находит свое выражение в росте научной информации, числа открытий, количества людей, занятых научной деятельностью (кривая 1 на рис. 1.2). Однако многие ученые полагают, что экспоненциальный характер развития науки со временем должен измениться и будет подчиняться кривой 2 (рис. 1.2), что обусловлено ограниченными ресурсами (люди, ассигнования).

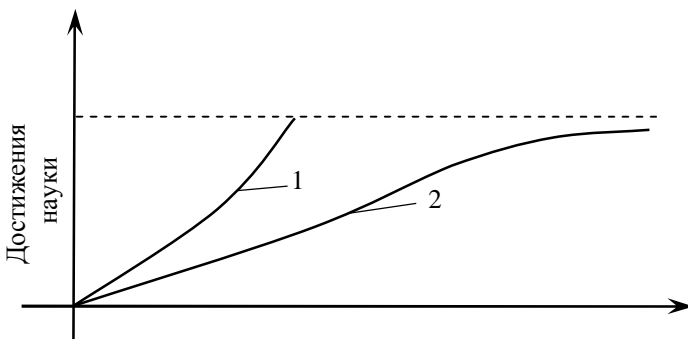


Рисунок 1.2 – Закономерности развития научных исследований во времени: 1 – экспонента; 2 – вероятная кривая

Следствием ускоряющегося развития науки является быстрое старение накопленных знаний. Из этой закономерности вытекают ценные рекомендации для будущих специалистов. Процесс обучения не заканчивается получением диплома об образовании, а лишь переходит в новое качество: самостоятельное пополнение знаний согласно достижениям науки и техники на базе приобретенных в вузе навыков.

Лавинообразное развитие науки сопровождается образованием новых ее направлений, каждое из которых рождает новые проблемы. Разветвление науки во многих случаях ведет к слиянию ее ветвей, поэтому новые науки рождаются, как правило, на стыке двух, трех ее ветвей (экономическая кибернетика, физико-химическая механика, биофизика, биогеохимия и т.д.). Такие тенденции развития науки нашли отражение в законах дифференциации и интеграции.

В соответствии с **законом дифференциации** углубление позна-

ния и освоение новых областей приводят к дроблению фундаментальных дисциплин на все более специальные области, которые совершенствуют собственные методы исследования, изучают свои микрообъекты. Синтез знаний в то же время ведет к укрупнению науки, что отображается **законом интеграции**. Первоначально наука формировалась по предметному признаку, но через проблемную ориентацию постепенно перешла к широкой математизации, к формированию системного подхода к решению научных задач, к усилению связи между фундаментальными и прикладными исследованиями.

Следующий закон, связанный с кумулятивным характером развития науки, получил название **закона соответствия**. Он означает, что новая более широкая теория должна содержать в себе предшествующую, проверенную практикой, как частный или предельный случай.

Одним из основных законов является **преемственность** в накоплении знаний, что ведет к единой линии необратимого, поступательного развития. Если бы каждому поколению нужно было заново открывать законы природы и общества, то система знаний складывалась бы очень медленно, но так как ученые базируются на знаниях, накопленных всеми предыдущими поколениями, то достижения науки неуклонно расширяются.

Преемственность в развитии науки неразрывно связана с ее интернациональным характером, так система знаний складывалась благодаря достижениям ученых различных стран, что обеспечивается с помощью научных публикаций (книги, статьи, патенты).

Каждое открытие в науке симметрично и пропорционально обрастает новыми знаниями, что согласуется с **законом кристаллизации**.

Одной из главных черт современной науки является ее сближение с производством. Если на ранних стадиях техника и производство опережали развитие науки, ставя перед ней задачи, то в настоящее время произошло изменение соотношения между наукой и производством, которое привело к преобразованию производительных сил общества. Сформировалась единая система "наука–техника–производство", где ведущая роль принадлежит науке, что является обязательным условием научно-технического прогресса. Соотношение

отдельных компонентов (H , T , Π) этой системы на современном этапе удовлетворяет неравенству $dH/dt > dT/dt > d\Pi/d\Pi$, что графически изображается на рисунке 1.3.

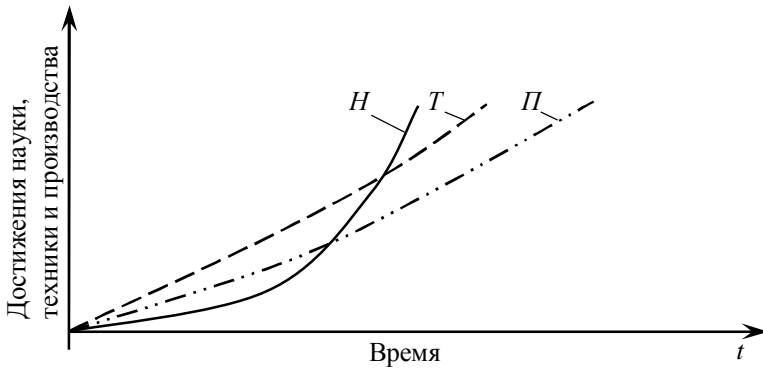


Рисунок 1.3 – Темпы развития науки, техники и производства во времени: H – наука; T – техника; Π – производство

Опережающая роль науки обусловлена вовлечением в сферу практической деятельности человека новых видов энергии, новых технологий, новых веществ с ранее неизвестными свойствами. Развитие науки создает предпосылки для прогресса техники и производства и превращает ее в непосредственную производительную силу общества. Однако наука не становится дополнительным элементом производства. Она своими методами совершенствует составные части производства: средства труда, предмет труда и сам труд.

Известны три основных пути превращения науки в производительную силу. Первый из них и единственный до XIX века состоит в создании на основе достижений науки новых технологических процессов, повышающих производительность труда и улучшающих процесс производства продукции. Второй путь стал проявляться в XIX веке и состоит в совершенствовании самого человека как основной производительной силы общества. В производстве находит все большее применение оборудование, для обслуживания которого требуется не толь-

ко высокая квалификация рабочего, но и фундаментальная подготовка специалистов по математике, физике, информатике, кибернетике, экономике и т.д. Производительность труда стала в значительной степени определяться развитием рационализаторской и изобретательной работы. Научное творчество, ранее свойственное лишь ученым, становится потребностью и необходимостью многих людей, независимо от их профессиональной принадлежности. Третий путь, проявившийся в последнее время, состоит в совершенствовании производственных процессов, начиная от научной организации труда на отдельном рабочем месте и заканчивая общей стратегией развития общества.

Изменившаяся роль науки привела к научно-технической революции, которая происходит в настоящее время во всем мире и заключается в коренном, качественном преобразовании производительных сил (комплексная механизация, автоматизация, роботизация производства) на основе превращения науки в ведущий фактор развития общественного производства.

1.4 Горная наука и ее предмет

Одно из первых определений понятия "горная наука" принадлежит М.В. Ломоносову, который говорил, что это "наука, которая учит минералы знать, приискивать и приводить в такое состояние, чтобы они в обществе человеческом были пригодны". Из этого определения видно, что уже в XVIII веке горная наука имела свой предмет, носила прикладной характер и включала в себя знания из области геологии и разведки месторождений полезных ископаемых, их разработки и обогащения. Содержание понятия остается фактически тем же и в настоящее время.

Горная наука – это совокупность знаний:

- о природных условиях залегания месторождений полезных ископаемых и физико-химических явлениях и процессах в толще пород при ведении горных работ;
- о способах добычи и обогащения полезных ископаемых;
- об организации производства, обеспечивающей безопасную и эффективную разработку месторождений.

Предметом горной науки являются производственные и технологические процессы разработки полезных ископаемых во взаимосвязи с сопутствующими им природными процессами и явлениями. Развитие горной науки сопровождалось ее дифференциацией и использованием достижений смежных наук. В настоящее время в ней можно выделить три раздела: технологический; нормализации условий труда; экономики, организации и управления горным производством.

Наиболее значимый *технологический* раздел включает в себя следующие дисциплины:

- горного цикла, т.е. подземной и открытой разработки месторождений полезных ископаемых (вскрытие, подготовка и системы разработки; технология очистных и подготовительных работ; механизация и автоматизация процессов; управление состоянием горного массива; разрушение горных пород; вспомогательные процессы: транспорт, подъем, водоотлив и т.д.), а также освоения подземного пространства;

- обогащения полезных ископаемых (технология и способы обогащению полезных ископаемых);

- охраны окружающей среды от воздействия горных работ и ликвидации их последствий;

- рационального использования недр и горной геомеханики;

- опробования и изучения состава и свойств породных массивов, горных пород и минералов;

- исследования физико-химических явлений и процессов, происходящих в массиве горных пород при ведении горных работ.

В раздел *нормализации* условий труда входят:

- обеспечение безопасных условий труда горнорабочих;

- теория и методы рудничной аэрологии;

- методы прогноза и предотвращения вредных проявлений при разработке месторождений (внезапные выбросы угля, газа и породы, самовозгорание угля и т.д.).

Раздел *экономики* горного производства включает:

- горную экономическую географию и макроэкономику;

- экономику горного предприятия и его подразделений;

- организацию труда и производства;
- управление (менеджмент) горными предприятиями и качеством продукции.

Современные цели горной науки определяются экономическими и социальными задачами нашего государства. Большое значение для Украины имеет снижение стоимости топливно-энергетических ресурсов и минерального сырья. Разработка месторождений, залегающих на больших глубинах или в сложных условиях, выдвигает проблему сокращения затрат человеческого труда.

В своем развитии горная наука постоянно решает две противоположные, и в то же время единые теоретические и практические задачи. С одной стороны создание способов разрушения горных пород, а с другой – обеспечение устойчивости горных выработок в течение срока службы. Реализовать их можно, только овладев методами активного управления процессами в массивах, с тем, чтобы сделать добычу полезных ископаемых безопасной, производительной, экономичной и достичь при этом наименьших потерь минералов в недрах.

ЛЕКЦИЯ 3

ТЕМА 2. ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

2.1 Классификация научно-исследовательских работ

Научно-исследовательские работы (НИР) классифицируют по видам связи с производством, степени важности, источникам финансирования, длительности разработки и целевому назначению.

По **видам связи** с производством:

- НИР, направленные на создание новых процессов, машин и конструкций, используемых для повышения эффективности производства;
- НИР, способствующие улучшению производственных отношений и повышению уровня организации производства без создания новых средств труда;
- НИР в области общественных и гуманитарных наук, которые предназначены для совершенствования общественных отношений, повышения духовной жизни людей.

По степени **важности** исследований НИР подразделяются на выполняемые по государственному плану (важнейшие); плану Академии наук Украины; планам отраслевых министерств и ведомств; по плану (инициативе) научно-исследовательской организации.

В зависимости от **источников финансирования** НИР делятся на госбюджетные, финансируемые из государственного бюджета; хозяйственные, финансируемые в соответствии с заключаемыми договорами между организациями-заказчиками и организациями, выполняющими исследования; перспективные (грантовые), финансируемые из отечественных и зарубежных благотворительных фондов или выполняемые за счет частных инвестиций.

По **длительности** разработки НИР подразделяются на долгосрочные, разрабатываемые в течение нескольких лет (5-10); краткосрочные, выполняемые за 1-3 года.

В зависимости от *цели исследований* и решаемых задач НИР могут быть разделены на четыре группы: поисковые работы; фундаментальные исследования; прикладные исследования; разработки.

Поисковые работы выполняются индивидуально учеными или группой ученых, которые имеют глубокие знания, большой опыт работы и свободны в выборе направления исследований и использовании средств.

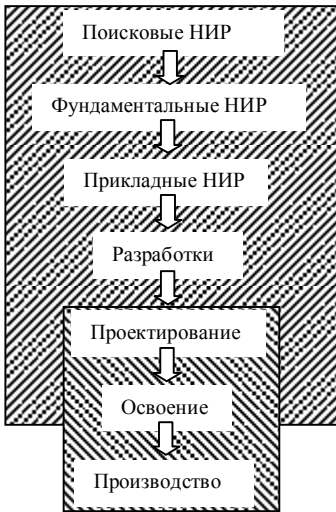
Фундаментальные исследования имеют целью познание человеком законов природы, они направлены на создание новых принципов, теорий и научных положений, которые могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Прикладные исследования базируются на результатах фундаментальных и направлены на получение новых закономерностей, на основе которых разрабатывают новое оборудование, машины, мате-

риалы, способы производства и совершенствуется организация труда.

Цель разработок заключается в преобразовании прикладных исследований в технические приложения. Они не требуют проведения объемных новых научных исследований. Конечная цель разработок – подготовка материала для внедрения в производство.

Взаимосвязь между основными типами научных исследований можно представить в виде схемы (рис. 2.1).



▨ – исследование; ■ – внедрение

Рисунок 2.1 – Схема взаимосвязи научных исследований и производства

2.2 Основные этапы научного исследования и опытно-конструкторских работ

Исследовательскую работу проводят в определенной последовательности. Фундаментальные и прикладные исследования имеют общие особенности и их выполняют обычно в шесть этапов (рис. 2.2).

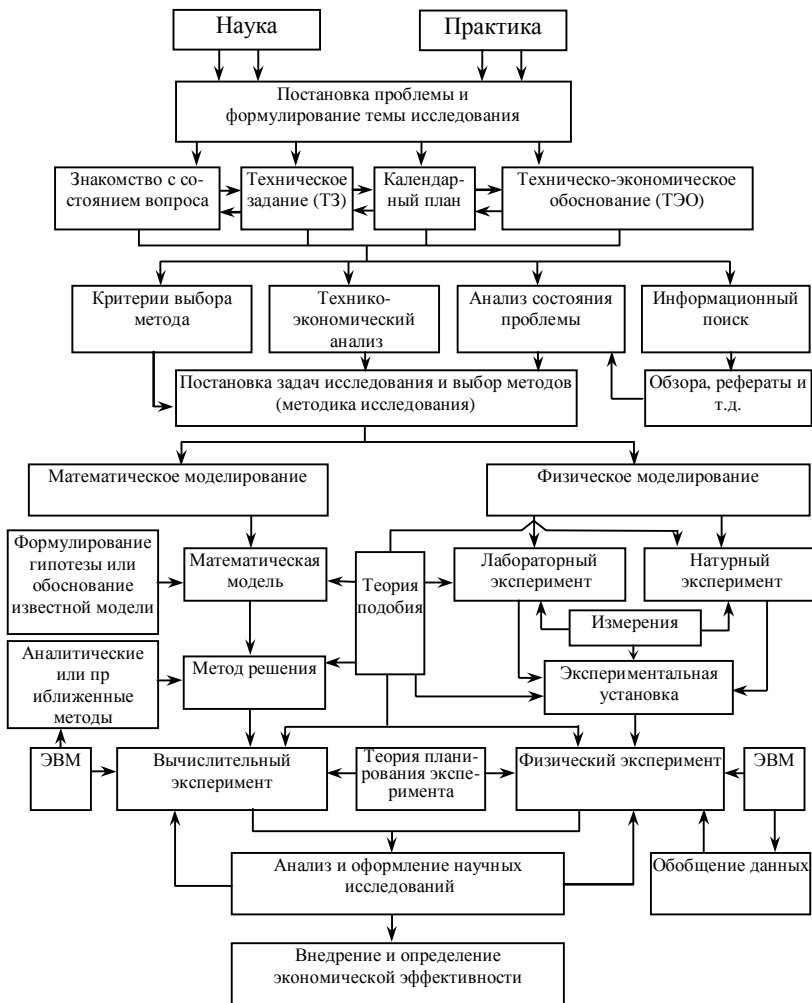


Рисунок 2.2 – Схема выполнения научного исследования

Постановка проблемы и формулирование темы исследования. В рамках этого этапа происходит ознакомление с проблемой, по которой предстоит выполнить исследование. Производится предварительное ознакомление с литературой, формулируется тема исследования. Разрабатывается техническое задание (ТЗ) и составляется календарный план выполнения НИР. Определяется ожидаемый экономический эффект и составляется технико-экономическое обоснование (ТЭО).

Этот этап исследований иногда называют подготовительным. Итогом его является составление технико-экономического обоснования НИР. В нем обосновывается актуальность и целесообразность выполнения работы, доказывается новизна и патентная чистота, а так же определяются необходимые затраты денежных средств и материальных ресурсов, назначаются сроки выполнения исследования, составляется календарный план решения проблемы, рассчитывается ожидаемая экономическая эффективность; устанавливается возможная область применения и потребность в результатах НИР. ТЭО оформляется в виде пояснительной записки с приложением к ней всех необходимых документов и расчетов (ТЗ, отчет о патентных исследованиях, расчет экономической эффективности).

Формулирование цели и задач исследований. Цели и задачи исследований формулируются на основе подробного анализа современного состояния рассматриваемой проблемы. Подбирается литература и составляются библиографические списки отечественных и зарубежных источников (монографий, учебников, статей и др.). Изучаются научно-технические отчеты о НИР, выполненные другими организациями. Составляются аннотации источников, обзоры, анализы, рефераты и экспресс – информации, делается классификация основных направлений. Прорабатываемая информация анализируется, сопоставляется, критикуется и обобщается в виде анализа состояния вопроса. На основе анализа ставятся конкретные цели и задачи исследования. Далее осуществляется выбор метода исследования, разрабатывается календарный план выполнения работ и составляется методика исследований.

Методика исследований является обязательным звеном при выполнении НИР. Она во многом обеспечивает соблюдение сроков работ

и успешное их завершение в зависимости от видов работ (лабораторные, полупромышленные, промышленные) методика может быть общей или частной. Содержание методики должно полностью соответствовать задачам исследований.

Теоретические исследования. Следующие этапы исследований сводятся к выполнению поставленных задач. Чаще всего в фундаментальных и прикладных исследованиях используется математическое и физическое моделирование, или, иными словами, теоретические и экспериментальные исследования, которые могут выполняться в различных сочетаниях, что зависит от темы и объекта исследований.

Теоретические исследования включают в себя несколько подэтапов. К ним относятся, прежде всего, составление математической модели исследуемого процесса (явления) на основе сформулированной гипотезы или использование готовой модели с учетом новых факторов. При этом для удобства решения и представления полученных результатов математическое описание явления чаще всего выполняется в безразмерных единицах на основе теории подобия.

Далее осуществляется выбор метода решения (аналитического или приближенного) с учетом требуемой точности, затрачиваемого времени, материальных затрат, простоты вычислений. Вычислительный эксперимент позволяет получить результаты исследования в виде числовых данных, которые затем подвергаются обработке. Расчеты осуществляют, как правило, с помощью ЭВМ. В результате теоретических исследований получают расчетные уравнения, графики и номограммы, характеризующие закономерности изучаемого процесса. Следует отметить, что при проведении расчетов и обобщений полученных результатов рационально применять теорию подобия и теорию планирования эксперимента.

Экспериментальные исследования. Для изучения физической сущности явления (процесса) часто еще на стадии формирования гипотезы и разработки математической модели возникает необходимость в поисковых экспериментах, так называемом физическом моделировании. Оно может выполняться на модельной установке или в натуральных условиях. Эксперименты проводятся с учетом основных положе-

ний теории подобия физических явлений.

Предварительные эксперименты, кроме того, позволяют определить геометрические размеры установок или параметры изучаемого явления, установить основные влияющие факторы и их диапазон изменения, наметить необходимые измерения и подобрать аппаратуру. На этом этапе исследований обязательным является разработка частных методик и программ работ; выполняется кропотливый и зачастую трудоемкий объем работ по конструированию приборов, макетов, аппаратов, моделей, стендов, установок и других средств проведения экспериментов; обосновываются способы измерений, и составляется программа проведения основного эксперимента.

Выполнение эксперимента может осуществляться по обычной схеме в виде перебора влияющих факторов или с использованием теории планирования эксперимента. После выполнения всей программы исследований производится проверка правильности полученных результатов. Данные эксперимента представляются в виде уравнений (чаще всего в безразмерных единицах), затем оценивается погрешность расчета по ним. На всех этапах физического моделирования широко применяются ЭВМ: для управления экспериментом; обработки результатов измерений; обобщения результатов и пр.

Анализ и оформление научных исследований. В рамках этого этапа производится сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования; дается анализ расхождений; уточняется теоретическая модель, и производятся в случае необходимости дополнительные эксперименты. На этой стадии исследований рабочая гипотеза превращается в теорию. На основании полученных результатов формулируются научные и производственные выводы. Конкретными результатами НИР могут быть уточнение математической или физической модели явления, разработка новой методики расчета, новой теории, рекомендации по совершенствованию машин и установок, подготовка данных для выполнения опытно-конструкторских работ. По итогам исследований оформляется отчет о НИР.

Внедрение и определение экономической эффективности. За-

вершается научно-исследовательская работа внедрением результатов исследований в производство и определением экономической эффективности от их пользования.

Для доведения результатов НИР к внедрению выполняются опытно-технологические или опытно-конструкторские разработки, которые включают в себя следующие этапы (рис. 2.3):

а) формулирование темы, цели и задач исследований;
б) изучение литературы, проведение исследований (в случаях необходимости) и подготовка к техническому проектированию экспериментального образца;

в) техническое проектирование, которое состоит в разработке вариантов технического проекта, выполнение необходимых расчетов; разработке чертежей, изготовлении отдельных узлов, блоков и анализе их работы; разработке и согласовании технического проекта; технико-экономическом обосновании проекта;

г) рабочее проектирование, которое заключается в разработке со всеми деталями рабочего проекта;

д) изготовление опытного образца: анализ и контроль технической документации; проектирование технологических процессов; разработка технологических карт; составление проекта организации работ; изготовление деталей, блоков и узлов опытного образца, их сборка; опробование, доводка и регулировка опытного образца. Стендовые и производственные испытания;

е) доработка опытного образца: анализ работы отдельных узлов опытного образца и их замена;

ж) государственные испытания: передача образца специальной комиссии на государственные испытания.

Общий цикл работ, начиная с фундаментальных исследований и заканчивая серийным выпуском продукции, составляет от 5 до 10 лет в зависимости от масштабности работы и уровня организации работ. Перед наукой стоит задача сокращения длительности этого цикла, но сделать это без существенных инвестиций невозможно.



Рисунок 2.3 – Схема выполнения опытно-конструкторских работ

2.3 Научные учреждения и кадры страны

Исследования ведутся в научных организациях, среди которых могут быть выделены:

- научно-исследовательские институты (НИИ), входящие в состав Национальной Академии наук Украины;
- высшие учебные заведения (ВУЗы);
- отраслевые НИИ, подчиненные отраслевым министерствам.

Наряду с этим научные исследования и разработки могут выполняться в проектно-конструкторских и технологических институтах (ГИПРОШАХТ – государственный институт по проектированию шахт), лабораториях, бюро и других учреждениях, подчиненных различным ведомствам. Ряд научно-исследовательских организаций являются головными. Помимо общих задач они осуществляют координацию научных исследований и контролируют выполнение исследований другими учреждениями.

Высшим научным учреждением страны является Национальная Академия наук Украины. Она осуществляет общее руководство исследованиями по важнейшим проблемам, проводимым в подведомственных НИИ, и координирует работу других научно-исследовательских учреждений по стратегическим, фундаментальным исследованиям.

Над решением проблем горной науки в Украине работают следующие академические институты: (ИГТМ НАНУ, г. Днепропетровск); Донецкий институт физики горных процессов (ДонНТИ НАНУ, г. Донецк); Украинский государственный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела (УкрНИМИ, г. Донецк). В России решением этих проблем заняты: институт проблем комплексного освоения недр (ИПКОН РАН, г. Москва), институт горного дела Сибирского отделения РАН (ИГД СО РАН, г. Новосибирск) и др.

Разнообразные фундаментальные и прикладные исследования выполняются в высших учебных заведениях, где работает основная часть научных работников. Подготовка специалистов и проведение научных исследований – это две неразрывные функции вуза.

Среди высших учебных заведений выделяют:

- университеты, которые готовят специалистов и проводят исследования в области естественных и гуманитарных наук;
- технические университеты и политехнические институты, которые готовят специалистов и ведут научную работу по различным техническим отраслям;
- специализированные учебные заведения, готовящие специалистов для отдельных отраслей и ведущие научную работу в соответствующей области знаний.

Специалистов горного профиля в Украине выпускают Национальный горный университет (НГУ, г. Днепропетровск), Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ, г. Донецк); Донбасский государственный технический университет (ДонГТУ, г. Алчевск), Криворожский технический университет (КТУ, г. Кривой Рог).

Важным преимуществом вузов в вопросах выполнения научной работы является наличие многопрофильных специалистов, что позволяет проводить широкий круг исследований.

В угольной промышленности работает целый ряд отраслевых научно-исследовательских институтов, среда которых следует назвать: Донецкий угольный институт (ДонУГИ, г. Донецк), Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в угольной промышленности (МакНИИ, г. Макеевка), научно-исследовательский институт по организации и механизации шахтного строительства (НИИОМШС, г. Харьков), институт горной механики (ИГМ им. М.М. Федорова, г. Донецк), Луганский институт струговой выемки угля (ЛИСВУ, г. Луганск), и др.

Большим авторитетом среди специалистов и ученых пользуются отраслевые институты России: институт горного дела (ИГД им. А.А. Скочинского, г. Люберцы), научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела, (НИМИ, г. Санкт-Петербург), Кузбасский научно-исследовательский институт по шахтному строительству (КузНИИШахтострой, г. Кемерово) и др.

Крупными научными силами располагают такие проектные и проектно-конструкторские институты как Южгипрошахт (г. Харьков), Донгипрошахт (г. Донецк), Луганскгипрошахт (г. Луганск) и др.

Научными кадрами являются высококвалифицированные работники, к числу которых относят лиц, имеющих высшее образование и ведущих научно-исследовательскую и научно-педагогическую работу в установленном законодательством порядке. Научным работникам, наиболее успешно выполняющим научную и педагогическую работу, присуждают ученые степени и присваиваются ученые звания.

В нашей стране (как и в бывшем СССР) установлены две ученые степени: кандидат наук и доктор наук. Они присуждаются Высшей аттестационной комиссией (ВАК) по результатам публичной защиты диссертаций в специализированных ученых советах. К компетенции ВАК относятся также присвоение ученого звания старшего научного сотрудника. Ученые звания (профессор, доцент) в Украине присваивает Министерство образования и науки (МОН), оно же выдает соответствующие аттестаты. Звания академика и члена-корреспондента присваивают соответствующие Академии, куда избираются действительными членами наиболее авторитетные ученые.

Подготовка кадров высшей квалификации (докторов наук и кандидатов наук) – одна из главных организационных задач науки. В нашей стране создана и успешно функционирует единая система подготовки научных и научно-педагогических кадров для работы в НИИ и вузах.

Основной формой подготовки научных кадров является аспирантура (очная и заочная). Подготовка в очной аспирантуре длится 3 года, а в заочной – 4 года, она осуществляется по индивидуальному плану, утвержденному на весь период обучения. За это время аспирант сдает экзамены кандидатского минимума (философию, иностранный язык и спецдисциплину), проводит самостоятельную научную работу и подготавливает к защите диссертацию. В вузе аспирант, кроме того, проходит и педагогическую подготовку. Для оказания помощи аспиранту в выполнении его исследования назначается научный руководитель, как правило, из числа докторов наук или профессоров. Тема исследования утверждается ученым советом и обычно является составной частью работ, выполняемых в научном учреждении.

Подготовка докторов наук осуществляется из числа наиболее активно ведущих научную деятельность кандидатов наук. Докторская

диссертация представляет собой существенный шаг в науке, связанный с разработкой новых научных направлений и решением крупных научных проблем. Подготовка докторов наук, как правило, осуществляется без отрыва соискателя от основной работы. Одной из форм подготовки является докторантура, когда для завершения работы над диссертацией предоставляется до трех лет.

Защита кандидатских и докторских диссертаций осуществляется на специализированных ученых советах, создаваемых по решению ВАК в вузах и НИИ, которые проводят фундаментальные и прикладные исследования. Диссертация на соискание ученой степени является квалификационной научной работой, выполняется она лично автором в виде специально подготовленной рукописи или опубликованной монографии. Диссертация содержит представленные автором для публичной защиты научно обоснованные теоретические или экспериментальные результаты, научные положения, которые характерны единством содержания и свидетельствуют о личном вкладе соискателя в науку. Для оценки качества диссертаций назначаются официальные оппоненты из числа ведущих ученых в данной отрасли и ведущее предприятие, которые представляют официальные заключения по диссертации.

Научных и научно-педагогических работников избирают на вакантные должности, соответствующие их ученому званию, по конкурсу на совете научного учреждения путем тайного голосования на пять лет. Избрание по конкурсу является одной из форм аттестации научных и научно-педагогических кадров.

ЛЕКЦИЯ 4

2.4 Научно-исследовательская работа в вузах

Научно-исследовательская работа в вузах имеет определенные особенности, состоящие в сочетании учебно-воспитательного процесса и научно-исследовательской деятельности, в которой совместно участвуют научно-педагогические работники и студенты.

Научно-исследовательская работа в вузах преследует три основные цели:

а) использование творческого потенциала вузов для решения важнейших проблем, так как в системе высшей школы работает около половины научных работников страны;

б) повышение квалификации преподавательского состава;

в) повышение качества подготовки выпускаемых специалистов и магистров, что обеспечивается за счет совершенствования учебного процесса и активного участия студентов в научной деятельности.

Научно-исследовательская работа в вузах осуществляется в направлениях, соответствующих профилю подготовки специалистов, в этой связи она характеризуется большим разнообразием тем.

В вузе научная деятельность возглавляется проректором по научной работе, а регламентируется она годовым и перспективным планами исследований. Для управления НИР в вузе создается научно-исследовательская часть (сектор). Каждая кафедра ведет исследовательские работы в соответствии с профилем подготовки специалистов за счет госбюджетных средств и договоров между вузом и заказчиком.

Одним из важных направлений деятельности вузовской науки является исследования по проблемам высшей школы. Они направлены на подготовку новых учебников и учебных пособий, разработку специальных курсов, внедрение проблемных методов обучения. Для усиления связи вузовской науки с производством ищутся новые формы содружества (филиалы кафедр, договора о содружестве, учебно-научно-производственные объединения).

Участие в исследовательской работе является важнейшим фактором в вопросе повышения квалификации преподавателей вуза. За

счет исследований повышается их эрудиция, расширяется кругозор и растет педагогическое мастерство. Преподаватель, который не ведет активную исследовательскую работу, не может успешно осуществлять творческую подготовку студентов.

Особенность студенческой научной работы состоит в том, что ее главной задачей является не решение важных научных проблем, а приобщение студентов к самостоятельной работе, углубление их знаний, развитие творческих способностей к решению поставленных задач. Развитие у студентов творческих способностей невозможно лишь с помощью традиционных видов учебных занятий. Это умение приходит к нему в процессе коллективной исследовательской деятельности, при выполнении творческой работы, вход постановки и проведения эксперимента, при публичном обсуждении результатов исследований и т.д.

Формированию творческих начал у будущих специалистов призвана система научно-исследовательской работы студентов (НИРС). Творчество, как говорил П.Л. Капица, – это создание новых ценностей по замыслу, установление новых фактов, разработка изобретений и подготовка открытий, т.е. получение новой, ценной информации для человечества. В широком смысле творчество проявляется при любой деятельности человека, когда он не имеет точной инструкции действий, а сам должен решать, как ему поступать. В этой связи НИРС играет очень большую роль, так как она позволяет соединять науку, образование и производство через совокупность проблемных ситуаций. НИРС дает возможность эффективно вводить в учебный процесс элементы творчества, применять методы проблемного обучения, углублять профессиональную направленность образования за счет рассмотрения проблемных ситуаций, воспитывать специалистов с повышенным творческим потенциалом.

Для осуществления студенческой научно-исследовательской работы в вузе необходимо соблюдение следующих основных условий:

- участие студентов в научной работе на протяжении всего периода обучения;
- последовательное увеличение сложности решаемых задач с постепенной ориентацией студента в направлении профиля его специальности;

– обеспечение преемственности при выполнении научной работы каждым студентом, а также в работе студентов младших и старших курсов, связи НИРС с научной работой кафедр.

Наилучшие результаты позволяет добиться комплексная система НИРС, охватывающая все дисциплины и формы учебных занятий и позволяющая придать им в течение всего времени обучения исследовательский характер.

Научная работа студентов имеет две основные формы. Первая из них, реализуется в научных кружках, студенческих конструкторских бюро, лабораториях и т.д. и не связана с учебным процессом. Вторая форма – это учебная научно-исследовательская работа, которая является обязательной для всех студентов и предусматривается учебным планом.

Учебная исследовательская работа студентов условно может быть разделена на подготовительный (младшие курсы) и основной периоды. Характерной особенностью НИРС на первых годах обучения есть ее тесная связь с учебным процессом. С первыми элементами исследований студенты встречаются на семинарских и лабораторных занятиях. Здесь у них формируются начальные навыки исследований, они учатся читать научную литературу, подготавливать рефераты, определять необходимое число измерений, овладеть методикой обработки опытных данных и анализировать полученные результаты.

При составлении тематики лабораторных работ предпочтение отдается темам, представляющим профессиональный интерес. Лабораторные работы бывают двух видов: выполнение на стандартных условиях типовых заданий; участие в постановке новых работ исследовательского характера. Работы первого вида выполняют все студенты; ко вторым привлекаются наиболее способные к экспериментальной деятельности студенты. Такие работы обычно связаны с проводимыми на кафедрах исследованиями.

Еще одно направление учебно-исследовательских работ на младших курсах – участие в олимпиадах, проводимых общеобразовательными кафедрами. Это способствует выработке у студентов навыков теоретических исследований и творческого подхода к решению

инженерных проблем.

Весьма полезными являются организуемые на младших курсах, после изучения некоторых важных для будущих горных специалистов дисциплин (например, геологии) семинары и кружки. Такие формы научной работы, развивающие обязательные разделы теоретического курса, помогают студентам критически осмыслить содержание дисциплины, учат делать обобщения и выводы.

Широкое распространение получила такая форма привлечения студентов к самостоятельной работе, как подготовка рефератов, докладов, выступлений. Особенно полезна подготовка обзорных докладов по материалам, опубликованным в современных научно-технических изданиях по профилю специальности.

Расширяет кругозор молодых исследователей участие, совместно со старшекурсниками, в конструкторских и исследовательских работах, проводимых в студенческих бюро. Очень полезным для старшекурсников является присутствие студентов младших курсов и их помощь в проведении исследований.

Полезно введение элементов исследований в курсовое проектирование, а также в практику, когда каждый студент получает индивидуальное задание с указанием научной темы, сформулированной с учетом нужд производства.

Наиболее эффективно позволяет привлечь студентов к научной работе индивидуальная НИР. Большинство студенческих тем представляют собой повторение ранее выполненных исследований, однако наиболее способные студенты принимают участие в плановых хозяйственных и госбюджетных НИР кафедр. Исследования по таким темам завершаются выполнением дипломной научно-исследовательской работы, квалификационной работой магистра или, как минимум, написанием специального раздела в типовом диплом проекте.

Благодаря участию в научной работе, еще обучаясь в вузе, студенты становятся авторами или соавторами заявок на изобретения, почти все студенты подают во время практик рационализаторские предложения, публикуют статьи в вузовском сборнике или других научно-технических изданиях. Результаты исследований студенты док-

ладывают на семинаре, ежегодной научно-технической конференции университета и конференциях в других вузах. Важным стимулом общения студентов к творческой работе служат конкурсы НИРС, проводимые на различных уровнях.

Широкое участие студентов в исследованиях благотворно сказывается на качестве учебного процесса. У студентов повышается ответственность за результаты учебы, улучшается теоретическая и практическая подготовка. Опыт показывает, что студенты, прошедшие школу НИРС, становятся не только квалифицированными специалистами, но и хорошими руководителями, организаторами производства.

2.5 Планирование и прогнозирование научных исследований

Научные исследования в нашей стране являются частью государственного плана развития и планируются Кабинетом Министров. Планирование научных исследований в общегосударственном масштабе обеспечивает согласованную работу всей науки страны, направляет ее развитие в соответствии и тенденциями мировой науки и запросами производства.

При планировании научных исследований составляются перспективные и годовые планы, при этом можно выделить следующие основные формы планирования НИР и использования достижений науки и техники:

а) государственный перспективный план по решению основных научно-технических проблем, который утверждается Кабинетом Министров и является частью плана развития страны;

б) координационные планы по решению основных научно-технических программ и проблем;

в) годовой план использования новых видов продукции, технологических процессов, образцов новой техники, имеющих общегосударственное значение. Этот план является частью годового плана развития страны и утверждается Кабинетом Министров;

г) отраслевые перспективные и годовые планы НИР, утверждаемые отраслевыми министерствами;

д) план научных исследований Национальной Академии наук Украины (НАНУ);

е) перспективные и годовые планы научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических работ организаций, предприятий, фирм и пр.

Формирование планов представляет собой длительный процесс рассмотрения содержания НИР, начиная от подразделений научных учреждений до утверждающей вышестоящей организации. Работы, включенные в план на основании правительственных постановлений, составляют группу важнейших, они получают первоочередное финансирование и материально-техническое обеспечение.

В последнее время в стране нашел применение новый вид планирования – программно-целевое, позволяющее решать крупные проблемы межотраслевого и межрегионального значения. Программно-целевое планирование состоит в разработке и реализации комплексных целевых программ, содержащих комплекс мероприятий, направленных на достижение определенной цели. По каждой из программ утверждаются головные организации, ответственные за результаты их реализации. В качестве примера можно привести программу «Анкер» Минуглепрома Украины с привлечением специалистов ИГТМ НАНУ.

В вузах также оставляются план НИР и ОКР, план внедрения законченных исследований, план публикаций, план подготовки диссертаций и т.д. Хотя заранее предвидеть результаты творческой работы невозможно, планирование научной работы позволяет обеспечить ритмичность, целеустремленность и эффективность выполнения НИР, а также избежать дублирования исследований и неоправданных затрат времени и средств.

Планирование науки тесным образом связано с прогнозированием ее развития. Прогнозирование научных исследований имеет целью дать вероятностную оценку путей их развития и достижения результатов в будущем, а также требуемых для их реализации ресурсов и организационных мер. Научно-технический прогресс, быстрое изменение научных концепций выдвигают задачу научного прогнозирования на передний план науки. Так, если раньше изменения в технологии

разработки месторождений полезных ископаемых происходили раз в 100 лет, то в настоящее время – через каждые 10-15 лет. Можно привести немало примеров, когда на вновь построенной шахте, еще до ее пуска в эксплуатацию, обнаруживались узкие места, а внедренные в производство новые технологические процессы не отвечали требованиям времени.

Прогнозы обычно составляют на 10-20 лет вперед. Выбор такого периода объясняется тем, что длительность прогноза совпадает с продолжительностью цикла «исследования – производство», т.е. научная идея пройдет через все этапы НИР и ОКР. За это время удваивается количество выполненных НИР, заканчивается срок действия патентов, на передовую линию прогресса выходит новое поколение специалистов. Наряду с этим составляются отдельные прогнозы на 40-50 лет и более. За это время происходит полная смена поколений, удваивается количество теорий. Эти прогнозы дают в основном качественные показатели.

Современные методы научно-технического прогнозирования могут быть подразделены на три группы: методы экстраполяции; экспертная оценка; моделирование.

Методы экстраполяции основаны на прямом и непосредственном продолжении действующих в настоящее время закономерностей на будущее. Обычно экстраполируют статистически складывающиеся тенденции изменения тех или иных количественных характеристик (рост научных кадров, затраты на науку и т.д.).

Методы экспертных оценок связаны со сбором и систематизацией различного рода опросов. Экспертом может быть ведущий ученый специалист в конкретной области науки, выработавший гипотетическое представление о путях ее развития. Обычно используют мнение многих экспертов (метод комиссии). Оценки экспертов переводят в количественную форму (баллы), что позволяет обработать полученную информацию статистически. Эффективность метода зависит от компетенции эксперта, так как не все эксперты равноценны, их мнения субъективны, на оценки экспертов влияет авторитет коллег и пр.

Методы моделирования при прогнозировании только разрабатываются, однако их перспективность очевидна. Следует отметить метод «исторической аналогии», в основе которого лежит закон спирали. Согласно этому методу техника развивается, опираясь на накопленный опыт, и в своем движении возвращается к старым идеям, используя их на новой научной основе.

Методы научного прогнозирования имеют свои достоинства, ограничения и недостатки. Однако их комплекс представляет собой надежный инструмент научно обоснованного предвидения, что позволяет правильно определить политику в области развития науки и техники.

2.6 Организация научной работы и управление научными исследованиями

Под организацией научных исследований подразумевают систему взаимосвязанных структур и функций, обеспечивающих оптимальный режим и непрерывное совершенствование научного труда с целью получить наилучшие результаты.

В соответствии с иерархией структур научных учреждений и ведомств различают организацию исследований на разных уровнях:

- труда научного работника;
- работы подразделений научного учреждения;
- деятельности объединений научных учреждений в системе академий и министерств.

Важное место в повышении эффективности научной деятельности занимает научная организация труда (НОТ), основные положения которой предусматривают:

- высокую организованность труда научного работника;
- строгое соблюдение режима и гигиены умственного труда;
- плановость работы;
- критику и самокритику;
- контролирование и точное фиксирование результатов работы;
- обеспечение резерва в научной работе;
- использование средств для автоматизации вспомогательных операций;

– систему методов и упражнений по совершенствованию памяти научного работника;

– коллективность в научной работе.

Принципами НОТ должны владеть все научные работники и особенно важно, чтобы их усвоили молодые, начинающие исследователи, в том числе аспиранты и студенты.

Научное творчество становится все более коллективным, что обусловлено, с одной стороны, концентрацией ученых в научных учреждениях, а с другой – расширением совместных научных поисков.

Поэтому особое внимание приобретают вопросы организации научных коллективов, структура которых должна обеспечивать возможность кооперации и специализации труда ученых и углубления знаний в определенных направлениях, четкое распределение обязанностей и равномерность загрузки исполнителей, проведения работ с наибольшим эффектом, создание единой системы планирования, организации и контроля выполнения работ.

Важную роль в науке играет руководитель, обычно назначаемый из числа наиболее квалифицированных и авторитетных научных работников. Он формирует научную тематику, организует ее выполнение и несет персональную ответственность за результаты деятельности руководимого им коллектива.

Управление научными исследованиями представляет собой целенаправленное воздействие на коллективы научных работников для организации и координации их деятельности в процессе производства новых научных знаний и эффективного использования их на практике.

Различают экономические, организационно-распорядительные и социально-психологические методы управления исследованиями.

Экономические методы управления определяются производственными отношениями и уровнем развития страны. С одной стороны, государство централизованно финансирует из бюджета научные исследования, устанавливает фонд зарплаты, а с другой – поощряет исследования на основе хоздоговоров и частных инвесторов.

Организационные методы существуют в форме организационного и распорядительного воздействия. Методы организационного

воздействия определяют устойчивые отношения и связи научного учреждения, например, его структуру, нормативные документы. Распорядительное воздействие – более активная и гибкая форма. Оно направлено на устранение возникающих в ходе выполнения НИР различных отклонений от поставленных администрацией задач и реализуется в форме приказов и распоряжений.

Социально-психологические методы учитывают специфику творческого интеллектуального труда в науке. Эти методы приобретают особое значение в условиях коллективного исследования, что ставит перед наукой ряд новых задач. Разрешить их можно только путем социальных, воспитательных, психологических и морально-этических мер воздействия на научного работника.

Управление научными исследованиями включает ряд функций:

- подбор, расстановка, повышение квалификации и воспитание научных кадров;
- планирование;
- оперативное управление и контроль за выполнением;
- внедрение результатов научной работы;
- организация службы научно-технической информации;
- развитие научного коллектива учреждения;
- совершенствование организации научного труда;
- организация финансовой деятельности и зарплаты сотрудников;
- материально-техническое обеспечение научных исследований;
- охрана собственности;
- обеспечение учета и отчетности;
- охрана труда, улучшение бытовых условий работников.

Процесс управления НИР многогранен, имеет свои специфические особенности и закономерности. Он включает следующие основные операции: определение цели управления, сбор информации и ее переработку; принятие решения; организацию выполнения принятого решения; учет и контроль за выполнением решения. Этот процесс непрерывен, в нем задействован ряд лиц (руководителей и исполнителей). Круг вопросов, по которым принимают решения руководители коллективов (группа, кафедра и лаборатория, директор или ректор), различен.

Ответственный исполнитель – руководитель на рабочем месте. Руководит техническим персоналом, научными сотрудниками, в первую очередь молодыми. Непосредственно участвуя в процессе исследований, он осуществляет оперативное управление, контроль за выполнением темы НИР, внедрением полученных результатов в производство.

Заведующий лабораторией (кафедрой) отвечает за выполнение планирования НИР, внедрение, совершенствование НОТ, осуществляет воспитание и руководит повышением квалификации. Он координирует НИР между ответственными исполнителями. Руководитель решает перспективные проблемы, руководит публикацией результатов, оформлением заявок на изобретения и т.д.

Руководитель учреждения принимает решение о подборе и расстановке кадров, решает вопросы перспективного развития, определяет функции каждого подразделения. Свои решения он оформляет в форме приказов.

2.7 Применение вычислительной техники при проведении научно-исследовательской работы

Средства вычислительной техники широко применяются во всех областях науки. Их правильное применение существенно влияет на эффективность исследования, заметно изменяет организационные формы научной работы.

ЭВМ делятся на две большие группы: аналоговые и цифровые. Аналоговые машины широко применяют в исследованиях. Достоинство: быстрота, наглядность, удобно исследовать влияние факторов на протекание процесса. Недостаток: малая точность, отсутствие памяти, необходимость сборки блок-схемы для решения каждой задачи. Основное применение – интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений, решение которых аналитически невозможно. Кроме того, с их помощью решают задачи оптимизации, моделирования и т.д.

Этапы решения задачи на аналоговых вычислительных машинах:

- математическая формализация условий задачи, т.е. составление системы уравнений, определение граничных и начальных условий;
- составление блок-схемы;

- расчет масштабных коэффициентов;
- сборка и настройка блок-схемы;
- пробное решение и отладка программы;
- решение и регистрация результатов.

Более широкими возможностями по сравнению с аналоговыми машинами обладают цифровые ЭВМ. Важное их преимущество состоит в наличии специальных средств управления, позволяющих выполнять действия над числами в определенной последовательности (программы). Кроме того, они точны и универсальны. Эти машины эффективно решают разнообразные задачи, в том числе и в диалоговом режиме. В последнем случае компьютер превращается в мощный прирост человеческого мозга.

Решение задачи на ЭВМ состоит из таких основных этапов:

- математическая формализация задачи;
- разработка алгоритма (выбор метода решения);
- составление программы для конкретной ЭВМ;
- подготовка цифровых данных к вводу в машину;
- отладка программы;
- решение задачи.

С момента появления (1946 г.) первой цифровой машины, ЭВМ прошли в своем развитии сложный путь. Сменилось уже несколько поколений, каждые 10 лет на смену приходит новое, которое существенно превосходит своих предшественников. В настоящее время цифровые вычислительные машины чаще называют компьютерами. Слово компьютер означает «вычислитель». Это связано с тем, что первые машины создавались как устройства для вычислений. Современные компьютеры превратились в универсальные средства для обработки всех видов информации, используемых человеком.

Каждый компьютер, согласно принципам фон Неймана, содержит следующие устройства:

- арифметическо-логическое устройство, выполняющее арифметические и логические операции;
- устройство управления, которое организует процесс выполнения программ;

- запоминающее устройство, или память для хранения программ и данных;

- внешние устройства для ввода и вывода информации.

Сам по себе компьютер является просто ящиком с набором электронных схем. Он не обладает знаниями ни в одной из областей своего применения. Все эти знания сосредоточены в выполняемых на компьютере программах. Поэтому для эффективного использования вычислительной машины необходимо знать назначение и свойства необходимых для работы с ним программ.

Программы, работающие на компьютере, можно подразделить на три категории:

- прикладные программы, непосредственно обеспечивающие выполнение необходимых пользователям работ (редактирование текстов, рисование картинок, обработку информационных массивов и т.д.);

- системные программы, выполняющие различные вспомогательные функции, например, создание копий используемой информации, проверку работоспособности устройств компьютера и т.д. Основную роль играет операционная система – программа, управляющая компьютером, запускающая все другие программы и выполняющая для них различные сервисные функции;

- инструментальные системы (системы программирования), обеспечивающие создание новых программ для компьютера.

В научных исследованиях вычислительная техника применяется очень широко. С помощью компьютера автоматизируется процесс поиска и систематизации научной информации, ЭВМ широко применяются в вычислительном инструменте, для автоматизации физического эксперимента и обработки его результатов.

Ручной поиск научной информации с помощью каталогов в библиотеке весьма трудоемок. Истинная автоматизация поиска достигается с помощью компьютера, локальных сетей и Inter Net (Inter Net – это общемировая совокупность компьютерных сетей, связывающих между собой миллионы компьютеров). Компьютерные базы данных кроме адресного шифра и поискового образа информации содержат

еще библиографическое описание, ссылки на литературу, а в ряде случаев и видеокопию.

При проведении вычислительного эксперимента требуется выполнять большое число математических операций, например, интегрирование, решение систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений и т.д. Вычисление интегралов и бесконечных рядов без особых трудностей можно выполнить с помощью компьютера. Так как для решения этих задач имеются стандартные программы.

При проведении сложного физического эксперимента (испытание образцов пород на ниспадающей ветви диаграммы загрузки, поляризационно-оптическое моделирование и т.д.), связанного с изменением большого количества параметров и необходимостью управления экспериментом, невозможно обойтись без ЭВМ. Кроме того, в математическое обеспечение компьютера входит набор программ обработки данных, планирования и управления экспериментом, сервисные программы, обеспечивающие удобство связи исследователя с системой, что позволяет экспериментатору быть активным звеном, не только наблюдать, но и вмешиваться в эксперимент, т.е. управлять им.

При выполнении студентами НИР также целесообразно использовать вычислительную технику, применение которой позволяет:

- облегчить выполнение сложных расчетов, благодаря чему студент может уделить больше внимания творческой части решаемой задачи;
- выработать у студента навыки алгоритмического мышления.

Разработка алгоритма вычисления и составление программы на ЭВМ может являться темой индивидуального или группового задания по НИРС.

ЛЕКЦИЯ 5

ТЕМА 3. АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ НАУЧНОЙ РАБОТЫ

3.1 Государственная система научно-технической информации

Характерной особенностью современной науки является бурный рост данных, получаемых в результате исследований. Общий объем научно-технической литературы в настоящее время удваивается каждые 8-10 лет. Но это лишь около одной трети научных материалов. Остальные две трети (это диссертации, отчеты и пр.) не попадают в печать, хотя во многих случаях рукописные материалы представляют для ученых не меньший интерес, чем опубликованные.

Перед специалистом стоит всегда трудная проблема: Как отыскать по интересующему вопросу новое и передовое? Как из такой огромной массы информации выбрать ту, которая ему необходима? Научный сотрудник тратит более трети своего рабочего времени на то, чтобы установить, что уже сделано по теме его исследований.

Чтобы повысить эффективность труда научных работников, в Украине создана служба научно-технической информации (НТИ), которая решает следующие задачи:

- сбор и переработку документальной информации с целью быстрого оповещения ученых и специалистов о новых достижениях в области науки и техники;
- хранение информации в информационно-поисковых системах (ИПС), позволяющих осуществлять быстрый поиск нужных знаний;
- переработку информации в информационно-логических системах (ИЛС) для получения новой информации.

Система НТИ включает в себя центральные и отраслевые институты научной и технико-экономической информации, межотраслевые и территориальные центры и библиотеки.

Самым крупным информационным центром на территории бывшего СССР является институт научной и технической информации (ВИНИТИ), который обрабатывает информацию со всего мира и изда-

ет реферативные журналы (РЖ). Реферативный журнал ВИНТИ пользуется большой популярностью у исследователей, он выпускается в 20 сериях по различным отраслям знаний, в том числе серия «Горное дело». В нем содержатся краткие сведения о публикациях, выходящих в 120 странах мира.

Украинский институт научно-технической и экономической информации (УкрИНТЭИ) проводит регистрацию научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и диссертаций и издает журнал "Науково-технічна інформація". Все организации страны, независимо от их ведомственной подчиненности, представляют в Укр. ИНТЭИ электронные копии и рукописи диссертаций, а также отчеты о НИР и ОКР, о которых институт информирует в информационных изданиях и по заявкам отдельных лиц и организаций снимает с них копии и рассылает их заказчикам.

Об изобретениях в Украине сообщает Украинский институт промышленной собственности (Укрпатент). Он является центром информации об отечественных и зарубежных фондах на изобретения и открытия. В угольной промышленности основными центрами научно-технической информации являются центральный научно-исследовательский институт экономики и научно-технической информации (ЦНИЭИуголь, г. Москва) и информационно-аналитический центр (г. Донецк), осуществляющие издание реферативной информации, в краткой форме раскрывающей содержание выполненных в отрасли исследований и разработок.

В государственную информационную систему входят и библиотеки. Богатейшим фондом по горным специальностям располагают Национальная библиотека Украины им. В.И. Вернадского (г. Киев), Государственное научное учреждение "Книжная палата Украины имени Ивана Федорова (г. Киев), Государственная научная библиотека им. В.Г. Короленко (г. Харьков), Центральная научно-техническая библиотека (г. Донецк). Крупнейшим фондом среди вузов Украины располагает библиотека ДонГТУ. Система каталогов и картотек помогает свободно ориентироваться в фондах библиотек. В настоящее время мно-

гие библиотеки создают свои электронные каталоги, доступ к которым обеспечивается через локальные сети или InterNet.

Исследованиями в области научно-технической информации занимается молодая, но быстро развивающаяся специальная дисциплина – «Информатика».

Всю научно-техническую информацию можно подразделить на два вида: документальную и электронную, которая в связи расширением компьютерных сетей все более развивается. Основная часть научной информации представлена в виде документов, которые подразделяются на первичные и вторичные, являющиеся результатом преобразования информации на основе изучения первичных документов.

Документальная информация подразделяется на опубликованные и неопубликованные источники. Опубликованные документы в свою очередь разделяются на неперидические и перидические публикации. К первому виду принадлежат книги, которые подразделяются на несколько типов (кроме художественных): научная, научно-популярная и производственно-техническая литература; учебники и учебные пособия; справочники и энциклопедии; нормативная литература.

Из перидических изданий, имеющих наибольшее значение для специалистов горного профиля, необходимо отметить следующие журналы: «Уголь Украины» (г. Киев), «Уголь» (г. Москва), «Известия вузов», «Горный журнал» (г. Екатеринбург), «Горный журнал» (г. Москва), «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых» (г. Новосибирск), «Вестник Национального горного университета» (г. Днепропетровск), «Вестник международной Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (г. Санкт-Петербург, г. Алчевск), «Ведомости Академии горных наук Украины» (г. Кривой Рог), – а также тематические сборники научных трудов НГУ, ДонНТУ, ДонГТУ, КТУ и другие.

Среди неопубликованных документов, в первую, очередь следует отметить отчеты о НИР и ОКР и диссертации, являющиеся ценнейшими источниками научной информации. Кроме того, к ним относятся депо-

нированные рукописи, хранящиеся в хранилищах. По заявкам организаций и отдельных лиц с них снимают копии и высылают заказчикам.

3.2 Поиск научно-технической информации

Любая исследовательская работа выполняется на основе обобщения уже имеющейся информации, т.е. изучения того, что сделано ранее другими исследователями. Поэтому каждое исследование начинается с информационного поиска, которым называется совокупность операций, направленных на отыскание литературы по разрабатываемой теме. **Цель поиска** – всесторонний анализ информации, освещение состояния вопроса (составление аналитического обзора), уточнение, при необходимости, названия темы, обоснование цели и задач научного исследования.

Поиск включает четыре этапа: отыскание необходимой информации, ее учет, проработку источников и их анализ. Поиск может быть ручным, механизированным и автоматизированным. Ручной поиск осуществляется по обычным библиографическим карточкам, картотекам, печатным указателям. Механизированный поиск основан на применении счетно-перфорационных машин и перфокарт, автоматизированный поиск состоит в применении электронных вычислительных машин и компьютерных сетей.

Информационный поиск осуществляется с помощью информационно-поискового языка (ИПЯ). В настоящее время наибольшее распространение получила универсальная десятичная классификация документов информации (УДК). УДК разделяет все области знаний на 10 отделов, каждый из которых делится на 10 подразделов, а подраздел – на 10 частей. Каждая часть детализируется до требуемой степени. Различные отрасли имеют различные индексы УДК: горное дело – 622; строительство – 624. УДК имеет ряд преимуществ (удобство, простота, быстрота), но малоприменима для автоматизированных систем поиска с помощью ключевых слов.

Прорабатывая ту или иную тему, научный работник накапливает большое количество различной информации (100-200 наименований и более). Для эффективного анализа этой информации необходимо знать методы ее учета, проработки и анализа. Учет проработанной ли-

тературы сводится к составлению библиографии. **Библиография** – это перечень различных информационных документов с указанием следующих данных: фамилии и инициалов автора (авторов), названия источника, места издания, издательства, года издания, объема источника в страницах.

Оформлению библиографии в научной работе (дипломном проекте и пр.) следует уделять серьезное внимание, так как она представляет самостоятельную ценность как справочный материал для дальнейших исследований. Библиографическое описание составляет строго в соответствии с государственным стандартом ГОСТ 7.1-2003.

Библиография используется в научном исследовании для ссылок на использованный источник. Существуют различные способы ссылок: отсылка к списку литературы в конце работы или в конце главы, в подстрочных примечаниях, указание источника вслед за цитатой. В технических научных трудах чаще применяют первый способ, причем ссылка на источник заключается в квадратные скобки. При включении в текст цитат необходимо учитывать правила их описания.

Проработка информации сводится к ее изучению и запоминанию. Каждый источник должен быть тщательно изучен, поэтому очень важно уметь работать над книгой. Первым условием эффективной проработки документа является установка, т.е. цель чтения. Изучение научно-технической информации требует творческого подхода, для чего необходимо вдохновение. Качество проработки информации во многом зависит от внимания и сосредоточенности при работе. Очень важным фактором при проработке литературы является настойчивость и систематичность. Каждая страница должна быть неторопливо проанализирована, обдумана применительно к поставленной цели. Только вдумчивый самостоятельный анализ прочитанного позволит достичь понимания. Часто, особенно при чтении сложного текста, полностью осмыслить его с первого раза невозможно. Приходится читать и перечитывать, добиваясь полного понимания материала. Систематическое усидчивое чтение по плану, с обдумыванием и анализом прочитанного, намного производительнее бессистемного.

Производительность проработки информации существенно зависит от умственной работоспособности, а последняя зависит от умения правильно распределить свою работу во времени. Прорабатывая текст, необходимо добиваться, чтобы каждое место было понятно. В отдельных случаях нужно не только понять, но и запомнить текст. Существуют различные способы запоминания: механический, смысловой, повторение (пассивное и активное).

Разновидностью информационного поиска является патентное исследование. Под ним понимается поиск и отбор патентной и научно-технической информации, относящейся к научным открытиям и техническим решениям (авторским свидетельствам, патентам). Патентные исследования проводятся в целях обеспечения высокого уровня, патентоспособности и патентной чистоты объекта исследований.

Основным документом в области изобретательства является закон «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі». В Украине предусмотрены две формы охраны изобретений: декларационный патент на изобретение и декларационный патент на полезную модель.

Согласно правилам составления и подачи заявления, изобретением признается новое и обладающее существенными отличиями техническое решение задачи, дающее положительный эффект. Охранные документы выдаются на следующие объекты:

- новое устройство (машины, приборы, крепь и др.);
- новый способ (добычи полезного ископаемого, возведения крепи и др.);
- новое вещество (сплав, смесь, химическое соединение и др.);
- применение ранее известных устройств, способов, веществ по новому назначению;
- новые штаммы микроорганизмов.

На изобретения оформляются заявки в соответствии с установленными требованиями. Заявки подаются авторами или организациями в **Украпатент**, где изобретение проходит экспертизу. Если решение положительное, то изобретение вносится в государственный реестр изобретений, о чем сообщается в официальном бюллетене.

Поиск информации в патентном фонде может проводиться при экспертизе изобретений на новизну, патентную чистоту или для других целей. В зависимости от сведений, положенных в основу при поиске и отборе описаний изобретений, различают три вида поиска: тематический, нумерационный или именной. Глубина поиска зависит от цели его проведения и характера объекта изобретения. Оптимальный период времени, за который следует просмотреть описания изобретений и другие источники информации, равен 10...15 годам.

Тематический поиск является самым распространенным и трудоемким. Проводят его в фондах описания изобретений, для чего используют справочно-поисковый аппарат или компьютер при наличии электронной базы данных. Нумерационный и именной поиски можно провести по годовым указателям авторских свидетельств и патентов к бюллетеням.

3.3 Обоснование тем научных исследований

В зависимости от масштабности решаемых исследовательских задач различают понятия научных направлений, проблем, тем и вопросов, формулирование и обоснование которых входит в задачу первого этапа научных исследований.

Под научным направлением понимают сферу научных исследований коллектива научных работников, направленных на решение целого комплекса задач (крупных фундаментальных, экспериментально-теоретических) в определенной отрасли науки. **Научное направление** включает в себя более мелкие структурные единицы – проблемы. Под **проблемой** понимают сложную, актуальную, научную задачу, которая охватывает значительную область исследования, имеет перспективное значение и состоит из нескольких исследовательских тем. **Тема** – это научная задача, охватывающая всю область научного исследования конкретного объекта. Каждая тема состоит из нескольких **вопросов**, под которыми понимают мелкие научные задачи, относящиеся к отдельным узким областям научного исследования.

Вначале, исходя из научного направления, формулируется проблема, например, разработать теорию, установить закономерности,

решить комплекс научных задач. Решение проблемы имеет, зачастую, теоретическое значение. Полезность и экономический эффект в результате ее решения иногда можно определить лишь ориентировочно. При разработке темы выдвигается конкретная задача (разработать прогрессивную технологию, новый материал, машину и т.д.), результаты решения этих задач имеют не только теоретическое значение, но, главным образом практическое, поскольку можно установить экономический эффект от реализации этих решений.

Постановка (выбор) проблем или тем является трудной, ответственной задачей. Вначале на основе анализа противоречий исследуемого направления формулируют основную комплексную проблему, определяют в общих чертах ожидаемый результат. После постановки осуществляется детальная разработка структуры проблемы, заключающаяся в формулировании отдельных тем, подтем и вопросов, т.е. составляют древо проблемы и выявляют ориентировочные предметы и области исследований. В заключение обосновывается **актуальность** проблемы, т.е. важность и срочность ее решения на данном этапе для науки и техники. Этот этап имеет важное значение, так как возможно дублирование исследований. При обосновании отдельных проблем происходит их коллективное обсуждение на заседаниях ученых советов, кафедр, лабораторий, по итогам которых принимается решение.

После обоснования проблемы и установления ее структуры, приступают к выбору темы научного исследования, что зачастую более сложно сделать, чем провести само исследование. К теме предъявляют ряд требований:

- она должна быть актуальной, т.е. важной и требующей скорейшего разрешения в настоящее время;
- должна иметь научную новизну, т.е. вносить вклад в систему научных знаний. Необходимо отличать научную задачу от инженерной. Если разрабатывается новая задача, но на основе уже открытых законов, то это область инженерных разработок, а не научных исследований;
- должна быть экономически эффективной и внедряемой в производство хотя бы в перспективе. Любая прикладная тема должна да-

вать эффект, поэтому выбор темы должен базироваться на специальном технико-экономическом расчете. Для теоретических разработок требование экономичности может уступать место требованию значимости (престиж, фундамент для прикладных исследований и пр.);

– должна соответствовать профилю научного коллектива, его квалификации и компетентности.

При обосновании темы важную роль играют контакты с ведущими учеными, тщательное знакомство с состоянием вопроса, хорошее знание производства и его запросов, работа в коллективе с научными традициями и разрабатывающемся комплексную проблему.

В ряде случаев при планировании тем возникает потребность в выборе наиболее перспективных, экономически обоснованных тем (например, представлен ряд тем для включения в план). В этом случае необходимость выполнения темы следует оценивать с помощью численных критериев.

Простейшим критерием является экономическая эффективность от использования:

$$k_3 = \mathcal{E}_n / \mathcal{Z}_n, \quad (3.1)$$

где k_3 – коэффициент экономической эффективности;

\mathcal{E}_n – предполагаемый экономический эффект от внедрения;

\mathcal{Z}_n – затраты на научные исследования.

Чем выше значение коэффициента k_3 , тем эффективнее тема.

Для уточнения критерия эффективности в условиях неопределенности учитывают вероятностный риск p

$$k_3 = \frac{\mathcal{E}_n}{\mathcal{Z}_n} (1-p), \quad (3.2)$$

а на этапе внедрения – объем внедряемой продукции и период внедрения

$$k_3 = \frac{C_r \sqrt{T}}{\mathcal{Z}_0}, \quad (3.3)$$

где C_r – стоимость продукции за год после освоения и внедрения;

T – продолжительность внедрения в годах;

Z_0 – общие затраты на освоение (НИР и ОКР и годовые затраты на изготовление продукции по новой технологии).

Возможно применение метода экспертных оценок. Методика его состоит в следующем. Подбирают состав экспертов и устанавливают оценочные показатели по отдельным аспектам (актуальность, экономичность, внедряемость). Каждому показателю назначают коэффициент значимости и задают оценочную бальную шкалу. Тема, получившая максимальный балл, считается наиболее перспективной. Суммарный балл вычисляют по формуле

$$q = \sum_{i=1}^n p_i \cdot m_i, \quad (3.4)$$

где p_i – балл i -го оценочного показателя;

m_i – коэффициент значимости i -го показателя;

n – число оценочных показателей по теме.

При выборе темы для студенческой научно-исследовательской работы следует иметь в виду, что она должна быть привязана к основным проблемам угледобывающей отрасли и соответствовать направлению исследований на кафедре. Заканчиваться работа должна решением конкретного актуального вопроса, использование которого возможно при реальном дипломном проектировании и в квалификационной работе магистра.

3.4 Составление технико-экономического обоснования НИР

Высокая эффективность выбранной темы может быть достигнута при условии, что еще до ее разработки выполнено технико-экономическое обоснование (ТЭО). Разработка ТЭО является непременным условием перед проведением исследований по теме. Это основной исходный документ планирования НИР. Только при наличии такого обоснования возможно дальнейшее финансирование темы заказчиком.

Цель составления ТЭО – установить данные о новейших достижениях по рассматриваемой теме, обосновать затраты денежных и ма-

териальных ресурсов, потребность, предполагаемые объемы внедрения и ожидаемые технико-экономические показатели.

В состав ТЭО входят следующие разделы:

- титульный лист;
- исходные положения (наименование НИР или ОКР, цель работы, обоснование актуальности и необходимости ее проведения);
- результаты предварительно выполненных патентных проработок, новизна и перспективность (сравнение с отечественным и зарубежным уровнем, использование изобретений и открытий, патентоспособность и патентная чистота);
- потребность в результатах исследовательских работ (назначение, область использования НИР, условия и возможности использования результатов);
- объем и место внедрения (масштабы внедрения в соответствии с планами развития отрасли);
- технико-экономические результаты (экономическая эффективность, затраты на выполнения работ и их внедрение, рост производительности труда, ожидаемая себестоимость);
- социальные результаты (повышение уровня механизации труда, улучшение норм техники безопасности и производственной санитарии, обеспечение охраны природы и окружающей среды);
- выводы и предложения (делается вывод о целесообразности и необходимости выполнения работы, формулируются требования к заказчикам).

ТЭО оформляется в виде пояснительной записки с приложением всех необходимых расчетов.

3.5 Анализ информации и формулирование задач научного исследования

Собранная в результате научно-технического и патентного поиска информация подлежит тщательному анализу. Прежде всего, всю информацию необходимо классифицировать и систематизировать.

Систематизацию можно проводить в хронологическом порядке или по тематике интересующих вопросов. В первом случае, прежде все-

го, следует выделить в хронологии разработки данной темы научные этапы, которые характеризуются качественными скачками. Литературные источники каждого этапа подвергаются критическому анализу.

Критику недостатков (методов, методик, формул, принципов) следует производить корректно, приводя обоснованные аргументы. Необходимо соблюдать принцип преемственности. Без прошлых исследований невозможно было бы ставить задачи на будущее, вместе с тем, все достижения, без скидки на авторитеты, должны быть подвергнуты творческому критическому анализу с учетом достигнутого уровня. Рациональные идеи следует извлекать и использовать в качестве базы для своих предположений. Сопоставляя в процессе анализа различные идеи, факты, теории у исследователя возникают собственные соображения и мнения, выявляются актуальные вопросы, формируется фундамент будущей гипотезы научного исследования.

Несколько иным вариантом является тематический анализ. Весь объем информации в этом случае систематизируют по вопросам разрабатываемой темы. При этом рассматривают последние издания, в которых подведен итог исследований данного вопроса. Затем дополнительно выборочно анализируют источники, представляющие особый интерес. Этот вариант обзора информационных источников более прост и требует меньших затрат времени.

Анализ информации производится с точки зрения исторического научного вклада каждого источника в решение и развитие данной темы по каждому элементу научного исследования (теория, эксперимент) и с точки зрения ценности производственных рекомендаций. При этом руководящей идеей в течение всего анализа остается актуальность и перспективность выбранной темы.

Итог всего анализа подводится по следующим основным вопросам:

- актуальность и новизна темы;
- последние достижения в области теоретических и экспериментальных исследований по теме;
- важнейшие, наиболее актуальные теоретические и экспериментальные задачи, подлежащие разработке;

– техническая целесообразность и экономическая эффективность этих разработок.

На основании указанных выводов формулируются в общем виде цель и конкретные задачи научного исследования.

В целом по теме или по отдельным вопросам составляются программа и календарной план исследований, в которых указываются сроки разработки темы и вопросов. После этого определяются методы решения поставленных задач.

Выбор метода исследований – один из важнейших этапов научного исследования. При этом руководствуются несколькими критериями:

– стоимость работы и экономическая эффективность от ее внедрения;

– полнота исследований;

– время, затрачиваемое на проведение исследований.

Немаловажное значение имеет наличие соответствующих специалистов и материальной базы.

Сложность среды, разнообразие горно-геологических условий залегания полезных ископаемых, вероятностный характер протекающих процессов предопределяет использование при решении задач горного производства комплексного метода исследований. Его составными частями являются:

– экспериментально-производственные методы;

– лабораторные методы;

– аналитические, экспериментально-аналитические и графоаналитические методы;

– методы математико-экономического моделирования и другие.

Каждому из этих методов свойственны свои преимущества и недостатки, но ни один из них не может обеспечить необходимую полноту решения горных задач. Только комплексное изучение на основе аналитических, лабораторных и производственных методов исследований позволяет нам приблизиться к пониманию сложных явлений, происходящих вокруг горных выработок в результате выемки полезного ископаемого и горных пород.

3.6 Разработка методики проведения научно-исследовательской работы

Заканчивается первый этап научного исследования составлением методики, которая является обязательной при проведении НИР, особенно при экспериментальных работах, и обеспечивает планомерное выполнение и успешное завершение исследований.

Методика должна содержать следующие основные разделы:

- введение (формулируется тема и задачи исследования, отражается состояние вопроса);
- план и схема исследования с указанием затрат времени на выполнение каждого этапа;
- планирование эксперимента;
- спецификация оборудования, приборов и измерительной аппаратуры;
- описание приемов работы на оборудовании и контрольно-измерительной аппаратуре;
- детальное описание режима исследования с указанием изучаемых переменных факторов, их взаимосвязи и числа опытов по каждому этапу;
- рекомендуемая форма записи первичных документов (рабочий журнал наблюдений и пр.).

Методика визируется исполнителем и утверждается научным руководителем. В зависимости от вида работ (лабораторные, полупромышленные, промышленные, аналитико-экспериментальные) содержание методики имеет свои особенности, но всегда должно полностью соответствовать задачам исследований.

ЛЕКЦИЯ 6

ТЕМА 4. МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Методология теоретических исследований

Теоретические исследования в горной науке в последние десятилетия получили широкое развитие, прежде всего, в механике горных пород, рудничной аэрологии. Они представляют собой творческий процесс, позволяющий решить следующие задачи:

- изменить существующие или создать новые научные гипотезы;
- объяснить процессы и явления, которые раньше были слабоизученными, связать их воедино путем установления причинно-следственных связей, т.е. найти стержень изучаемого процесса;
- научно обобщить большое количество опытных данных;
- доказать научные закономерности, установить законы и создать на их базе теорию.

Теоретическое исследование имеет несколько стадий:

- выбор проблемы;
- сбор и обобщение информации, сопоставление и сравнение ее, критическое осмысливание и формулирование собственных мыслей;
- знакомство с известными путями решения аналогичных задач и отказ от них;
- перебор различных вариантов решения и выбор наиболее рационального;
- формулирование оригинального метода решения и его анализ.

Творчество часто не укладывается в заранее намеченный план. Иногда оригинальные решения появляются внезапно, часто они возникают у специалистов смешанных областей, так как на них не давит груз известных решений. Собственные творческие мысли и оригинальные решения возникают тем чаще, чем больше сил, труда, времени затрачивается на постоянное обдумывание предмета исследования.

При этом успех зависит не только от кругозора и целеустремленности научного работника, но и от того, в какой мере он владеет методами научного исследования (анализ, синтез, дедукция, индукция

и пр.). В прикладных науках, к которым относится и горная, основным методом теоретических исследований является *гипотетический*.

Методология гипотетического метода заключается в следующем:

- изучение и анализ физической, химической сущности исследуемого явления (процесса);
- формулирование «рабочей гипотезы» или выбор из множества альтернативных гипотез наиболее приемлемой;
- построение физической модели и ее изучение;
- составление формализованной (расчетной) схемы и постановка задачи;
- проведение математического исследования, т.е. получение математической модели;
- анализ теоретических решений, разработка научных положений и выводов.

Описание сущности исследуемого явления или процесса составляет основу теоретических разработок. Такое описание должно базироваться на законах физики, химии и др. Для этого исследователь должен знать классические законы естествознания и умело их использовать применительно к рабочей гипотезе научного исследования, причем основываться он должен на наблюдениях.

Процессы, встречающиеся в прикладных науках, имеют ряд общих принципиальных положений, так как протекают они в соответствии с общими законами диалектики и принципами термодинамики. Так, например, в большинстве случаев развиваются два противоположных процесса (упрочнение и разрушение при деформировании пород), процессы (явления), изучаемые в горном деле, обладают свойствами инерционности, наследственности, периодичности. Многие из этих процессов отвечают принципу Сен-Венана, развиваются по принципу цепных реакций:

$$\frac{dy}{dt} = k y^m \quad (4.1)$$

или по принципу теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = a \nabla^2 T, \quad (4.2)$$

где $\nabla^2 = \left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} \right)$ – оператор Лапласа;

T – температура;

a – температуропроводимость;

t – время.

Наряду с детерминированными процессами (неслучайными, вызванными какой-либо причиной) в горном деле широко распространены и случайные процессы, особенно это относится к задачам планирования, организации и управления производством.

Учитывая общенаучные подходы, можно более эффективно сформулировать гипотезу научного исследования и наметить план его выполнения.

Решение теоретических задач производится с помощью различных математических методов:

– аналитические методы (элементарная математика, дифференциальное и интегральное исчисление, вариационное исчисление, тензорное исчисление, функции комплексного переменного и др.), используемые для изучения непрерывных и детерминированных процессов;

– методы математического анализа с использованием эксперимента (метод аналогий, теория подобия, метод размерностей);

– вероятностно-статистические методы (математическая статистика и теория вероятностей, дисперсионный и корреляционный анализ, теория надежности, метод Монте-Карло, марковские процессы и др.), используемые для изучения как дискретных, так и непрерывных случайных процессов;

– методы системного анализа (исследование операций, теория массового обслуживания, теория управления, теория множеств и т.д.), используемые для исследования сложных моделей с многообразными взаимосвязями элементов, характеризующихся непрерывностью и детерминированностью, а также дискретностью и случайностью;

– численные методы, основанные на численном решении с по-

мощью ЭВМ уравнений, систем уравнений, интегрировании и дифференцировании уравнений, точное решение которых вызывает определенные трудности;

– методы прикладной математики, допускающих наличие формулировок и утверждений, справедливых лишь в данных реальных условиях.

4.2 Составление модели объекта исследований

Любой объект исследований зависит от многих действующих на него факторов, которые затрудняют его исследование. Например, массив горных пород является сложной физической средой и обладает целым рядом структурно-механических особенностей, которые в значительной степени определяют его механическое состояние. Изучение таких объектов и процессов, происходящих в них, производят с помощью метода *моделирования*, основанного на замене реального объекта его моделью, отображающей с определенной точностью основные свойства оригинала и специально создаваемой для их изучения.

Моделирование как метод научного исследования получило широкое развитие с середины XIX века. Однако уже задолго до этого некоторые ученые на основе интуитивных соображений обращались к натурным моделям. Систематическое моделирование оказалось возможным благодаря разработке научных положений теории подобия, которая явилась основой применения физических моделей (модель и оригинал имеют одинаковую физическую природу) во всех областях науки. Однако физическое моделирование имеет ограниченную сферу применения. Более широкими возможностями обладает математическое моделирование, под которым понимают способ исследования различных объектов путем изучения явлений (процессов), имеющих различное физическое содержание, но описываемых одинаковыми математическими соотношениями. В простейших случаях для этой цели используются известные аналогии между механическими, электрическими, тепловыми и другими явлениями.

Существенным моментом математического моделирования является то обстоятельство, что при изучении любого явления (процесса), в первую очередь, необходимо построить его математическое опи-

сание, или, иными словами, составить математическую модель. При аналоговом моделировании математическая модель позволяет для данного процесса-оригинала подобрать на основании известных аналогий удобные физические процессы – модели, а также установить соотношения, связывающие их параметры. В более сложных случаях, когда для моделирования создаются специальные установки или используются ЭВМ, математическая модель необходима для определения структуры объекта и параметров стенда или построения моделирующего алгоритма на одном из языков программирования.

Математическая модель реальной системы является абстрактным формально описанным объектом, изучение которого возможно математическими методами, в том числе и с помощью математического моделирования. Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяет строить для них абсолютно адекватные математические модели. Поэтому обычно математическая модель, описывающая процесс функционирования системы, в состоянии охватить только основные, характерные его закономерности, оставляя в стороне второстепенные факторы.

Формализации любого реального процесса предшествует изучение структуры составляющих его явлений. В результате этого производится так называемое содержательное описание процесса, представляющее собой первую попытку изложения закономерностей и постановку прикладной задачи. Оно является исходным для последующих этапов формализации, т.е. построения формализованной схемы процесса и математической модели.

Содержательное описание концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках элементарных явлений исследуемого процесса, о степени и характере взаимодействия между ними, о месте и значении каждого явления в общем процессе функционирования системы. Процесс может быть описан лишь в результате обстоятельного его изучения, которое зачастую сводится к наблюдению за ним и фиксации количественных характеристик при проведении эксперимента. Однако иногда требуется составление описания процессов, для которых измерения невозможны. В этих случаях

используют накопленный опыт и результаты наблюдений за аналогичными процессами.

В содержательное описание включают постановку прикладной задачи, определяющую цель моделирования исследуемого процесса, перечень искомых величин с указанием их практического предназначения и требуемой точности. Постановка прикладной задачи обычно не имеет строгой математической формулировки. Однако она должна обязательно содержать четкое изложение идеи предполагаемого исследования, перечень зависимостей, подлежащих оценке по результатам моделирования, совокупность факторов, которые должны учитываться при построении математической модели процесса.

Формализованная схема процесса является промежуточным звеном между содержательным описанием и математической моделью. Она разрабатывается в тех случаях, когда из-за сложности объекта переход от содержательного описания к математической модели оказывается невозможным. Для построения формализованной схемы необходимо выбрать характеристики процесса, установить систему параметров, определить все зависимости между характеристиками и параметрами процесса, с учетом факторов, учитываемых при формализации. На этом этапе должна быть дана точная математическая формулировка задачи исследования с указанием окончательного перечня искомых величин и оцениваемых зависимостей. Математическая формулировка основывается на начальных условиях и систематизированной совокупности всех исходных данных, которые могут быть представлены графически или таблично, но с обязательным решением вопросов интерполяции и экстраполяции экспериментального материала.

Преобразование формализованной схемы в математическую модель выполняется математическими методами, для этого все соотношения выражаются в аналитической форме, записываются в виде систем неравенств логические условия. При моделировании процессов на ЭВМ числовой материал используется не в первоначальном виде, а в форме аппроксимирующих выражений (интерполяционных полиномов). При построении математических моделей необходимо очень осторожно подходить к приближенным зависимостям, представляющим

экспериментальные данные, так как это обстоятельство может играть заметную роль с точки зрения совпадения результатов моделирования.

Таким образом изучить объект наиболее полно можно лишь при условии, если модель полностью отражает его физическую сущность или может быть представлена в математическом виде. Рассмотрим несколько примеров по составлению моделей для исследования явлений и процессов в области горной науки.

Реологическая модель породного массива. При исследовании процессов в массиве горных пород распространение получила теория

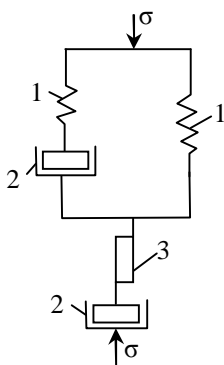


Рисунок 4.1– Модель упруго-вязко-пластического тела:

1 – модель Гука; 2 – модель Ньютона; 3 – модель Сен-Венана

упруго-вязко-пластической среды, в которой для наглядности изображения реологических свойств породы используется метод структурных моделей. Общий вид модели для линейно-деформируемой среды приведен на рис. 4.1. Каждая из таких моделей включает в себя простейшие элементы, имитирующие упругие, вязкие и пластические свойства. Упругие свойства среды имитируются пружинами (рис. 4.2, а), деформирование которых подчиняется закону Гука ($S = E \cdot e$ – величина деформации прямо пропорциональна приложенной нагрузке, где E – модуль Юнга). Движение перфорированного поршня в заполненном вязкой жидкостью цилиндре (рис.4.2, б), характеризует вязкие свойства тел согласно закону Ньютона, ($\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}$ – сопротивление пропорционально скорости деформирования, где η – коэффициент вязкости). Пластические свойства среды учитываются, моделью пластичности Сен-Венана (рис. 4.2, в), представляющий собой груз, скольжение которого по площадке возможно, если $\sigma > \sigma^*$, где σ^* – определенная константа для данной среды.

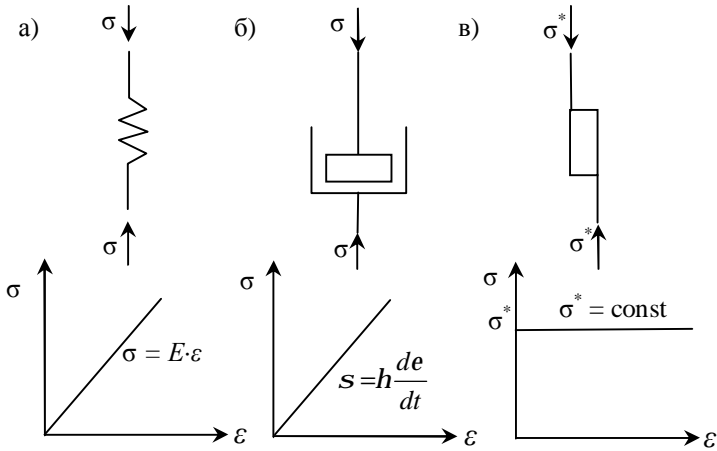


Рисунок 4.2 – Механические модели и зависимости, описывающие их поведение: а – модель упругости Гука; б – модель вязкости Ньютона; в – модель пластичности Сен-Венана

Математическая модель, соответствующая приведенной на рис. 4.1 физической модели, имеет сложный вид. Поэтому рассмотрим входящую в ее состав более простую модель вязко-упругого тела (модель Максвелла), широко применяемую в механике горных пород для описания поведения глин (рис. 4.3). Деформация тела в соответствии с

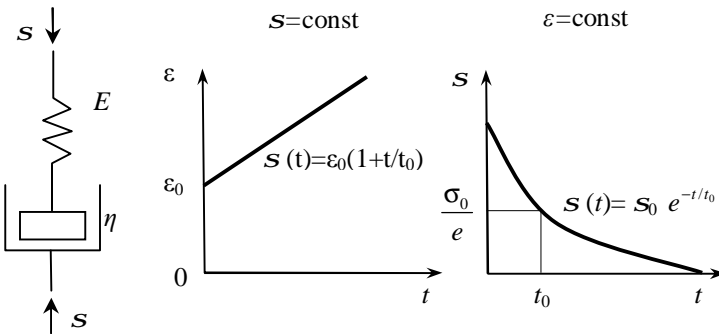


Рисунок 4.3 – Модель вязко-упругого тела (Максвелла) и соответствующие ей зависимости ползучести и релаксации

моделью Максвелла состоит из суммы двух членов, один из которых связан с напряжением уравнением упругости Гука, а производная второго связана с напряжением с помощью уравнения вязкости Ньютона. Модель Максвелла представляет собой последовательное соединение двух простых механических элементов (Гука и Ньютона). В этом случае математическая модель, соответствующая физической модели (рис. 4.3), принимает вид:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{E_0} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{h}. \quad (4.3)$$

Решая (4.3) при $s = \text{const}$, получим уравнение ползучести

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 (1 + t/t_0), \quad (4.4)$$

где $h = E_0 t_0$;

E_0 – мгновенный модуль упругости;

t_0 – время релаксации, в течение которого напряжения уменьшаются в e раз;

$\varepsilon_0 = \sigma/E_0$ – начальная деформация.

Решая (4.3) при $\varepsilon = \text{const}$, получим уравнение релаксации

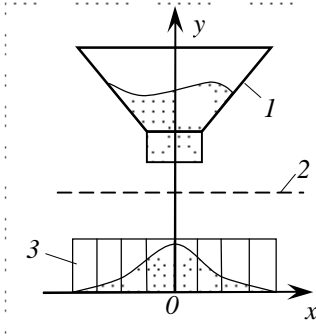
$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/t_0}, \quad (4.5)$$

где $\sigma_0 = E_0 \cdot \varepsilon$ – начальные напряжения.

Рассмотренные математические модели явлений ползучести и релаксации описываются функциональной зависимостью, т.е. когда одному значению аргумента соответствует одно значение функции.

Вероятностная модель. В природе часто встречаются процессы, когда одному значению аргумента соответствует несколько значений функции, вследствие действия на явление случайных факторов. Рассмотрим модель вероятностного распределения сыпучего, вытекающего из бункера через сито в ящик с вертикальными перегородками (рис. 4.4).

Наблюдения показывают, что распределение сыпучего в ящике подчиняется нормальному закону, являющемуся математической мо-



- 1 – воронка-бункер;
- 2 – сито;
- 3 – ящик с секциями

Рисунок 4.4– Закономерности распределения сыпучего материала

делью вероятностного процесса:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad (4.6)$$

где y – ордината, количество песка в секции;

x – абсцисса, номер секции в ящике;

σ – среднеквадратичное отклонение.

Модель технологического процесса. В последнее время распространение получили модели, обеспечивающие оптимизацию технологических процессов. Рассмотрим так называемую транспортную задачу (рис. 4.5). Пусть имеется A_1, A_2, A_3 объектов строительства (шахтная поверхность, стволы), потребляющих соответственно a_1, a_2, a_3 количество щебня ($a_j, j = 3$). В местах B_1 и B_2 есть карьеры с запасами щебня v_1 и v_2 , ($v_i, i=2$). При этом соблюдается условие $a_1+a_2+a_3=v_1+v_2$.

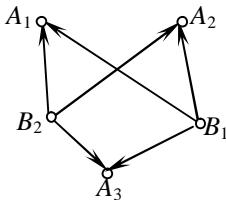


Рисунок 4.5 – Схема транспортных связей: A – объекты строительства, B – карьеры.

Стоимость единицы продукции из карьера B_1 на объект A_1 равна C_{11} , на объект A_2 – C_{12} , на объект A_3 – C_{13} , т.е. $[C_{ij}]$.

Количество щебня x_{ij} , транспортируемое на объект A_j из карьера B_i , взаимосвязано с другими величинами системой уравнений

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} = a_1; \\ x_{12} + x_{22} = a_2; \\ x_{13} + x_{23} = a_3; \end{cases} \quad \begin{cases} x_{11} + x_{12} + x_{13} = b_1; \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} = b_2. \end{cases} \quad (4.7)$$

В системе (4.7) первое уравнение означает количество щебня, транспортируемое из карьеров B_1 и B_2 на объект A_1 ; второе – на объект A_2 ; третье – на объект A_3 . Четвертое уравнение означает количество щебня, доставляемое на объекты A_1, A_2, A_3 из карьера B_2 и т.д.

В этой системе, состоящей из 5 уравнений, имеется 6 неизвестных, поэтому задача имеет много решений. Требуется определить наиболее выгодный вариант (экономичный) перевозки щебня. В этом случае с помощью линейного программирования (численный метод) находят функцию, которая удовлетворяет условию

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} \cdot x_{ij} = \min . \quad (4.8)$$

Уравнения (4.7) и (4.8) представляют собой математическую модель, позволяющую оптимизировать транспортный поток. Схема решения задачи изображена на рис. 4.5.

Кибернетическая модель. Интерес представляет кибернетическая модель «черного ящика» (рис. 4.6), описывающая систему неиз-

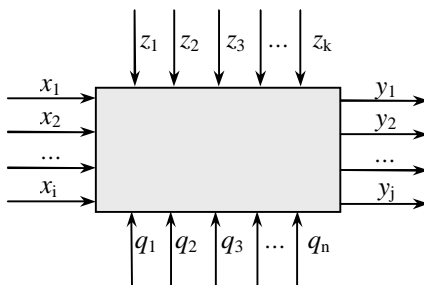


Рисунок 4.6 – Модель «черного ящика»

вестной структуры и недоступной для непосредственного наблюдения. Известны лишь x_i (вход), y_i (выход), z_k (управляющие факторы), q_n – (возмущающие факторы). Статистическим путем с помощью метода математического планирования эксперимента можно построить математическую модель исследуемого процесса. Модель отыскивается в виде уравнения регрессии, связывающего математическое ожидание случайной переменной y с контролируруемыми величинами (x, z, q) .

Модель-аналог. В теоретических и экспериментальных исследованиях, основываясь на аналогии, очень часто изучают явления на модели-аналоге, а затем с помощью полученных зависимостей устанавливают закономерности в натуре.

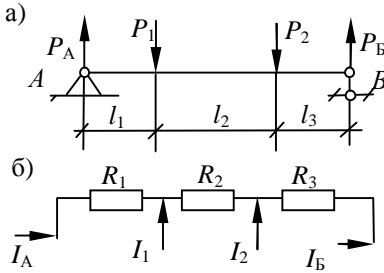


Рисунок 4.7 – Расчетная схема балки на двух опорах (а) и ее электрическая модель-аналог (б)

На рис. 4.7 приведена простейшая электрическая модель-аналог для изучения напряженно-деформированного состояния балки на двух опорах. Реакции на опорах балки вычисляются из уравнений

$$\begin{cases} \sum m_A = 0; & P_1 l_1 + P_2 \cdot (l_2 + l_1) - P_B \cdot (l_1 + l_2 + l_3) = 0; \\ \sum m_B = 0; & P_A \cdot (l_1 + l_3 + l_3) - P_1 \cdot (l_2 + l_3) + P_2 l_3 = 0, \end{cases} \quad (4.9)$$

по формулам:

$$\frac{P_1(l_2 + l_3) + P_2 l_3}{l_1 + l_2 + l_3} = P_A; \quad \frac{P_1 l_1 + P_2(l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3} = P_B. \quad (4.10)$$

Силу тока на входе и выходе электрической сети вычисляют аналогично:

$$I_A = \frac{I_1(R_2 + R_3) + I_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad I_B = \frac{I_1 R_1 + I_2(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (4.11)$$

Таким образом, меняя силу тока I_1 и I_2 и сопротивление R , можно изучить реакции опор балки в зависимости от значения P_1 и P_2 .

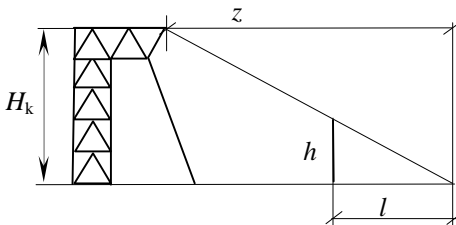


Рисунок 4.8 – Модель подобия для измерения высоты копра

Модели-подобия. Используя модель подобия нет необходимости непосредственно, например, измерять высоту копра H_k , для этого достаточно использовать простейшую модель – треугольник и теорему о подобии треугольников. А высоту можно определить путем измерения расстояния к копру (рис. 4.8):

$$H_k = h \cdot k_p, \quad (4.12)$$

где k_p – критерий подобия, равный $k_p = z/l$.

Аналогичный прием используются и в более сложных моделях подобия. Однако при этом учитывается не только геометрическое подобие, но и кинематическое и механическое.

Имитационная модель. При решении задач о напряженно-деформированном состоянии пород вокруг выработки, когда математическую модель невозможно преобразовать к конечному виду, а упрощения приводят к грубым результатам, рационально использовать численные методы (например, метод конечных элементов), которые особенно эффективны в связи с применением вычислительных машин.

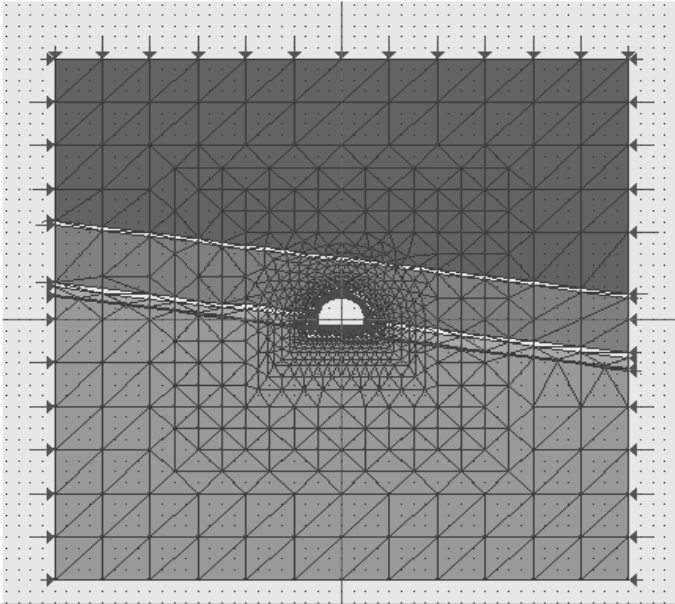


Рисунок 4.9 – Модель для исследования состояния выработки методом конечных элементов

В этом случае содержание исследования, по сути, остается тем же, что и при использовании методов механики сплошной среды, но для приближенного решения задачи производится ее дискретизация (рис. 4.9), а также разрабатываются моделирующий алгоритм и программы для ЭВМ на одном из алгоритмических языков. Реализация моделирующего алгоритма является, в некотором смысле, имитацией явлений, составляющих геомеханические процессы вокруг выработки, с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени и особенностей изменения состояния породного массива. Процесс моделирования всегда может быть приостановлен для анализа или сравнения с натурным экспериментом, результаты которого могут быть использованы для корректировки, как отдельных параметров, так и самой модели, причем возможен учет действия случайных факторов.

ЛЕКЦИЯ 7

4.3 Аналитические методы исследований

В научных исследованиях очень часто используют аналитические методы, которые позволяют установить математическую зависимость между параметрами изучаемого явления или процесса в явном виде, глубоко её проанализировать и установить точные количественные связи между аргументами и функциями.

Стремясь упростить исследуемую модель и получить простое решение поставленной задачи, широко применяют элементарные функции и уравнения, особенно линейные ($y = ax$, $y = a + bx$), например, прямолинейная огибающая кругов Мора. Для исследования процессов по принципу «ценного механизма» (разрушение, растворение, перемешивание и др.) используют экспоненциальные ($y = e^{ax}$), параболические ($y = x^2$) и показательные ($y = a^x$) функции. Чтобы изучить колебательные и периодические процессы применяют тригонометрические функции.

Элементарные функции непрерывны, что позволяет их дифференцировать и интегрировать, а также оптимизировать путем нахождения экстремумов. Например, производительность труда P шахтостроительной организации зависит от годового объема работы V в виде:

$$P = C_0 + C_1 V - C_2 V^2, \quad (4.13)$$

где C_0 , C_1 и C_2 – постоянные.

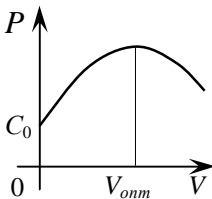


Рисунок 4.10 – Графическое представление зависимости (4.13)

Анализ зависимости (4.13) показывает, что по мере увеличения объема работ производительность вначале возрастает, а затем убывает, так как в больших организациях сложно организовывать производство (рис. 4.10). Оптимальный объем работ для ШСУ можно найти, определив экстремум функции (4.13):

$$\frac{dP}{dV} = C_1 - 2V \cdot C_2 = 0; \quad V_{opt} = \frac{C_1}{2C_2}. \quad (4.14)$$

При анализе формы и размеров инженерных конструкций пользуются методами элементарной, начертательной и аналитической геометрии, а также векторным анализом.

Для теоретического анализа функций одной переменной используют дифференциальные уравнения. Уравнения первого порядка имеют вид:

$$f\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) = 0 \text{ – запись в неявном виде;} \quad (4.15)$$

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \text{ – запись в явном виде.}$$

Часто применяют дифференциальные уравнения второго, третьего и более высших порядков:

$$f\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}, \dots, \frac{d^ny}{dx^n}\right) = 0. \quad (4.16)$$

Общее решение таких уравнений представляет собой семейство кривых на плоскости. Кривая $f(x, y)$ будет решением уравнения (4.15), если она в каждой точке касается вектора поля направления dy/dx . Поэтому каждое такое уравнение имеет множество решений (кривых):

$$F(x, y, C_1, C_2, \dots, C_n) = 0, \quad (4.17)$$

где C_1, C_2, \dots, C_n – постоянные интегрирования.

Для нахождения частного решения необходимо задать начальные условия, число которых равно порядку уравнения. Это позволяет определить вначале постоянные C_1, C_2, \dots, C_n , а затем и частные решения.

Обыкновенные дифференциальные уравнения применяются при решении задач о напряженном состоянии массива, равновесии конструкций, распределении масс, уплотнении грунтов, предельном состоянии пород и др.

Например, в результате исследований установлено, что после БВР скорость оседания пыли из движущегося по выработке воздуха пропорциональна ее количеству:

$$\frac{dm}{dt} = -\alpha m, \quad (4.18)$$

где m – количество пыли,

t – время;

α – коэффициент пропорциональности.

Преобразуем (4.18) к виду:

$$dm = -\alpha m dt = -\alpha m \frac{dx}{V}.$$

После интегрирования этого уравнения получим:

$$\frac{dm}{m} = -\alpha \frac{dx}{V}, \quad \ln m = -\frac{\alpha x}{V} + C;$$

При $x = 0$, $m = m_0$, тогда $C = \ln m_0$, а искомая зависимость примет вид:

$$m = m_0 e^{-\alpha x/V}; \quad m = m_0 e^{-\alpha x}. \quad (4.19)$$

По мере удаления от источника вследствие осаждения пыли концентрация ее будет уменьшаться по экспоненциальному закону.

Большое распространение при решении прикладных задач получили дифференциальные уравнения в частных производных, например,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \text{ и др.} \quad (4.20)$$

Общее решение этих уравнений зависит уже не от произвольных постоянных, а от произвольных функций. В них искомые решения представляют собой функции нескольких независимых переменных. Суть решения задачи сводится к тому, чтобы найти соотношение между переменными, установить функциональные зависимости

$$u = f(x, y) \text{ или } u = f(x, t),$$

удовлетворяющие дифференциальному уравнению с частными производными и частным условиям задач, которые называют краевыми условиями (начальными и граничными). Эти дополнительные условия определяются физическим смыслом задачи, они позволяют из множества решений получить одно, удовлетворяющее рассматриваемому процессу.

Условия, которые характеризуют все особенности искомого решения, называются условиями *однозначности*. Эти условия включают:

- геометрию системы (симметрия, форма и размеры тела);
- физические свойства тела (теплопроводность, водопроницаемость, упругость, пластичность, вязкость и пр.);
- начальные условия, т.е. состояние системы в начальный момент;
- граничные условия, т.е. взаимодействие системы на границах с окружающей средой.

Для решения линейных задач математической физики с простыми условиями, например, задачи теплообмена и им подобные, применяют операционные методы или методы интегрального преобразования Лапласа, Фурье, Бесселя и др. Суть операционного преобразования заключается в переводе функции $f(t)$ переменного t , называемой начальной или оригиналом, в функцию $f^*(p)$ другого переменного p , называемую изображением. Далее изучают не саму функцию (оригинал), а ее измененное значение (изображение).

Преобразование осуществляется путем умножения начальной функции на другую и интегрирования ее. Так, преобразование Лапласа от

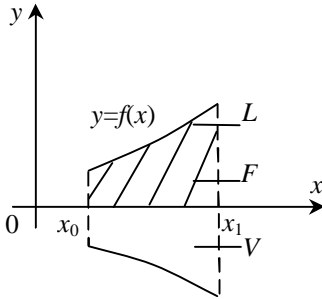
функции $f(t)$ имеет вид $f^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$, где p – комплексное число.

Использование функции изображения $f^*(p)$ позволяет сложные операции дифференцирования и интегрирования $f(t)$ заменить простыми алгебраическими операциями с $f^*(p)$. Выполнив эти операции, производят обратный переход к $f(t)$.

При решении нелинейных задач со сложными краевыми условиями точные аналитические методы встречают значительные трудности.

Многие задачи исследуются с помощью *вариационного исчисления*. Для этого вводят понятие функционала. Пусть имеем кривую

$y = f(x)$ с областью определения $x_0 \leq x \leq x_1$ (рис. 4.11). Длина кривой L , площадь криволинейной трапеции F , объем тела вращения V зависит от вида заданной кривой:



$$L = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + [y'(x)]^2} dx;$$

$$F = \int_{x_0}^{x_1} y(x) dx; \quad (4.21)$$

$$V = \pi \int_{x_0}^{x_1} [y(x)]^2 dx.$$

Рисунок 4.11 –Схема к определению понятия функционала

Таким образом, функция $y = f(x)$ однозначно определяет значения L , F и V , т.е. играет роль своеобразного «аргумента». В этом случае величины L , F , V называют функционалами относительно функции $y = f(x)$. Суть задачи вариационного исчисления состоит в том, что, если задан функционал $F(y')$ в области $x_0 \leq x \leq x_1$, то требуется найти такую функцию $y = f(x)$, при которой этот функционал принимает экстремальные значения.

В фундаментальных исследованиях часто применяют тензорное исчисление. При этом изучаемая величина имеет определенный физический смысл и не зависит от выбора системы координат. Такие величины называются тензорами. Например, напряженное состояния пород в точке характеризуется тензором

$$\sigma_{ij} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}.$$

Тензорное исчисление – раздел математики, изучающий тензоры и тензорные поля средствами линейной алгебры и математического анализа.

В теории упругости для определения концентраций напряжений в плоскости или пространстве, содержащей различные вырезы (выработки) широко используется теория функций комплексной переменной. В основе этой теории лежит положение о конформном преобразовании, когда изучение процессов в сложной области можно заменить более простым, отображая эту область на полуплоскость или круг. Функция комплексного переменного – функция, у которой независимая переменная Z и сама функция $\omega = f(Z)$ принимают значения из области комплексных чисел.

Рассмотренные аналитические методы, как правило, позволяют успешно решать только относительно простые задачи. В то же время часто возникает необходимость использования сложных дифференциальных или систем с нелинейными начальными и граничными условиями. В этом случае прибегают к тем или иным приближенным вычислениям с помощью численных методов (конечных разностей, конечных элементов). Эти методы основаны на замене непрерывного процесса изменения функции скачкообразным, что позволяет решать задачи на ЭВМ. Сводятся они к решению системы алгебраических уравнения с большим числом неизвестных, количество которых определяется разбивочной сеткой.

4.4 Экспериментально-аналитические методы исследований

Физические процессы можно исследовать аналитическими или экспериментальными методами.

Аналитические методы позволяют изучать процессы на основе математических моделей, которые могут быть представлены в виде функций, уравнений, систем уравнений, в основном дифференциальных или интегральных. Обычно в начале создают грубую модель, которую затем, после ее исследования, уточняют. Такая модель позволяет достаточно полно изучать физическую сущность явления.

Однако им свойственны существенные недостатки. Для того чтобы из всего класса найти частное решение, присущее лишь данному процессу, необходимо задать условия однозначности. Часто неправильное принятие краевых условий приводит к искажению физической сущности явления, а отыскать аналитическое выражение, наиболее реально отображающие это явление, или вообще невозможно или чрезвычайно затруднительно.

Экспериментальные методы позволяют глубоко изучить процессы в пределах точности техники эксперимента, особенно те параметры, которые представляют наибольший интерес. Однако результаты конкретного эксперимента не могут быть распространены на другой процесс, даже весьма близкий по своей сути. Кроме того, из опыта трудно установить, какие из параметров оказывают решающее влияние на ход процесса, и как будет протекать процесс, если меняются одновременно различные параметры. Экспериментальные методы позволяют установить лишь частные зависимости между отдельными переменными в строго определенных интервалах. Использование этих зависимостей за пределами этих интервалов может привести к грубым ошибкам.

Таким образом, и аналитические, и экспериментальные методы имеют свои преимущества и недостатки. Поэтому чрезвычайно плодотворным является сочетание положительных сторон этих методов исследований. На этом принципе основаны методы сочетания аналитических и экспериментальных исследований, которые, в свою очередь, основываются на методах аналогии, подобия и размерностей.

Метод аналогии. Метод аналогии применяют, когда разные физические явления описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями.

Рассмотрим суть метода аналогии на примере. Тепловой поток зависит от температурного перепада (закон Фурье):

$$q_T = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (4.22)$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Массперенос или перенос вещества (газа, пара, влаги, пыли) определяется перепадом концентрации вещества C (закон Фика):

$$q_B = -m \frac{dC}{dx}, \quad (4.23)$$

m – коэффициент масспереноса.

Перенос электричества по проводнику с погонным сопротивлением обуславливается перепадом напряжения (закон Ома):

$$q_3 = -\frac{1}{\rho} \frac{dU}{dx}, \quad (4.24)$$

где ρ – коэффициент электропроводности.

Три различных физических явления имеют идентичные математические выражения. Таким образом, их можно исследовать методом аналогии. При этом в зависимости от того, что принимается за оригинал и модель, могут быть различные виды моделирования. Так, если тепловой поток q_T изучают на модели с движением жидкости, то моделирование называют гидравлическим; если его исследуют на электрической модели, моделирование называют электрическим.

Идентичность математических выражений не означает, что процессы абсолютно аналогичны. Чтобы на модели изучать процесс оригинала, необходимо соблюдать критерии аналогии. На прямую сравнивать q_T и q_3 , коэффициенты теплопроводности λ и электропроводности ρ , температуру T и напряжения U нет смысла. Для устранения этой несопоставимости оба уравнения необходимо представить в безразмерных величинах. Каждую переменную Π следует представить в виде произведения постоянной размерности Π_{Π} на переменную безразмерную Π_6 :

$$\Pi = \Pi_{\Pi} \cdot \Pi_6. \quad (4.25)$$

Имея в виду (4.25), запишем выражения для q_T и q_3 в следующем виде:

$$\begin{aligned} q_T &= q_{T\Pi} \cdot q_{T6}; & \lambda &= \lambda_{\Pi} \cdot \lambda_6; & T &= T_{\Pi} \cdot T_6; & x &= x_{\Pi} \cdot x_6; \\ q_3 &= q_{3\Pi} \cdot q_{36}; & \rho &= \rho_{\Pi} \cdot \rho_6; & U &= U_{\Pi} \cdot U_6. \end{aligned}$$

Подставим в уравнения (4.22) и (4.24) значения преобразованных переменных, в результате чего получим:

$$\left[\frac{q_{тп} \cdot x_{п}}{\lambda_{п} \cdot T_{п}} \right] q_{тб} = -\lambda_{б} \frac{dT_{б}}{dx_{б}} ; \quad \left[\frac{\rho_{п} q_{эп} \cdot x_{п}}{U_{п}} \right] q_{эб} = \frac{1}{-\rho_{б}} \frac{dU_{б}}{dx_{б}}.$$

Оба уравнения написаны в безразмерном виде и их можно сравнивать. Уравнения будут идентичны, если

$$\left[\frac{q_{тп} \cdot x_{п}}{\lambda_{п} \cdot T_{п}} \right] = \left[\frac{\rho_{п} q_{эп} \cdot x_{п}}{U_{п}} \right]. \quad (4.26)$$

Это равенство называют критерием аналогии. С помощью критериев устанавливают параметры модели по исходному уравнению объекта.

В настоящее время широко применяется электрическое моделирование. С его помощью можно изучить различные физические процессы (колебания, фильтрацию, массперенос, теплопередачу, распределение напряжений). Это моделирование универсально, простое в эксплуатации, не требует громоздкого оборудования. При электрическом моделировании применяют аналоговые вычислительные машины (АВМ). Под которыми, как мы уже говорили, понимают определенное сочетание различных электрических элементов, в которых протекают процессы, описываемые математическими зависимостями, аналогичными с зависимостями для изучаемого объекта (оригинала). Существенным недостатком АВМ является сравнительно небольшая точность и не универсальность, так как для каждой задачи необходимо иметь свою схему, а значить и другую машину.

Для решения задач используют и другие методы электрического моделирования: метод сплошных сред, электрических сеток, электро-механическая аналогия, электрогидродинамическая аналогия и др. Плоские задачи моделируют с использованием электропроводной бумаги, объемные – электролитических ванн.

Метод размерностей. В ряде случаев встречаются процессы, которые не могут быть непосредственно описаны дифференциальными уравнениями. Зависимость между переменными величинами в таких случаях можно установить экспериментально. Для того чтобы ограничить эксперимент и отыскать связь между основными характеристиками процесса, эффективно применять метод анализа размерностей.

Анализ размерностей является методом установления зависимости между физическими параметрами изучаемого явления. Основан он на изучении размерностей этих величин.

Измерение физической характеристики Q означает ее сравнение с другим параметром q той же самой природы, то есть нужно определить во сколько раз Q больше чем q . В этом случае q является единицей измерения.

Единицы измерения составляют систему единиц, например, Международную систему СИ. Система включает единицы измерения, которые независимы одна от другой, их называют основными или первичными единицами. В системе СИ таковыми являются: масса (килограмм), длина (метр), время (секунда), сила тока (ампер), температура (градус Кельвина), сила света (кандела).

Единицы измерений других величин называются производными или вторичными. Они выражаются с помощью основных единиц. Формула, которая устанавливает соотношение между основными и производными единицами называется размерностью. Например, размерность скорости V является

$$[V] = L^1 \cdot T^{-1}, \quad (4.27)$$

где L – условное обозначение длины, а T – времени.

Эти символы представляют собой независимые единицы системы единиц измерения (T измеряется в секундах, минутах, часах и т.д., L метрах, сантиметрах, и т.д.). Размерность выводится с помощью уравнения, которое в случае скорости имеет следующий вид:

$$V = dL / dT,$$

откуда вытекает формула размерности для скорости. Анализ размерностей базируется на следующем правиле: размерность физической величины является произведением основных единиц измерения, возведенных в соответствующую степень.

В механике используют, как правило, три основные единицы измерения: массу, длину и время. Таким образом, в соответствии с вышеприведенным правилом, можно записать:

$$[N] = L^l \cdot M^m \cdot T^t, \quad (4.28)$$

где N – обозначение производной единицы измерения;

L, M, T – обозначения основных (длина, масса, время) единиц;

l, m, t – неизвестные показатели, которые могут быть представлены целыми или дробными числами, положительными или отрицательными.

Существуют величины, размерность которых состоит из основных единиц в степени, равной нулю. Это так называемые безразмерные величины. Например, коэффициент разрыхления породы представляет собой отношение двух объемов, откуда

$$[k_p] = V^1 / V^1 = V^{1-1} = V^0,$$

следовательно, коэффициент разрыхления есть безразмерная величина.

Если в ходе эксперимента установлено, что определяемая величина может зависеть от нескольких других величин, то в этом случае возможно составить уравнение размерностей, в котором символ изучаемой величины располагается в левой части, а произведение других величин – в правой. Символы в правой части имеют свои неизвестные показатели степени. Чтобы получить окончательно соотношение между физическими величинами, необходимо определить соответствующие показатели степени.

Например, необходимо определить время t , затраченное телом, имеющим массу m , при прямолинейном движении на пути l под действием постоянной силы f . Следовательно, время зависит от длины, массы и силы. В этом случае уравнение размерностей запишется следующим образом:

$$T = L^x \cdot M^y \cdot (L \cdot M \cdot T^{-2})^z.$$

Левая часть уравнения может быть представлена в виде $T^1 \cdot M^0 \cdot L^0$. Если физические величины изучаемого явления выбраны правильно, то размерности в левой и правой частях уравнения должны быть равны. Тогда система уравнений показателей степени запишется:

$$\begin{cases} x + z = 0; \\ y + z = 0; \\ -2z = 1. \end{cases}$$

тогда $x=y=1/2$ и $z = -1/2$.

Это значит, что время зависит от пути как \sqrt{l} , от массы как \sqrt{m} и от силы как $1/\sqrt{f}$. Однако получить окончательное решение поставленной задачи с помощью анализа размерностей невозможно. Можно установить лишь общую форму зависимости:

$$t = k \sqrt{\frac{m \cdot l}{f}}, \quad (4.29)$$

где k – безразмерный коэффициент пропорциональности, который определяют путем эксперимента.

Таким способом находят вид формулы и условия эксперимента. Необходимо определить лишь зависимость между двумя величинами: t и A , где $A = \sqrt{m \cdot l / f}$.

Если размерности левой и правой частей уравнения равны, это значит, что рассматриваемая формула аналитическая и расчеты могут выполняться в любой системе единиц. Напротив, если используется эмпирическая формула, необходимо знать размерности всех членов этой формулы.

Используя анализ размерностей, можно ответить на вопрос: не потеряли ли мы основные параметры, влияющие на данный процесс? Иначе говоря, найденное уравнение является полным или нет?

Предположим, что в предыдущем примере тело при движении нагревается и поэтому время зависит также от температуры C . Тогда уравнение размерностей запишется:

$$T^1 \cdot M^0 \cdot L^0 \cdot C^0 = L^x \cdot M^y \cdot (L \cdot M \cdot T^{-2})^z \cdot C^e.$$

Откуда легко найти, что $e = 0$, т.е. изучаемый процесс не зависит от температуры и уравнение (4.29) является полным. Наше предположение не верно.

Таким образом, анализ размерностей позволяет:

- найти безразмерные соотношения (критерии подобия), чтобы облегчить экспериментальные исследования;
- выбрать влияющие на изучаемое явление параметры, чтобы найти аналитическое решение задачи;
- проверить правильность аналитических формул.

Метод анализа размерностей очень часто применяется в исследованиях и в более сложных случаях, чем рассмотренный пример. Он позволяет получить функциональные зависимости в критериальном виде. Пусть известна в общем виде функция F для какого-либо сложного процесса

$$F = f(n_1, n_2, \dots, n_k), \quad (4.30)$$

содержащая k неизвестных постоянных или переменных размерных величин. Необходимо отыскать F и найти ее зависимость от переменных.

Значения n_1, \dots, n_k имеют определенную размерность единиц измерения. Метод размерностей предусматривает выбор из числа k трех основных независимых друг от друга единиц измерения. Остальные $(k-3)$ величины, входящие в функциональную зависимость (4.30), выбирают так, чтобы они были представлены в функции F как безразмерные, т.е. в критериях подобия. Преобразования производят с помощью основных, выбранных единиц измерения. При этом функция (4.30) принимает вид:

$$\frac{F}{a^x \cdot b^y \cdot c^z} = f\left(1, 1, 1, \frac{A}{a^{x_1} \cdot b^{y_1} \cdot c^{z_1}}, \frac{B}{a^{x_2} \cdot b^{y_2} \cdot c^{z_2}}, \frac{C}{a^{x_3} \cdot b^{y_3} \cdot c^{z_3}}\right).$$

Три единицы означают, что первые три числа являются отношением n_1, n_2 и n_3 к соответственно равным значениям a, b, c . Выражение (4.30) анализируют по размерностям величин. В результате устанавливают численные значения показателей степени $x \dots x_3, y \dots y_3, z \dots z_3$ и определяют критерии подобия.

Наглядным примером использования метода анализа размерностей при разработке аналитико-экспериментальных методов является расчетный метод Ю.З. Заславского, позволяющий определить параметры крепи одиночной выработки.

ЛЕКЦИЯ 8

Теория подобия. Теория подобия – это учение о подобии физических явлений. Ее использование наиболее эффективно в том случае, когда на основе решения дифференциальных уравнений зависимости между переменными отыскать невозможно. В этом случае, воспользовавшись данными предварительного эксперимента, с применением метода подобия составляют уравнение, решение которого можно распространить за пределы эксперимента. Этот метод теоретического исследования явлений и процессов возможен лишь на основе комбинирования с экспериментальными данными.

Теория подобия устанавливает критерии подобия различных физических явлений и с помощью этих критериев исследует свойства явлений. **Критерии подобия** представляют собой безразмерные отношения размерных физических величин, определяющих изучаемые явления.

Использование теории подобия дает важные практические результаты. С помощью этой теории осуществляют предварительный теоретический анализ проблемы и выбирают систему величин, характеризующих явления и процессы. Она является основой для планирования экспериментов и обработки результатов исследований. Совместно с физическими законами, дифференциальными уравнениями и экспериментом, теория подобия позволяет получать количественные характеристики изучаемого явления.

Формулирование проблемы и установление плана эксперимента на базе теории подобия значительно упрощается благодаря функциональной зависимости между совокупностью величин, определяющих явление или поведение системы. Как правило, в этом случае речь не идет о том, чтобы изучать отдельно влияние каждого параметра на явление. Очень важно, что можно достичь результатов с помощью одного лишь эксперимента над подобными системами.

Свойства подобных явлений и критерии подобия изучаемых явлений характеризуются тремя теоремами подобия.

Первая теорема подобия. Первая теорема, установленная Ж. Берtrandом в 1848г., базируется на общем понятии динамического

подобия Ньютона и его втором законе механики. Эта теорема формулируется следующим образом: **для подобных явлений можно найти определенную совокупность параметров, называемых критериями подобия, которые равны между собой.**

Рассмотрим пример. Пусть два тела, имеющие массы m_1 и m_2 , перемещаются с ускорениями соответственно a_1 и a_2 под действием сил f_1 и f_2 . Уравнения движения имеют вид:

$$f_1 - m_1 a_1 = 0, \quad f_2 - m_2 a_2 = 0,$$

или
$$f_1 - m_1 \frac{dl_1}{dt_1^2} = 0, \quad f_2 - m_2 \frac{dl_2}{dt_2^2} = 0,$$

или
$$1 - \frac{m_1}{f_1} \cdot \frac{dl_1}{dt_1^2} = 0, \quad 1 - \frac{m_2}{f_2} \cdot \frac{dl_2}{dt_2^2} = 0,$$

или
$$\frac{m_1}{f_1} \cdot \frac{dl_1}{dt_1^2} = 1, \quad \frac{m_2}{f_2} \cdot \frac{dl_2}{dt_2^2} = 1.$$

Распространяя результат для n подобных систем, получим критерий подобия:

$$\frac{m_1 l_1}{f_1 \cdot t_1^2} = \frac{m_2 l_2}{f_2 \cdot t_2^2} = \dots = \frac{m_n l_n}{f_n \cdot t_n^2}. \quad (4.31)$$

Критерий подобия условимся обозначать символом Π , тогда результат вышеприведенного примера запишется:

$$\Pi = \frac{m \cdot l}{f \cdot t^2} = idem. \quad (4.32)$$

Таким образом, в подобных явлениях соотношение параметров (критерии подобия) равны между собой и для этих явлений справедливо $\Pi = idem$. Обратное утверждение также имеет смысл. Если критерии подобия равны, то явления являются подобными.

Найденное уравнение (4.32) называется **критерием динамического подобия Ньютона**, оно аналогично выражению (4.29), полученному с помощью метода анализа размерностей, и является частным случаем критерия термодинамического подобия, основанного на законе сохранения энергии.

При исследовании сложного явления могут развиваться несколько различных процессов. Подобие каждого из этих процессов обеспечивается подобием явления в целом. С точки зрения практики очень важно, что критерии подобия могут трансформироваться в критерии другого вида с помощью деления или умножения на константу k . Например, если имеются два критерия Π_1 и Π_2 , следующие выражения являются справедливыми:

$$\Pi_1 \cdot \Pi_2 = idem; \Pi_1 / \Pi_2 = idem; 1 / \Pi = idem; k \cdot \Pi_1 = idem. \quad (4.33)$$

Если подобные явления рассматриваются во времени и в пространстве, речь идет о критерии полного подобия. В этом случае описание процесса наиболее сложно, оно позволяет иметь не только численное значение параметра (силу удара взрывной волны в точке, удаленной от места взрыва на 100 м), но также развитие, изменение рассматриваемого параметра во времени (например, увеличение силы удара, скорость затухания процесса и т.д.).

Если подобные явления рассматриваются только в пространстве или во времени, они характеризуются критериями неполного подобия.

Наиболее часто, используют приблизительное подобие, при котором не рассматриваются параметры, влияющие на данный процесс в незначительной степени. Вследствие этого и результаты исследований будут приблизительными. Степень этого приближения определяется путем сравнения с практическими результатами. Речь идет в этом случае о критериях приблизительного подобия.

Вторая теорема подобия (П – теорема). Она была сформулирована в начале XX века учеными А. Федерманом и У. Букингом следующим образом: *каждое полное уравнение физического процесса может быть представлено в форме $(m - k)$ критериев (безразмерных зависимостей), где m есть число параметров, а k – число независимых единиц измерения.*

Такое уравнение может быть решено по отношению к любому критерию и может быть представлено в виде критериального уравнения:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{m-k}). \quad (4.34)$$

Благодаря Π -теореме возможно уменьшить число переменных размерных величин до $(m - k)$ безразмерных величин, что упрощает анализ данных, планирование эксперимента и обработку его результатов.

Обычно, в механике, в качестве основных единиц принимаются три величины: длину, время и массу. Тогда при исследовании явления, которое характеризуется пятью параметрами (включая, безразмерную константу), достаточно получить взаимосвязь между двумя критериями.

Рассмотрим пример приведения величин к безразмерному виду, используемый обычно в механике подземных сооружений. Напряженное деформированное состояние пород вокруг выработки предопределяется весом вышележащей толщи γH , где γ – объемный вес пород, H – глубина расположения выработки от поверхности; прочностной характеристикой пород R ; сопротивлением крепи q ; смещениями контура выработки U ; размерами выработки r ; модулем деформации E .

В общем виде зависимость можно записать следующим образом:
$$U = f(\gamma H; R; q; E; r).$$

В соответствии с Π -теоремой система за n параметров и одной определяемой величины должна дать $(n + 1 - k)$ безразмерных комбинаций. В нашем случае время не принимается во внимание, следовательно, получаем четыре безразмерные комбинации.

$$\frac{U}{r}; \frac{\gamma H}{R}; \frac{q}{R}; \frac{q}{E},$$

из которых можно составить более простую зависимость:

$$\frac{U}{r} = f\left(\frac{\gamma H}{R}; \frac{q}{R}; \frac{q}{E}\right)$$

Третья теорема подобия. Эта теорема сформулирована акад. В.Л. Кирпичевым в 1930 г. следующим образом: **необходимым и достаточным условием подобия является пропорциональность схожих параметров, составляющих часть условия однозначности, и равенство критериев подобия изучаемого явления.**

Два физических явления подобны, если они описываются одной и той же системой дифференциальных уравнения и имеют подобные

(граничные) условия однозначности, а их определяющие критерии подобия – численно равны.

Условиями однозначности являются условия, с помощью которых конкретное явление отличают от всей совокупности явлений того же типа. Подобие условий однозначности устанавливается в соответствии со следующими критериями:

- подобие геометрических параметров систем;
- пропорциональность физических постоянных, имеющих основное значение для изучаемого процесса;
- подобие начальных условий систем;
- подобие граничных условий систем в течение всего рассматриваемого периода;
- равенство критериев, имеющих основное значение для изучаемого процесса.

Подобие двух систем будет обеспечено в случае пропорциональности их схожих параметров и равенства $m-k-1$ критериев подобия, определенных с помощью *П*-теоремы из полного уравнения процесса.

Различают два типа задач в теории подобия: прямую и обратную. Прямая задача состоит в определении подобия при известных уравнениях. Обратная задача заключается в установлении уравнения, которое описывает подобие схожих явлений. Решение задачи сводится к определению критериев подобия и безразмерных коэффициентов пропорциональности.

Задача нахождения уравнения процесса с помощью *П*-теоремы решается в следующем порядке:

- определяют тем или иным методом все параметры, влияющие на данный процесс. Один из параметров записывается в виде функции от других параметров:

$$A_1 = f(A_1, A_2, \dots, A_n); \quad (4.35)$$

- предполагают, что уравнение (4.35) является полным и однородным по отношению к размерности;

- выбирают систему единиц измерений. В этой системе выбирают независимые параметры. Число независимых параметров равно k ;
- составляют матрицу размерностей выбранных параметров и рассчитывают детерминант этой матрицы. Если параметры независимы, то детерминант не будет равен нулю;
- находят комбинации критериев, используя метод анализа размерностей, их число в общем случае равно $k-1$;
- определяют коэффициенты пропорциональности между критериями с помощью эксперимента.

Критерии механического подобия. В горной науке наибольшее применение находят критерии механического подобия. При этом считают, что другие физические явления (термические, электрические, магнитные и др.) не влияют на изучаемый процесс. Чтобы получить необходимые критерии и постоянные подобия используют закон динамического подобия Ньютона и метод анализа размерностей.

В качестве основных единиц принимаются длина, масса и время. Все остальные характеристики рассматриваемого процесса будут находиться в зависимости от этих трех основных единиц. Следовательно, механическое подобие устанавливает критерии для длины (подобие геометрическое), времени (подобие кинематическое) и массы (подобие динамическое).

Геометрическое подобие двух подобных систем будет иметь место, если все размеры модели изменены в C_l раз по отношению к системе, имеющей реальные размеры. Иначе говоря, отношение расстояний в натуре и на модели между любой парой аналогичных точек есть величина постоянная, **называемая геометрическим масштабом**:

$$\frac{AC}{ac} = \frac{AB}{ab} = \frac{BC}{bc} = \frac{l_n}{l_m} = C_l. \quad (4.36)$$

Отношение площадей подобных фигур равно квадрату коэффициента пропорциональности C_l^2 , отношение объемов – C_l^3 .

Условие кинематического подобия будет иметь место, если аналогичные частицы систем, перемещаясь по геометрически подоб-

ным траекториям, проходят геометрически подобные расстояния за отрезки времени t_n в натуре и t_m на модели, которые отличаются коэффициентом пропорциональности:

$$\frac{t_A}{t_a} = \frac{t_B}{t_b} = \dots = \frac{t_n}{t_m} = C_l. \quad (4.37)$$

Условие динамического подобия будет иметь место, если, кроме условий (4.36) и (4.37), еще и массы аналогичных частиц подобных систем отличаются одна от другой коэффициентом пропорциональности:

$$\frac{m_A}{m_a} = \frac{m_B}{m_b} = \dots = \frac{m_n}{m_m} = C_m. \quad (4.38)$$

Коэффициенты C_l , C_t , и C_m названы коэффициентами подобия.

Имея динамическое подобие, очень легко установить зависимости между всеми характеристиками любой механической системы. В самом деле:

– для скоростей $\frac{v_n}{v_m} = \frac{l_n \cdot t_m}{l_m \cdot t_n} = \frac{C_l}{C_t} = C_v;$ (4.39)

– для ускорений $\frac{a_n}{a_m} = \frac{l_n \cdot t_m^2}{t_n^2 \cdot l_m} = \frac{C_l}{C_t^2} = C_a;$ (4.40)

– для сил $\frac{f_n}{f_m} = \frac{m_n \cdot a_n}{m_m \cdot a_m} = \frac{m_n \cdot l_n \cdot t_m^2}{m_m \cdot l_m \cdot t_n^2} = \frac{C_m \cdot C_l}{C_t^2} = C_f;$ (4.41)

– для мощности $\frac{N_n}{N_m} = \frac{f_n \cdot l_n \cdot t_m}{f_m \cdot l_m \cdot t_n} = \frac{m_n \cdot l_n^2 \cdot t_m^3}{m_m \cdot l_m^2 \cdot t_n^3} = \frac{C_m \cdot C_l^2}{C_t^3} = C_N.$ (4.42)

Следовательно, коэффициенты подобия различных величин могут быть выражены через коэффициенты динамического подобия C_l , C_t и C_m

Иногда удобно выражать коэффициенты подобия, используя вторичные единицы измерения. Например, масса в условии (4.38) может быть представлена в виде произведения объема на плотность. Тогда,

$$C_m = \frac{m_n}{m_m} = \frac{\rho_n \cdot l_n^3}{\rho_m \cdot l_m^3} = \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot C_l^3.$$

Так как условие геометрического подобия нами уже определено, то условие динамического подобия может быть дано отношением плотностей подобных систем

$$C_r = r_n / r_m. \quad (4.43)$$

Представляя в выражении (4.41) массы частиц в виде плотности и объема, получим:

$$C_f = C_m \cdot C_l \cdot C_t^{-2} = C_\rho \cdot C_l^4 \cdot C_t^{-2} = C_\rho \cdot C_l^2 \cdot C_v^2. \quad (4.44)$$

Зависимости (4.44) представляют собой различные формы математической записи одного и того же закона динамического подобия.

Заменим в (4.41) коэффициенты пропорциональности соответствующими отношениями:

$$\frac{f_n}{\rho_n \cdot a_n \cdot l_n^3} = \frac{f_m}{\rho_m \cdot a_m \cdot l_m^3} = idem. . \quad (4.45)$$

В задачах механики горных пород выражения *динамического подобия* преобразуется, учитывая гравитационные силы $\rho_n \cdot q_n = \gamma_n$, $\rho_m \cdot q_m = \gamma_m$ и напряжения в породном массиве $f_n / l_n^2 = \sigma_n$, $f_m / l_m^2 = \sigma_m$, и принимает следующую форму:

$$\frac{\sigma_n}{\gamma_n \cdot l_n} = \frac{\sigma_m}{\gamma_m \cdot l_m} = idem. \quad (4.46)$$

Анализ критерия (4.46) показывает, что в случае геометрического масштаба моделирования $C_l = l_n / l_m$, чтобы обеспечить механическое подобие модели и природы, возможны три условия:

$$\sigma_m \neq \sigma_n \text{ и } \gamma_m = \gamma_n; \quad \sigma_m = \sigma_n \text{ и } \gamma_m \neq \gamma_n; \quad \sigma_m \neq \sigma_n \text{ и } \gamma_m \neq \gamma_n.$$

Первое условие соответствует наиболее простой механической модели, которая воспроизводит явление, соблюдая геометрическое подобие и сохраняя его физическую природу. Количественно модели-

руемые явления протекают в этом случае иначе, а геометрические размеры и силы изменяются пропорционально $\sigma_n/\sigma_m = l_n/l_m$.

Если соблюдают условие $\sigma_m = \sigma_n$ и $\gamma_m \neq \gamma_n$, то необходимо выбрать материал модели по формуле: $\gamma_m = \gamma_n \cdot l_n/l_m$, т.е. объемный вес модели должен быть выше объемного веса породы в l_n/l_m раз. Это условие обеспечивается, если в качестве материала модели использовать натуральную породу, а объемный вес модели увеличить с помощью сил инерции, например, вращением в центрифуге.

Если для создания модели используют искусственный материал, механические характеристики которого меньше, чем аналогичные параметры в натуре, механическое подобие будет обеспечено при условии:

$$\sigma_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \sigma_n. \quad (4.47)$$

Эти материалы называются эквивалентными.

Выбор условий подобия в механике горных пород зависит также от уровня развития процессов деформации пород. При деформируемости массивов в пределах упругости должны соблюдаться два условия

$$E_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} E_n \quad \text{и} \quad \mu_m = \mu_n. \quad (4.48)$$

В случае упругих ϵ_l пластических ϵ_p деформаций:

$$\frac{(\epsilon_p)_m}{(\epsilon_e + \epsilon_p)_m} = \frac{(\epsilon_p)_n}{(\epsilon_e + \epsilon_p)_n}, \quad \text{где} \quad \epsilon_e + \epsilon_p = f(\sigma). \quad (4.49)$$

При моделировании процессов разрушения пород условия подобия зависят от типа разрушения:

$$\begin{aligned} \text{– от сжатия} \quad & (\sigma_c)_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} (\sigma_c)_n; \\ \text{– от растяжения} \quad & (\sigma_t)_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} (\sigma_t)_n; \end{aligned} \quad (4.50)$$

$$- \text{от сдвига } (\tau_0)_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} (\tau_0)_n; \quad tg\varphi_m = tg\varphi_n.$$

При использовании теории подобия удобно оперировать критериями подобия, которые обозначаются двумя латинскими буквами фамилии ученых. Рассмотрим некоторые критерии подобия.

Подобие механических систем динамического характера выражают критерием Ньютона:

$$Ne = \frac{f}{\rho \cdot v^2 \cdot l^2} = idem.$$

Изучая потоки жидкостей, применяют критерий Рейнольда, который является показателем отношения сил инерции к силам трения:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = idem,$$

где ν – динамическая вязкость.

Критерий Эйлера Eu характеризует соотношения давления и сил инерции:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot v^2} = idem,$$

где ΔP – падение давления при движении жидкости в трубопроводе вследствие трения.

Подобие сил тяжести характеризует критерий Фруда:

$$Fr = \frac{g \cdot l}{v^2} = idem.$$

Временное подобие характеризует критерий гомохронности:

$$Ho = \frac{v \cdot l}{t} = idem.$$

Критерий Фурье характеризует скорость выравнивания тепла в теле:

$$Fo = \frac{a \cdot T}{l^2} = idem,$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Все приведенные, а также и другие критерии, являются безразмерными и независимыми друг от друга, поэтому их сочетание дает

новые критерии. Использовать критерии подобия при исследовании явлений и процессов очень удобно. Для этого экспериментальные данные обрабатывают в критериальном виде, т.е. в дифференциальные уравнения вместо переменных l , a , t и т.д. ставят безразмерные критерии подобия. Затем приступают к решению теоретического уравнения в критериальном виде. Полученное аналитическое решение позволяет распространить результаты единичного опыта на группу подобных явлений и анализировать переменные величины за пределами эксперимента.

Критерии подобия применяются и для решения дифференциальных уравнений со многими переменными. В этом случае уравнения и граничные условия целесообразно представлять в критериальном безразмерном виде, хотя это иногда и нелегко. Решение уравнений в безразмерном виде менее трудоемко, поскольку число переменных уменьшается, анализ аналитических выражений упрощается, а объем расчетов существенно снижается.

ЛЕКЦИЯ 9

4.5 Вероятностно-статистические методы исследований

Во многих случаях в горной науке необходимо исследовать не только детерминированные, но и случайные процессы. Все геомеханические процессы протекают в непрерывно изменяющихся условиях, когда те или иные события могут произойти, а могут и не произойти. При этом возникает необходимость анализировать случайные связи.

Несмотря на случайный характер событий, они подчиняются определенным закономерностям, рассматриваемым в *теории вероятностей*, которая изучает теоретические распределения случайных величин и их характеристики. Способами обработки и анализа случайных эмпирических событий занимается другая наука, так называемая математическая статистика. Эти две родственные науки составляют единую математическую теорию массовых случайных процессов, широко применяемую в научных исследованиях.

Элементы теории вероятностей и матстатистики. Под *совокупностью* понимают множество однородных событий случайной величины x , которая составляет первичный статистический материал. Совокупность может быть генеральной (большая выборка N), содержащей самые различные варианты массового явления, и выборочной (малая выборка N_1), представляющая собой лишь часть генеральной совокупности.

Вероятностью $P(x)$ события x называют отношение числа случаев $N(x)$, которые приводят к наступлению события x , к общему числу возможных случаев N :

$$P(x) = N(x) / N . \quad (4.51)$$

В математической статистике аналогом вероятности является понятие частоты события $\bar{y}(x)$, представляющей собой отношение числа случаев $n(x)$, при которых имело место событие, к общему числу событий:

$$\bar{y}(x) = n(x) / n . \quad (4.52)$$

При неограниченном возрастании числа событий частота $\bar{y}(x)$ стремится к вероятности $P(x)$.

Допустим, имеются какие-то статистические данные, представленные в виде ряда распределения (гистограммы) на рис. 4.11, тогда частота \bar{y}_{oi} характеризует вероятность появления случайной величины в интервале i , а плавная кривая $f(x)$ носит название функции распределения.

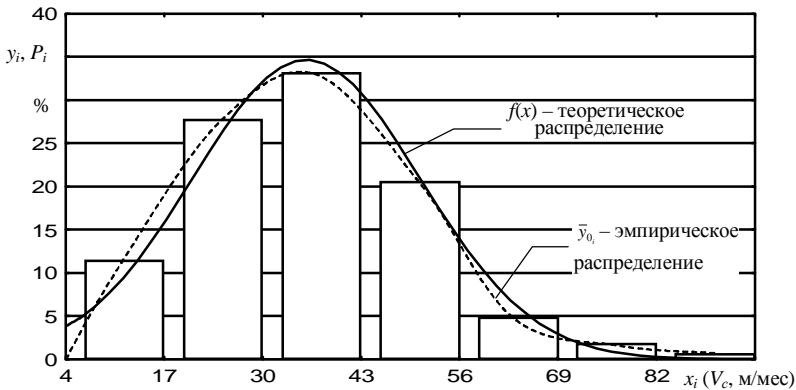


Рисунок 4.11 – Гистограмма, теоретическое и эмпирическое распределения для скорости сооружения выработок

Вероятность случайной величины – это количественная оценка возможности ее появления. Достоверное событие имеет $P=1$, невозможное событие – $P=0$. Следовательно, для случайного события

$$0 \leq P(x) \leq 1, \text{ а сумма вероятностей всех возможных значений } \sum_0^n P_i = 1.$$

В исследованиях недостаточно иметь кривую распределения $f(x)$, а необходимо знать и ее характеристики:

а) среднеарифметическое – $\bar{x} = \sum_1^n \frac{x_i}{n}$; (4.53)

б) размах – $R = x_{\max} - x_{\min}$, который можно использовать для ориентировочной оценки вариации событий, где x_{\max} и x_{\min} – экстремаль-

ные значения измеренной величины;

$$\text{в) математическое ожидание} - m(x) = \sum_1^n x_i P_i . \quad (4.54)$$

Для непрерывных случайных величин математическое ожидание записывается в виде

$$m(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx , \quad (4.55)$$

т.е. равно действительному значению наблюдаемых событий x , а соответствующая абсцисса называется центром распределения.

$$\text{г) дисперсия} - D(x) = \sum_1^n [x_i - m(x)]^2 \cdot P_i , \quad (4.56)$$

которая характеризует рассеивание случайной величины по отношению к математическому ожиданию. Дисперсию случайной величины иначе еще называют центральным моментом второго порядка.

Для непрерывной случайной величины дисперсия равна

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m(x))^2 \cdot f(x) dx ; \quad (4.57)$$

д) среднее квадратичное отклонение или стандарт –

$$s(x) = \sqrt{D(x)} . \quad (4.58)$$

е) коэффициент вариации (относительное рассеяние) –

$$k_b = \sigma(x) / m(x) < 1 , \quad (4.59)$$

который характеризует интенсивность рассеяния в различных совокупностях и применяется для их сравнения.

Площадь, расположенная под кривой распределения $f(x)$, соответствует единице, это означает, что кривая охватывает все значения случайных величин. Однако таких кривых, которые будут иметь площадь, равную единице, можно построить большое количество, т.е. они могут иметь различное рассеяние. Мерой рассеяния и является дисперсия или среднее квадратичное отклонение (рис. 4.12).

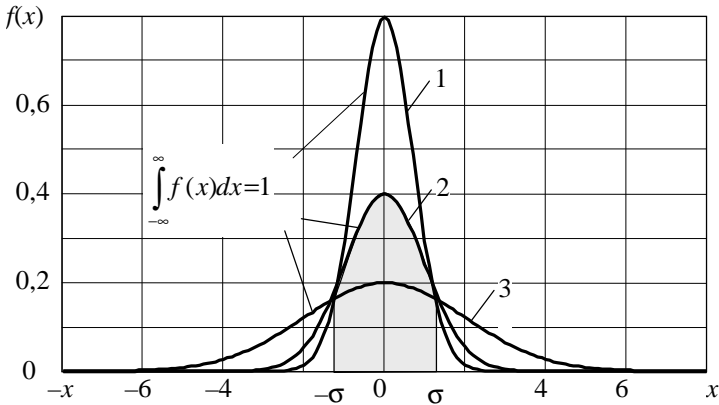


Рисунок 4.12 – Характер рассеяния нормальной кривой
распределения 1 – $s=0,5$; 2 – $\sigma=1,0$; 3 – $\sigma=2,0$

Выше мы рассмотрели основные характеристики теоретической кривой распределения, которые анализирует теория вероятностей. В статистике оперируют эмпирическими распределениями, а основной задачей статистики является подбор теоретических кривых по имеющемуся эмпирическому закону распределения.

Пусть в результате n измерений случайной величины получен вариационный ряд $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Обработка таких рядов сводится к следующим операциям:

- группируют x_i в интервале и устанавливают для каждого из них абсолютную и относительные частоты y_i и $\overline{y_{oi}}$;

- по значениям x_i и $\overline{y_{oi}}$ строят ступенчатую гистограмму (рис. 4.11);

- вычисляют характеристики эмпирической кривой распределе-

ния: среднеарифметическое $\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i$; дисперсию $D = \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - \overline{x})^2$;

среднеквадратичное отклонение $s = \sqrt{D}$.

Значениям \overline{x} , D и s эмпирического распределения соответствуют величины \overline{x} , $D(x)$ и $s(x)$ теоретического распределения.

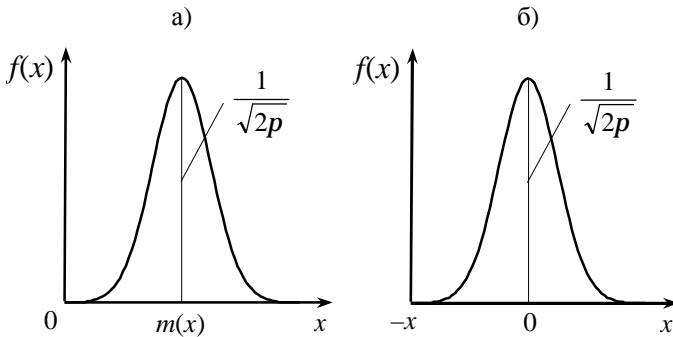


Рисунок 4.13 – Общий вид кривой нормального распределения:
а) $m(x) \neq 0$; б) $m(x) = 0$.

Рассмотрим основные теоретические кривые распределения. Наиболее часто в исследованиях применяют закон нормального распределения (рис. 4.13), уравнение которого при $m(x) \neq 0$ имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[\frac{(x-m(x))^2}{2\sigma^2} \right]}. \quad (4.60)$$

Если совместить ось координат с точкой m , т.е. принять $m(x)=0$ и принять $s^2 = 1$, закон нормального распределения будет описываться более простым уравнением:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-x^2}{2}}. \quad (4.61)$$

Для оценки рассеяния обычно пользуются величиной s . Чем меньше s , тем меньше рассеяние, т.е. наблюдения мало отличаются друг от друга. С увеличением s рассеяние возрастает, вероятность погрешностей увеличивается, а максимум кривой (ордината), равный $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, уменьшается. Поэтому значение $y=1/\sigma\sqrt{2\pi}$ при $s = 1$ называют мерой точности. Среднеквадратичные отклонения $(+s)$ и $(-s)$

соответствуют точкам перегиба (заштрихованная область на рис. 4.12) кривой распределения.

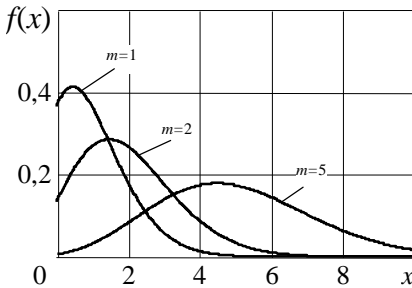


Рисунок 4.14 – Общий вид кривой распределения Пуассона

При анализе многих случайных дискретных процессов используют распределение Пуассона (краткосрочные события, протекающие в единицу времени). Вероятность появления чисел редких событий $x=1, 2, \dots$ за данный отрезок времени выражается законом Пуассона (см. рис. 4.14):

$$f(x) = \frac{m^x}{x!} e^{-m} = \frac{(I \cdot t)^x}{x!} e^{-I \cdot t}, \quad (4.62)$$

где x – число событий за данный отрезок времени t ;

λ – плотность, т.е. среднее число событий за единицу времени;

$I \cdot t = m$ – среднее число событий за время t ;

Для закона Пуассона дисперсия равна математическому ожиданию числа наступления событий за время t , т.е. $S^2 = m$.

Для исследования количественных характеристик некоторых процессов (времени отказов машин и т.д.) применяют показательный закон распределения (рис. 4.15), плотность распределения которого выражается зависимостью

$$f(x) = I \cdot e^{-Ix}, \quad (4.63)$$

где λ – интенсивность (среднее число) событий в единицу времени.

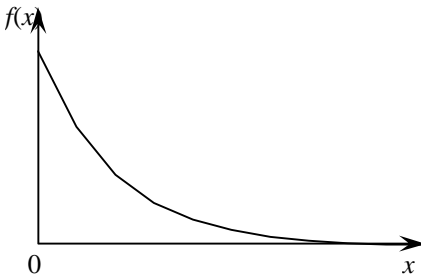


Рисунок 4.15 – Общий вид кривой показательного закона распределения

В показательном распределении интенсивность λ является величиной, обратной математическому ожиданию $\lambda = 1/m(x)$. Кроме того, справедливо соотношение $s^2 = [m(x)]^2$.

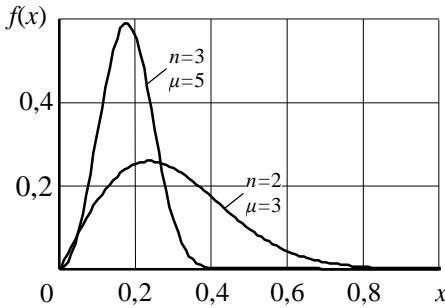


Рисунок 4.16– Общий вид кривой распределения Вейбулла

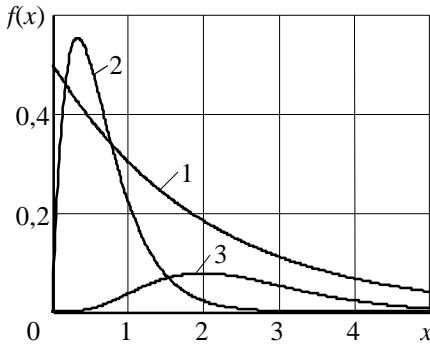


Рисунок 4.17– Общий вид кривых гамма-распределения: 1 – $\alpha=1; \lambda=0,5$; 2– $\alpha=2; \lambda=3$; 3– $\alpha=5; \lambda=2$

В различных областях исследований широко применяется закон распределения Вейбулла (рис. 4.16):

$$f(x) = n \cdot m^n \cdot x^{n-1} \cdot e^{-m \cdot x^n}, \quad (4.64)$$

где n, μ – параметры закона; x – аргумент, чаще всего время.

Исследуя процессы, связанные с постепенным снижением параметров (снижением прочности пород во времени и т.д.), применяют закон гамма-распределения (рис. 4.17):

$$f(x) = \frac{I^a}{a!} x^{a-1} e^{-Ix}, \quad (4.65)$$

где λ, a – параметры. Если $a=1$, гамма функции превращается в показательный закон.

Кроме приведенных выше законов применяют и другие виды распределений: Пирсона, Рэля, бета – распределение и пр.

Дисперсионный анализ. В исследованиях часто возникает вопрос: В какой мере влияет тот или иной случайный фактор на исследуемый процесс? Методы установления основных факторов и их влия-

ние на исследуемый процесс рассматриваются в специальном разделе теории вероятностей и математической статистике – дисперсионном анализе. Различают одно – и многофакторный анализ. Дисперсионный анализ основывается на использовании нормального закона распределения и на гипотезе, что центры нормальных распределений случайных величин равны. Следовательно, все измерения можно рассматривать как выборку из одной и той же нормальной совокупности.

Теория надежности: Методы теории вероятностей и математической статистики часто применяют в теории надежности, которая широко используется в различных отраслях науки и техники. Под надежностью понимают свойство объекта выполнять заданные функции (сохранять установленные эксплуатационные показатели) в течение требуемого периода времени. В теории надежности отказа рассматриваются как случайные события. Для количественного описания отказов применяют математические модели – функции распределения интервалов времени (нормальное и экспоненциальное распределение, Вейбулла, гамма-распределения). Задача состоит в нахождении вероятностей различных показателей.

Метод Монте-Карло. Для исследования сложных процессов вероятностного характера применяют метод Монте-Карло. С помощью этого метода решают задачи по нахождению наилучшего решения из множества рассматриваемых вариантов.

Метод Монте-Карло иначе еще называют методом статистического моделирования. Это численный метод, он основан на использовании случайных чисел, моделирующих вероятностные процессы. Математической основой метода является закон больших чисел, который формулируется следующим образом: *при большом числе статистических испытаний вероятность того, что среднеарифметическое значение случайной величины стремится к ее математическому ожиданию, равна 1:*

$$\lim P \left\{ \left| \frac{\sum x}{n} - m(x) \right| < \varepsilon \right\} \rightarrow 1, \quad (4.64)$$

где ε – любое малое положительное число.

Последовательность решения задач методом Монте-Карло:

- сбор, обработка и анализ статистических наблюдений;
- отбор главных и отбрасывание второстепенных факторов и составление математической модели;
- составление алгоритмов и решению задач на ЭВМ.

Для решения задач методом Монте-Карло необходимо иметь статистический ряд, знать закон его распределения, среднее значение \bar{x} , математическое ожидание $m(x)$ и среднеквадратичное отклонение. Решение эффективно лишь с использованием ЭВМ.

4.6. Методы системного анализа

Системный анализ – это комплекс приемов и методов изучения сложных систем, представляющих собой совокупность взаимодействующих элементов, характеризующихся прямыми и обратными связями. Суть системного анализа и состоит в выявлении этих связей и установлении их влияния на систему в целом. С использованием системного подхода изучается развитие сложных систем, таких как экономика отрасли, шахтостроительного управления и пр. Наиболее полно можно выполнить системный анализ с использованием научных положений кибернетики.

Системный анализ складывается из четырех этапов:

- постановка задачи (определяют объект, цели и задачи исследования);
- установление границ изучаемой системы и определение ее структуры (все объекты и процессы, имеющие отношение к поставленной цели, разбиваются на внешнюю среду и собственно изучаемую систему (замкнутую или открытую), затем выделяются части системы (элементы) и устанавливается взаимодействие между ними и внешней средой;
- составление математической модели системы (описывают выделенные элементы системы и процессы взаимодействия с помощью тех или иных параметров; математический аппарат использует в зависимости от особенностей процессов (непрерывные и дискретные, детерминированные и вероятностные);

– анализ системы (анализируют математическую модель, находят ее экстремальные условия, оптимизируют процессы и систему, формулируют выводы).

Наиболее ответственный момент – оптимизация, которая заключается в нахождении оптимума рассматриваемой функции и соответственно оптимальных условий поведения данной системы. Оптимизацию производят по критерию. Известны различные математические методы оптимизации исследуемых моделей (аналитические, градиентные, математическое программирование, вероятностно-статистические, автоматические).

Оптимизация систем *аналитическими* методами состоит в том, что необходимо определить экспериментальное (минимальное или максимальное) значение некоторой функции $j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в определенной области S значений параметров x_1, x_2, \dots, x_n . Аналитические методы для оптимизации сложных процессов используют редко.

Чаще применяют *метод градиентного* (наискорейшего) спуска и подъема. Допустим, что необходимо найти экстремум целевой функции $f(x_1, x_2)$, описывающей некоторую поверхность (рис. 4.18).

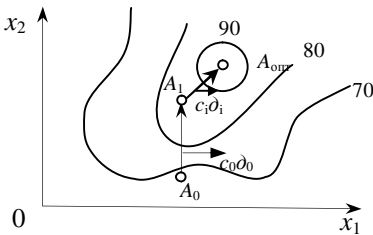


Рисунок 4.18 – Схема движения к оптимуму

Нахождение экстремума начинают с любой точки $A_0(x_{01}, x_{02})$. Определяют наиболее крутое направление, которое называют градиентом и обозначают \vec{g} . По направлению градиента начинают движение и оптимуму с шагом \vec{cg} , c – постоянная величина, зависящая от точности измерения.

В результате получаем новую точку $A_1(x_{11}, x_{22})$, в которой снова повторяют процедуру до тех пор, пока не достигнут экстремума.

Если целевая функция f и граничные уравнения являются линейными, то для нахождения экстремума чаще всего применяют *ме-*

тоды линейного программирования. В этом случае целевая функция записывается в виде

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \min(\max). \quad (4.67)$$

Ограничения задаются в виде линейных неравенств

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{im}x_m \geq b_i; \quad (4.68)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

где a_{ij} , b_i , c_i – константы;

x_1, x_2, \dots, x_n – независимые переменные.

Метод линейного программирования изучен достаточно полно, для решения задач не требуется сложных вычислений, имеются стандартные программы на ЭВМ.

В ряде случаев встречаются задачи **нелинейного программирования**, целевая функция которых записывается как сумма линейной и нелинейной частей. Если функции непрерывные и выражаются частными производными, то задача оптимизация решается классическими методами на основе дифференциального исчисления. Если переменные дискретны, то задачи решаются методами целочисленного программирования.

Различают также **динамическое программирование**, которое представляет собой математический метод оптимизации решений, специально приспособленный к многоэтапным изменениям. Чтобы решить задачу динамического программирования, необходимо отыскать минимум (максимум) сложной дискретной функции большого количества переменных. Метод динамического программирования сводит эту задачу к простой путем – минимизации простых функций в обратном порядке.

Для оптимизации технологических процессов в строительстве применяется **теория массового обслуживания** (ТМО), которая имеет целью отыскать оптимальные условия, т.е. обеспечить эффективность работы системы в режиме "требование-обслуживание". Под обслуживанием понимают удовлетворение в потребности какой-либо заявки. Например, погрузка породы в надшахтном здании в автосамосвалы

при ее транспортирование в отвал. Таким образом, в ТМО система состоит из числа (потока) требований, обслуживающего прибора (аппарата) и выходящего потока. Число требований создает очередь на обслуживание. При избытке автомобилей, неизбежно возникают простои при погрузке.

Основными характеристиками ТМО являются: число требований \bar{n} ; интенсивность поступления требований λ ; интенсивность обслуживания (пропускная способность) μ ; коэффициент использования системы $\gamma = I/m$; время ожидания в очереди до обслуживания $\bar{t}_0 = n/I$; длительность обслуживания $t_1 = 1/m$; время обслуживания в системе $t_{об} = \bar{t}_0 + \bar{t}_1$; математическое ожидание числа требований $n_c = \bar{n}/\gamma$.

Величины $I, t_0, t_1, t_{об}, n$, как правило, принимают случайные значения, а распределение времени обслуживания по длительности выражается показательным законом.

Задачей ТМО является установление наиболее достоверных зависимостей между интенсивностью потока λ и пропускной способностью μ , количеством требований и эффективностью обслуживания системы. Базируется теория массового обслуживания на анализе случайных процессов.

Для оптимизации случайных процессов используют также **теорию игр**. Теория игр – это математическая теория конфликтов. Конфликт заключается в том, что интересы двух сторон не совпадают. Примером конфликтной ситуации являются спортивные игры. Однако методы теории игр применяют и для решения задач, в которых, например, в качестве "противника" выступает природа.

В процессе проведения системного анализа, наряду с определением экстремальных условий исследуемых моделей, выявляют и другие закономерности в их поведении. После окончания исследований формулируют выводы и принимают решения об использовании полученных результатов.

Выше были приведены основные сведения о некоторых теоретических методах, используемых в горной науке. Их список не полон, с успехом могут применяться и другие методы. В каждом конкретном случае при выполнении НИРС студент должен ознакомиться с ними в специальной литературе.

ЛЕКЦИЯ 10

ТЕМА 5. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Методология экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования – это один из основных способов получения научных данных. В их основе лежит эксперимент, который представляет собой научно поставленный опыт в условиях, позволяющих следить за его ходом, управлять им и воссоздать при необходимости. От пассивного наблюдения эксперимент отличается активным воздействием исследователя на изучаемое явление. Цель эксперимента – проверка теоретических предположений, а также более широкое и глубокое изучение предмета исследования.

Различают эксперименты в естественных и искусственных условиях. Естественный эксперимент проводят в открытых системах при сложном влиянии внешних факторов (социальный, производственный и т.д.). Искусственный эксперимент широко применяется в технических науках, с его помощью изучают изолированное явление в специальных условиях с целью его оценки в количественном или качественном отношении.

Экспериментальные исследования делятся на **лабораторные и производственные**. Лабораторные опыты проводят с применением типовых приборов, специальных моделирующих установок, стендов. Они позволяют получить научную информацию с минимальными затратами, но не всегда полностью моделируют реальное явление или процесс. Поэтому часто возникает потребность в производственных экспериментальных исследованиях. Они имеют целью изучить процесс в реальных условиях с учетом воздействия различных случайных факторов. Такие эксперименты проводят в шахтах, на строящихся объектах. К производственным исследованиям относят также специальные полевые экспедиции по обследованию эксплуатируемых объектов. Одной из разновидностей производственного эксперимента является собирание материалов в организациях, которые накапливают их по стандартным формам. Такие данные подвергаются обработке методами математической ста-

тистики (анкетирование). Производственный эксперимент может проводиться в виде опытов на специальных полигонах.

Зачастую на эксперимент затрачивается много средств и времени, проводится большое количество наблюдений и измерений, получают множество графиков, на обработку и анализ затрачивается много труда. Иногда оказывается, что сделано много лишнего, а иногда, что экспериментатор не четко организовал эксперимент, не правильно выбрал цель, а на её основе сформулировал задачи исследований. Поэтому прежде чем приступить к экспериментальным исследованиям, необходимо четко продумать методологию эксперимента.

Методология эксперимента – это общие принципы, структура эксперимента, его постановка и последовательность выполнения. Методология эксперимента включает в себя следующие основные этапы:

- разработку плана-программы эксперимента;
- выбор средств для проведения эксперимента;
- проведение эксперимента;
- обработку и анализ экспериментальных данных.

Для того чтобы правильно организовать эксперимент, применяют математическую теорию планирования эксперимента, позволяющую повысить точность и уменьшить объем экспериментальных исследований.

В общем случае план-программа эксперимента включает: наименование темы исследований; рабочую гипотезу; методику эксперимента; перечень необходимых материалов, приборов, установок; календарный план работ; смету расходов на выполнение эксперимента.

Основу плана-программы составляет методика эксперимента. **Методика** – это система приемов и способов для последовательного наиболее эффективного экспериментального исследования. Методика включает в себя: цель и задачи эксперимента, выбор варьируемых факторов; обоснование средств и потребного количества измерений; описание проведения эксперимента; обоснование способов обработки и анализа результатов эксперимента.

Определение цели и задач исследования – это один из основных этапов эксперимента. Обосновывают цель на основе анализа информа-

ции, рабочей гипотезы или результатов теоретических исследований. Имеющаяся до начала эксперимента научная информация позволяет судить об ожидаемых закономерностях, а, следовательно, она позволяет сформулировать задачи эксперимента (3-4 задачи).

Выбор варьируемых факторов заключается в установлении основных и второстепенных факторов, влияющих на исследуемый процесс и составления из них убывающего по важности ряда (ранжирование). Основным принципом установления степени важности характеристики является её роль в исследуемом процессе. Для этого изучают процесс в зависимости от какой-то одной переменной при остальных постоянных. Это возможно при небольшом количестве факторов, если же переменных величин много, целесообразно использовать многофакторный анализ и математическое планирование эксперимента.

Выбор необходимых для наблюдений и измерений приборов, оборудования, машин и др. производится на базе выпускаемых каталогов и с помощью специальной науки – метрологии. В первую очередь используют стандартные приборы и машины, работа на которых регламентируется стандартами. В отдельных случаях возникает потребность в создании уникальных приборов, установок и стендов. При этом разработка и конструирование приборов и других средств должна быть тщательно обоснована теоретическими расчетами и практическими соображениями.

При экспериментальном исследовании процесса или явления повторные отчеты, как правило, не одинаковы. Отклонения объясняются различными причинами: неоднородностью свойств объекта исследований, не современностью приборов и классом их точности, особенностями эксперимента и др. Чем больше случайных факторов, влияющих на опыт, тем больше отклонения отдельных измерений от среднего значения. Это требует повторных измерений, следовательно, необходимо знать их потребное минимальное количество. Под минимальным количеством измерений понимают такое их количество, которое в данном опыте обеспечивает устойчивое среднее значение измеряемой величины, удовлетворяющее заданной степени точности. Установление потребного минимального количества измерений имеет

большое значение, поскольку обеспечивает получение объективных результатов при минимальных затратах времени и средств.

Иногда для исключения систематической ошибки, возникающей при субъектном назначении последовательности испытаний, очередность опытов устанавливают с использованием метода рандомизации, суть которого заключается в случайной последовательности опытов, назначаемой с помощью таблицы случайных чисел.

В методике подробно описывают процесс проведения эксперимента. Вначале разрабатывают очередность выполнения операций наблюдения и измерений, а затем описывают каждую операцию в отдельности с учетом выбранных средств измерений. При этом уделяют внимание контролю качества операций, обеспечивая высокую надежность и заданную точность при минимальном количестве измерений.

При проведении экспериментальных работ особое значение имеет добросовестность, терпение, настойчивость, выдержка. Обязательным требованием при проведении эксперимента является ведение журнала наблюдений. Форма журнала может быть произвольной, однако вести его нужно аккуратно, без каких-либо исправлений. При получении резко отличающихся измерений, исполнитель должен указать обстоятельства, сопутствующие указанному измерению, а не исключать его, стремясь получить нужный результат. Экспериментатор должен непрерывно следить за средствами измерений и проводить их рабочую поверку.

Одновременно с производством измерений исполнитель должен проводить предварительную обработку результатов и их анализ, что позволяет контролировать исследуемый процесс, корректировать эксперимент, улучшать методику и повышать эффективность эксперимента.

Особо тщательно необходимо соблюдать указанные требования при проведении производственных экспериментов. Вследствие больших объемов работ и значительной их трудоемкости ошибки, допущенные в процессе эксперимента, могут существенно увеличить продолжительность исследований и уменьшить их точность.

Важным разделом методики является выбор методов обработки и анализа результатов эксперимента. Результаты экспериментов сис-

тематизируется и анализируется, затем их представляют в виде таблиц, графиков, номограмм, формул, что позволяет быстро сопоставлять полученные данные.

Особое место занимают математические методы обработки и анализа опытных данных; установление эмпирических зависимостей; аппроксимация связей между факторами; нахождение критериев и доверительных интервалов и др.

Объем и трудоемкость экспериментальных исследований во многом зависят также от глубины теоретических разработок. Например, если теоретически получена аналитическая зависимость $y=3 e^{-2x}$, однозначно определяющая процесс, то объем эксперимента минимален и направлен на подтверждение зависимости. Если установлен общий вид зависимости $y=a_1 e^{-a_2x}$, то в этом случае задано семейство кривых и в задачу эксперимента входит определение параметров a_1 и a_2 . Объем эксперимента возрастает. И, наконец, при поисковом эксперименте, если теоретических зависимостей не получено, объем экспериментальных работ наиболее значителен, и в этом случае уместно использовать метод математического планирования эксперимента. На объем и трудоемкость эксперимента также влияет его вид. Как правило, полевые эксперименты имеют большую трудоемкость, чем лабораторные.

5.2 Выбор средств измерений и их статистическая оценка

Важным моментом в организации эксперимента является выбор средств измерений. Средства измерений должны отвечать следующим требованиям:

- соответствовать теме, цели и задачам НИР;
- обеспечивать высокую производительность труда с минимальными затратами времени;
- обеспечивать требуемое качество работ, т.е. заданную степень точности при минимальном количестве измерений;
- соответствовать требованиям эргономики, техники безопасности.

Желательно максимально использовать стандартные средства измерений, которые обязательно должны пройти метрологическую поверку.

Общая характеристика измерений. Измерение – это процесс нахождения какой-либо физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств и её сравнения с известной величиной, принятой за единицу (эталон). Теорией и практикой измерений занимается специальная наука – метрология.

Различают измерения по видам измеряемых величин (статические и динамические), способу нахождения величины (прямые, когда величину устанавливают непосредственно из опыта, и косвенные, когда интересующая величина определяется по функциональной зависимости от других величин, устанавливаемых прямыми измерениями). Различают также измерения по классам точности (особо точные, высокоточные, технические). Особо точные – это эталонные измерения с максимально возможной точностью, применяются, например, в экспериментальной физике. Высокоточные измерения имеют погрешность, не превышающую заданную точность, и используются для наиболее ответственных экспериментов и в качестве контрольно-поверочных измерений. Технические измерения используются наиболее широко при экспериментальных исследованиях, их погрешность определяется особенностями средств измерений. Кроме того, различают абсолютные и относительные измерения. Абсолютные – это прямые измерения в единицах измеряемой величины (W – абсолютная влажность грунта в процентах). Относительные – измерения посредством отношения измеряемой величины к одноименной величине, принимаемую для сравнения (относительная влажность грунта W/W_m , где W_m – абсолютная влажность грунта на границе текучести).

Средства измерений. Средства измерений – это совокупность технических средств, которые дают необходимую информацию при выполнении эксперимента и имеют нормированные метрологические свойства.

В зависимости от принципа работы средства измерений подразделяются на пневматические, механические, электрические и т.д. Измерительные средства делят на образцовые и технические. Образцовые средства являются эталонами и предназначены для поверки технических средств. Образцовые средства не обязательно должны быть точнее, они должны иметь большую стабильность и надежность.

К средствам измерений относят меры, измерительный инструмент, измерительные приборы, преобразователи и установки. Мерой называют средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Они могут быть однозначными и многозначными. Измерительным инструментом – называют обычно приспособления, предназначенные для измерения геометрических параметров. Измерительным прибором называют средство измерения, вырабатывающее сигналы информации в форме, удобной для восприятия экспериментатором. В приборах измеряемая величина преобразуется в показание или сигнал.

Приборы классифицируют по различным признакам. По способу отсчета значения измеряемой величины, их делят на показывающие и регистрирующие. Наибольшее распространение получили показывающие приборы, отчетные устройства которых состоят из шкалы и указателя. Однако они менее точны, чем цифровые приборы, которые фиксируют измеряемую величину в виде цифр. Регистрирующие приборы могут быть самопишущими и печатными. В первом случае измеряемая величина выдается в виде графика, а печатные приборы выдают информацию в виде цифр на специальной ленте. Кроме того, приборы классифицируют по точности измерений, стабильности показаний, чувствительности, пределам измерений и т.д.

Измерительный преобразователь – средство измерения, генерирующее сигнал в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но без непосредственного восприятия наблюдателем.

Совокупность функционально связанных приборов, преобразователей и других вспомогательных устройств, обеспечивающая выработку измерительной информации, удобной для наблюдения, называется измерительной установкой. Измерительные установки могут вырабатывать сигналы для автоматической обработки результатов измерений с помощью ЭВМ.

Выходной сигнал измерительных средств фиксируется отчетными устройствами, которые могут быть цифровыми, регистрирующими и шкальными. Число, отсчитываемое по отчетному устройству

при измерениях, называются отсчетом, а переход от отсчета к показаниям прибора осуществляется с помощью постоянной прибора, цены деления шкалы или градуированной кривой. Когда постоянная прибора равна единице измеряемой величины, показания прибора и отсчет численно совпадают.

Шкала является важной частью отсчетного устройства и представляет собой совокупность отметок, соответствующих ряду последовательных значений величин. Шкалы могут быть равномерными и неравномерными. Равномерные шкалы имеют постоянные интервалы и постоянную цену деления, неравномерные шкалы имеют неодинаковые интервалы, а иногда и непостоянную цену деления. Цена деления – это разность значений измеряемой величины, соответствующих двум соседним отметкам. Разность между значениями измеряемой величины, соответствующую началу и концу шкалы, называют диапазоном показаний прибора.

Погрешности измерений. Результаты измерений не могут быть получены абсолютно точно. Это обусловлено несовершенством метода и средств измерений, непостоянными условиями выполнения эксперимента и т.д. Результаты измерений оценивают различными показателями: погрешность, точность и достоверность измерений.

Погрешность измерений – это отклонение результата измерения от истинного значения величины. Степень приближения измерения к действительному значению величины называют **точностью измерений**, она характеризует их качество. Степень доверия к результатам измерения, т.е. вероятность отклонений измерения от действительной величины, характеризуется **достоверностью измерений**.

В практических расчетах используют абсолютную и относительную погрешность. Абсолютной погрешностью Δ называют разность между измеренным x и истинным X значениями измеряемой величины:

$$\Delta = x - X. \quad (5.1)$$

За действительное значение принимают такое значение величины, которое заведомо точнее, чем получаемое при измерениях.

Относительная погрешность обычно выражается в процентах и дает наиболее ясное представление о погрешности, поскольку характеризует соотношение между абсолютной погрешностью и истинной величиной:

$$\delta = (\Delta / X) \cdot 100 \% \quad (5.2)$$

Следует заметить, что точное значение X заранее неизвестно, поэтому погрешности измерений могут оцениваться только приближенно.

Чтобы повысить точность и достоверность измерений необходимо уменьшить погрешности, которые возникают вследствие несовершенства методов и средств измерений, недостатков проведения опыта, влияния различных внешних факторов, субъективных особенностей экспериментатора.

Погрешности классифицируются на систематические и случайные. Систематические погрешности остаются постоянными при повторных экспериментах или изменяются по определенному закону. Их разделяют на пять групп:

- инструментальные погрешности;
- погрешности из-за неправильной установки;
- погрешности в результате действия внешней среды (температуры, магнитных и электрических полей, атмосферного давления, влажности, вибрации и колебаний);
- субъективные погрешности;
- погрешности метода.

Систематические погрешности необходимо обязательно исключить, так как они могут привести к неправильным научным выводам. Они могут быть устранены следующими методами:

- путем регулирования средств измерений, тщательной их поверки, устранения внешних воздействий;
- исключения погрешности в процессе эксперимента путем повторного измерения;
- путем нахождения погрешности с помощью более точного средства измерения и её учета.

Если систематическую погрешность устранить нельзя, то ограничиваются оценкой её границ.

Случайными называют погрешности, которые возникают случайно и не могут быть исключены. Однако при наличии многократных повторений наиболее отклоняющиеся измерения можно исключить с помощью статистических методов. Разновидностью случайных погрешностей являются грубые погрешности или промахи. Наиболее типичными причинами промахов являются ошибки при наблюдениях: неправильный отсчет, опiski при записи результатов, различные манипуляции с приборами.

Измерительные приборы также характеризуются погрешностью и точностью, стабильностью измерений и чувствительностью. Под абсолютной погрешностью прибора понимают величину:

$$b = \pm (x - x_0), \quad (5.3)$$

где x – показание прибора;

x_0 – действительное значение измеряемой величины, определяемое более точным методом.

Часто для оценки погрешности приборов применяют относительную погрешность в процентах:

$$b_{\text{отн}} = \pm ((x - x_0) / x_0) \cdot 100\%. \quad (5.4)$$

Погрешность прибора является важнейшей его характеристикой. Она возникает вследствие некачественного изготовления или неудовлетворительной эксплуатации, что приводит к систематическим погрешностям. Кроме них, возникают и случайные погрешности, обусловленные сочетанием различных факторов. Поэтому основными характеристиками прибора являются суммарные погрешности, определяющие его точность. В зависимости от величины допускаемых погрешностей приборы делятся на классы точности: 1-й – наивысший, 4-й – наинизший.

Разность между максимальным и минимальным показателями прибора называют размахом. Если эта величина непостоянная при прямом и обратном ходах, то эту разность называют вариацией пока-

заний. Под чувствительностью прибора понимают способность отсчитывающего устройства реагировать на изменения измеряемой величины, а под стабильностью – свойства отсчетного устройства обеспечивать постоянство показаний одной и той же величины. Стабильность прибора определяется вариацией показаний.

Все средства измерений должны проходить периодическую поверку, которая может быть государственной, ведомственной и рабочей, проводимой перед началом измерений. Наиболее распространенным способом поверки прибора является его сопоставление с образцовым прибором.

Методы оценки измерений. Общая погрешность измерений в основном определяется случайной погрешностью, учет которой очень важен. Анализ случайных погрешностей основывается на теории случайных ошибок. В основе теории случайных ошибок лежит предположение о том, что при большом числе измерений случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака, встречаются одинаково часто. Большие погрешности встречаются реже, чем малые, или вероятность появления погрешности уменьшается с ростом её величины. При бесконечно большом числе измерений истинное значение измеряемой величины равно среднеарифметическому значению всех результатов измерений, а появление того или иного результата как случайного события описывается нормальным законом распределения.

Различают генеральную и выборочную совокупность измерений. Совокупность всех возможных значений случайной величины в рассматриваемых условиях представляет собой генеральную совокупность. Некоторая часть этих экспериментов, которая имеет место в действительных условиях, является выборочной или выборкой. Число экспериментов, составляющих выборку, представляет её объем. Обычно считают, если число измерений $n > 30$, то среднее значение данной совокупности x приближается к его истинному значению.

Теория случайных ошибок позволяет решить две основные задачи: оценить точность и надежность измерения при данном количестве замеров; определить минимальное количество замеров, гарантирующее требуемую точность и надежность измерения. Наряду с этим

возникает часто необходимость исключить грубые ошибки, определить достоверность полученных данных и др.

Интервальная оценка с помощью доверительной вероятности.

Для большой выборки и нормального закона распределения характеристикой измерения являются дисперсия D или коэффициент вариации:

$$D = \sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1); \quad k_v = \sigma / \bar{x}. \quad (5.5)$$

Дисперсия характеризует однородность измерения. Чем она выше, тем больше разброс. Коэффициент вариации характеризует изменчивость. Чем выше k_v , тем больше изменчивость измерений относительно средних значений. Коэффициент вариации оценивает также разброс при оценке нескольких выборок.

Доверительным называется интервал значений x_i , в который попадает истинное значение x_0 измеряемой величины с заданной вероятностью. Доверительной вероятностью измерения называют вероятность P_0 того, что значение x_0 измеряемой величины попадет в данный доверительный интервал. Эта величина определяется в долях единицы или в процентах.

Пусть необходимо установить вероятность того, что x_0 попадет в диапазон $a \leq x_0 \leq b$. Доверительная вероятность P_0 описывается выражением

$$P_d = P(a < m(x) < b) = \frac{1}{2} (\Phi((b-x)/\sigma) - \Phi((a-x)/\sigma)),$$

где $\Phi(t)$ – функция Лапласа, аргументом которой является

$$t = m / \sigma, \quad (5.6)$$

здесь $m = b - x$; $m = -(a - x)$,

t – гарантийный коэффициент.

Функция Лапласа $\Phi(t)$ является интегральной, ее численные значения $\Phi(t)$ табулированы и изменяются (при t от 0 до $t = 4,0$) соответственно в пределах $\Phi(t)=0$ до $\Phi(t)=0,9999$.

Возможна и иная задача. На основе установленной доверительной вероятности (очень часто ее принимают равной 0,9; 0,95) необхо-

димо установить точность измерений, т.е. доверительный интервал $2m$

Поскольку $P_\delta = \Phi(m/\sigma)$, то по таблице обратным интерполированием можно определить половину доверительного интервала:

$$m = \sigma \cdot \arg \Phi(P_\delta) = \sigma t. \quad (5.7)$$

где $t = \arg \Phi(P_\delta)$ – аргумент функции Лапласа или при малом числе измерений ($n < 10$) аргумент функции Стьюдента, которая также табулирована в зависимости от числа измерений n и вероятности P_δ .

Доверительный интервал характеризует точность измерения данной выборки, а доверительная вероятность – достоверность измерения.

Установление минимального количества измерений. Задача сводится к установлению минимального объема выборки (числа измерений) N_{min} при заданных значениях доверительного интервала $2m$ и доверительной вероятности P_δ . При выполнении измерений необходимо знать их точность Δ , которую обычно характеризуют с помощью среднего знания среднеквадратичного отклонения σ_0 :

$$\Delta = \frac{S_0}{x}, \quad \text{где } S_0 = S/\sqrt{n} = \sqrt{\frac{S^2}{n}}. \quad (5.8)$$

Значение σ_0 также называют средней ошибкой. Доверительный интервал ошибки измерения Δ определяется аналогично тому, как и для измерений $m = t \cdot S_0$. Зная t , по таблице легко определить доверительную вероятность ошибки измерения.

Часто возникает необходимость в определении минимального количества измерений по заданной точности и доверительной вероятности. В этом случае аналогично выражению (5.7) и с учетом условия (5.8) запишем

$$m = S \cdot \arg \Phi(P_\delta) = (S_0/\sqrt{n}) \cdot t. \quad (5.9)$$

Отсюда, полагая $N_{min} = n$, имеем

$$N_{min} = \frac{S^2 t^2}{S_0^2} = \frac{k_\delta^2 t^2}{\Delta^2}, \quad (5.10)$$

где k_g – коэффициент вариации, %;

Δ – точность измерения, %.

Параметр N_{min} вычисляется в следующей последовательности:

– проводят предварительный эксперимент с количеством измерений n , которое составляет в зависимости от трудоемкости опыта от 20 до 50;

– вычисляют среднеквадратичное отклонение $s = \sqrt{s^2}$;

– в соответствии с поставленными задачами эксперимента устанавливают требуемую точность измерений (m , Δ), которая должна быть не менее точности прибора;

– устанавливают нормированное отклонение t , которое также задают в зависимости от точности измерений, например, при большей точности $t=3,0$, при малой – $t=2,0$;

– из выражений (5.9) и (5.10) определяют N_{min} . В дальнейшем в процессе эксперимента число измерений не должно быть меньше N_{min} .

Оценки измерений с помощью σ и σ_0 по приведенным методам справедливы при $n > 30$. Для нахождения границ доверительного интервала при малых выборках применяют метод, предложенный в английском математиком В.С. Госсетом (псевдоним Стьюдент). Кривые распределения Стьюдента в случае $n \rightarrow \infty$ (практически при $n > 20$) переходят в кривые нормального распределения.

Для малой выборки доверительный интервал

$$m_{cm} = s_0 \cdot a_{cm}, \quad (5.11)$$

где a_{cm} – коэффициент Стьюдента, принимаемый по таблице в зависимости от значения доверительной вероятности Φ_{cm} .

Зная m_{cm} , можно вычислить действительное значение изучаемой величины для малой выборки:

$$x_0 = \bar{x} \pm m_{cm}. \quad (5.12)$$

Возможна иная постановка задачи. Пусть известны n известных измерений малой выборки. Необходимо определить доверительную вероятность P_0 при условии, что погрешность среднего значения не

выйдет за пределы $\pm m_{cm}$. Задачу решают в такой последовательности. Вначале вычисляют \bar{x} , s_0 и a_{cm} , а затем, с помощью величины a_{cm} , известного n и таблицы определяют доверительную вероятность.

Исключение грубых ошибок. Появление этих ошибок ощутимо влияет на результат измерений. При анализе эксперимента необходимо, прежде всего, исключить грубые ошибки. Однако, до того как исключить то или иное измерение, необходимо убедиться, что это действительно грубая ошибка.

Известно несколько методов определения грубых ошибок статистического ряда. Наиболее простым способом исключения из ряда резко выделяющегося измерения является правило трех сигм, поскольку разброс случайных величин от среднего значения не превышает

$$x_{\max, \min} = \bar{x} \pm 3s. \quad (5.13)$$

Более достоверными являются методы, базирующиеся на использовании доверительного интервала. Пусть имеется статистический ряд малой выборки, подчиняющийся закону нормального распределения. При наличии грубых ошибок критерии их появления вычисляют по формулам

$$b_1 = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{s \sqrt{\frac{n-1}{n}}}; \quad b_2 = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{s \sqrt{\frac{n-1}{n}}}, \quad (5.14)$$

где x_{\max} , x_{\min} – наибольшее и наименьшее значения из n измерений.

Установленные критерии сопоставляют с максимальным значением b_{\max} , приведенным в таблице в зависимости от доверительной вероятности и числа измерений. После исключения грубых ошибок определяют новые значения \bar{x} и σ .

Методика выявления грубых ошибок с использованием критерия В.И. Романовского сводится к следующему. Задаются доверительной вероятностью P_δ , и по таблице в зависимости от n находится ко-

эффицент q . Вычисляют предельно допустимую абсолютную ошибку отдельного измерения

$$\Delta_{np} = S \cdot q. \quad (5.15)$$

Если $\bar{x} - x_{\max} > \Delta_{np}$, измерение x_{\max} исключают из ряда наблюдений.

Для приближенной оценки можно применять такую методику:

- вычислить по (5.5) среднеквадратичное отклонение σ ;
- определить с помощью (5.8) среднюю ошибку σ_0 ;
- принять доверительную вероятность \bar{P}_0 и найти доверитель-

ный интервал m_{ct} из формулы (5.11);

- окончательно установить действительное значение измеряемой величины по формуле (5.12).

Определение ошибки функции. Во многих случаях в процессе экспериментальных исследований приходится иметь дело с косвенным измерениями. При этом неизбежно в расчетах применяют функциональные зависимости типа $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Поскольку в данную функцию подставляют не истинные, а приближенные значения, то и окончательный результат также будет приближенным. В связи с этим одной из задач исследований является определение ошибки функции, если известны ошибки их аргументов.

При исследовании функции одного переменного предельные абсолютные Δ_{np} и относительные d_{np} ошибки (погрешности) вычисляют по формулам:

$$\Delta_{np} = \pm \Delta x \cdot f'(x); \quad (5.16)$$

$$d_{np} = \pm d \ln(x), \quad (5.17)$$

где $f'(x)$ – производная функции $f(x)$;

$d \ln$ – дифференциал натурального логарифма функции.

Если исследуется функция многих переменных, то

$$\Delta_{np} = \pm \sum_1^n \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} dx_i \right|; \quad (5.18)$$

$$d_{np} = \pm d |\ln(x_1, x_2, \dots, x_n)|. \quad (5.19)$$

В формулах (5.18) и (5.19) под знаком суммы и дифференциала понимают абсолютные величины. Порядок определения ошибок с помощью этих уравнений следующий:

– определяют абсолютные и относительные ошибки аргументов (независимых переменных). Обычно величина $x_0 \pm \Delta$ каждого переменного измерена, следовательно, абсолютные ошибки для аргументов известны, т.е. $\Delta_{x_1}, \Delta_{x_2}, \dots, \Delta_{x_n}$;

– вычисляют относительные ошибки независимых переменных:

$$d_{x_1} = \frac{\Delta_{x_1}}{x_0}; d_{x_2} = \frac{\Delta_{x_2}}{x_0}, \dots, d_{x_n} = \frac{\Delta_{x_n}}{x_0}. \quad (5.20)$$

– находят частные дифференциалы функции и по формуле (5.18) вычисляют Δ_{np} в размерностях функции и по $f(y)$;

– вычисляют по (5.19) относительную погрешность d_{np} , %.

ЛЕКЦИЯ 11

5.3 Рациональное планирование эксперимента

Основные понятия. Традиционный экспериментальный метод исследования заключается в установлении зависимости при изменении одного фактора и постоянстве остальных (однофакторный эксперимент). Этот метод обладает рядом существенных недостатков. Основным из них является не всегда корректное допущение о возможности стабилизации всех переменных исследуемого объекта при последовательном изучении каждого из них. Кроме того, такой подход обладает исключительной трудоемкостью. Более рационально планировать эксперимент с использованием методов математической статистики и теории вероятностей.

Под планированием экспериментальных исследований понимают математическое обоснование количества изучаемых проб (точек, объектов), последовательности измерений, числа влияющих факторов и уравнений их рассмотрения в зависимости от поставленной задачи с целью достижения максимальной информативности эксперимента, достоверности данных и получаемых зависимостей при минимальных затратах труда. Таким образом, рациональное планирование эксперимента преследует следующую основную цель: как провести эксперимент с минимальной трудоемкостью и наименьшим количеством измерений, получая при этом максимум достоверной информации.

В основу планирования эксперимента Р.А. Фишером (в 1925 году) был положен метод дисперсионного анализа и использование так называемого латинского квадрата. В наше время теория рационального планирования эксперимента включает несколько направлений, среди которых можно выделить:

- планирование многофакторного эксперимента на основе дисперсионного анализа;
- планирование экстремальных экспериментов;
- планирование отсеивающих экспериментов;
- планирование многофункциональных экспериментов на основе регрессионного анализа.

Методы рационального планирования эксперимента позволяют одновременно изучить влияние на исследуемый объект ряда факторов (многофакторный эксперимент). Они основаны на математической теории, которая определяет оптимальные условия эксперимента, в том числе и при неполном значении физической сущности явления. Для этого математические методы используют не только на стадии обработки результатов измерений, но также при подготовке и проведении опытов. Это позволяет с помощью эксперимента исследовать и оптимизировать сложные процессы и системы, обеспечивая высокую эффективность и точность определения исследуемых факторов.

При планировании экспериментальных исследований обычно предусматривается решение таких вопросов:

- определение величины и количества интервалов между экспериментальными точками;
- установление числа опытов при фиксированных параметрах на различных участках области изменения независимых переменных;
- разработку плана и последовательности проведения опытов.

Решение этих задач часто усложняется необходимостью учета ряда специфических обстоятельств, связанных с используемой техникой, с сущностью явления и глубиной его изучения, с реальными возможностями постановки и проведения опытов. Однако в настоящее время установлены некоторые общие положения, которые необходимо соблюдать при рациональном планировании экспериментальных исследований. Так, например, теория математического планирования эксперимента основывается на ряде концепций, которые обеспечивают успешную реализацию задач исследования. К ним относятся концепции рандомизации, последовательного проведения эксперимента, математического моделирования, оптимального использования факторного пространства и ряд других.

Принцип *рандомизации* заключается в том, что в план эксперимента вводят элемент случайности. Для этого эксперимент составляют так, чтобы факторы, трудно поддающиеся контролю, учитывать статистически и исключать как систематические ошибки.

При *последовательном проведении эксперимента* его выпол-

няют поэтапно, а результаты каждого этапа анализируют и принимают решение о целесообразности проведения дальнейших исследований (рис. 5.1). В результате эксперимента получают уравнение регрессии, которое называют *математической моделью* процесса. Под моделью понимают не абсолютно точное описание явления (подобно закону), а приближенное выражение, которое удовлетворительно характеризует явление в некоторой локальной области факторного пространства. Для описания одного и того же явления можно предложить несколько моде-



Рисунок 5.1 – Структурная схема эксперимента с целью оптимизации исследуемого процесса

лей, оценка которых производится по критерию Фишера. Так как степень полинома, адекватно описывающего процесс, предсказать невозможно, то сначала пытаются описать явление линейной моделью, а затем (если она неадекватна) повышают степень полинома, т.е. проводят эксперимент поэтапно.

Оптимальное использование факторного пространства заключается в том, что состояние объекта в каждом опыте определяется по результату одновременного оптимального варьирования n – факторов в m – мерном пространстве. Это позволяет добиться значительного увеличения точности расчета коэффициентов полученной модели и уменьшения трудоемкости эксперимента.

Классические и факторные планы проведения экспериментальных исследований. При планировании экспериментальных исследований, прежде всего, необходимо установить число независимых переменных, влияющих на изучаемый параметр. Обычно число независимых переменных равно 3, 4, 5 и более. Планирование таких многофакторных экспериментов осуществляется с использованием классических и факторных планов.

Классический план можно считать универсальным, так как его применяют при любых экспериментальных исследованиях. Факторный план является более точным и менее трудоемким, однако он ограничивается изучением определенных процессов и явлений, поэтому имеет ограниченное применение.

Рассмотрим подробнее эти планы. При классическом планировании эксперимента все независимые переменные, кроме одной, например X , фиксируются, а переменная X варьируется во всем диапазоне изменения. Затем задаются новые значения независимым переменным Y, Z , и вновь варьируется X и т.д. Если число интервалов равно ρ , то в этом случае необходимо сделать опыты на $k; p$ уровнях (здесь k – число опытов при всех фиксированных параметрах на одном уровне).

Если известно, что зависимая переменная W является той или иной функцией независимых переменных, то объем эксперимента удастся немного сократить. Например, если

$$W = a \cdot X^n + b \cdot Y^k + c \cdot Z^m, \quad (5.21)$$

то можно сделать три группы исследований: в первой фиксируют какую-нибудь пару значений Y и Z , изменяя X во всем интервале, что позволяет определить константы a и n ; во второй – фиксируют какие-либо значения X и Z , изменяя Y во всем диапазоне, что позволяет установить b и k , в третьем – фиксируют какие-либо значения X и Y , изменяя Z во всем интервале, и определяя c и m .

Факторные планы применяют тогда, когда независимая функция W имеет вид

$$W=f_1(X)+f_2(Y)+f_3(Z); \quad (5.22)$$

$$W=\Phi_1(X)\cdot\Phi_2(Y)\cdot\Phi_3(Z). \quad (5.23)$$

В последнем случае путем логарифмирования выражения (5.23) можно получить

$$\ln W=\ln\Phi_1(X)+\ln\Phi_2(Y)+\ln\Phi_3(Z). \quad (5.24)$$

Вводя обозначения $\zeta=\ln W$; $j_1(x)=\ln\Phi_1(X)$; $j_2(Y)=\ln\Phi_2(Y)$; $j_3(Z)=\ln\Phi_3(Z)$, получим

$$\zeta=j_1(X)+j_2(Y)+j_3(Z). \quad (5.25)$$

Чаще всего приходится иметь дело с экспериментальным изучением парных зависимостей между первичным фактором (аргументом) и вторичным фактором. Последовательность операций при однофакторном анализе проиллюстрируем на примере экспериментальных взрывов в полевых выработках (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Зависимость удельного расхода ВВ (кг/м³) от прочности пород на одноосное сжатие

Номер опыта n	Прочность пород на одноосное сжатие σ_c , МПа (уровни k)				
	60	100	140	180	220
1	3,1	3,9	4,2	4,9	5,3
2	3,2	3,7	4,3	5,1	5,4
3	4,3	4,2	4,9	5,0	5,1
4	2,7	4,3	4,0	5,2	5,0
5	4,1	4,0	4,5	4,8	4,9
Среднее	3,48	4,02	4,38	5,00	5,14

Как видно из табл. 5.1, эксперимент выполнен на пяти уровнях ($k = 5$) прочности подрываемых пород, причем на каждом уровне измерения повторялись пять раз, т.е. $n = 5$.

Для определения значимости влияния прочности горных пород на удельный расход ВВ при проведении буровзрывных работ в полевых выработках сделаем такие расчеты:

а) определим сумму квадратов всех наблюдений:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n X_{ij}^2 = 503,23;$$

б) определим среднюю сумму квадратов по столбцам:

$$Q_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 = \frac{1}{5} 2471,87 = 494,37;$$

в) определим средний квадрат общей суммы:

$$Q_3 = \frac{1}{k \cdot n} \left(\sum_{i=1}^k X_i^2 \right) = \frac{1}{5 \cdot 5} 12122,01 = 484,88;$$

г) рассчитаем дисперсии S_s^2 и S_0^2 :

$$S_s^2 = \frac{Q_2 - Q_3}{n-1} = \frac{494,37 - 484,88}{4} = \frac{9,49}{4} = 2,37;$$

$$S_0^2 = \frac{Q_1 - Q_3}{k(n-1)} = \frac{503,23 - 494,37}{5 \cdot 4} = \frac{8,86}{20} = 0,443;$$

д) сравним дисперсии S_s^2 и S_0^2 по критерию Фишера, для чего используем так называемое распределение Фишера:

$$F = \frac{S_s^2}{S_0^2} = \frac{2,37}{0,443} = 5,35.$$

Полученное значение F сравним с квантилями распределения Фишера для степеней свободы $f_1 = k - 1 = 4$ и $f_2 = k(n - 1) = 20$. При уровне значимости 0,05 имеем $F_{0,95}(4; 20) = 2,9$. Таким образом, $F > 2,9$, что подтверждает тот факт, что прочность горных пород при одноосном сжатии существенно влияет на удельный расход взрывчатых веществ при проведении взрывных работ в полевых выработках.

е) вычислим дисперсию принятого фактора по формуле:

$$s_d^2 = \frac{S_s^2 - S_0^2}{n} = \frac{2,37 - 0,443}{5} = 0,385.$$

Планирование многофакторного эксперимента. Обычно вторичный (функциональный) фактор является зависимым не от одного, а от нескольких факторов (аргументов). Чтобы выявить влияние каждого из них, необходимо задать ему не менее 4-5 различных значений. Однако при этом для полного исследования взаимного влияния нескольких факторов на один и тот же вторичный фактор будет необходимо очень большое число опытов. Например, для полного исследования четырех факторов, принимающих по 5 значений, необходимо провести $5^4 = 625$ комбинаций опытов, не учитывая их повторения в идентичных условиях.

Такое большое количество экспериментов очень сложно провести, поэтому число опытов обычно сокращают за счет исследования лишь части наиболее существенных факторов; уменьшения количества значений и уровней каждого из факторов; исследования влияния каждого из факторов лишь при некоторых частных значениях других факторов.

Рассмотренный ранее пример однофакторного эксперимента включает в себя все возможные уровни факторов в диапазоне их изменения. Такой эксперимент называется полным факторным экспериментом. Число попыток при таком эксперименте равняется произведению уровней всех факторов (для трехфакторного – $5^3 = 125$). Поэтому при большом числе факторов уместен дробный факторный эксперимент, при котором ряд сочетаний уровней пропускается, в результате чего число попыток уменьшатся.

Если проводится двухфакторный эксперимент на пяти уровнях для обоих факторов, то число опытов составит 25. Все сочетания факторов можно изобразить в виде соответствующего квадрата, где латинскими буквами *A* и *B* обозначены факторы (рис. 5.2). Индекс при этих буквах обозначает уровень исследуемого фактора. Такие квадраты Фишер назвал латинскими.

Необходимо иметь в виду, что к факторам *A* и *B* можно добавить третий фактор *C*, не меняя числа попыток. Однако при этом не

<p>а)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>A_1</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_1</td><td>B_1</td><td>B_1</td><td>B_1</td><td>B_1</td></tr> <tr><td>A_1</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_2</td><td>B_2</td><td>B_2</td><td>B_2</td><td>B_2</td></tr> <tr><td>A_1</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_3</td><td>B_3</td><td>B_3</td><td>B_3</td><td>B_3</td></tr> <tr><td>A_1</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_4</td><td>B_4</td><td>B_4</td><td>B_4</td><td>B_4</td></tr> <tr><td>A_1</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_5</td><td>B_5</td><td>B_5</td><td>B_5</td><td>B_5</td></tr> </table>	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_1	B_1	B_1	B_1	B_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_2	B_2	B_2	B_2	B_2	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_3	B_3	B_3	B_3	B_3	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_4	B_4	B_4	B_4	B_4	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_5	B_5	B_5	B_5	B_5	<p>б)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>A_1</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_1</td><td>B_1</td><td>B_1</td><td>B_1</td><td>B_1</td></tr> <tr><td>C_1</td><td>C_2</td><td>C_3</td><td>C_4</td><td>C_5</td></tr> <tr><td>A_2</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_2</td><td>B_2</td><td>B_2</td><td>B_2</td><td>B_2</td></tr> <tr><td>C_2</td><td>C_3</td><td>C_4</td><td>C_5</td><td>C_1</td></tr> <tr><td>A_3</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_3</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_3</td><td>B_3</td><td>B_3</td><td>B_3</td><td>B_3</td></tr> <tr><td>C_3</td><td>C_4</td><td>C_5</td><td>C_3</td><td>C_2</td></tr> <tr><td>A_4</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_4</td><td>B_4</td><td>B_4</td><td>B_4</td><td>B_4</td></tr> <tr><td>C_4</td><td>C_5</td><td>C_1</td><td>C_2</td><td>C_3</td></tr> <tr><td>A_5</td><td>A_2</td><td>A_3</td><td>A_4</td><td>A_5</td></tr> <tr><td>B_5</td><td>B_5</td><td>B_5</td><td>B_5</td><td>B_5</td></tr> <tr><td>C_5</td><td>C_1</td><td>C_2</td><td>C_3</td><td>C_4</td></tr> </table>	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_1	B_1	B_1	B_1	B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	A_2	A_2	A_3	A_4	A_5	B_2	B_2	B_2	B_2	B_2	C_2	C_3	C_4	C_5	C_1	A_3	A_2	A_3	A_3	A_5	B_3	B_3	B_3	B_3	B_3	C_3	C_4	C_5	C_3	C_2	A_4	A_2	A_3	A_4	A_5	B_4	B_4	B_4	B_4	B_4	C_4	C_5	C_1	C_2	C_3	A_5	A_2	A_3	A_4	A_5	B_5	B_5	B_5	B_5	B_5	C_5	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_1	B_1	B_1	B_1	B_1																																																																																																																										
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_2	B_2	B_2	B_2	B_2																																																																																																																										
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_3	B_3	B_3	B_3	B_3																																																																																																																										
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_4	B_4	B_4	B_4	B_4																																																																																																																										
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_5	B_5	B_5	B_5	B_5																																																																																																																										
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_1	B_1	B_1	B_1	B_1																																																																																																																										
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5																																																																																																																										
A_2	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_2	B_2	B_2	B_2	B_2																																																																																																																										
C_2	C_3	C_4	C_5	C_1																																																																																																																										
A_3	A_2	A_3	A_3	A_5																																																																																																																										
B_3	B_3	B_3	B_3	B_3																																																																																																																										
C_3	C_4	C_5	C_3	C_2																																																																																																																										
A_4	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_4	B_4	B_4	B_4	B_4																																																																																																																										
C_4	C_5	C_1	C_2	C_3																																																																																																																										
A_5	A_2	A_3	A_4	A_5																																																																																																																										
B_5	B_5	B_5	B_5	B_5																																																																																																																										
C_5	C_1	C_2	C_3	C_4																																																																																																																										

Рисунок 5.2 – Латинские квадраты двухфакторного (а) и трехфакторного (б) экспериментов

все сочетания A , B , C будут присутствовать в квадрате. Если разместить уровни фактора C так, чтобы в каждой стороне и столбце встречались все его уровни, то, усредняя данные по строкам и рядкам, будем иметь средние, постоянные значения фактора C , что не должно исказить влияние факторов A и B на изучаемый параметр (рис. 5.2,б).

Далее можно добавить к этому плану еще и четвертый фактор, чтобы в каждой строке и каждом столбце такого плана были бы все пять уровней третьего и следующих факторов и одновременно не один уровень третьего и следующих факторов не встречались вместе по всей таблиц более одного раза. Таким образом, избежать большого объема экспериментальных исследований можно лишь в том случае, если спланировать сочетания различных факторов так, чтобы при минимальном числе опытов наиболее равномерно охватить всю площадь таблицы возможных сочетаний влияющих факторов.

Планирование экстремальных экспериментов. Наиболее широко используют планы экстремального эксперимента, позволяющие описать модель с помощью полинома и оптимизировать исследу-

дуемый объект. Эти планы представляют собой систему опытов, содержащую возможные неповторяющиеся комбинации выбранных факторов при заданных уровнях их варьирования. Метод позволяет изучать влияние многих факторов на исследуемый процесс в некоторой области факторного пространства, лежащего в окрестности выбранной точки с координатами $(Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n})$. Полученный полином k -й степени (функция отклика) для математического описания процесса можно использовать также для его оптимизации, т.е. определять параметры, при которых явление или процесс будет протекать наиболее эффективно.

Экстремальный эксперимент основан на том, что исследуемую непрерывную функцию $y = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$, имеющую все производные в заданной точке с координатами $Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n}$, можно разложить в ряд Тейлора:

$$y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \dots + \beta_n Z_n + \beta_{12} Z_1 Z_2 + \dots + \beta_{(n-1)n} Z_{n-1} Z_n + \beta_{11} Z_1^2 + \beta_{22} Z_2^2 + \dots + \beta_{nn} Z_n^2, \quad (5.27)$$

где β_0 – значение функции отклика в начале координат $Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n}$;

$$b_i = \frac{\partial y}{\partial z_i}; \quad b_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial z_i \partial z_j}; \quad b_{ii} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 y}{\partial z_i^2}. \quad (5.28)$$

Ряд Тейлора аналогичен уравнению регрессии:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + a_{12} x_1 x_2 + \dots + a_{(n-1)n} x_{n-1} x_n + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + \dots + a_{nn} x_n^2, \quad (5.29)$$

где a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} – коэффициенты регрессии;

x_i – кодированная переменная, введенная в целях упрощения арифметических расчетов и равная

$$x_i = (z_i - z_{0i}) / \Delta z_i; \quad \Delta z_i = (z_{i\max} - z_{i\min}) / 2; \quad z_{0i} = (z_{i\max} + z_{i\min}) / 2.$$

Следовательно, x_i является относительной величиной, максимальному значению $z_{i\max}$ соответствует $x_i = +1$, а минимальному $z_{i\min}$ соответствует $x_i = -1$.

Коэффициенты регрессии уравнения (5.29) вычисляются методами математической статистики и представляют они собой приближен-

ную оценку коэффициентов $\beta_0, \beta_i, \beta_j$ и т.д. в уравнении (5.27), поэтому уравнение (5.29) описывает исследуемый объект только с определенной степенью точности.

Уравнение (5.29) широко используется для получения математической модели объектов исследования, хотя оно и не содержит информации о механизме явлений и его физико-химических свойствах. В математической теории эксперимента разработаны оптимальные планы получения уравнения типа (5.29). Определение коэффициентов регрессии и анализ уравнения производят с помощью ЭВМ.

Планы оптимального эксперимента реализуются в такой последовательности (рис. 5.1):

- оценка информации и определение n факторов, наиболее существенных для исследуемого процесса;
- использование математической модели в виде линейной функции отклика;
- анализ выбранной модели;
- нахождение экстремума в области n -мерного фактора пространства путем использования полинома k -й степени;
- если модель неадекватна, то в качестве модели выбирают полиномы более высокого порядка.

Планирование экстремального эксперимента с целью описания исследуемого объекта. Планирование эксперимента начинается со сбора, изучения и анализа имеющихся данных об объекте. В результате определяют выходной параметр y и входные – z_i . Выходной параметр (переменная состояния объекта) должен иметь количественную характеристику, т.е. измеряться с достаточной степенью точности и однозначно характеризовать объект исследования. Входные параметры z_i должны иметь границы изменения ($z_{i\max} - z_{i\min}$), причем при различных комбинациях факторов z_i переменная состояния объекта y не должна выходить из области допустимых значений. Между фактором z_i и значением y необходимо однозначное соответствие. Факторы z_i между собой взаимно независимы. В целях упрощения вычислений удобно пользоваться относительными переменными $x_i, \Delta z_i, z_{0i}$. Значениям $z_{i\max}$ и $z_{i\min}$ соответствует $x_i = +1$ и $x_i = -1$.

Среди планов экстремального эксперимента наиболее простыми являются планы полного факторного эксперимента (ПФЭ), в случае реализации которых определяется значение параметров состояния объекта y при всех возможных сочетания уровней варьирования их факторов z_i . Если мы имеем дело с n -факторами, каждый из которых устанавливается на q уровнях, то для того, чтобы осуществить полный факторный эксперимент, необходимо поставить $m = q^n$ опытов. С увеличением q резко возрастает количество опытов, поэтому если $q > 2$, планы ПФЭ редко используются. Наибольшее распространение получили планы типа 2^n .

Рассмотрим пример. Допустим, что необходимо исследовать явление в зависимости от изменения двух факторов z_1 и z_2 методом полного двухфакторного эксперимента. Предположим, что явление описывается линейным полиномом, т.е. поверхность отклика представляет собой плоскость, характеризуемую полиномом

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2. \quad (5.30)$$

Чтобы построить поверхность отклика в виде плоскости, достаточно провести четыре опыта. Наиболее удобно выбранные факторы варьировать на верхнем и нижнем уровнях, что соответствует $x_i = +1$ и $x_i = -1$. Для удобства планирования эксперимента составляют план-матрицу (табл. 5.2) двухфакторного эксперимента, в соответствии с которым и проводят исследования.

Таблица 5.2 – План-матрица двухфакторного эксперимента

Номер опыта j	Факторы x_i		Функция отклика y
	x_1	x_2	
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Первый опыт проводят при минимальных значениях факторов z_1 и z_2 , четвертый – при максимальных значениях z_1 и z_2 , второй при ми-

нимальном значении z_2 и максимальном z_1 , а третий – наоборот.

Как следует из табл. 5.2. принцип построения матриц планирования полного факторного эксперимента заключается в том, что уровни варьирования первого фактора чередуются от опыта к опыту, частота смены уровней каждого последующего фактора вдвое меньше, чем у предыдущего. У последнего уровня факторы изменяются всего два раза.

Матрица планирования полного факторного эксперимента в этом случае обладает следующими свойствами:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij}=0; \quad \sum_{j=1}^m x_{ij}^2=m; \quad \sum_{j=0}^m x_{jn}x_{in}=0. \quad (5.31)$$

где m – число опытов полного факторного эксперимента;

j – номер опыта;

i и n – номер факторов.

Свойство, выраженное уравнениями (5.31), называется ортогональностью, а матрица – ортогональной. Это свойство обеспечивает относительную простоту вычисления коэффициентов регрессии, которые определяют по формулам:

$$A_0=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^m y_j; \quad a_j=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^m x_{ij}y_j; \quad a_{in}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^m x_{ij}x_{jn}y_j. \quad (5.32)$$

Формулы (5.32) справедливы только при вычислении коэффициентов линейного полинома. В самом же общем виде коэффициенты регрессии вычисляют с помощью многочленов Чебышева, обеспечивающих минимум суммы квадратов отклонений.

Некоторые из коэффициентов уравнения регрессии могут оказаться незначительными, т.е. пренебрежимо малыми. Коэффициент регрессии значим и им пренебрегать нельзя, если:

$$|a| \geq D_a \cdot t, \quad (5.33)$$

где t – критерий Стьюдента;

D_a – дисперсия при определении регрессии здесь $D_a=D_y/\sqrt{m}$,

здесь D_y – дисперсия среднего значения фактора.

Полученные таким образом уравнения линейной регрессии проверяют по условию адекватности (например, по критерию Фишера).

При большом числе факторов, в случае линейного полинома, для нахождения коэффициентов регрессии, используя метод дробного факторного эксперимента (ДФЭ), можно уменьшить количество опытов, реализовав лишь часть матрицы полного факторного эксперимента (например, $\frac{1}{2}$ или $\frac{1}{4}$ часть).

Если же экспериментальные данные не согласуются с линейной моделью, то исследуемый процесс стремятся описать поверхностью второго порядка, а двухуровневого варьирования факторов x_i в этом случае недостаточно. При использовании ПФЭ типа 3^n резко возрастает количество опытов, план становится трудоемким, а формулы – громоздкими.

В этом случае проще использовать центральные композиционные планы (ЦКП), которые можно получить из планов типа 2^n . Для этого к реализованному плану линейного полинома добавляют опыты в промежуточных (звездных) точках и в центре плана.

Более точными планами по сравнению с ортогональными являются ротабельные планы, что достигается благодаря увеличению количества опытов в центре плана и случайному выбору так называемого звездного плеча. Существуют и другие виды планов, изданы даже специальные каталоги планов эксперимента, в которых проводится сравнительная их оценка, и даются рекомендации по выбору применительно к конкретным условиям эксперимента.

Оптимизация технологических процессов с использованием планирования эксперимента. Важное место в теории планирования эксперимента занимают вопросы оптимизации исследуемых процессов и многокомпонентных систем, наибольшая эффективность которых, достигается только в оптимальных условиях, характеризующихся экстремальными значениями y_j .

Оптимизация процесса представляет собой целенаправленный поиск значений влияющих факторов, при которых достигается экстремум критерия оптимальности. Оптимизацию процессов обычно осуществляют в условиях ограничений на влияющие факторы и исследуемые функции отклика, поскольку как факторы, так и функции могут изменяться только в определенных границах. При этом используют различные виды планов (ПФЭ, ортогональные и ротабельные, ЦКП и др.).

Рассмотрим в качестве примера метод крутого восхождения или наискорейшего спуска. Допустим, что в некоторой окрестности точки y_1 с координатами z_1, z_2 исследуемая функция отклика, характеризующая процесс, описывается полиномом

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2.$$

Один из факторов, выраженных в натуральных величинах, принимают за базовый, например x_1 . Вычисляют для него произведение $a_1\Delta z_1$, где a_1 – коэффициент регрессии, Δz_1 – интервал варьирования первого фактора. Далее для базового фактора выбирают шаг движения Δz_{01} , с учетом которого производится оптимизация. Обычно $\Delta z_1 > \Delta z_{01}$, после этого определяют $v = \Delta z_1 / (a_1\Delta z_1)$. Затем вычисляют шаги движения к оптимуму для всех остальных факторов, в данном случае $\Delta z_{02} = v \cdot a_2\Delta z_2$.

К оптимуму движутся из центра плана. На каждом новом шаге добавляют Δz_{0i} к соответствующим предыдущим значениям факторов z_i . Так, осуществляют оптимизацию методом крутого восхождения. Наряду с этим часто используют для оптимизации процессов методы Гауса-Зейделя, симплексов и др.

ЛЕКЦИЯ 12

5.4 Лабораторные экспериментальные исследования

В горной науке лабораторные экспериментальные исследования находят широкое применение. С их помощью уточняют результаты экспериментально-производственных наблюдений, что сокращает объем работ, выполняемых в шахтных условиях. Они дают также необходимый материал для проверки аналитических решений и являются необходимым этапом при разработке и обосновании гипотез.

Огромное преимущество лабораторных исследований состоит в том, что для установления взаимосвязи явлений в процессе эксперимента можно менять условия, исследуя влияние того или иного фактора.

В настоящее время в лабораторных условиях выполняют исследования по двум основным направлениям:

- определяют физико-механические свойства горных пород на образцах (плотностные, деформационные, прочностные, акустические, гидравлические, тепловые, электромагнитные, горно-технические параметры);

- моделируют основные процессы и явления, связанные с горными работами (действие взрыва; перемещение отбитой горной массы под действием гравитационных сил; распределение напряжений вокруг выработок; механизм сдвижения, деформации и разрушения пород вокруг очистных и подготовительных выработок; взаимодействие крепи с массивом горных пород; процессы вентиляции, транспорта и пр.).

Физико-механические свойства горных пород необходимы для исследования процессов, происходящих в горных породах под воздействием горного давления. Эти знания помогают создавать новые методы добычи и переработки полезных ископаемых, а также средства контроля и управления процессами горного производства.

Сравнение лабораторных методов изучения свойств пород на образцах с натурными методами показывает, что они гарантируют большую стабильность измеренных величин, дают более достоверные данные для классификации пород, позволяют более четко выявить зависимости

свойств от различных факторов. Определение свойств на образцах менее трудоёмко и позволяет неоднократно производить измерения.

По своему объёму образец часто соответствует объёмам пород, подверженных разрушению при различных производственных процессах, что позволяет использовать полученные показатели в технологических расчетах. Для процессов, происходящих в большем объёме массива, можно использовать методы перехода к свойствам породы в массиве путем учета факторов, обуславливающих отличия этих свойств.

Именно поэтому в настоящее время широкое распространение имеют лабораторные методы определения физико-механических параметров образцов пород, многие из которых стандартизированы.

Моделирование явлений и процессов, подобных происходящим в природе, широко используется в различных областях горной науки. Экспериментальное моделирование возможно двух видов: физическое и аналоговое. Физическое моделирование предусматривает воссоздание в модели тех же самых физических полей, которые действуют в объекте природы, лишь измененных по своим абсолютным значениям в соответствии с масштабом моделирования. Аналоговое моделирование предусматривает замену в модели по сравнению с натурой одних физических полей другими, например, замену натурального поля механических напряжений электрическим полем в модели. При этом изучают закономерности процессов и явлений в натуральных объектах, используя математическую тождественность основных законов и совпадение дифференциальных уравнений.

Преобладающее применение имеют методы физического моделирования. В зависимости от используемого материала различают следующие разновидности физического моделирования:

Моделирование на натуральных материалах, когда например, модель массива горных пород создают из этих же пород:

- на неподвижных стендах с нагружением силами тяжести;
- центробежное моделирование, в этом случае модель помещают в центрифугу, чтобы за счет центробежной силы увеличить объёмные силы в модели во столько раз, во сколько раз уменьшены ее линейные размеры;

– моделирование путем интенсивного торможения, сброшенного с копра ящика с моделью.

Моделирование на искусственных материалах:

– моделирование на эквивалентных материалах, параметры которых подбираются таким образом, чтобы поведение материала было подобным поведению природы. Например, при постоянном объемном весе прочность и модуль деформации этих материалов должны быть уменьшены против природы пропорционально линейному масштабу;

– моделирование на специальных материалах с особыми физическими свойствами, в которых напряженное состояние модели изучается с помощью оптического, электрического и других эффектов. Наиболее распространено оптическое моделирование.

Комбинированное моделирование:

– центробежное моделирование на эквивалентных материалах;

– центробежное моделирование на оптически активных материалах.

Все эти методы имеют свои достоинства и недостатки, которые и определяют условия применения различных методов. Так, в каждом конкретном случае необходимо выделить интересующие нас в первую очередь стороны исследуемого процесса, а затем применять тот метод, при котором эти стороны будут наиболее сходны с натурой.

При любом методе моделирования практически невозможно соблюсти масштабы для всех физических величин. Поэтому в каждом случае выделяют минимальное число величин, наиболее существенно влияющих на исследуемые стороны процесса. Для этих величин масштабы моделирования соблюдаются наиболее тщательно, даже за счет нарушения подобия по остальным величинам. Так, если при моделировании на искусственных материалах устанавливают упругие деформации пород, то важен масштаб модуля упругости, а масштабом прочности можно пренебречь. Если же исследуется разрушение пород, то важен масштаб прочности.

Среди методов аналогового моделирования в горном деле нашел применение метод электромеханических и электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Он основан на математической аналогии между некоторыми физическими процессами (например, движение

электрического тока в проводящей среде и ламинарное движение жидкости в пористой среде, распределение поля напряжений, распространение тепла). В качестве электропроводящей среды применяют специальную бумагу, позволяющую обеспечить удельную электропроводимость среды на любом участке модели, строго пропорциональную значению соответствующего параметра в натуре.

Метод эквивалентных материалов. Метод предложен Г.Н. Кузнецовым в 1936г. В основу метода положена идея создания моделей породного массива из искусственных материалов, эквивалентных по своим прочностным и деформационным свойствам горным породам. Этот метод получил международное признание и широко используется во многих исследовательских организациях при решении задач механики горных пород. Теоретические основы метода эквивалентных материалов (ЭМ) разработаны во ВНИМИ. Для его реализации предложена методика построения и испытания плоских и объемных моделей массива горных пород, разработаны эквивалентные материалы и методы для изучения их физико-механических свойств, а также средства измерения перемещений в моделях и давлений на крепь, имитируемых выработок. В качестве примера модель, применяемая для изучения процесса перемещения массива при проведении выработки, представлена на рис. 5.3.

Моделирование, проведенное с учетом на уровне многочисленных факторов, позволили с помощью метода ЭМ решить обширный круг задач, среди которых можно выделить следующие:

- изучить процесс сдвижения породной толщи при очистной выемке полезного ископаемого и деформации земной поверхности;
- изучить процесс деформирования, разрушения и сдвижения пород непосредственной и основной кровли над очистными выработками;
- изучить взаимодействие крепи заданной жесткости с породами почвы и кровли в очистном забое;
- установить распределение деформаций и напряжений в зоне опорного давления вокруг выработанного пространства;
- изучить процесс деформирования и разрушения пород вокруг одиночной выработки и взаимодействия зоны неупругих деформаций с крепью с учетом влияния различных горно-геологических факторов;

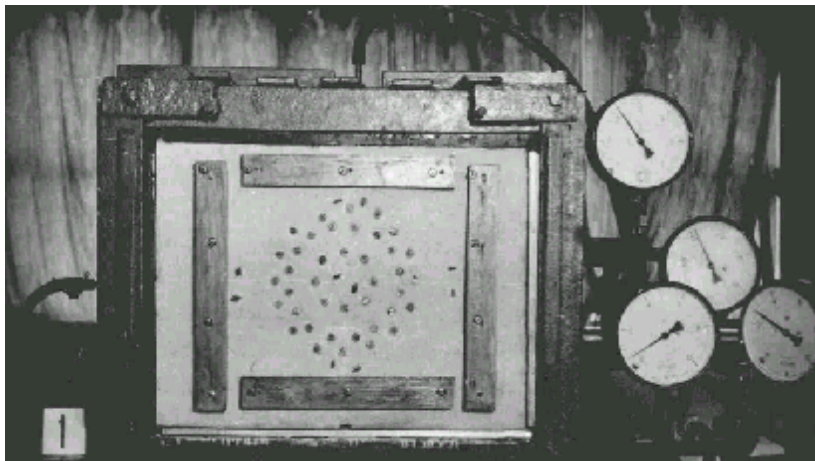


Рисунок 5.3 – Общий вид стенда для моделирования процесса деформирования пород при проведении выработки методом эквивалентных материалов

- изучить проявления горного давления в подготовительных выработках при их надрботке, подработке и охране различными способами;
- изучить процессы выпуска отбитой горной массы;
- исследовать устойчивость бортов карьеров и т.д.

Сущность метода ЭМ заключается в том, что на физических моделях при соблюдении условий подобия с известными допущениями исследуются геомеханические процессы, а результаты этих исследований используются при разработке теоретических положений и практических рекомендаций. В основе метода ЭМ лежит теория механического подобия, согласно которой справедливо, как было продемонстрировано выше, следующее инвариантное выражение

$$\frac{\sigma_n}{\gamma_n l_m} = \frac{\sigma_m}{\gamma_m l_m} = inv. \quad (5.34)$$

Выражением (5.34) устанавливается соотношение для всех механических характеристик, имеющих размерность «Паскаль» (пределы прочности на сжатие σ_c и растяжение σ_p , модуль упругости E , сцепле-

ние C и т.д.). При использовании искусственных материалов, механические характеристики которых ниже соответствующих характеристик моделируемых горных пород $\sigma_n > \sigma_m$, обеспечение условий механического подобия модели и природы производится по условию

$$\sigma_m = \frac{l_m}{l_n} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \sigma_n. \quad (5.35)$$

Материалы, механические характеристики которых при принятом геометрическом масштабе $C_l = l_n / l_m$ удовлетворяют по отношению к моделируемым горным породам условию (5.35), получили название эквивалентных.

Работы по изготовлению и испытанию моделей из эквивалентных материалов производятся в такой последовательности. По результатам лабораторных испытаний натуральных пород определяют их физико-механические свойства. С учетом принятого геометрического масштаба модели подбираются соответствующие рецептуры эквивалентных материалов, после чего на специальном стенде по разработанной технологии изготавливается модель, имитирующая толщину пород в принятом масштабе моделирования.

В модели устанавливаются приспособления, марки, приборы и датчики для имитации работы крепи и регистрации напряжений, деформаций и смещений элементов крепи и моделируемой толщи массива. Затем воспроизводятся в определенном масштабе времени процесс перемещения забоя выработки с регистрацией поля напряжений и смещений в точках на разных расстояниях от забоя. По окончании испытания модели обычно из ее монолитной части вырезают образцы эквивалентных материалов для контрольного определения свойств.

Достоинством метода ЭМ следует считать возможность воспроизведения процессов неупругого деформирования и разрушения пород вблизи выработок. Этот метод позволяет делать объемные модели и на их основе решать трехмерные задачи геомеханики. Указанные обстоятельства способствовали широкому внедрению метода в лабораторную практику. В то же время моделированию на эквивалентных материалах

присущи серьезные недостатки.

Физико-механические свойства пород трудно воспроизвести на каком-либо одном типе эквивалентных материалов, только за счет изменения его состава. Поэтому в распоряжении исследователя должен находиться целый ряд материалов, отличающихся по своим исходным компонентам, физико-механическим характеристикам и назначению, что усложняет постановку эксперимента. Так, для конкретного эксперимента выбрать ЭМ необходимо с учетом следующих требований:

- соответствия типу решаемой задачи, качественной аналогии в механическом поведении породы и материала;
- количественного подобия физико-механических характеристик натуре и модели с учетом масштаба моделирования;
- технологических особенностей изготовления модели;
- воспроизведения структурной прочности и деформационной неоднородности модели;
- стабильности свойств;
- экономичности.

Все ЭМ можно классифицировать по ряду признаков:

- по способу образования связей (нетвердеющие, физически твердеющие, химически твердеющие);
- по химической природе связующего: на основе углеводов нефтяного происхождения (парафин, церезин, вазелин); на основе неорганических веществ (гипс, цемент, жидкое стекло, тиосульфат натрия); на основе синтетических смол (карбомидной, эпоксидной, кремнеорганической и др.); на основе смол естественного происхождения (канифоль, и др.);
- по степени дисперсности наполнителей (мел, каолин, тальк, слюда, полевой шпат, кварц, инертная пыль и т.д.) ЭМ можно разделить на: низко-дисперсные (> 250 мкм), дисперсные (50-250 мкм), дисперсные (< 50 мкм);
- по химической природе наполнителя различают ЭМ: кремнеземные (диоксид кремния, песок, глина, тальк, слюда); карбонатные (известняк, доломит, мел); сульфатные (гипс, барит); металлические

(чугунная дробь, магнетит, свинцовый порошок); полимерные (полиэтилен, резиновая крошка, полистирол).

Кроме того, при изготовлении ЭМ применяют вспомогательные материалы (пластификаторы, отвердители, катализаторы, поверхностно-активные вещества), влияющие на процессы твердения смесей или модифицирующие свойства основных компонентов.

В качестве другого недостатка метода следует отметить сложность, а иногда и вовсе невозможность выполнения условия подобия для всех механических характеристик, то есть не удается соблюсти равенство:

$$\frac{\sigma_{с.н}}{\sigma_{с.м}} = \frac{\sigma_{р.н}}{\sigma_{р.м}} = \frac{C_{н}}{C_{м}} = \frac{E_{н}}{E_{м}}. \quad (5.36)$$

Еще более затруднено соблюдение условия подобия в слоистых массивах, для которых соотношения (5.36) должны быть справедливы во всех слоях, так, например, для модуля упругости необходимо:

$$\frac{E_{н_1}}{E_{м_1}} = \frac{E_{н_i}}{E_{м_i}} = \dots = \frac{E_{н_n}}{E_{м_n}} = const, \quad (5.37)$$

где i – порядковый номер слоя.

Следующая сложность моделирования заключается в том, что изучение деформационных процессов в окружающем выработку массиве на больших глубинах требует сооружения моделей весьма внушительных размеров, что сопровождается повышением трудоемкости эксперимента. В случаях, если на модели в силу недостаточных размеров невозможно представить все пласты пород, то воспроизводят только слои, залегающие непосредственно над выработкой, а вес остальных пород имитируется с помощью специальной пригрузки. Однако в этом случае зачастую не соблюдается баланс внешних сил при перемещении забоя, вызывающем развитие динамических процессов сдвижения и обрушения пород в массиве.

Достоверность и репрезентативность результатов, полученных на моделях из ЭМ, в значительной степени зависит также от технологии изготовления моделей, поэтому даже при правильно подобранных

компонентах возможны существенные погрешности из-за несоблюдения требований к подготовке и дозированию компонентов, приготовлению, укладке и уплотнению смеси, а также твердению модели.

Основным нюансом исследований на моделях из ЭМ является измерения, так как от этого во многом зависит достоверность и надежность результатов. С одной стороны, одним из преимуществ метода является возможность измерений параметров, которые трудно измерить в шахтных условиях. Однако при этом необходимо иметь в виду, что закладка динамометров в модель зачастую приводит к искажению напряженно-деформированного состояния изучаемого массива, а измерения смещений на моделях не могут быть выполнены с достаточной точностью из-за малой чувствительности измерительных устройств.

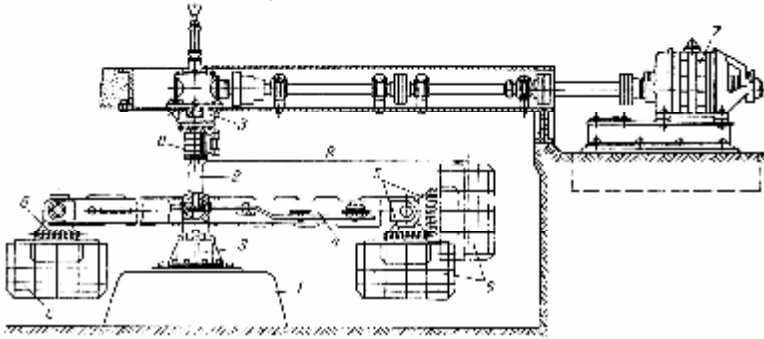
Метод центробежного моделирования. Этот метод впервые был предложен в 1932г. Г.И. Покровским. В основу его положено соотношение плотностных характеристик при равенстве $\sigma_n = \sigma_m$:

$$\gamma_m = \frac{l_n}{l_m} \cdot \gamma_n \cdot \quad (5.38)$$

Сущность метода заключается в том, что гравитационные силы, предопределяющие напряженно-деформированное состояние пород на той или иной глубине, заменяются при моделировании силами инерции, которые развиваются посредством вращения модели (из материала натуры) в центрифуге при соответствующей скорости вращения (рис. 5.4). Для соблюдения условия подобия в этом случае необходимо, чтобы объемный вес материала модели был во столько раз больше объемного веса пород ($\gamma_m > \gamma_n$), во сколько раз размеры исследуемой области породного массива больше размеров модели ($l_n > l_m$). Это равенство возможно, если модели придать ускорение a во столько раз больше по сравнению с земным g , во сколько раз линейные размеры модели меньше размеров натуры:

$$a = C_l \cdot g. \quad (5.39)$$

Масштаб центробежного моделирования C_l связан с угловой скоростью вращения центрифуги ω и радиусом вращения модели R



- 1 – фундамент под вертикальную ось; 2 – вертикальная ось;
 3 – подшипники; 4 – коромысло; 5 – вилки для крепления подвесок;
 6 – каретки; 7 – электродвигатель постоянного тока; 8 – коллектор;
 9 – основание модели; 10 – модель

Рисунок 5.4 – Конструкция центрифуги

следующим соотношением:

$$C_l = \sqrt{1 + \frac{\omega^4 R^2}{\partial}} = 0,102 \sqrt{\omega^4 R^2 + 96,24} . \quad (5.40)$$

В лабораторной практике обычно используют приближенную зависимость между числом оборотов центрифуги в минуту n и масштабом моделирования:

$$n = 3 \sqrt{\frac{C_l}{R}} . \quad (5.41)$$

Следует указать на некоторую некорректность результатов центробежного моделирования, так как соблюдение условия подобия для различных частей модели, расположенных на разных расстояниях R от центра вращения, практически не осуществимо, так как нельзя обеспечить вращение отдельных областей модели с различной угловой скоростью. Кроме того, трудности с реализацией объемных сил, превосходящих силы тяжести во столько раз, во сколько раз модель меньше исследуемой области, препятствует применению центробежного моделирова-

ния при решении задач горной геомеханики. Поэтому метод центробежного моделирования чаще всего применяется в комплексе с методом эквивалентных материалов и поляризационно-оптическим методом.

Поляризационно-оптическое моделирование. Поляризационно-оптический, или просто оптический метод моделирования, позволяет устанавливать распределение и значения напряжений в массивах пород вокруг выработок любой конфигурации (крепя) при соблюдении условия оплошности упругого и пластического деформирования. Метод основан на появлении оптической анизотропии и вызываемого ею двойного лучепреломления при приложении к модели механической нагрузки. Такое свойство характерно ряду прозрачных материалов, например различным видом стекла, целлулоиду, отверженным эпоксидным смолам и пр., а также специальным низкомодульным оптически чувствительным материалам (игдантин, агарин), работающим под собственным весом.

Свойство двойного лучепреломления в таких материалах обнаружено в 1816 г. английским физиком Д. Брюстером, однако практическое применения метод начали лишь в начале XX века. Впервые для целей горного дела метод применили в 1915г. (Ф.Ю.Левинсон-Лессинг и А.К. Зайцев) при выборе оптимальной формы поперечного сечения железнодорожного туннеля. Для решения геотехнических задач методы фотоупругости и фотопластичности широко применялись в ИГД им. А.А. Скочинского под руководством В.Ф. Трубмачева.

Схема оптической установки показана на рис. 5.5. Луч света от

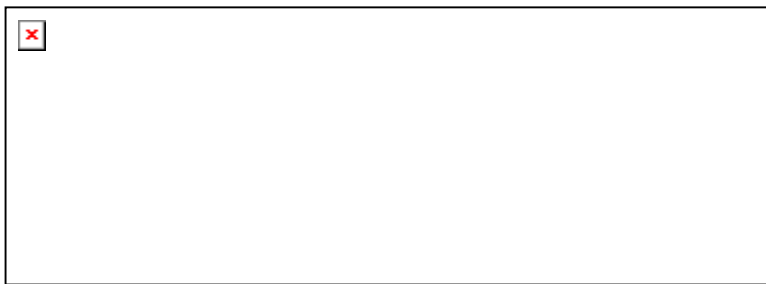


Рисунок 5.5 – Схема поляризационной установки

источника 1, пройдя через поляризатор 2, плоско поляризуется. Поляризованный свет, пройдя через напряженную модель 3, претерпевает двойное преломление, которое различно в разных точка модели в зависимости от значений и направлений главных напряжений в этих точках. Далее оба луча, образовавшиеся в рассматриваемой точке модели в результате двойного лучепреломления, проходят через анализатор 4, и при этом сводятся в одну плоскость. Прошедшие анализатор плоско поляризованные лучи интерферируют при определенной оптической разности ход, которая пропорциональна разности главных напряжений в соответствующей точке. Зависимость оптической разности хода от разности напряжений, выражающая основной закон фотоупругости, имеет следующий вид.

$$\Gamma = Cd(s_1 - s_2), \quad (5.42)$$

где Γ – оптическая разность хода;

C – постоянная, называемая оптическим коэффициентом напряжения;

d – толщина модели;

s_1 и s_2 – главные нормальные напряжения.

Если источник 1 излучает белый свет, то на экране 5 получают изображение в виде полосок, окрашенных в различные цвета светового спектра. При этом каждая цветная полоса представляет собой геометрическое место точек с одинаковой оптической разностью хода Γ и, следовательно, с одно и той же разностью главных нормальных напряжений, которая, как известно, связана с максимальным касательным напряжением:

$$t_{\max} = (s_1 - s_2)/2. \quad (5.43)$$

Таким образом, цветные полосы на экране представляют собой линии равных максимальных касательных напряжений исследуемой модели, называемые изохромами.

В некоторых точках модели плоскость колебания луча совпадает с направлением какого-либо из главных напряжений. В таких точках

двойного лучепреломления не происходит, так как плоскости поляризации анализатора и поляризатора оказываются взаимноперпендикулярны, т.е. скрещены. В результате на экране появляются черные линии, пересекающие цветную картину изохром. Эти линии есть геометрические места точек, в которых направления главных нормальных напряжений S_1 или S_2 параллельны. Такие линии получили название изоклин.

Темные точки образуются также в точках, где напряжения S_1 или S_2 равны или нулевые. Эти точки называют особыми или изотропными, они определяют структуру изохром и изоклин и поэтому имеют важное значение при расшифровке поля распределения напряжений в модели.

Если хотят исключить появление на экране изоклин, то вместо плоской поляризации света используют круговую, для чего в конструкцию полярископа вводят так называемые четвертьволновые пластинки из слюды. Для света, поляризованного по кругу, все направления в модели, на которую он падает, равноценны и поэтому погасание луча по изостатическим направлениям не происходит.

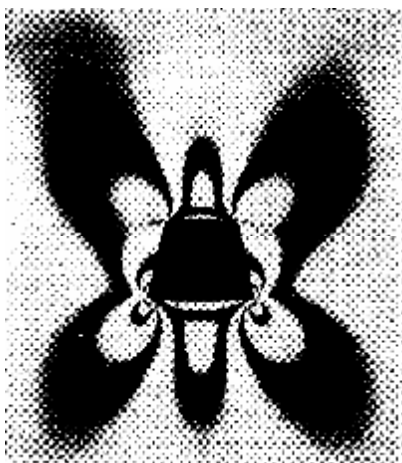


Рисунок 5.6 – Картинка изохром вокруг выработки трапециевидной формы поперечного сечения при действии вертикальных сил

Если напряженную модель просвечивают монохроматическим светом, то на экране вместо цветной картины изохром, получают чередование темных и светлых полос (рис. 5.6), причем в тех точках, где разность хода равна четному числу полуволин образуются темные полосы, а в точках, где разность хода равна нечетному числу полуволин, наблюдаются светлые полосы.

Посчитав число полос, которые прошли через исследуе-

мую точку модели при ее нагружении, либо число полос от ненагруженной области, можно определить оптическую разность хода, а по ней – максимальное касательное напряжение в этой точке.

Более точно значение максимального касательного напряжения можно определить с помощью компенсатора, с помощью которого на разность хода лучей, создаваемую моделью, накладывается разность хода, равную по величине, но обратную по знаку. Результирующая разность хода оказывается нулевой, т.е. при скрещенных поляроидах в исследуемой точке модели происходит затемнение.

Таким образом, исследование картины изохром в модели позволяет определить разность главных напряжений или максимальное касательное напряжение, а исследование картины изоклин позволяет охарактеризовать направления главных напряжений S_1 или S_2 . Однако величины S_1 или S_2 метод не дает, для этого используют специальные способы, основанные на решении дифференциальных уравнений равновесия с привлечением полученных картин.

Метод оптического моделирования позволяет получить весьма наглядное представление о поле распределения напряжений в породном массиве вокруг выработок любой конфигурации. С использованием данного метода решен ряд задач механики горных пород, которые не представлялось возможным решить аналитическими методами.

Метод электромеханических аналогий. Как было отмечено ранее, если оригинал описывается той же системой уравнений, что и модель, но имеет иную физическую природу, то применяется математическое моделирование. Основой такого подхода является аналогия, т.е. правдоподобное и вероятное заключение о сходстве двух предметов или явлений в каком-либо признаке на основании установленного их сходства в других признаках. Принцип математической аналогии позволяет экспериментально находить решение дифференциальных уравнений на модели той области, где эксперимент осуществляется наиболее легко и точно. Для этой цели обычно используется электротехника, так как элементы электрических цепей (емкости, индуктивности, резисторы) могут быть выполнены просто, а электроизмерительные приборы обладают высокой точностью.

Электрическое моделирование механических систем производится на основе физической постановки задачи, когда механическая систем, характеризующаяся массой, упругостью, трением и связями, заменяется моделью – схемой, в которой все элементы заменены аналогичными. Само моделирование возможно на основе математической постановки задачи. Для этого сначала составляется дифференциальное уравнение исследуемой механической системы и для его решения создается электрическая модель, характеризуемая точно таким же дифференциальным уравнением.

Аналогию между механическим и электромагнитными явлениями обосновал в 1881 г. Максвелл, который принял в качестве обобщенной величины перемещения электрический заряд, в качестве скорости – силу тока, и в качестве механической силы – величину электродвижущей силы. Механические параметры системы и соответствующие им электрические величины (по Максвеллу) приведены в табл. 5.3.

Используя рассмотренные ранее структурные механические модели для идеальных сред (Гука, Ньютона, Сен-Венана), упругие, вязкие и пластические свойства горных пород могут быть представлены следующими электрическими моделями.

Упругость. Механической моделью упругого тела является пружина, в которой деформации, после снятия нагрузки, полностью восстанавливаются и определяются приложенной силой и жесткостью пружины

$$F=k \cdot S, \quad (5.44)$$

где F – приложенная к пружине сила;

k – коэффициент, учитывающий жесткость пружины;

S – деформации пружины.

Зависимость между напряжениями и упругой деформацией выражается законом Гука (рис. 4.2,а):

$$\sigma=E \cdot \varepsilon, \quad (5.45)$$

где σ – напряжение, Н/м²;

E – модуль упругости, Н/м²;

ε – относительная деформация.

Таблица 5.3 – Электромеханические аналогии

Характер величин	Механическая система		Электрическая система	
	Поступательное движение	Вращательное движение	I система аналогий	II система аналогий
Параметры системы	Инертная характеристика		Индуктивность L	Емкость C
	m	J		
	Сопротивление трению		Омическое сопротивление R	Проводимость $g = (1/R)$
	R_n	R_b		
Податливость		Емкость C	Индуктивность L	
	S	S_b		
Параметры состояния	Перемещение		Заряд q	Потокоцепление Φ Напряжение U
	x	j		
	Скорость		Ток $i = \frac{dq}{dt}$	Напряжение U
	$v = \frac{dx}{dt}$	$w = \frac{dj}{dt}$		
	Усилие		Напряжение U	Ток i
P	M			
Энергия	Кинетическая энергия		Магнитная энергия	Электрическая энергия
	$T = \sum \frac{1}{2} m v^2$	$T_b = \sum \frac{1}{2} J w^2$	$T_m = \sum \frac{1}{2} L i^2$	$T_e = \sum \frac{1}{2} C U^2$
	Потенциальная энергия		Электрическая энергия	Магнитная энергия
	$W = \sum \frac{1}{2} \frac{x^2}{S}$	$W_b = \sum \frac{1}{2} \frac{j^2}{S_b}$	$W_e = \sum \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$	$W_m = \sum \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{L}$
Рассеяние энергии	$A = \sum \frac{1}{2} R_n v^2$	$A_b = \sum \frac{1}{2} R_b w^2$	$A_e = \sum \frac{1}{2} R i^2$	$A_m = \sum \frac{1}{2} g U^2$

В качестве электрического аналога упругих свойства горных пород может служить емкость, для которой справедливо выражение

$$U = \frac{1}{C} \cdot q, \quad (5.46)$$

где U – напряжение, В;

C – емкость конденсатора, Ф;

q – заряд на обкладках конденсатора, Кл.

Вязкость. Механической моделью, характеризующей свойства вязкости, является тело Ньютона. Структурный элемент, отражающий поведение такого тела, представляется в виде перфорированного поршня, движущегося в цилиндре, наполненном вязкой жидкостью. Напряжения в нем прямо пропорциональны скорости деформирования (рис. 4.2, б):

$$s = h \frac{de}{dt} = h \dot{\epsilon}, \quad (5.47)$$

где η – вязкость среды, Н·с/м²;

$\dot{\epsilon}$ – скорость деформирования, с⁻¹.

Аналогом вязких свойств горных пород при электрическом моделировании может служить омическое сопротивление, тогда величина падения напряжения на сопротивлении определяется уравнением

$$U = R \frac{dq}{dt} = R \cdot i, \quad (5.48)$$

где U – напряжение на сопротивлении, В;

R – величина омического сопротивления, Ом;

i – сила электрического тока.

Пластичность. Особенность пластического течения состоит в том, что оно возникает в твердом теле под действием напряжений, превосходящих определенное критическое значение, и прекращается тогда, когда напряжения становятся меньше этого критического значения.

Механической моделью, отражающей пластическую деформацию при нагружении, является модель сухого трения лежащего на горизонтальном основании массивного тела, сдвигаемого внешними силами. Тело, деформирующееся по такому закону, называется средой Сен-Венана (рис. 4.2, в).

В качестве электрического аналога этой механической модели может быть двухэлектродный ионный прибор (неоновая лампа). Если на электроды лампы подать напряжение, то до тех пор, пока оно будет меньше напряжения зажигания лампы $U_{зж}$, ток в цепи лампы практически проходить не будет.

Инерционность. В соответствии со вторым законом механики инерционная сила может быть выражена:

$$F_{ин} = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad (5.49)$$

где m – масса, кг;

x – перемещение, м;

v – скорость, м/с.

Напряжения, вызванные силами инерции, можно выразить

$$S_{ин} = m_э \cdot \frac{d^2e}{dt^2}, \quad (5.50)$$

где $m_э$ – приведенная масса, определяемая произведением плотности горной породы на площадь взаимодействия;

e – относительная деформация, вычисляемая как относительное перемещение центра масс системы.

В электрических цепях мерой инерции является индуктивность цепи, для которой справедливо равенство

$$U = L \frac{di}{dt} = L \frac{d^2q}{dt^2}, \quad (5.51)$$

где L – индуктивность, Гн;

U – напряжение, В;

q – заряд, Кл;

i – сила тока, А.

Следовательно, для механических моделей можно составить дифференциальное уравнение, решение которого возможно на электрических моделях. Так, например, модель среды Максвелла (рис. 4.3) с последовательным соединением упругой пружины и демпфера, находящихся по напряжением σ , может быть заменена электрической цепью с параллельным соединением активного сопротивления и емкости (рис. 5.7), а математическая модель деформации системы (4.3) представлена, согласно первому закону Киргофа:

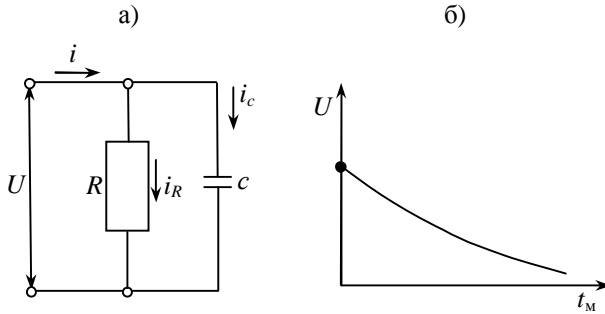


Рисунок 5.7 – Электрический аналог модели Максвелла (а) и изменение напряжения на конденсаторе (аналог явления релаксации напряжений) (б)

$$i = i_c + i_R = C \frac{dU}{dt} + \frac{1}{R} U . \quad (5.52)$$

С использованием электрического моделирования изучаются деформационные процессы в горных породах при динамических нагрузках, жесткий режим загрузки при испытании горных пород, сложное напряженное состояние горных пород и другие задачи горной геомеханики.

Метод электрогидравлических аналогий. Метод основан на математической аналогии между стационарным движением электрического тока в проводящей среде и ламинарным движением жидкости в пористых горных породах. Описание этих процессов основано:

– на аналогии закону Ома $j = -\sigma \text{ grad } U$; $J = \int j dS$, (5.53)

где j – плотность тока; σ – электропроводность;

U – электрический потенциал; I – сила тока,

– закону Дарси $v = -k \text{ grad } h$; $Q_\phi = \int U dS$, (5.54)

где v – скорость фильтрации; k – коэффициент фильтрации;

h – пьезометрический напор; Q_ϕ – фильтрационный расход.

Для получения на электрической модели процессов, аналогичным процессам фильтрации жидкости в природе, необходимо соблюдение вытекающего из теории подобия условия:

$$\left[\frac{C_{k,s} \cdot C_{h,U}}{C_l^2} \right] = const, \quad (5.55)$$

где C_l – геометрический масштаб подобия;

$C_{k,\sigma} = k/\sigma$ – параметр физического подобия, устанавливающий пропорциональность коэффициента электропроводности коэффициенту фильтрации. Для однородной среды, т.е. когда $k=const$ и $S=const$, имеет место автомодельность;

$C_{h,U}$ – параметр динамического подобия, устанавливающий граничные условия моделирования.

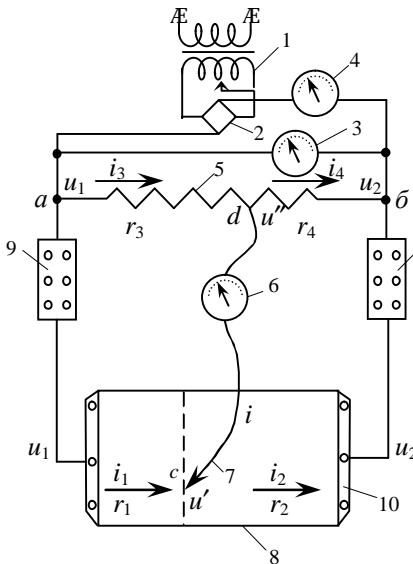


Рисунок 5.8 – Принципиальная схема установки ЭГДА:

- 1 – трансформатор; 2 – выпрямитель;
- 3 – вольтметр; 4 – миллиамперметр;
- 5 – потенциометр; 6 – нуль-индикатор;
- 7 – поисковая игла; 8 – модель;
- 9 – магазин сопротивлений; 10 – шины

Моделирование электрогидравлическим методом производится с помощью установки ЭГДА, основанной на использовании мостового (компенсационного) метода измерений электрического потенциала в поле модели.

Установка (рис. 5.8) состоит из блока питания и блока измерений. В качестве электропроводящей среды используются материалы, позволяющие обеспечить электропроводность на любом участке модели строго пропорционально значению соответствующих параметров в натуре. Наибольшее распространение получила электро-

проводная бумага, иногда применяют электролиты.

Изготовление модели начинается с выбора геометрического масштаба и нанесения очертания исследуемой области на лист электропродной бумаги. Задание граничных условий осуществляется в соответствии с теорией подобия. На участках границы модели, где производная от искомой функции равна нулю, электропродную бумагу обрезают, т.е. заменяют бумагу воздухом и, тем самым, устанавливают изоляцию. Для реализации граничных условий $U=\text{const}$ на соответствующие участки границы модели устанавливают шины-зажимы, на которые подают требуемый потенциал.

Методика эксперимента сводится к определению геометрических мест точек с одинаковыми значениями приведенного электрического потенциала. Соединяя указанные точки плавными кривыми, получают эквипотенциальные линии, которые являются аналогами соответствующих параметров в натуре. Таким же образом с помощью установки ЭГДА могут быть построены линии тока, которые обладают свойством ортогональности по отношению к линиям равных потенциалов.

Имитационное моделирование на ЭВМ. При проектировании сложных систем практически единственным методом исследования является имитационное моделирование на ЭВМ. Имитируя поведение отдельных частей сложного объекта и их взаимодействие, учитывая большое число влияющих факторов в условиях, близких к реальным, ЭВМ позволяет с использованием математической модели вычислить любые характеристики объекта, предусмотренные программой исследований.

Метод имитационного моделирования является особого рода численным методом, имеющим существенные отличия. При использовании обычных методов первоначальная математическая модель исследуемого процесса преобразовывается в систему уравнений, допускающих численное решение. К полученным уравнениям применяется некоторый численный метод, который по своей логической структуре обычно весьма далек как от математической модели, так и от процесса – оригинала.

В противоположность этому при имитационном моделировании реализация моделирующего алгоритма является, в некотором смысле, имитацией элементарных явлений, составляющих исследуемый про-

цесс, с сохранением их логической структуры, последовательности протекания во времени и особенно характера и состава информации о состояниях процесса. С этой точки зрения можно указать на имеющуюся аналогию между исследованием процессов методом компьютерного моделирования и экспериментальным исследованием процессов в натуре. И в том и в другом случаях для решения поставленных задач используется любая доступная информация о процессах и явлениях. При этом структура моделирующего алгоритма слабо зависит от совокупности искомых величин, а определяется, главным образом, математической моделью. Для исследования процессов методом имитационного моделирования нет необходимости создавать специальные моделирующие установки и вычислительные машины. Большинство встречающихся в горной практике процессов могут быть исследовано с использованием универсальных ПЭВМ, обладающих требуемым для этого объемом памяти и быстродействием.

Компьютерное моделирование позволяет решать задачи исключительной сложности. Исследуемая система может одновременно содержать элементы непрерывного и дискретного действия, быть подверженной влиянию случайных факторов, описываться весьма громоздкими соотношениями и т.д.

Наряду с отмеченными преимуществами метод имитационного моделирования, как любой численный метод, обладает существенным недостатком, заключающимся в том, что его решение носит частный характер, так как оно соответствует фиксированным значениям параметров системы и начальных условий. Поэтому для полного анализа системы приходится многократно моделировать процесс ее функционирования, варьируя исходные данные задачи.

Для моделирования на ЭВМ любого процесса, заданного при помощи математической модели, необходимо построить соответствующий моделирующий алгоритм. ЭВМ, реализуя моделирующий алгоритм, выполняет диктуемую программой последовательность операций. Программирование задачи и решение ее на машине относится к технической части работы. Для составления программ используются разные способы:

- операторные схемы моделирующихся алгоритмов;
- языки программирования;
- пакеты прикладных программ;
- универсальные имитационные модели.

Моделирующий алгоритм представляет собой совокупность операторов (основных, вспомогательных и служебных), которую можно рассматривать как специальную форму записи математической модели. Однако полного совпадения математической модели и соответствующего моделирующего алгоритма, как правило, не бывает.

При реализации моделирующих алгоритмов на ЭВМ вырабатывается информация о состоянии исследуемых систем. Эта информация является исходным материалом для определения приближенных значений искомых величин. Объем информации может быть настолько значительным, что запоминание ее в памяти машины, обработка и последующий анализ оказываются практически невозможными, или, во всяком случае, чрезмерно трудоемкими. Поэтому фиксацию, обработку и представление информации необходимо организовать так, чтобы оценки искомых величин формировались постепенно по ходу моделирования, без специального запоминания всей информации о состояниях системы.

В настоящее время существует большое число примеров, когда сложная система без особого труда исследуется методом компьютерного моделирования, в то время как для изучения другими методами (аналитическими, моделированием на аналоговых установках и физическими методами) она оказывается недоступной. Примером может служить моделирование на ЭВМ проходки туннеля.

Чтобы оценить устойчивость породного массива и запроектировать крепь возникает необходимость в моделировании последовательности проведения выработки и оценивании состояния горных пород непосредственно у забоя. При этом необходимо учитывать, что передача напряжений происходит частично через массив перед забоем, боковые стенки выработки и установленную крепь (рис. 5.9). Поэтому критические ситуации могут возникнуть еще в зоне влияния забоя от совокупного действия продольных и поперечных напряжений. Кроме того, следует иметь в виду, что крепь устанавливается на определенном расстоянии от забоя,

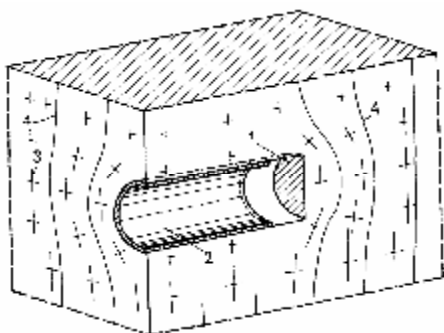


Рисунок 5.9 – Распределение напряжений вблизи забоя туннеля: 1 – забой; 2 – крепь; 3 – главные напряжения; 4 – траектория напряжений

вязкопластические деформации и разрушение еще до обнажения пород, то становится ясно, что имитировать проведение туннеля очень сложно, но возможно с помощью компьютерного моделирования.

Для решения таких задач механики сплошной среды используют численные методы, например метод конечных элементов (МКЭ). В отличие от аналитических методов, основывающихся на решении дифференциальных уравнений, которые требуют удовлетворения условий равновесия и сплошность деформаций в каждой точке деформируемого тела, в МКЭ исследуемая бесконечная область заменяется конечной и разбивается на конечное число элементов, причем их стыковка осуществляется только в вершинах элементов. Для определения неизвестных усилий и смещений узлов по заданным усилиям или перемещениям на границе расчетной области составляются уравнения, число которых соответствует числу узлов. Сетка конечных элементов разбивается неравномерно, сгущается в областях, где требуется более высокая точность и где ожидаются высокие градиенты напряжений.

Решающее значения для получения при моделировании близких к действительности результатов вычислений напряжений и деформаций в породном массиве и в набрызг-бетонной крепи имеет воспроизведение напряженно-деформированного пород до момента нанесения

т.е. тогда, когда в массиве уже произошла частичная деформация и разрушение пород. Следовательно, уже на этом этапе работ необходимо принимать во внимание пространственное напряженно-деформированное состояние массива. Если учесть, что породы часто бывают анизотропными, а массив неоднородным, кроме того, в нем возникают

на породы бетона. Поэтому при моделировании проведения выработки должны учитываться все этапы работ, начиная от проходки портала (рис. 5.10), до сдачи объекта в эксплуатацию. Моделирование включает следующие этапы расчета:

- решение задачи для естественного напряженного состояния массива;
- расчет исходного состояния (до возведения крепи);
- итерационный процесс воспроизведения развития горнопроходческих работ.

Для расчета так называемого исходного состояния крепь рассматривают в уже деформированной системе, соответствующей случаю естественного напряженного состояния, а затем на следующем шаге имитируют проходку туннеля, причем крепь не доводят до забоя на длину за-

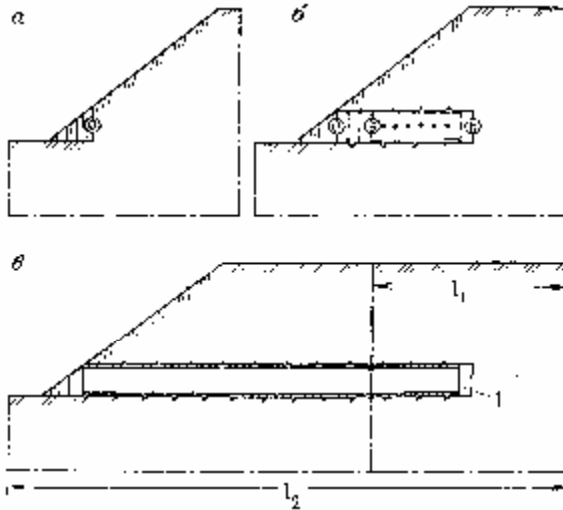


Рисунок 5.10 – Этапы работ при проведении туннеля и соответствующие им расчетные фрагменты:
 а – врезка туннеля; б – проходка порталного участка;
 в – возведение крепи; 1 – забой вне зоны влияния портала; l_1 и l_2 – длины расчетных участков небольших и больших размеров

ходки. В процессе итерационного расчета проходки выработки с учетом уже имеющихся до нанесения набрызг-бетона деформаций поверхности выработки расчетные деформации крепи приближают к истинным деформациям стенок, обусловленным проходкой, что позволяет определить нагрузку на крепь и рассчитать ее оптимальные параметры.

В заключение следует отметить, что решение тех или иных задач с использованием имитационного моделирования является по сути дела машинным экспериментом, который по степени приближения к действительности существенно приближается к натурным исследованиям. Однако затраты рабочего времени и материальных средств на реализацию имитационных моделей оказываются незначительными по сравнению с затратами, связанными с натурными экспериментами.

ЛЕКЦИЯ 13

5.5 Экспериментально-производственные исследования

Натурные наблюдения и измерения играют первоочередную роль в горной науке. Такое положение не случайно. Действительно, при изучении процессов горных работ, как ни в одной другой отрасли, велико многообразие влияющих факторов. Оно обусловлено как большим разнообразием и изменчивостью горно-геологических условий, так и вариациями режимов ведения и параметров горных работ. Кроме того, горные работы непрерывно развиваются, а фронт их перемещается в пространстве. Поэтому, хотя шахтные экспериментальные исследования трудоемки и сложны, без них невозможно выявить основные определяющие факторы изучаемых процессов и правильно поставить задачи для аналитических исследований и лабораторного моделирования.

Основное достоинство экспериментально-производственных исследований состоит в том, что они отражают реальные условия, позволяют выявить совокупное действие суммы влияющих факторов и вместе с тем дают возможность оценить преобладающие факторы.

К настоящему времени для решения задач горного производства разработано и применяется на практике большое количество экспериментально-производственных методов. К ним относится метод *технико-экономического анализа*, суть которого заключается в сборе на предприятиях статистических сведений, и в последующей их обработке с целью установления количественных зависимостей. По исходным данным строят кривые, для которых подбирают эмпирические уравнения. Если же по интересующему вопросу статистических данных нет, то исходные материалы могут быть получены в результате специально поставленных наблюдений.

Значительный объем экспериментально-производственных исследований приходится на долю изучения *проявлений горного давления* в зависимости от горно-геологических условий и при различных ситуациях. Выбор способов и средств управления горным давлением базируется на установлении объективных количественных и качест-

венных его проявлений.

По видам решаемых задач методы исследования проявлений горного давления можно подразделить на четыре группы:

- определение физико-механических свойств и структурных характеристик пород в массиве;
- определение смещений и параметров сдвижения горных пород;
- исследование напряженного состояния горных пород и его изменений;
- изучение взаимодействия пород с крепью и давления разрушенных пород.

Каждое из исследований требует применения особых методов и специальной аппаратуры. Поэтому при постановке шахтных исследований одним из наиболее важных вопросов является установление области целесообразного применения различных методов и измерительной аппаратуры, обеспечивающих получение надежных показателей проявлений горного давления. В связи с этим при постановке и проведении шахтных исследований проявлений горного давления наряду с выбором метода измерений и прибора, обязательно должны быть решены вопросы представительности и достоверности полученных результатов для изучаемого явления с учетом поставленных целей и задач исследований.

Выполнение указанных требований накладывает определенную специфику на методику шахтных исследований, где должен освещаться целый комплекс специфических вопросов:

- выбор объекта исследований и места установки измерительной аппаратуры на объекте;
- полнота отражения горнотехнических и горно-геологических условий на объекте;
- соответствие принятых методов и приборов поставленной задаче, надежности, диапазону величин и точности измерений;
- обеспечение достоверных показателей проявлений горного давления;
- проведение достаточного объема измерений по числу установленных приборов, началу, частоте и длительности измерений;
- корректность обработки и анализа результатов измерений.

При анализе результатов шахтных измерений необходимо иметь в виду, что даже при соблюдении всех поставленных требований к выбору и установке приборов результаты измерений на различных приборах не будут одинаковыми. Неполное соответствие измеряемых величин показателям проявлений горного давления также определяется трудностью выполнения заведомо достаточного объема измерений на объекте.

В соответствии с изложенным, при обработке результатов во всех случаях должны быть установлены точность измерений и пределы, в которых находятся истинные значения измерений, для чего следует использовать методы математической статистики.

Рассмотрим основные виды исследований, проводимых в шахтных условиях.

Определение свойств пород в местах их естественного залегания. В связи с проявлением масштабного эффекта определение свойств пород массиве имеет особое значение. Иногда, при высокой степени нарушенности пород, масштабный эффект столь значителен, что деформационные и прочностные показатели пород в массиве снижаются более чем на порядок.

Наибольшее распространение получили геофизические методы исследования массива горных пород. Они основаны на существовании объективной связи между геологическими факторами и геофизическими параметрами, измеряемыми непосредственно в массиве. Информационные возможности геофизических методов зависят от надежности используемых связей и степени дифференциации пород по изучаемым параметрам. Благодаря наличию корреляционных связей между геофизическими параметрами, свойствами и состоянием горных пород эти методы находят применения при изучении физических (плотностных) и механических (прочностных и деформационных) свойств, оценке структурных характеристик и напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Для изучения физических свойств, вещественного состава и состояния горных пород используют методы измерения естественной и искусственной радиоактивности. Исследования, основанные на измерении естественной радиоактивности пород, относят к радиометрическим, а ба-

зирующиеся на изучении явлений, возникающих при искусственном облучении пород, получили название ядерно-физических. Практическое значение получило облучение горных пород γ -лучами и нейтронами.

Плотность пород в массиве с достаточной степенью точности можно определить с помощью гамма-метода, основанного на эффекте различной степени поглощения и рассеяния радиоактивного гамма-излучения в средах с различной плотностью. Сущность метода состоит

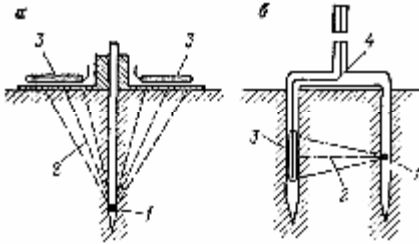


Рисунок 5.11 – Схемы изучения свойств горных пород методом радиоактивного просвечивания: 1 – источник излучения, 2 – поток излучения; 3 – детекторы, 4 – кабель

в том, что в изучаемом участке массива пород бурят на расстоянии 20-70 см друг от друга параллельные шпуров (рис. 5.11). В одном из них помещают источник гамма-излучения, а в другом регистрирующий зонд с детектором. Перемещая зонды с источником и детектором вдоль шпуров, фиксируют интенсивность излучения, а по тарировочным графикам устанавливают плотность пород на исследуемых участках.

Методы изучения механических свойств горных пород в натуре очень разнообразны, и их можно объединить в следующие группы:

- испытания участков массива на обнажениях горных выработок с использованием механических средств нагружения по аналогии с испытаниями пород на образцах;
- испытания в опытных камерах и с использованием опытных горных работ, включая эксплуатационную оценку физико-технических свойств пород;
- косвенную оценку прочностных и деформационных свойств на обнажениях пород при использовании сосредоточенной нагрузки (пробные приборы);
- косвенную оценку прочностных и деформационных свойств по-

род при использовании физических полей (неразрушающие методы).

Среди методов локальных испытаний распространение получили: механические испытания без отрыва от забоя шпура (скважины); вдавливание штампа в стенки скважины для изучения деформационных свойств пород; прессиометрия, т.е. нагружение стенок скважины на участке ограниченной длины для изучения деформационных свойств и прочности породы на разрыв.

Испытания горных пород на относительно больших объемах производят следующими методами:

- на породных призмах, образованных в массиве;
- на породных балках;
- путем вдавливания штампа больших размеров в породное обнажение;
- путем отрыва части массива от плоского обнажения при выдергивании штанги, закрепленной в массиве.

Проводимые в массиве испытания в основном имитируют условия экспериментов на образцах горных пород, при этом главным требованием является обеспечение необходимого вида напряженного состояния во времени испытаний и характера разрушения горных пород. Схемы возможных испытаний на призмах, выделенных из массива, приведены на рис. 5.12.

При грубой оценке механических свойств горных пород нашли применение методы, основанные на свойстве пород оказывать сопротивление проникновению испытательного инструмента (индентора,

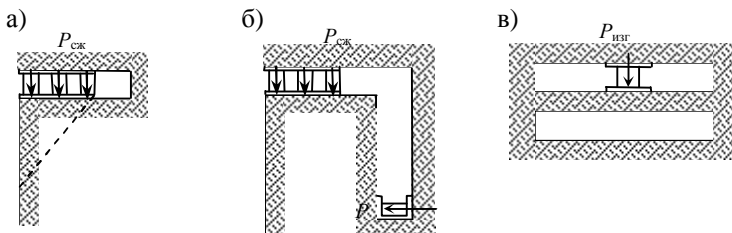


Рисунок 5.12 – Схемы механических испытаний горных пород в массиве: а – на срез; б– на срез со сжатием; в – на изгиб

зонда, резца и пр.). Особенность таких испытаний является экспрессная оценка свойств пород.

По способу взаимодействия испытательного инструмента с массивом пробные приборы делят на: статические, динамического вдавливания и бурения (резания). Они состоят из индентора (штампа), непосредственно вдавливаемого в массив, устройства для создания и передачи нагрузки на индентор, измерительных устройств. Из прочностных показателей горных пород, определяемых с помощью пробных приборов, наибольшее распространение получили контактная прочность, статическая и динамическая твердость, удельное сопротивление вдавливанию, буримость, сопротивляемость резанию, по которым с использованием корреляционных зависимостей устанавливается коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протогьяконова, предел прочности на сжатие и пр.

Физические методы косвенного исследования прочностных и деформационных свойств пород подразделяются в зависимости от изучаемого в данной точке массива параметра. На измерении удельного электрического сопротивления, диэлектрической и магнитной проницаемости основаны электрические, магнитные и радиоволновые методы. На оценке акустических свойств горных пород (скоростей распространения продольной и поперечной волн, коэффициентов затухания этих волн) основаны геоакустические методы. На определении тепловых параметров (теплопроводности, теплоемкости и пр.) основаны теплофизические методы.

В зависимости от задач исследования используют различные варианты каждого из геофизических методов, отличающихся масштабом охватываемого измерением объема среды, детальностью изучения свойств и процессов, оперативностью получения информации. Кроме того, геофизические методы отличаются и методически в зависимости от размещения точки измерения (на дневной поверхности, в скважине, на поверхности выработки и т.д.). По точности измерения, надежности результатов и простоте геофизические методы способны конкурировать с лабораторными. Их достоинством является возможность неограниченного повторения испытаний, гарантирующая достоверность

показателей, быстрота проведения эксперимента и получения результата. Геофизические методы исследования дают возможность определять комплекс свойств на одном и том же участке, вести непрерывный контроль состояния выработок и изучать кинетику деформационных процессов в производственных условиях.

В практике полевых испытаний (и лабораторных тоже) широко используется наличие прямой связи между упругими параметрами пород и скоростями распространения акустических волн, что позволяет неразрушающим способом определить деформационные характеристики пород. Акустические свойства имеют корреляционную связь с пределами прочности, плотностью, буримостью, взрываемостью и пр.

Например, при ультразвуковом методе исследования в массив (или в образце) периодически посылаются упругие импульсы (рис. 5.13). Они принимаются и преобразуются в электрический сигнал, а затем усиливаются и регистрируются, в результате этого определяется время распространения и амплитуда сигналов. Затем по известному расстоянию между излучателем и приемником и измеренному времени устанавливаются скорости распространения упругих волн в породах.

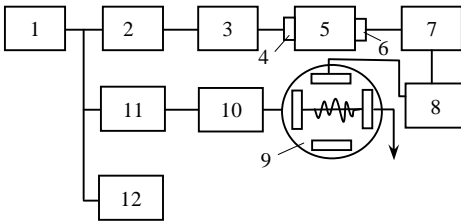


Рисунок 5.13 – Блок-схема ультразвукового импульсного прибора:

- 1 – задающий генератор импульсов;
- 2 – блок задержки; 3 – генератор зондирующих импульсов; 4 – излучатель;
- 5 – объект контроля; 6 – приемник;
- 7 – аттенюатор; 8 – усилитель;
- 9 – электронно-лучевая трубка;
- 10 – генератор горизонтальной развертки; 11 – блок калиброванной регулируемой задержки;
- 12 – блок меток времени

Исследование напряженного состояния массива горных пород. Натурные измерения напряженного состояния горных пород преимущественно ведутся с использованием выработок и скважин. При образовании выработки процесс деформирования пород проявляется в

виде смещений породных обнажений, поэтому большинство методов определения напряжений основано на регистрации деформаций пород. Среди деформационных методов исследований напряженного состояния пород практическое значение получили методы разгрузки, возмущений и разности давлений.

В глубине массива изменения напряженного состояния пород проявляются через изменения их физических свойств. К физическим методам изучения напряженного состояния относятся методы, основанные на активном использовании физических полей (акустический, электрометрический, радиометрический, тепловой), а также методы, основанные на регистрации изменений естественного поля напряжений или возникшего в результате перераспределения напряжений нового поля (электрический, магнитный, радиоактивный, тепловой, сейсмоакустический, сейсмоэлектрический, пьезоэлектрический, магнитосейсмический).

Для оценки состояния породного массива путем реконструкции палеотектонических полей напряжений используются геологические методы, заключающиеся в определении пространственного положения главных осей напряжений по системам трещин скалывания, положению трещин отрыва, формам складок и другим структурным элементам.

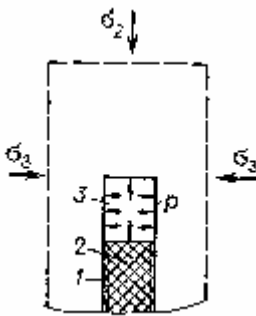


Рисунок 5.14 – Схема испытания скважины на разрыв:
1 – скважина, 2 – распорный герметизатор; 3 – нагнетательная камера

Существенную информацию о напряженном состоянии массива горных пород и величине наибольшего сжимающего напряжения дает анализ состояния керна из скважин (шпуров), так как характер разрушения керна связан с направлением и величиной напряжений, действующих в массиве.

Прямым методом определения напряженного состояния породного массива является испытание скважины на разрыв (рис. 5.14), основанное на разрушении пород в пределах локального измерительно-

го участка под действием приложенного к стенке скважины давления, превышающего сопротивление пород трещинообразованию в условиях естественного залегания. Локальный разрыв скважины в заданной точке массива может быть осуществлен двумя способами: путем нагнетания жидкости в герметизированный участок скважины и с помощью гидравлического датчика.

Метод разгрузки массива основан на измерении деформаций при искусственном снятии напряжений на определенном участке обнаженной поверхности выработки путем создания щелей (врубов). При разгрузке происходит упругое восстановление формы и размеров элемента массива, и реализуются деформации восстановления, которые фиксируются заранее установленными тензометрическими приборами. Различают следующие варианты метода: полной и частичной разгрузки, и компенсационной нагрузки.

При образовании в породном массиве какой-либо полости происходит пространственное перераспределение напряжений, приводящее к деформированию пород под действием нового поля. Эта реакция возмущения проявляется в виде деформаций, смещений, прироста напряжений. В качестве источника возмущений могут служить опережающий шпур, скважина, щель и другие выработки.

С помощью буровых скважин оценка напряжений в массиве производится по контурным деформациям, происходящим в результате ползучести пород. Степень деформирования и характер деформации стенки скважины зависят от коэффициента бокового распора. Изменяя изменение деформаций во времени, расчетным путем определяют напряжения, явившиеся причиной процесса деформирования. В другом варианте метод возмущений реализуют на малых базах путем выбуривания параллельных скважин. В измерительной скважине малого диаметра располагают деформометр и снимают начальные показания. После этого бурят возмущающую скважину большого диаметра и снимают конечные показания. По разности показаний по каждому направлению определяются соответствующие смещения контура измерительной скважины.

Другой вариант метода заключается в регистрации изменений напряжений под влиянием щели, скважины или очистной выработки. Он

основан на измерении давления жидкости в датчике, установленном в измерительной скважине и нагруженном предварительным давлением. Данный вариант получил название метода разности давлений.

Изучение состояния пород вокруг выработки. Производственные исследования геомеханических процессов включают оценку состояния массива с использованием результатов каротажа разведочных скважин, визуальное обследование состояния и условий поддержания горных выработок и наблюдения за внешними признаками проявлений горного давления, инструментальные измерения в массиве с помощью отдельных приборов и специально оснащенных измерительных станций. На основе результатов исследований устанавливаются эмпирические зависимости напряженно-деформированного состояния массива от его свойств и горнотехнических факторов.

Оценка устойчивости массива при проектировании выработок производится по данным геологической разведки месторождений полезных ископаемых с использованием результатов прочностных и деформационных испытаний кернов или каротажа разведочных скважин, который дает возможность изучать состояние пород в пределах всей обуриваемой толщи массива, включая и ослабленные зоны. В основу каротажного прогноза положена корреляционная связь между определяемыми физическими свойствами пород (или состоянием скважины), отражаемыми на каротажных диаграммах, и признаками, характеризующими устойчивость и расслоение пород.

Применение при прогнозе состояния массива получили акустический, электрометрический и кавернометрический методы. Каротаж позволяет получить данные о породах, вмещающих угольный пласт, мощности отдельных слоев, структурных особенностях и степени однородности толщи. Эти данные совместно с характеристиками пород, которые получают по кернам, позволяют определить основные свойства пород по их минералогическому составу и структурно-текстурным особенностям. Однако достоверность такого прогноза ввиду ограниченности объема породных проб и большого расстояния между разведочными скважинами невысока.

Начальную информацию о состоянии выработок получают при визуальном осмотре обнажений. Такие наблюдения предшествуют инструментальным измерениям и позволяют выявлять начальные признаки разрушения горных пород в выработках, фиксировать места локальных разрушений, определять ориентировку сил горного давления и давать приближенную оценку напряженного состояния массива пород для прогноза устойчивости выработок.

Особую ценность для суждения о состоянии породного массива вокруг выработок имеют показатели трещиноватости, среди которых можно выделить:

– частоту трещиноватости, которая характеризуется числом трещин, приходящихся на один метр породного обнажения, и дает возможность оценить коэффициент структурного ослабления массива;

– блочность, которая определяет степень расчленения трещинами массива на отдельные блоки и оценивается числом блоков (кусков) в 1 м^3 объема массива;

– коэффициент трещинной пустотности, представляющий собой отношение суммарного раскрытия трещин к длине участка измерения (линейный коэффициент), площади трещины к площади породы (площадной коэффициент), объема пустот и объему породы (объемный коэффициент).

Материалы по изучению трещиноватости на породных обнажениях (месторасположение участка, ориентировка поверхности или направление выработки, магнитное склонение и др.) заносят в журнал. При исследованиях, кроме того, регистрируют элементы залегания трещин (азимут и угол падения), геометрические показатели (протяженность, раскрытие, форма), заполнитель (состав и состояние), характер поверхности трещин, угол скольжения и т.д. Для этого используют горный компас, рулетку, линейки, набор щупов, фотоаппарат и другие принадлежности.

При изучении состояния пород вокруг выработки выполняют следующие исследования:

– определение расстояний от контура выработки до границ зоны нарушенных пород (или зоны повышенных напряжений) в различных

направлениях для каждого напряженно-деформированного состояния породного массива;

- установление характера и степени развития трещиноватости в зоне неупругих деформаций;

- изучение количественных характеристик напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Одним из основных методов изучения состояния массива горных пород вблизи выработок является скважинный, реализуемый различными способами:

- визуальный осмотр стенок скважины (шпура) по всей ее длине с помощью оптических приборов, позволяющих наблюдать и фотографировать трещины и расслоения;

- анализ прочностных свойств и числа отдельностей кернов, выбуриваемых с различной глубины из забоя и боков выработки, которые используются также для прогноза выбросоопасности горных пород;

- измерение скорости фильтрации воздуха (воды) при нагнетании в массив через скважины (шпуры) различной длины;

- интроскопию массива геофизическими методами с использованием ультразвуковых, электрических, электромагнитных и радиоактивных излучений.

Разностороннюю и надежную информацию о состоянии массива вблизи выработок позволяет получить акустический метод, с его помощью определяют зону нарушенных пород и характер распределения трещиноватости от контура в глубь массива, напряженное состояние пород, упругие и прочностные свойства, анизотропию и неоднородность массива. При изучении состояния массива с помощью ультразвука используются методики каротажа и прозвучивания. Вокруг выработки бурят несколько шпуров (скважин) и перемещают по их длине с интервалом 0,2-0,3м датчики, получая детальную информацию о массиве (рис. 5.15). При этом о состоянии массива судят как по абсолютным значениям, так и по относительному изменению акустических характеристик прошедшего через массив упругого импульса. Минимальные значения скоростей распространения волн наблюдаются в

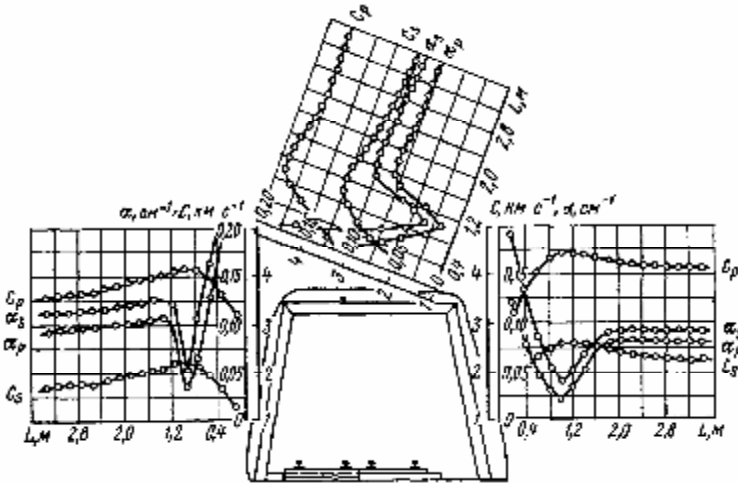


Рисунок 5.15 – Изменение скоростей продольных (c_p) и поперечных (c_s) волн и коэффициентов затухания (α_p и α_s) с удалением от контура выработки L

зоне неупругих деформаций, а повышенные значения характерны для зоны опорного давления.

Для регистрации перемещений пород во времени применяют чаще всего реперные устройства, которые устанавливают на различной глубине в шпурах (скважинах), пробуренных вокруг выработки.

Различают контурные репера и глубинные, которые подразделяются по следующим признакам: по способам передачи и регистрации данных о деформировании и перемещении точек в породном массиве; по способам закрепления реперных устройств в скважине; по числу одновременно работающих реперов; по возможностям измерения относительных и абсолютных перемещений.

Наибольшее распространение получили репера механического типа. При их использовании из выработки бурят серию шпуров (скважин), в каждый из которых устанавливают комплект реперов, состоящий из опорного репера, закрепляемого в забое шпура, и контурного репера, по которому регистрируют перемещения контура выработки. Проволоки

(стрезни) от отдельных реперов проходят через все реперы, расположенные ближе к устью шпура. Пример установки реперов в шпуре (скважине) и результаты замеров смещений пород приведены на рис. 5.16.

Непосредственным признаком проявлений горного давления являются смещения поверхности выработки. Для измерения относительного смещения боковых пород в очистных и подготовительных выработках применяют контурные реперы, измерительные универсальные стойки, нивелиры, оптические измерительные устройства.

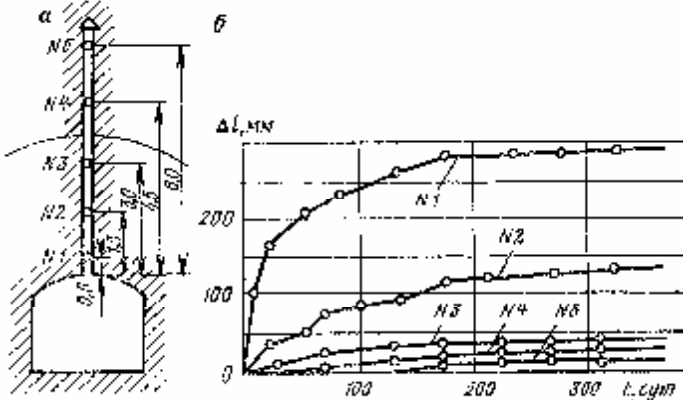


Рисунок 5.16 – Схема установки реперов (а) и график их смещения Δl во времени t (б): №1-5 – номера реперов

Контурные реперы представляют собой металлические штыри, устанавливаемые в шпуры, пробуренные в кровлю, почву и бока выработки на глубину 0,3-0,5м. Закрепление реперов производится цементированием или с помощью деревянных пробок. На конце реперов для фиксации рулетки или измерительных стоек делаются крючки и отверстия. Измерительные стойки состоят из двух труб, одна из которых перемещается относительно другой. Между верхними и нижними трубами устанавливается регистрирующее измерительное устройство (самописец, индикатор часового типа или индуктивный датчик).

Разрушение горных пород под действием горного давления связано с образованием микро- и макротрещин, которое сопровождается

излучением акустических, электромагнитных и тепловых импульсов. Методы, которые используют это явление, носят название эмиссионных. Наибольшее распространение на практике получил метод акустической эмиссии. Применение метода акустической эмиссии в исследованиях позволяет фиксировать в пространстве и во времени процесс деформирования и разрушения пород, устанавливать их предельные механические характеристики, определять степень усталости при многоцикловых нагрузках, оценивать выбороопасность массива и пр.

Измерение сдвижений земной поверхности и толщи горных пород. Изучение характера и измерение параметров сдвижения земной поверхности и толщи горных пород ведут с помощью наблюдательных станций, состоящих из системы реперов, закладываемых в грунт на земной поверхности, подрабатываемые здания и сооружения, породное обнажение горных выработок, специальные скважины, пробуренные в пределах предполагаемой области сдвижения. По мере развития горных работ по реперам ведут систематические наблюдения посредством нивелирования и измерения горизонтальных расстояний между ними с привязкой к опорным реперам, располагаемым за пределами области сдвижений.

Реперы наземных наблюдательных станций располагают в створах профильных линий с таким расчетом, чтобы обеспечить получение необходимых данных о границах области сдвижения и параметрах процесса сдвижения земной поверхности.

Для детального изучения механизма процесса сдвижения породного массива необходимо сочетать наблюдения за сдвижением земной поверхности с наблюдениями за сдвижением пород вокруг очистной выработки и деформированием толщи горных пород.

Скважины для наблюдений бурят с земной поверхности и горных выработок. В скважинах размещают и закрепляют в выбранных точках глубинные реперы, которые представляют собой металлические патрубки или деревянные клинья, закрепляемые посредством расклинивания или цементирования. От репера по скважине на поверхность или в выработку выводится тросик, по которому следят за перемещением репера относительно устья. Так как само устье скважины тоже

смещается, то ведут также измерения смещений устья, привязывая их к реперам, расположенным вне пределов области сдвижения. Одним из вариантов наблюдений является применение радиоактивных реперов, представляющих собой стальные контейнеры, в которые помещено радиоактивное вещество. Использование радиоактивных реперов позволяет разместить в одной скважине достаточно большое их количество.

Изучение взаимодействия пород с крепью. Исследования взаимодействия крепи с массивом производятся с целью получения данных для объективной оценки работы крепи в конкретных горно-геологических условиях и изучения влияния различных факторов на работу крепи в течение всего срока выработки службы. Они базируются на установлении значения и характера распределения нагрузки на крепь с целью уточнения расчетных схем при определении прочных размеров элементов крепи.

Наиболее полная информация о взаимодействии крепи с массивом может быть получена при комплексных натурных исследованиях распределения нагрузки на крепь по контуру выработки, характера деформирования пород вокруг выработки и напряженного состояния породного массива в зоне влияния выработки. При проведении комплексных исследований используют измерительные станции, включающих комплекс устройств и приборов для измерения соответствующих параметров. Для непосредственного определения нагрузок на крепь используют динамометры, динамометрические площадки и динамометрические крепи.

Различают три схемы размещения динамометрической аппаратуры:

- с установкой динамометра между крепью и породой;
- с введением измерительного прибора в конструкцию крепи;
- с использованием в качестве измерительного прибора элементов самой крепи.

По первой схеме нагрузки на крепь определяют во времени по всему контуру выработки; по второй – усилия, действующие по осям сопрягающихся с динамометрами элементов крепи; по третьей – деформации предварительно протарированных элементов крепи. Недостатком первой схемы является невозможность оценки косонаправленных нагрузок; второй – трудности с перерасчетом зарегистрированных

усилий в радиальные нагрузки на крепь; третьей – погрешности вычислений, связанные с тем, что тарировочные зависимости часто не отражают реальные условия работы крепи.

Первая схема размещения измерительной аппаратуры является основной, а вторая и третья – вспомогательными, они используются для оценок нагрузок на стоечные крепи. Изучение нагрузок на набрызг-бетонную крепь основывается на измерении напряжений в бетоне.

Динамометры, используемые для исследования взаимодействия крепи и пород, различаются по принципу действия чувствительного элемента, предельным измеряемым нагрузкам, разрешающей способности и габаритам. Основными составными частями динамометра являются чувствительный элемент, корпус, элемент для передачи давления и индикатор. В зависимости от используемого чувствительного элемента различают механические, гидравлические, электрические, магнитоупругие и фотоупругие динамометры.

При исследовании работы анкерной крепи используют измерительные приборы для определения нагрузки (анкерные динамометры) и несущей способности крепи (анкерные выдергиватели). Анкерные динамометры измеряют упругие деформации тарельчатых пружин под действием нагрузки на анкер. Их устанавливают на конце анкеров при помощи натяжной гайки.

Анкерные выдергиватели бывают гидравлические (усилие 150-250 кН) и механические (80-150кН). Гидравлический выдергиватель состоит из насоса, цилиндров, поршня и рычага, при помощи которого осуществляются возвратно-поступательное движение плунжера насоса. При этом регистрируется или деформация штанги, или ее скольжение по шпуре.

Основу измерительных станций, устанавливаемых сразу после проведения выработки, составляют динамометрические крепи. Один из типов динамометрической крепи ИГД им. А.А. Скочинского, используемой в горизонтальных выработках, закрепленных сборкой рамной железобетонной крепью арочной формы, показан на рисунке 5.17. Крепь состоит из комплекта несущих траверс или колец 1, элементов крепи 2, динамометров 3 и железобетонных затяжек 4.

Преимущество динамометрической крепи состоит в том, что она

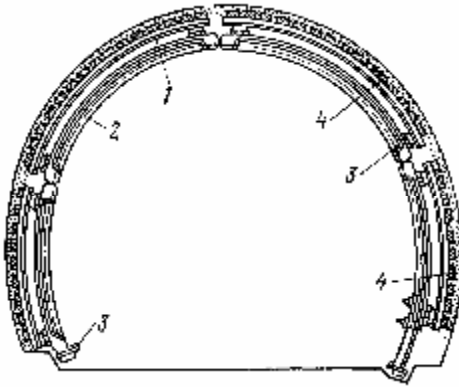


Рисунок 5.17 – Динамометрическая арочная крепь

позволяет регистрировать нагрузки, их изменения и распределение на протяжении всего участка выработки. Однако динамометрическая крепь по сравнению с одиночными динамометрами значительно дороже, ее установка трудоемка, а регистрируемое давление на крепь не соответствует действительности, так как сопротивление системы

крепь-динамометр отличается от реакции сопротивления одной крепи.

Косвенные методы определения нагрузки на крепь основаны на измерении напряжений и деформаций в ее элементах. Для их измерения используют специальные приспособления (проволочные датчики, струнные, магнитоупругие и фотоупругие тензометры) или нагрузки

на крепь оценивают по деформациям элементов крепи (например, изменению радиуса закругления верхняка).

Использование фотоупругих датчиков для определения нагрузки на перекрытие механизированной крепи демонстрируется на рис. 5.18. Датчики наклеиваются на элементы крепи до момента ее монтажа в лаве. Напряжения измеряют с помощью шахтных полярископов после стабилизации работы крепи.

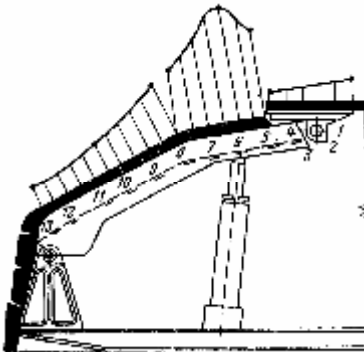


Рисунок 5.18 – Схема расположения датчиков на перекрытии крепи и распределение напряжений: 1-13 – номера датчиков

Рассмотренными задачами не ограничиваются шахтные исследования. В производственных условиях изучают также:

- состав и качество полезных ископаемых;
- вопросы контроля и прогноза динамических явлений при ведении горных работ;
- вопросы технологического контроля и оценки качества скрытых работ в массиве горных пород;
- рабочие параметры горных машин и механизмов, взаимодействие их с породами, вопросы диагностики технического состояния горных машин и механизмов;
- законы движения подземных вод, газов, рудничного воздуха, запыленность и загазованность рудничной атмосферы;
- вопросы пожароопасности, техники безопасности, влияние производственной среды на здоровье и производительность труда;
- энергоемкость технологических процессов, энергопотребления и энергоснабжение горных машин, участков шахты;
- разрушение пород взрывом и другими способами;
- способы и параметры обогащения полезных ископаемых и другие вопросы.

Это естественно не полный перечень вопросов, решаемых с помощью экспериментально-производственных исследований. Сложность и многофакторность реальных явлений и процессов, взаимное влияние фактора на конечный результат в большинстве случаев вызывают необходимость комплексного изучения указанных вопросов, что предопределяет объективность и достоверность научных выводов.

ЛЕКЦИЯ 14

ТЕМА 6. ОБРАБОТКА И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

6.1 Графический анализ результатов эксперимента

После получения результатов измерений и оценки их точности, данные сводят в таблицы. Однако по табличным данным трудно установить закономерности присущие, изучаемым явлениям, поэтому результаты обрабатывают графическими методами. Графическое изображение одновременно дает наглядное представление о результатах эксперимента, позволяет глубже понять физическую сущность исследуемого процесса, дает возможность выявить общий характер функциональной зависимости и позволяет судить о качестве выполненного эксперимента. Графическим методом особенно удобно исследовать зависимости одного параметра от другого. Кроме того, метод получил широкое распространение при оценке степени согласования экспериментальных и теоретических исследований.

При обработке результатов эксперимента необходимо иметь в виду, что связи между изучаемыми параметрами имеют не только функциональный, а стохастический (вероятностный) характер. В этом случае для изучения зависимости между исследуемыми величинами необходимо использовать методы корреляционного анализа, с помощью которых можно оценить степень близости корреляционной зависимости и функциональной. Следует заметить, что корреляционную связь между величинами можно искать только в том случае, если диапазон изменения величин, по меньшей мере, в 4-5 раз превышает разброс данных.

Чтобы графически установить зависимость одних величин от других, необходимо нанести опытные данные на график. Для графического изображения результатов измерений, как правило, применяют систему прямоугольных координат. Если анализируется функция $y = f(x)$, то по оси абсцисс наносят значения аргумента x , а по оси ординат – значения функции y от данного аргумента (рис. 6.1). Мас-

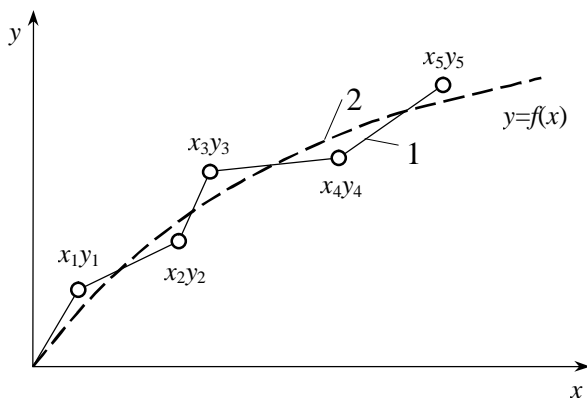


Рисунок 6.1 – Графическое изображение функции $y=f(x)$:
 1 – результаты эксперимента;
 2 – аппроксимационная кривая

штаб выбирается так, чтобы размеры диаграмм по горизонтали и вертикали были приблизительно одинаковыми. Каждую пару табличных значений x_i , y_i , принимают за координаты точки, которые наносят на график. Если соединить точки прямыми отрезками, то получим ломаную, характеризующую непосредственные результаты эксперимента, а границы разброса данных дают представление о погрешности измерений. Для получения аппроксимационной зависимости точки нужно соединить плавной кривой, чтобы она по возможности проходила наиболее близко по всем экспериментальным точкам.

Однако могут быть и исключения из этого правила. Допустим, установлено скачкообразное изменение одной из координат, которое объясняется сущностью физико-химических процессов. Осреднение всех точек в этом случае может привести к тому, что скачек функции будет принят за погрешности измерений.

Часто при графическом изображении результатов экспериментов приходится иметь дело с тремя переменными, т.е. с функцией $b = f(x, y, z)$, в этом случае для построения графика применяют метод разделения переменных. Одной из величин (z) в пределах интервала измерений ($z_1 - z_n$) задают несколько последовательных значений, а для

двух остальных переменных x и y (при $z_i = \text{const}$) строят графики $y = f_1(x)$. В результате на одном графике получают семейство кривых.

Большую роль при графическом изображении играет выбор системы координат. Координатные сетки бывают равномерными и неравномерными, логарифмическими и вероятностными. Назначение неравномерных сеток различное. В большинстве случаев их применяют для более наглядного изображения функций, например, криволинейные функции спрямляют на логарифмических сетках.

Для облегчения систематических расчетов с использованием сложных теоретических или эмпирических формул строят номограммы, с помощью которых можно представить любые алгебраические выражения. В результате сложные математические выражения можно заменить графиками. Построение номограмм является трудоемким процессом. Существует несколько методов, наиболее эффективным является способ, в котором переменные представляются как безразмерные критерии.

6.2 Методы подбора эмпирических формул

В процессе экспериментальных исследований получают статистический ряд измерений. Например, для функции двух переменных $y = f(x)$ каждому значению функции y_1, \dots, y_n соответствует определенное знание аргумента x_1, \dots, x_n . На основе экспериментальных данных можно подобрать алгебраические выражения, которые называют эмпирическими формулами. Такие формулы содержат постоянные величины, установленные по опытным данным, они имеют ограниченную область применения, которая не должна выходить за пределы эксперимента. Тем не менее, эмпирические формулы имеют очень большое значение и весьма широко применяются. Необходимость в подборе эмпирических формул возникает, кроме того, при замене сложного аналитического выражения, которое требует громоздких вычислений, упрощенной эмпирической зависимостью. Часто эмпирические формулы незаменимы для анализа измеренных величин.

Таким образом, эмпирические формулы являются приближен-

ными выражениями аналитических зависимостей. Замену точных аналитических выражений называют аппроксимацией, а функции – аппроксимирующими.

Процесс подбора эмпирических формул состоит в следующем. Вначале на сетку прямоугольных координат наносят данные измерений, соединяют точки плавной кривой, и выбирают её вид, а затем вычисляют параметры формул. Вид формулы по возможности должен быть простым. Наиболее часто встречающиеся виды графиков эмпирических формул представлены на рис. 6.2.

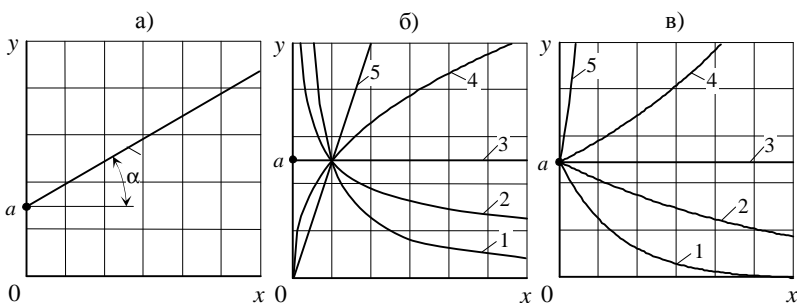


Рисунок 6.2 – Основные виды графиков эмпирических формул:

а – линейная функция ($y=a+b \cdot x$, $b=\operatorname{tg} \alpha$);

б – степенная функция ($y=a \cdot x^b$; 1 – $b=-1$; 2 – $b=-0,4$; 3 – $b=0$; 4 – $b=0,4$; 5 – $b=1$);

в – экспоненциальная функция ($y=a \cdot e^{bx}$; 1 – $b=-0,4$; 2 – $b=-0,1$; 3 – $b=0$; 4 – $b=0,1$; 5 – $b=1$)

Аппроксимация экспериментальных данных прямолинейной функцией (рис. 6.2, а) позволяет наиболее просто установить эмпирическую формулу, поэтому при анализе графического материала линейную функцию часто используют. Ее также широко применяют для линеаризацию кривых с помощью полу – или логарифмических координатных сеток.

Если экспериментальный график имеет вид, представленный на рис. 6.2, б, то необходимо применить формулу $y=ax^b$, заменяя $x=\lg x$ и, $y=\lg y$, имеем $y=\lg a + bx$, т.е. прямую на логарифмической сетке.

Если график имеет вид кривых на рис. 6.2, в, то можно использовать выражение $y = a \cdot e^{bx}$, которое линеаризуется на полулогарифмической сетке, заменяя $y = \lg y$: $y = \lg a + bx \cdot \lg e$.

При подборе эмпирических формул широко используются полиномы

$$y = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + \dots + A_n x_n, \quad (6.1)$$

где A_0, \dots, A_n – постоянные коэффициенты.

Полиномами можно аппроксимировать любые результаты измерений, если они графически представляют собой непрерывные функции. Даже при неизвестном выражении (6.1), ее функции можно определить, применяя методы средних и наименьших квадратов.

Построение эмпирических зависимостей по табличным данным. Рассмотрим последовательность построения эмпирических зависимостей между исследуемыми величинами x и y , если они заданы таблицей экспериментальных данных. В качестве примера возьмем результаты лабораторного определения величины коэффициента крепости по шкале М.М. Протодяконова и соответствующие им значения контактной прочности (твердость) по Л.Н. Барону, определяемой путем вдавливания плоского штампа диаметром 2-3 мм в нешлифованную поверхность образца (табл. 6.1).

За независимую переменную примем коэффициент крепости горных пород f , а за функцию – контактную твердость P_k . Разобьем интервал изменения f на $n = 50$ одинаковых частей, для чего вначале определим шаг разбивки с использованием формулы Стэрджеса:

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,322 \lg n} = \frac{19,4 - 0,6}{1 + 3,322 \cdot 1,699} = 2,8.$$

Принимаем интервал изменения коэффициент крепости пород от 0 до 20 с шагом разбивки $n = 2$, и строим на основании этого табл. 6.2, где средним значениям P_{ki} в каждом i -м интервале соответствует среднее значение f_i . С использованием средних построена табл. 6.3, где первые (ΔP_{ki}), вторые ($\Delta^2 P_{ki}$) и третьи ($\Delta^3 P_{ki}$) разности определяются по формулам:

Таблица 6.1 – Результаты лабораторного определения коэффициента крепости и контактной твердости горных пород

Горные породы	Коэффициент крепости	Контактная твердость, МПа
Уголь марки Т	0,6	17
Руда гематитовая	0,6	15
Уголь марки Ж	0,7	22
Уголь марки К	1,2	49
Уголь марки Г	1,5	68
Антрацит	1,8	90
Руда полиметаллическая	1,6	75
Сланец углистый	2,2	113
Аргиллит углистый	2,7	154
Песчаник крупнозернистый	3,7	248
Руда анатитовая	3,0	180
Мергель	4,0	280
Песчаник среднезернистый	3,1	190
Песчаник сланцевый	5,0	397
Известняк некрепкий	4,5	321
Доломит	4,2	303
Сланец песчаный	4,3	295
Фосфорит	6,3	596
Алеврит	6,4	618
Известняк	6,6	526
Аргиллит	5,3	459
Периодит	7,0	710
Песчаник мелкозернистый	7,8	843
Скарн	6,5	633
Габро-диабаз	7,9	861
Габро	9,6	1151
Гранодиорит	8,2	882
Порфир	9,5	1131
Сленит	9,6	1154
Туф	9,3	1091
Туфбрекция	8,7	974
Кварцит	8,8	993
Мрамор	8,9	1014
Альбитофир	12,0	1733
Базальт	10,2	1319
Гранит	11,0	1497
Диорит	11,0	1489
Бренчия	10,1	1310
Диорит	13,3	1915
Порфирит	13,6	1995
Роговик	13,5	1969
Гранит лециоуратовый	14,8	2443
Гранодиорит серый	15,2	2562
Гранодиорит розовый	15,9	2776
Кальцито-флюорит	14,3	2298
Монцонит альбитизованный	16,8	3082
Гранатовый скарн	17,2	3215
Диабаз	19,1	3870
Гранит окварцованный	19,4	3980
Гранодиорит метаморфизованный	18,6	3690

$$\Delta P_{k_1} = P_{k_2} - P_{k_1} = 194 - 49 = 145 \text{ МПа};$$

$$\Delta P_{k_2} = P_{k_3} - P_{k_2} = 410 - 194 = 216 \text{ МПа};$$

$$\Delta P_{k_3} = P_{k_4} - P_{k_3} = 694 - 410 = 284 \text{ МПа};$$

$$\Delta^2 P_{k_1} = \Delta P_{k_2} - \Delta P_{k_1} = 216 - 145 = 71 \text{ МПа};$$

$$\Delta^2 P_{k_2} = \Delta P_{k_3} - \Delta P_{k_2} = 284 - 216 = 68 \text{ МПа};$$

$$\Delta^3 P_{k_1} = \Delta^2 P_{k_3} - \Delta^2 P_{k_2} = 68 - 71 = -2 \text{ МПа и т.д.}$$

Полагая, что $u = \frac{f - f_1}{n}$, искомую зависимость можно записать в

виде ряда:

$$P_k = P_{k_1} + u \Delta P_{k_1} + \frac{u(u-1)}{2} \Delta^2 P_{k_1} + \dots + \frac{u(u-1)(u+n-1)}{n \cdot 1} \Delta^n P_{k_1}. \quad (6.2)$$

Если в табл. 6.3 разности m -го порядка находятся в пределах точности эксперимента, то $m + 1$ разности можно не рассчитывать, а для m -х следует найти их среднее значение.

В нашем случае вторые разности можно считать стабильными, а их среднее значение равно:

$$\overline{\Delta^2 P_{k_1}} = \frac{71 + 68 + 71 + 66 + 69 + 70 + 68 + 70 + 70}{9} = 69,125.$$

После подстановки в (6.2) значений получим

$$P_k = 49 + \frac{f-1}{2} 145 + \frac{f-1}{2} \cdot \frac{(f-1)/2-1}{2} 69,125.$$

Преобразовав выражение, получим эмпирическую форму, связывающую показатель контактной твердости пород с коэффициентом крепости:

$$P_k = 8,64 f^2 + 37,94 f + 2,42. \quad (6.3)$$

Зависимость (6.3) представляет собой квадратичный трехчлен, часто используемый для аппроксимации многих зависимостей.

Таблица 6.2 Средние значения параметров f и P_u

Интервалы f	\bar{f}_i	$\sum P_k$	n	\bar{P}_{k_i} , МПа
0...2,0	1,0	17+15+32+49+68+90+75=346	7	49
2,1...4,0	3,0	130180154+190+248+280=1165	6	194
4,1...6,0	5,0	397+531+303=1231	3	410
6,1...8,0	7,0	603+595+618+759+710+843+633+861+626=6248	9	694
8,1...10,0	9,0	1151+882+1131+1154+2091+974+993+1014=8390	8	1049
10,1...12,0	11,0	1733+1319+1497+1489+1310=7348	5	1470
12,1...14,0	13,0	1915+1995+1969=5879	3	1960
14,1...16,0	15,01	2443+2562+2776+2298=10079	4	2520
16,1...18,0	17,0	3082+3215=6297	2	3148
18,1...20,0	19,0	38870+3980+3690=11540	3	3846

Таблица 6.3 Расчет разностей

Аргументы	Функции	Первые разности	Вторые разности	Третьи разности
$f_1=1$	$P_{k_1}=49$	$\Delta P_{k_1}=145$	$\Delta^2 P_{k_1}=71$	$\Delta^3 P_{k_1}=-2$
$f_2=3$	$P_{k_2}=194$	$\Delta P_{k_2}=216$	$\Delta^2 P_{k_2}=68$	$\Delta^3 P_{k_2}$
$f_3=5$	$P_{k_3}=410$	$\Delta P_{k_3}=284$	$\Delta^2 P_{k_3}=71$	$\Delta^3 P_{k_3}$
$f_4=7$	$P_{k_4}=694$	$\Delta P_{k_4}=355$	$\Delta^2 P_{k_4}=66$	$\Delta^3 P_{k_4}$
$f_5=9$	$P_{k_5}=1049$	$\Delta P_{k_5}=421$	$\Delta^2 P_{k_5}=69$	$\Delta^3 P_{k_5}$
$f_6=11$	$P_{k_6}=1470$	$\Delta P_{k_6}=490$	$\Delta^2 P_{k_6}=70$	$\Delta^3 P_{k_6}$
$f_7=13$	$P_{k_7}=1960$	$\Delta P_{k_7}=560$	$\Delta^2 P_{k_7}=68$	$\Delta^3 P_{k_7}$
$f_8=15$	$P_{k_8}=2520$	$\Delta P_{k_8}=628$	$\Delta^2 P_{k_8}=70$	$\Delta^3 P_{k_8}$
$f_9=17$	$P_{k_9}=3148$	$\Delta P_{k_9}=698$	$\Delta^2 P_{k_9}=70$	$\Delta^3 P_{k_9}$
$f_{10}=19$	$P_{k_{10}}=3846$	$\Delta P_{k_{10}}=698$	$\Delta^2 P_{k_{10}}$	$\Delta^2 P_{k_{10}}$

Метод средних. Метод средних основан на следующем предположении. Если по экспериментальным точкам можно построить несколько плавных кривых, то наилучшей будет та кривая, у которой разностные отклонения наименьшие. Следовательно, подбор эмпирической формулы по методу средних основывается на условии равенства нулю всех отклонений функции от среднего значения, т.е.

$$\sum_{i=1}^m e_i = 0, \quad (6.4)$$

где $e_i = y_i - \bar{y}$ – единичное отклонение.

Последовательность нахождения коэффициентов эмпирической формулы по методу средних сводится к следующему:

а) на основании предварительного анализа результатов эксперимента устанавливают вид функции, в качестве которой чаще всего используют многочлен;

б) определяют число членов ряда, обычно ограничиваясь 3-4;

в) в принятое выражение подставляют все пары измеренных значений x_i и y_i для определения отклонений:

$$\begin{aligned} A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_1^2 + \dots + A_n x_1^n - y_1 &= \varepsilon_1; \\ A_0 + A_1 x_2 + A_2 x_2^2 + \dots + A_n x_2^n - y_2 &= \varepsilon_2; \\ A_0 + A_1 x_m + A_2 x_m^2 + \dots + A_n x_m^n - y_m &= \varepsilon_m; \end{aligned} \quad (6.5)$$

г) обычно число уравнений больше количества коэффициентов A , поэтому отклонения распределяют на столько групп, сколько неизвестных коэффициентов в уравнении;

д) приравнивая к нулю сумму отклонений для каждой из групп, получают систему линейных уравнений относительно искомых параметров A . Для решения систем уравнений в математическом обеспечении ПЭВМ имеются стандартные программы;

е) после определения численных значений коэффициентов проверяется качество аппроксимации сопоставлением значений функции и экспериментальных точек.

Для иллюстрации метода средних воспользуемся результатами лабораторного определения коэффициента крепости и контактной

твердости горных пород, представленных в табл. 6.1, а в качестве аппроксимационной формулы возьмем трехчлен (6.3):

$$P_k = af^2 + bf + c.$$

Сгруппируем уравнения согласно табл. 6.4, а в пределах каждой группы сложим уравнения почленно и приравняем суммы к нулю:

$$\begin{cases} 84a + 16b + 4c - 1347 = 0; \\ 341a + 33b + 3c - 4479 = 0; \\ 875a + 51b + 3c - 9514 = 0 \end{cases} \quad (6.6)$$

Таблица 6.4 – Расчет параметров эмпирического уравнения методом средних

f_i	P_{k_i} , МПа	f_i^2	$af_i^2 + bf_i + c - P_{k_i} = e_i$	Группа точек
1	49	1	$a + b + c - 49 = 0$	I
3	194	9	$9a + 3b + c - 194 = 0$	
5	410	25	$25a + 5b + c - 410 = 0$	
7	694	49	$49a + 7b + c - 694 = 0$	
9	1049	81	$81a + 9b + c - 1049 = 0$	II
11	1470	121	$121a + 11b + c - 1470 = 0$	
13	1960	169	$169a + 13b + c - 1960 = 0$	
15	1520	225	$225a + 15b + c - 2520 = 0$	III
17	3148	289	$289a + 17b + c - 3140 = 0$	
19	3846	361	$361a + 19b + c - 3846 = 0$	

Решая систему (6.6), получим $a = 8,59$, $b = 39,2$; $c = -0,39$.

Таким образом, зависимость между параметрами может быть представлена формулой

$$P_k = 8,59f^2 + 39,2f - 0,39, \quad (6.7)$$

которая почти полностью совпадает с ранее полученным выражением (6.3), что свидетельствует от достаточной точности метода.

Метод наименьших квадратов. Наилучшие результаты при определении параметров заданного уравнения дает использование метода наименьших квадратов. Суть этого метода заключается в следующем. Если все измерения функции y_1, \dots, y_2 произведены с одина-

ковой точностью, а ошибки измерения соответствуют нормальному закону, то параметры исследуемого уравнения определяются из условия, что сумма квадратов отклонений измеренных значений от расчетных принимает наименьшее значение.

Если аппроксимирующее уравнение записать в виде

$$y(x)=b_1+b_2x+\dots+b_nx^n, \quad (6.8)$$

а имеющиеся данные в точках x_i обозначить через y_i , то условием минимума суммы квадратов будет равенство:

$$S = \sum_{i=1}^n \{y(x_i, b_1, b_2, \dots, b_n) - y(x_i)\}^2 = \min, \quad (6.9)$$

где n – число экспериментальных точек.

В математическом обеспечении современных ЭВМ имеются стандартные программы для аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов обеспечивает результаты высокой надежности.

Применение метода продемонстрируем на предыдущем примере для квадратного трехчлена

$$y=ax^2+bx+c, \quad (6.10)$$

параметры которого определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^4 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i^3 + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i + c \cdot n = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (6.11)$$

Расчет коэффициентов эмпирического уравнения производится на основе табл. 6.5, используя данные последней строки для составления системы:

$$\begin{cases} 317338a+19900b+1330c=3505308; \\ 19900a+1330c+100c=223020; \\ 1330a+100b+10c. \end{cases}$$

Таблица 6.5 – Расчет коэффициентов эмпирического уравнения методов наименьших квадратов

№ п/п	f_i	f_i^2	f_i^3	f_i^4	$f_i P_{k_i}$, МПа	$f_i P_{k_i}$, МПа	$f_i^2 \cdot P_{k_i}$, МПа
1	1	1	1	1	49	49	49
2	3	9	27	81	194	582	1746
3	5	25	125	625	410	2050	10250
4	7	49	343	2401	694	4858	34006
5	9	81	729	6561	1049	9441	84969
6	11	121	1331	14641	1470	16170	177870
7	13	169	2197	28561	1960	25480	331240
8	15	225	3375	50625	2520	37800	567000
9	17	289	4913	83521	3148	53516	909772
10	19	361	6859	130321	3846	73074	1388406
Всего	100	1330	19900	317338	15340	223020	3505308

После решения системы уравнений получим $a = 8,6$; $b = 38,9$; $c = 0,81$, а формула запишется в виде:

$$P_k = 8,6f^2 + 38,9f + 0,81. \quad (6.12)$$

Сопоставляя (6.12), (6.7) и (6.3), убеждаемся, что коэффициенты при переменной f отличаются между собой не больше чем на 2 %, что свидетельствует о допустимой погрешности уравнений, полученных различными способами.

ЛЕКЦИЯ 15

6.3 Понятие о корреляционном анализе

Если две переменные зависят друг от друга так, что каждому значению x соответствует определенное значение y , то между ними существует функциональная и детерминированная связь. Если одному значению x соответствует несколько значений (совокупность) y , то такую связь называют стохастической. Стохастическая связь состоит в том, что одна случайная переменная реагирует на изменение другой изменением своего закона распределения. В практике исследований часто рассматривается частный случай такой связи, называемый статистической связью. Об этой связи говорят тогда, когда условное математическое ожидание одной случайной переменной является функцией значения, принимаемого другой случайной переменной.

Зависимость между одной случайной переменной и условным средним значением другой случайной переменной называется корреляционной. Под корреляционным анализом понимают исследование закономерностей между явлениями (процессами), которые зависят от случайных факторов. Суть корреляционного анализа сводится к установлению уравнения регрессии, т.е. зависит между случайными величинами, аргументом x и функцией y , оценке тесноты связи между ними, достоверности и адекватности результатов измерений.

Чтобы определить наличие связи между x и y строят так называемое корреляционное поле (рис. 6.3). По расположению точек и наклону средней линии уже визуально можно судить о наличии корреляционной связи. Так, очевидно, что с увеличением значений x на рис. 6.3 значения y увеличиваются. Следовательно, можно сделать вывод, то имеется положительная связь между x и y . Если на корреляционном поле осреднить точки, т.е. определить \bar{x}_i и $\bar{y}_i(x)$, нанести эти точки на график и соединить их между собой, то получим ломаную линию (1), по виду которой можно судить, как в среднем меняется y в зависимости от изменения x . Такая линия называется эмпирической линией регрессии. По ее виду можно сделать предположение о форме

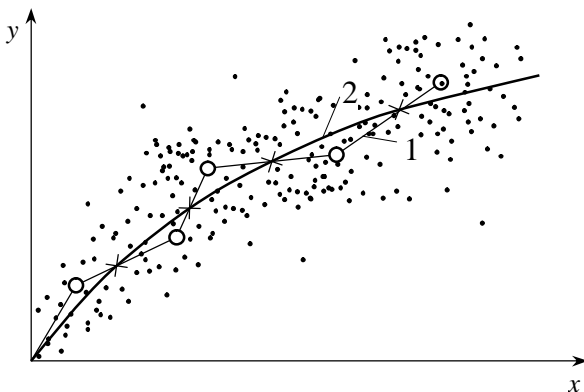


Рисунок 6.3 – Корреляционное поле
 1 – экспериментальная регрессионная зависимость;
 2 – теоретическая регрессионная зависимость;

связи. В данном случае ломаную линию можно аппроксимировать прямой или криволинейной зависимостями.

Если на корреляционном поле провести плавную линию, которая равноудалена от средних точек, то получим теоретическую регрессионную зависимость. Такую зависимость называют парной или однофакторной. В общем случае парная зависимость может быть аппроксимирована линией, параболой, логарифмической, степенной и показательной функциями, полиномом и др.

Линейная регрессия, или линейная форма связи между случайными переменными, занимает особое место в корреляционном анализе. При такой связи $\bar{y}(x)$ есть линейная функция

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1x, \quad (6.13)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты регрессии;

x – независимая случайная переменная.

Параметры в уравнении регрессии (коэффициенты регрессии) определяются по способу наименьших квадратов, т.е. при построении теоретической регрессионной зависимости оптимальной будет такая функция, у которой соблюдается условие

$$\sum (y_i - \bar{y}(x))^2 = \min, \quad (6.14)$$

где y_i – фактические ординаты поля;

$\bar{y}(x)$ – среднее значение ординаты с абсциссой x .

В случае линейной регрессии за теоретическое значение принимается величина, получаемая по формуле (6.13), т.е. ищется такая прямая линия, сумма квадратов отклонений измеренных значений y_i от которой была бы минимальной:

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}(x)]^2 = Q_{\min}. \quad (6.15)$$

Как известно, минимум функции можно найти, приравняв к нулю ее первую производную. Запишем выражения (6.15) в виде

$$Q = \sum (y - a_0 - a_1 x)^2 = Q_{\min},$$

найдем частные производные функции Q по a_0 и a_1 , приравняем их нулю и составим систему нормальных уравнений

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum x = \sum y, \\ a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 = \sum xy, \end{cases} \quad (6.16)$$

решая которую получаем значения коэффициентов регрессии

$$a_0 = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum yx}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}; \quad a_1 = \frac{n \sum yx - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}. \quad (6.17)$$

Зависимость (6.13) является частным случаем более общей нелинейной зависимости

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_k x^k. \quad (6.18)$$

Коэффициенты регрессии a_0, a_1, \dots, a_k в (6.18) определяются аналогично по способу наименьших квадратов, в результате чего получим:

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 + \dots + a_k \sum x^k = \sum y; \\ a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 + \dots + a_k \sum x^{k+1} = \sum yx; \\ a_0 \sum x^k + a_1 \sum x^{k+1} + a_2 \sum x^{k+2} + \dots + a_k \sum x^{2k} = \sum yx^k; \end{cases} \quad (6.19)$$

Вычислив коэффициенты системы (6.19), ее можно решить любым известным методом.

В общем случае тесноту связи оценивают по отношению к общей дисперсии s_y^2 , т.е. рассматривают отношение

$$h_T^2 = \frac{M[\bar{y}(x) - m_y]^2}{s_y^2} \quad (6.20)$$

где $\bar{y}(x)$ – теоретическая функция регрессии;

m_y – условное генеральное среднее;

$M[\]$ – математическое ожидание;

s_y^2 – полная дисперсия;

h_T^2 – теоретическое корреляционное отношение.

Критерием близости корреляционной зависимости между x и y линейной функциональной зависимости является коэффициент корреляции, который показывает степень линейности связи между x и y :

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2\} \{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2\}}}, \quad (6.21)$$

где n – число измерений.

Коэффициент корреляции является частным случаем теоретического корреляционного отношения (6.20), когда связь между переменными x и y линейна. Значение коэффициента корреляции всегда меньше единицы. При $r=1$ переменные x и y связаны функциональной линейной связью.

На практике часто возникает потребность в установлении связи между y и многими параметрами x_1, x_2, \dots, x_n . Многофакторные теоретические регрессии аппроксимируют полиномами первого или второго порядка. Уравнение регрессии определяет систематическую составляющую, а ошибки разброса – случайную. В этом случае для изучения связи между переменными используют несколько видоизмененный метод, а уравнение связи составляется между зависимой случайной величиной y и n переменными x . Для простоты рассуждений ограни-

чимся линейной формой связи, представленной следующим уравнением регрессии:

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n, \quad (6.22)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – переменные;

a_0 и a_1, \dots, a_n – неизвестные параметры, называемые коэффициентами регрессии.

Метод, позволяющий по выборке, которая содержит отдельные измеренные значения переменных y и x_1, x_2, \dots, x_n , оценить значения неизвестных параметров a_0 и a_1, \dots, a_n , называется множественной регрессией. Выражение (6.22) называется уравнением множественной линейной регрессии. Коэффициенты уравнения (6.22) так же, как и в случае двух признаков, определяют, исходя из принципа наименьших квадратов:

$$Q = \sum [y - (a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n)]^2 = Q_{\min}. \quad (6.23)$$

Последовательно дифференцируя (6.23) по a_0 и a_1, \dots, a_n и приравнявая каждое из полученных выражений нулю, получают систему нормальных уравнений:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + \dots + a_n \sum x_n = \sum y; \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + \dots + a_n \sum x_1 x_n = \sum x_1 y; \\ a_0 \sum x_n + a_1 \sum x_1 x_n + a_2 \sum x_2 x_n + \dots + a_n \sum x_n^2 = \sum x_n y, \end{cases} \quad (6.24)$$

которую решают любым известным способом. Теоретическую модель множественной регрессии можно получить методами математического планирования активного эксперимента, а также пассивным способом, когда точки фактического пространства выбираются произвольно.

6.4 Анализ теоретико-экспериментальных исследований

В процессе проведения эксперимента постоянно возникает потребность проверить соответствие теоретических предпосылок экспериментальным данным. Проверка теоретических данных на адекватность, т.е. пригодность теоретической кривой экспериментальным данным, необходима также на стадии анализа теоретико-

экспериментальных исследований. Методы оценки адекватности основаны на использовании доверительных интервалов, позволяющих с заданной доверительной вероятностью определить значения оцениваемого параметра.

В практике оценки адекватности применяют различные статистические критерии, наиболее употребляемым является критерий Фишера. В этом случае для адекватности необходимо рассчитать экспериментальное (опытное) значение критерия Фишера ($K_{ф.э}$) и сравнить с теоретическим (табличным) ($K_{ф.т}$), принимаемым при требуемой доверительной вероятности P_d (обычно 0,95). При этом, если $K_{ф.э} < K_{ф.т}$, то модель адекватна, если $K_{ф.э} > K_{ф.т}$, то модель неадекватна.

Экспериментальный критерий вычисляют по формуле:

$$K_{ф.э} = \frac{D_a}{D_{ср}}, \quad (6.25)$$

где D_a – дисперсия адекватности;

$D_{ср}$ – средняя дисперсия всего эксперимента;

$$D_a = \frac{\sum_i^n (y_{im} - \bar{y}_{iэ})^2}{n-d}; \quad D_{ср} = \frac{\sum_i^m (y_{im} - \bar{y}_{iэ})^2}{mn}, \quad (6.26)$$

где $y_{i,m}$ – теоретическое значение функции для каждого измерения;

$y_{i,э}$ – экспериментальное значение функции;

$\bar{y}_{i,э}$ – среднее экспериментальное значение функции из m серий измерений;

n – количество измерений в одном опыте (в одной серии);

d – число коэффициентов уравнения теоретической регрессии;

Значение $K_{ф.т}$ принимается по таблице для заданной доверительной вероятности и числа степеней свободы.

При проведении экспериментов очень часто результаты обрабатываются в виде тех или иных законов распределения. В таких случаях возникают две основные задачи:

а) определение вида вероятностного закона, т.е. аппроксимации

экспериментальной информации каким-либо законом распределения;

б) проверка пригодности, т.е. адекватности этого закона экспериментальным данным.

Для установления математических вероятностных моделей в начале необходимо построить гистограмму случайного процесса. Далее проводят усредненную кривую, внешний вид кривой позволяет судить о виде закона распределения. Для проверки ее адекватности теоретической кривой необходимо применить какой-либо из критериев, наиболее часто применяют критерий Пирсона, особенно при больших выборках.

Гипотеза о законе распределения подтверждается, если соблюдается условие:

$$P(\chi^2, q) > \alpha = 1 - \Phi(x), \quad (6.27)$$

где $\alpha = 1 - \Phi(x)$ – уровень значимости, обычно принимаемый равным 0,1;

χ^2 – критерий согласия Пирсона;

q – число степеней свободы, $q = m - S$;

m – количество групп выборки или число измерений в одной серии;

S – число используемых связей (констант).

Значение χ^2 вычисляют по формуле:

$$\chi^2 = \sum_i^m \frac{(y_{э_i} - y_{m_i})^2}{y_{m_i}}, \quad (6.28)$$

где $y_{э_i}$, y_{m_i} – количество измерений (частота) в каждой группе серий соответственно по данным эксперимента и по теоретической кривой.

6.5. Прогнозирование многофакторных процессов и явлений

При исследовании горных процессов и явлений установить форму и тесноту связи можно тогда, когда измеряемые параметры выражены количественно. Однако многие признаки могут быть представлены только в качественной форме, так, например, система разработки (сплошная, столбовая и др.) схема проветривания (прямоточная, возвратноточная и т.д.) и прочее. В большинстве случаев объекты исследований чаще всего являются результатом влияния большого числа

количественных и качественных факторов и признаков. О таких объектах говорят, что они являются многомерными (изображаются точкой в многомерном пространстве). Для их описания используются специальные методы исследования, основанные на положениях теории информации, распознавания и прогнозирования.

В качестве примера рассмотрим методологию прогнозирования многопараметрических процессов и явлений, предложенную Фрумкиным Р.А., которая базируется на теории последовательного анализа А. Вальда. Методология предусматривает выполнение следующих этапов исследований:

- выбор объекта исследований и установление градации уровней прогнозируемых состояний;
- сравнение распределений факторов и оценка существенности их различий;
- разбивку упорядоченного ряда на диапазоны и выделение информационных признаков;
- расчет отношений правдоподобия, прогностических коэффициентов и информативности факторов;
- разработку распознающих систем, выбор уровня ошибок и прогностических порогов;
- проверку распознающих систем и оценку их эффективности.

Методология демонстрируется на примере прогнозирования потенциальной выбросоопасности углепородного массива на шахтах «Луганскуголь». В этом случае необходимо знать два подлежащих распознаванию состояния массива: приводящее (A_1) и не приводящее (A_2) к развязыванию внезапного выброса в той или иной ситуации. После проведения наблюдений (15-20 для каждого процесса) производится сравнение факторов $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, характерных для A_1 и A_2 .

Сравнение факторов произведем на примере начальной скорости газовыделения (x_1), для этого величины x_1 размещены для каждого события в возрастающем порядке с выделением значения, относящегося к A_1 и A_2 (табл.б.6).

Таблица 6.6 – Общий упорядоченный ряд распределения начальной скорости газовыделения

Начальная скорость газовыделения (л/мин) по диапазонам изменения фактора для каждого A					
первый		второй		третий	
A_1	A_2	A_1	A_2	A_1	A_2
1,1	0,8	3,4	3,1	6,1	6,5
	0,9		3,6	6,2	
	1,0		3,7	6,3	
	1,4	3,7	6,4		
	1,5	3,8			
1,9	1,8	4,0	4,1	7,0	7,1
	2,4	4,2		7,3	
	2,5			7,8	
2,5	2,8	4,8	5,9	8,0	8,0
	2,9	5,0		8,2	8,1
				8,5	
					8,6
					8,9

Сравнение произведено в два этапа. Предварительное сравнение распределений с целью оценки существенности их различий выполнено с помощью непараметрического критерия Вилкоксона – Манна – Уитни, а окончательное – путем разбивки всей шкалы на диапазоны. В каждом диапазоне (i -м) подсчитывается число наблюдений при реализации событий A_1 и A_2 , их частоты (вероятности) $P(x_1^i/A_1)$, $P(x_1^i/A_2)$ и отношение вероятностей $P(x_1^i/A_1)/P(x_1^i/A_2)$ (см. табл.6.7).

Принцип выбора одной из двух гипотез по отношению вероятностей заключается в следующем. Если отношение равно 2,08, то это значит, что гипотеза A_1 (в нашем случае выбросоопасное состояние массива) в 2,08 раза правдоподобнее гипотезы A_2 , поэтому отношение вероятностей называют отношением правдоподобия.

Таблица 6.7 – Распределение условных вероятностей начальной скорости газовыделения

Показатель	Диапазоны начальной скорости газовыделения, л/мин			Всего
	до 3,0	3,1-6,0	>6,0	
Число наблюдений				
A_1	3	8	12	23
A_2	9	6	5	20
Условные вероятности				
$P(x_1^i/A_1)$	0,13	0,35	0,52	1,0
$P(x_1^i/A_2)$	0,45	0,3	0,25	1,0
Отношение вероятностей				
$P(x_1^i/A_1)/P(x_1^i/A_2)$	0,29	1,17	2,08	
Прогностический коэффициент				
$100 \cdot \lg \frac{P(x_1^i/A_1)}{P(x_1^i/A_2)}$	-54	+7	+32	

Поскольку в процессе прогнозирования отношения правдоподобия для независимых факторов перемножаются, то удобнее использовать их логарифмы, умноженные на 100, называемые прогностическим коэффициентом. Коэффициент со знаком плюс говорит о большем правдоподобии гипотезы A_1 . Чем больше абсолютная величина коэффициента, тем больше он несет информации о преобладании вероятности одного из прогнозов. Однако информативность фактора нельзя определить только по величине прогностического коэффициента. Она зависит также от частоты попадания в данный диапазон. Поэтому формула для определения информативности фактора имеет вид:

$$I_{x_j} = \sum_i 100 \cdot \lg \frac{P(x_j^i/A_1)}{P(x_j^i/A_2)} [P(x_j^i/A_1) - P(x_j^i/A_2)], \quad (6.29)$$

где I_{x_j} – информативность j -го фактора.

Информативность фактора «начальная скорость газовыделения» равна $I_{x_j} = 26,3$. Чем больше величина I_x , тем больше в нем содержится информации, необходимой для различения сравниваемых состояний. При величине $I_{x_j} \leq 1$ исследуемый фактор можно считать не информативным.

Таблица 6.8 – Прогностическая таблица для оценки потенциальной выбороопасности массива

Наименование факторов и их информативность	Признаки	Прогностические коэффициенты
1. Наличие геологических нарушений $I=116$	есть	+75
	нет	-65
2. Пластовое давление газа, МПа $I=55$	$\leq 7,2$	-70
	7,3-9,9	-46
	10,0-11,5	+8
	$\geq 11,6$	+71
3. Удельный выход летучих веществ, % $I=45$	≤ 11	-45
	12-15	-28
	16-19	+14
	≥ 20	+86
4. Начальная скорость газовыделения, л/мин $I=22$	$\leq 3,0$	-16
	3,1-6,0	+9
	$\geq 6,1$	+80
5. Эффективная пористость, % $I=20$	≤ 10	-15
	10,1-16	-2
	$\geq 16,1$	+80
6. Мощность пласта, м $I=20$	$\leq 0,85$	+65
	0,86-1,0	+14
	$\geq 1,1$	-17
7. Коэффициент крепости угля по М.М. Протодяконову $I=20$	$\leq 0,8$	+68
	0,9-1,5	-8
	$\geq 1,6$	-18
8. Перемятость угля по А.Е. Ольховиченко $I=13$	$\leq 2,4$	-10
	2,5-2,6	-8
	2,7-3,0	-2
	$\geq 3,1$	+80
9. Глубина разработки, м $I=8$	≤ 300	-10
	301-400	+2
	≥ 401	+18

После вычисления информативности всех имеющихся в распоряжении исследователя факторов их заносят в так называемую прогностическую таблицу (табл.6.8). Использованию таблицы предшествует выбор прогностических порогов, которые намечаются из допустимого процента ошибок:

$$\text{Порог } A_1 = 100 \cdot \lg \frac{1-a}{b} ; \quad \text{Порог } A_2 = 100 \cdot \lg \frac{a}{1-b} . \quad (6.30)$$

где a – ошибка первого рода, если событие A_1 принимают за событие A_2 ;

β – ошибка второго рода, когда событие A_2 принимают за событие A_1 .

Допустимый уровень ошибок назначается исследователем и зависит от сложности и целей проводимых исследований. Для целей прогнозирования внезапных выбросов угля и газа в связи с большой сложностью и слабой изучаемостью явления он может быть принят для ошибок I рода 20 % , а II рода – 5 % . На практике это приведет к некоторому увеличению затрат, связанных с реализацией дополнительных мер по соблюдению ПБ, однако в 4 раза снизит вероятность ситуаций, связанных с трагическим исходом. При таком уровне ошибок порог для выбора решения в пользу A_1 будет равен + 70, в пользу A_2 – 120.

Применение табл. 6.8 сводится к следующему. С учетом рассчитанных порогов определяют значимость каждого фактора в порядке их расположения в таблице. Затем суммируют прогностические коэффициенты, соответствующие каждому из факторов для выработки, которую следует отнести и одному из возможных событий A_1 и A_2 . Если достигнут порог со знаком минус, выносят решение в пользу гипотезы A_2 . Если после суммирования коэффициентов для всех признаков ни один из порогов не достигнут, то выносят решение о недостаточной информации для решения вопроса с намеченным уровнем надежности.

ЛЕКЦИЯ 16

ТЕМА 7. АНАЛИЗ, ОФОРМЛЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.1 Анализ исследований и формулирование выводов и предложений

Основой совместного анализа теоретических и экспериментальных исследований является сопоставление выдвинутой рабочей гипотезы с опытными данными.

В результате анализа могут возникнуть три случая:

а) установлено полное или достаточно хорошее совпадение рабочей гипотезы, теоретических предпосылок с результатами опыта. На основании этого полученные результаты исследований используют для формулирования основных научных положений, вытекающих из рабочей гипотезы, в результате чего последняя превращается в доказанное теоретическое положение или даже в теорию;

б) экспериментальные данные лишь частично подтверждают положение рабочей гипотезы и в той или иной её части противоречат ей. В этом случае рабочую гипотезу изменяют и перерабатывают так, чтобы она наиболее полно соответствовала результатам эксперимента. Чаще всего производят дополнительные эксперименты с целью подтверждения рабочей гипотезы, после чего она также превращается в теорию;

в) эксперимент не подтверждает рабочую гипотезу. Её анализируют, при необходимости пересматривают. Затем производят новые экспериментальные исследования с учётом новой рабочей гипотезы. Отрицательный результат научной работы, как правило, не является бросовым, так как этот результат помогает выработать правильные представления об объектах, явлениях и процессах.

После анализа формулируют выводы или предложения, которые представляют в форме заключения к работе. Это сделать не так просто, так как необходимо выделить то новое и существенное, что является результатом исследований, и определить пути дальнейшей работы. Количество выводов не должно быть более 5-10, и они должны прямо

отвечать поставленной цели исследований.

Выводы удобно разделить на научные и производственные, причём в научных выводах необходимо показать какой вклад внесён в науку в результате выполненных исследований. В заключение нужно также осветить план использования законченных НИР и дать ожидаемый экономический эффект.

7.2 Составление отчётов о НИР

Материалы, полученные в процессе исследований, обрабатывают, систематизируют и оформляют в виде научного отчёта. Он должен быть изложен логически последовательно, формулировки должны быть точны и просты, результаты работы представлены конкретно, а выводы убедительно аргументированы.

При составлении научных отчётов следует руководствоваться требованиями ГОСТ, в соответствии с которым отчёт должен содержать: титульный лист; список исполнителей; реферат; содержание (оглавление); основную часть, которая в свою очередь содержит: введение, разделы (главы), отражающие методику, содержание и результаты выполненной работы, заключение (выводы и предложения); список литературы; приложения. В необходимых случаях в отчёт включают перечень сокращений, символов, специальных терминов и их определений.

Во введении характеризуют состояние вопроса, цель, новизну и актуальность исследования. В основной части излагают обзор, анализ и критику, ранее выполненных исследований, теоретические и экспериментальные исследования с изложением методики, результатов и их анализа. Заключение содержит оценку результатов работы, намеченных путей дальнейшей работы, значимость и научную ценность. В отчётах по техническим наукам отмечается необходимость проведения ОКР. В приложение включают вспомогательный материал в виде математических выкладок и расчётов, таблиц цифровых данных, протоколов и актов испытаний, инструкций и методик.

Представляют отчёт в виде тома (нескольких томов), отпечатанных на машинке или принтере. Текст отчёта разделяют на главы, параграфы, пункты. Иллюстрации именуют рисунками, нумеруют и

сопровождают подрисуночной подписью. Таблицы также нумеруются и имеют заголовки.

Специальной формой отчёта является диссертация, которая содержит сведения о самостоятельной научной работе, представленной автором на соискание учёной степени.

Одной из форм составления научных отчётов является реферат, который имеет обычно следующее содержание:

- введение, где характеризуется теоретическое и практическое значение темы;
- основная часть реферата, где излагают сущность реферируемых данных и критические замечания по ним;
- заключение, где даётся оценка и выводы о проанализированной информации;

Рецензия или отзыв о научной работе оценивает научные положения и результаты научного исследования. При составлении рецензии обычно придерживаются такой последовательности:

- актуальность темы;
- оценка научного содержания, языка, стиля изложения;
- последовательность изложения результатов;
- оценка иллюстраций;
- замечания по объёму и содержанию;
- общие выводы и итоговая оценка исследований.

Критика рецензента должна быть принципиальной, научно обоснованной, но вместе с тем доброжелательной, способствующей улучшению исследования.

Доклад или научное сообщение также является одной из форм отчёта о НИР. Это краткое изложение основных научных положений автора, их практическое и научное значение, выводы и предложения. Для доклада отводят ограниченное время (10-20 мин), поэтому он должен быть кратким и чётким. Не рекомендуется читать доклад, так как эмоциональность и убеждённость докладчика обеспечивают контакт с аудиторией. Главным в научном докладе является содержание и научная аргументация.

7.3 Подготовка научных материалов к опубликованию

В научной печати публикуют новые научные результаты и конкретные предложения, имеющие важное теоретическое и практическое значение. К научным печатным работам относятся монографии, брошюры, статьи, тезисы докладов, рефераты, а к учебным изданиям – учебник и учебные пособия.

В монографии излагают итог всестороннего исследования определённой темы или проблемы, выполненный одним или несколькими авторами. В статье приводят результаты, полученные по конкретному вопросу и имеющие научное и практическое значение. Статьи публикуют в научных журналах или сборниках. Объём статьи не должен превышать 10-12 страниц.

Учебник – это систематизированное изложение определённой учебной дисциплины в соответствии с учебной программой, и утверждённое официальной инстанцией в качестве учебника. Учебное пособие частично заменяет или дополняет учебник.

Подготовку материалов исследования к печати проводят в определённой последовательности. Составляют план и систематизируют материал исследования. Затем по главам и параграфам излагают материал в научном стиле. Материалы печатают на пишущей машинке или принтере. После этого рукопись редактируют. Различают литературное и техническое редактирование, которое выполняется по определённым правилам. После этого статья направляется в редколлегию журнала или издательство.

7.4 Внедрение законченных научно-исследовательских работ

Внедрение законченных научных исследований в производство является завершающим этапом НИР. Внедрение – это передача производству научной продукции (отчёт, временные указания, технические условия, технический проект и т.д.) в удобной для реализации форме с обеспечением технико-экономического эффекта.

Процесс внедрения состоит из двух этапов: опытно-производственного внедрения; серийного внедрения. На первом этапе научная разработка проходит опытную проверку в производственных

условиях. Новые конструкции должны быть предварительно изготовлены и испытаны на полигонах, новые материалы проходят испытания в производственных условиях и их используют для изготовления опытных конструкций, технологические процессы подлежат опытной проверке на производственных предприятиях, а если в результате выполнения НИР предлагается новая машина или какое-либо оборудование, то необходимо изготовить опытный образец.

Опытные образцы конструкций, материалов, машин тщательно изучают в производственных условиях при различных многократных воздействиях. Продолжительность таких испытаний устанавливают расчётом. На основании опытной проверки анализируется технико-экономическая эффективность образца, его эксплуатационные показатели (надёжность, долговечность), себестоимость, технологичность изготовления и делается вывод о необходимости переоборудования производственных предприятий. Результаты испытаний оформляют в виде пояснительной записки, к которой прилагаются различные акты, подписываемые представителем заказчика и подрядчика.

Первый этап внедрения требует больших финансовых затрат, он трудоёмок и продолжителен, так как часто требуется вносить переделки в опытный образец. Участие авторов разработки на первом этапе является обязательным, так как требуется разработка рекомендаций по совершенствованию опытных образцов.

Прикладные теоретические исследования считаются завершёнными, если в соответствии с договором по ним разработаны рекомендации, указания, инструкции и другие руководящие материалы.

После опытно-производственного испытания новые материалы, конструкции, технологию внедряют в серийное производство. На этом этапе научно-исследовательские организации не принимают участия. Они могут, по просьбе внедряющих организаций, давать консультации или оказывать научно-техническую помощь.

7.5 Оценка эффективности научных исследований

Наука является наиболее эффективной сферой вложения капиталовложений. В мировой практике принято считать, что прибыль от

капиталовложений в науку составляет 100-200%, что на много выше прибыли в любых отраслях. В нашей стране эффективность науки также достаточно высока.

Наука с каждым годом обходится всё дороже. В связи с этим в экономике возникает и вторая проблема – снижение непосредственных затрат на исследования при возрастающем эффекте от их внедрения. Поэтому под эффективностью научных исследований понимают также по возможности более экономное проведение НИР. Повышение эффективности научных исследований в коллективе может быть достигнуто различными способами: улучшением планирования и организации НИР; более эффективным использованием оборудования; рациональным использованием ассигнований; материальным стимулированием научного труда; применением научной организации труда; улучшением психологического климата в научном коллективе и т.д.

Для оценки эффективности исследований применяют различные критерии. Фундаментальные исследования дают эффект лишь спустя значительный период после начала исследований. Результаты фундаментальных НИР можно оценить только с помощью качественных критериев:

- возможность применения результатов в различных отраслях;
- новизна явлений, дающая импульс для актуальных исследований;
- вклад в обороноспособность страны;
- приоритет отечественной науки;
- международное признание работ;
- фундаментальные монографии;
- цитируемость работ и т.д.

Прикладные исследования оценить проще, в этом случае применяют различные количественные критерии. В условиях рыночной экономики оценивание эффективности прикладных научно-технических разработок производится путем определения научно-технического, экономического и социального эффектов.

Для технологических разработок научно-технический эффект выражается в повышении научно-технического уровня и в улучшении параметров техники и технологии, что вытекает из установленных но-

вых закономерностей, а также из разработанных новых технологических способов производства.

Научно-техническая эффективность результатов прикладных НИР устанавливается в комплексе с оценкой их экономической и социальной эффективности с помощью показателей научно-технического уровня (табл. 7.1), который определяется по сопоставляемым признакам.

Таблица 7.1 – Ориентировочная шкала баллов для сравнения научно-технического уровня НИР и ОКР и нормативные величины весовых коэффициентов

Показатели научно-технического уровня	Признаки показателей	Количество баллов	Коэффициент важности показателя
Научно-технический уровень	Превышает лучшие мировые аналоги	10	0,3-0,35
	Соответствует мировому уровню	7-9	
	Ниже лучших мировых аналогов	5-6	
	Превышает лучшие отечественные аналоги	3-4	
	Соответствует отечественному уровню	1-2	
	Ниже отечественного уровня	0	
Перспективные	Важнейшие	10	0,35-0,4
	Важные	5-7	
	Полезные	1-3	
Потенциальный масштаб практического использования	Мировой рынок	10	0,2
	Отрасли национальной экономики	7-8	
	Отрасль (регион)	3-5	
	Отдельное предприятие (объединение)	1,2	
Степень вероятности получения положительных результатов	Большой (значительный)	10	0,1
	Умеренный (средний)	5-6	
	Малый (слабый)	1-3	

Для оценивания научно-технического уровня результатов НИР и ОКР выбирают несколько наиболее существенных технических параметров, в которых, прежде всего, заинтересованы будущие потребители технологии, продукции, услуг, способов выполнения работ. В частности, это может быть производительность, надежность эксплуатации, энерго- и материалоемкость, показатели экологичности. Другие параметры (особенно технические) должны находиться в пределах общепринятого уровня.

Оценивание включает несколько этапов:

- определение совокупности необходимых нормативно-правовых документов, отображающих требования к новой продукции, особенно в области экологии, безопасности, предъявляемые в странах возможной продажи фирмами-конкурентами;

- определение перечня технических и технико-экономических показателей, необходимых для оценки научно-технического уровня;

- формирование группы аналогов на мировом и отечественном рынках и установление значений их технико-экономических показателей;

- для сравнения необходимо брать (если речь идет о новых образцах техники) такие аналоги, выпуск которых только начался, или (если речь идет о технологиях и материале) которые используются в последние 2-3 года;

- для каждого аналога необходимо определить значения одинаковых оценочных показателей;

- сопоставление значений параметров новой продукции, что будет получена в результате выполнения НИР и ОКР, с требованиями нормативных документов и параметрами аналогов.

Экономический эффект состоит в получении экономических результатов от научно-технических разработок как в целом для экономики страны, так и для отдельных регионов, отраслей, организаций и предприятий, которые принимают участие в реализации технологических нововведений.

При расчёте экономической эффективности возможны различные случаи в зависимости от цели расчета, вида объекта внедрения и базы сравнения. В каждом конкретном случае необходимо руководствоваться нормативными материалами.

Связь между экономическими показателями и техническими параметрами разработки устанавливается в каждом конкретном случае при выполнении НИР, при чем в практике укрупненных расчетов затрат на новую технику широкую популярность нашел метод регрессионного анализа. В общем виде регрессионную зависимость можно записать как

$$y=f(x, a), \quad (7.1)$$

где y – зависимая переменная (тот или иной экономический показатель);

$x=\{x_1, \dots, x_m\}$ – вектор независимых переменных (технических параметров;

$a=\{a_0, \dots, a_m\}$ – коэффициенты модели.

Для установления взаимосвязи с показателями экономической эффективности могут быть использованы и нормативные методы, с помощью которых устанавливается влияние изменений в технических параметрах на поточные затраты производства, например, на заработную плату, на затраты электроэнергии, материальные составляющие затрат и др.

С точки зрения организации разработчика основными критерием экономической эффективности является отношение:

$$K_3 = \mathcal{E}/\mathcal{Z}, \quad (7.2)$$

где \mathcal{E} – экономический эффект от внедрения темы;

\mathcal{Z} – затраты на выполнение и внедрение темы.

Эффективность труда коллектива научных работников оценивают:

– критерием производительности труда – $K_{\text{п}}=C_0/P$, где C_0 – сметная стоимость НИР и ОКР; P – среднесписочное число работников подразделения;

– количеством внедренных тем за определенный период;

– экономическим эффектом от внедрения НИР и ОКР;

– количеством полученных патентов;

– количеством проданных лицензий или валютной выручки.

Эффективность конкретного научного работника оценивают по количеству публикаций и цитируемости его трудов. Экономическую оценку работы отдельного работника применяют редко.

С точки зрения потребителя научной продукции основным по-

казателем эффективности НИР и ОКР является экономический эффект \mathcal{E} от внедрения разработки, поэтому остановимся подробно на методике её расчёта.

Расчёт экономического эффекта от использования результатов в НИР и ОКР имеет свои особенности. Так как научный процесс условно можно разделить на три этапа (выбор темы, выполнение НИР и ОКР и внедрение в производство) то и расчёт экономической эффективности производят поэтапно. В соответствии с тремя этапами НИР различают три вида эффективности: предварительную, ожидаемую, фактическую.

Предварительная экономическая эффективность устанавливается при составлении ТЭО и включении темы исследований в план. Рассчитывают её по ориентировочным показателям.

Ожидаемую экономическую эффективность вычисляют в процессе выполнения НИР и относят к определённому периоду (году) внедрения продукции в производство. Это более точный критерий, хотя объём внедрения можно определить только ориентировочно.

Фактическая экономическая эффективность определяется после внедрения научных разработок в производство. Расчёт её производят обычно по фактическим затратам и с учётом конкретных стоимостных показателей. Она обычно несколько ниже ожидаемой и определяют её на предприятии, где осуществляется внедрение.

На уровне предприятий, использующих научно-технические разработки, экономические результаты определяют в виде выручки от реализации, изготовленной новой продукции, или продукции, изготовленной по новой технологии за вычетом средств, затраченных на собственные потребности. В состав затрат в процессе определения эффективности включают все необходимые для внедрения одноразовые капитальные и поточные затраты всех участников проекта. При этом в основе расчёта экономического эффекта лежат приведённые затраты:

$$Z_{np} = C + E_n \cdot K, \quad (7.3)$$

где C – себестоимость;

K – капитальные вложения;

E_n – нормативный коэффициент окупаемости капзатрат.

Ожидаемую или фактическую экономическую эффективность \mathcal{E}

вычисляют по разности приведённых затрат базового (старого) и нового варианта продукции:

$$\Xi = Z_{np.1} - Z_{np.2} . \quad (7.4)$$

При известных вероятностях различных условий реализации проекта математическое выражение определения ожидаемого экономического эффекта записывается в следующем виде:

$$\Xi = \sum P_i \cdot \Xi_i , \quad (7.5)$$

где Ξ_i – эффект при i -м условии реализации;

P_i – вероятность реализации этих условий.

Если в процессе внедрения НИР и ОКР требуются дополнительные капиталовложения, то вычисляют кроме того фактический срок их окупаемости:

$$T_{\phi.} = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1} , \quad (7.6)$$

где K_1 и K_2 – удельные капиталовложения по новому и старому вариантам;

C_1 и C_2 – себестоимость единицы продукции по новому и старому вариантам.

Чтобы оценить эффективность затрат, показатель T_{ϕ} сравнивают с нормативным показателем для данной отрасли:

$$T_n = \frac{1}{E_n} \geq T_{\phi} . \quad (7.7)$$

Если неравенство соблюдается, то капиталовложения эффективны. Для учета фактора времени, если в процессе выполнения и внедрения НИР возникает потребность в капзатратах в различные периоды, необходимо эти затраты приводить к сопоставимому виду. Для этого используют зависимости приведения к:

$$\text{– будущему периоду – } K_{\bar{o}} = K_m (1 + E_n)^T ; \quad (7.8)$$

$$\text{– настоящему периоду – } K_m = \frac{K_{\bar{o}}}{(1 + E_n)^T} , \quad (7.9)$$

где T – продолжительность периода;

$K_{\bar{o}}$ – эквивалентные затраты через T лет;

K_m – текущие затраты.

В условиях рыночной экономики, особенно в период ее становления, инвестирование в науку сопряжено с риском неполучения ожидаемых результатов в желаемые сроки. В связи с этим, кроме определения экономической эффективности, возникает необходимость в количественной оценке риска инвестируемых в научные разработки средств. Это делается для того, чтобы заранее, еще до осуществления капитальных вложений, инвесторы, включая и само предприятие, планирующее строительство, могли иметь ясную картину реальных перспектив о получения прибыли и возврата вложенных средств.

Методические подходы к оценке экономической эффективности инвестиционных проектов должны предусматривать обеспечение минимально гарантированного уровня доходности проекта при условии компенсации инфляционного изменения покупательной способности денег в течение рассматриваемого периода времени и покрытие риска инвестора, связанного с осуществлением проекта. Это достигается путем использования методов дисконтирования.

Процесс дисконтирования стоимости проекта заключается в приведении к выбранному в качестве базы моменту времени (текущему или специально обусловленному) стоимостной оценки будущих значений как самих инвестиций, распределенных во времени, так и поступлений (денежного потока) от инвестиций с использованием.

Зависимость между современной и будущей стоимостью инвестиционного проекта выглядит следующим образом:

$$CC = BC / (1 + k_o)^t \quad (7.10)$$

где CC – современная стоимость;

BC – будущая стоимость;

k_o – коэффициент приведения (дисконтирования);

t – разрыв во времени между текущим моментом и базисным годом инвестиционного проекта.

С учетом дисконтирования величина накопленных чистых поступлений от реализации проекта определяется выражением:

$$ЧП_0 = \sum_{t=1}^T ЧП_t / (1+k_0)^t, \quad (7.11)$$

где $ЧП_0$ – чистые поступления от реализации проекта, распределенные во времени.

Чистые поступления от реализации проекта рассчитываются как сумма чистой прибыли и начисленной амортизации:

$$ЧП_t = П_t + A, \quad (7.12)$$

где $ЧП_t$ – величина чистой прибыли проекта;

A – амортизационные отчисления.

Рассматриваемый показатель позволяет рассчитать накопленную текущую прибыльность будущих доходов, объем которых частично зависит от ссудного процента и темпов инфляции.

Аналогично может быть рассчитана приведенная будущая стоимость проекта, где в числителе формулы представлены распределенные по годам будущего периода капитальные вложения, предназначенные на финансирование внедрения разработки.

В международной практике признанными показателями, характеризующими выгоды от внедрения научно-технических разработок, и которые используются для оценки экономической эффективности инвестиционных проектов, являются критерии, базирующиеся на временной стоимости денег:

NPV (Net Present Value) – чистый (дисконтированный) доход (прибыль);

PI (Profitability Index) – индекс доходности (прибыльности);

PBP (Payback Period) – период (срок) окупаемости инвестиций в реализацию проектов;

IRR (Internal Rate of Return) – внутренняя норма доходности (рентабельности).

Так, например, разность дисконтированных чистых поступлений от реализации проекта и первоначальных поступлений определяет величину чистого приведенного дохода:

$$ЧПД = \sum_{t=1}^T ЧПД_t / (1+k_0)^t - \sum_{t=1}^T ИЗ_t / (1+k_0)^t \quad (7.13)$$

где *ЧПД* – чистый приведенный доход;

ИЗ – инвестиционные затраты, включающие затраты на исследования, оборотные средства и издержки производства (при определении реальной эффективности реализации проекта).

Чистый приведенный доход позволяет сравнить капиталовложения, которые необходимо осуществить, с дополнительной прибылью, которую они обеспечат в будущем. Если дисконтированная сумма ожидаемых в будущем доходов от капиталовложений больше, чем издержки на инвестирование, то проект может быть признан эффективным, т.е. следует инвестировать только те проекты, которые имеют положительное значение *ЧПД*. Этот показатель наиболее рационально использовать для ранжирования инновационных предложений и выбора приоритетных проектов с точки зрения их эффективности.

Коэффициент чистого дисконтированного дохода (индекс доходности) определяется как отношение *ЧПД* и необходимой дисконтированной стоимости инвестиций. Это отношение позволяет получить дисконтированную норму прибыли (коэффициент эффективности), вычисляемую по формуле:

$$ИД = ЧПД / ДСИ, \quad (7.14)$$

где *ИД* – индекс доходности или, иными словами, коэффициент эффективности *k_э*;

ДСИ – дисконтированная (приведенная) стоимость инвестиций в инновации.

Внутренняя норма доходности (ВНД) определяется как расчетная ставка дисконта, при которой суммарные чистые приведенные поступления равны нынешней (дисконтированной) стоимости затрат на проект. Показатель ВНД вычисляется по формуле:

$$\sum_{t=1}^T \frac{P_t}{(1+k_d)^t} = 0, \quad (7.15)$$

где *P_t* – чистый денежный поток за период *t*, вычисляемый путем решения (7.15) относительно *k_d* для определения минимально допустимой нормы эффективности, при которой *ЧПД* равен 0, или дисконтированные прибыли равные инвестициям. Этот показатель устанавлива-

ет границу безубыточности инвестиционного проекта.

Срок окупаемости инвестиций определяется как период для возмещения первоначально вложенный на разработку средств на основе накопленных чистых реальных денежных потоков, обусловленных реализацией инновационного проекта, т.е. отношением суммы инвестиций к дисконтированным доходам. Показатель периода окупаемости инвестированных в инновации средств позволяет получить информацию об уровне рискованности проекта в связи с изменениями в относительной ликвидности инвестиций.

Показатели экономической эффективности (7.13-7.15) инновационных проектов учитывают затраты и результаты, связанные с их реализацией, как коммерческого характера, так и те, которые выходят за пределы прямых финансовых интересов участников проекта, в том числе эффект отраслей национальной экономики, социальный эффект и другие составляющие эффективности, обусловленные вне рыночной деятельностью субъектов внедрения научно-технических разработок.

Для удовлетворения коммерческих интересов каждого из участников проекта важное значение имеет оценка финансовых результатов его реализации или коммерческая эффективность, которая является составляющей интегральной эффективности отраслей национальной экономики. Коммерческая эффективность проектов научно-технических разработок и их использования определяется как соотношение финансовых затрат и результатов научно-технических разработок, обеспечивающих требуемую норму доходности.

Социальные, экологические и другие результаты, которые не могут быть оценены в стоимостном выражении, учитываются как дополнительные показатели эффективности отраслей национальной экономики и принимаются во внимание при принятии решений о приоритетности проекта и его государственной поддержке. Однако в большинстве случаев социальные следствия научно-технических разработок поддаются стоимостной оценке и включаются в состав общих результатов проекта в пределах установленной его эффективности.

Основными видами социальных результатов являются:

- изменения в структуре производственного персонала и его

квалификации, в том числе изменения численности работников (прежде всего женщин), занятых вредными видами труда, а также требующих повышения квалификации;

– улучшение здоровья работников, определяемые с помощью уровня предотвращенных потерь, связанных с выплатами из фонда социального страхования или затратами на охрану здоровья.

– изменения окружающей среды.

Влияние инновации на изменения условий труда работников и окружающей среды оцениваются в баллах, соответствующих санитарно-гигиеническим нормам или психологическим условиям труда, а также нормативами уровня загрязнения окружения. С этой целью могут быть использованы данные социологических опросов, а также специальные измерения на рабочих местах.

8. ПРИМЕР КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЗАДАЧИ

Введение

В качестве примера рассмотрим решение исследовательской задачи, цель которой состоит в установлении зависимости производительности электровоза при откатке горной массы от расстояния транспортирования.

Данная задача может быть решена различными методами:

- экспериментальным, т.е. путем непосредственных наблюдений и их последующей обработки;
- аналитическим, т.е. путем рассмотрения логической сущности формализации данного производственного процесса;
- статистическим, т.е. путем обработки представительной статистической информации.

Эти методы могут применяться как по отдельности, так и в комплексе. В последнем случае речь идет о комплексном методе исследования.

8.1 Экспериментальный метод

Если по интересующему нас вопросу нет готовых данных, которые можно обработать статистическими методами, или количество их недостаточно, то исходную информацию можно получить непосредственными наблюдениями, организованными в достаточном объеме, или с помощью специальных опытов (экспериментов), так как наблюдения обычно проводятся в не совсем сравнимых условиях.

Пусть студентами на практике путем наблюдений получены по отдельным шахтам следующие данные о сменной производительности электровоза в зависимости от расстояния транспортирования, сведенные в журнал наблюдений в соответствии с порядковым номером студента по журналу группы (табл. 8.1).

Таблица 8.1 – Журнал наблюдений

Номер наблюдения	Шахта	Расстояние откатки, км	Производительность откатки в смену, т
1	«Украина»	1,20	300
2	«Перевальская»	0,70	425
3	«Луганская»	1,05	470
4	им. Артема	1,85	350
5	«Фашевская»	0,40	425
6	«Славяносербская»	0,60	510
7	«Никонон-новая»	1,95	275
8	«Белореченская»	1,60	350
9	«Лугунинская»	0,30	550
10	«Черкасская»	1,30	325
11	«Анненская»	1,50	340

После получения цифровых данных производится их обработка и анализ. Обработка может быть произведена в табличной форме. В этом случае записи журнала наблюдений располагаются в определенном порядке, удобном для анализа. В нашем случае в зависимости от возрастания расстояния транспортирования.

Таблица 8.2 – Обработка данных журнала наблюдений

Номер наблюдения	Расстояние откатки, км	Производительность откатки в смену, т
9	0,3	550
5	0,4	425
6	0,6	510
2	0,7	425
3	1,05	470
1	1,20	300
10	1,30	325
11	1,50	340
8	1,60	350
4	1,85	350
7	1,95	275

Табл. 8.2 позволяет в некоторой мере судить о зависимости количества перевезенной за смену горной массы от расстояния. Но пользоваться ею не совсем удобно. Так, например, интервалы между значениями расстояния транспортирования при отдельных наблюдениях не одинаковы, а в некоторых случаях одинаковым расстояниям соответствуют различные количества перевезенных грузов.

Поэтому более наглядно обработку наблюдений производить в графическом виде (см. рис. 8.1). При построении такого графика обна-

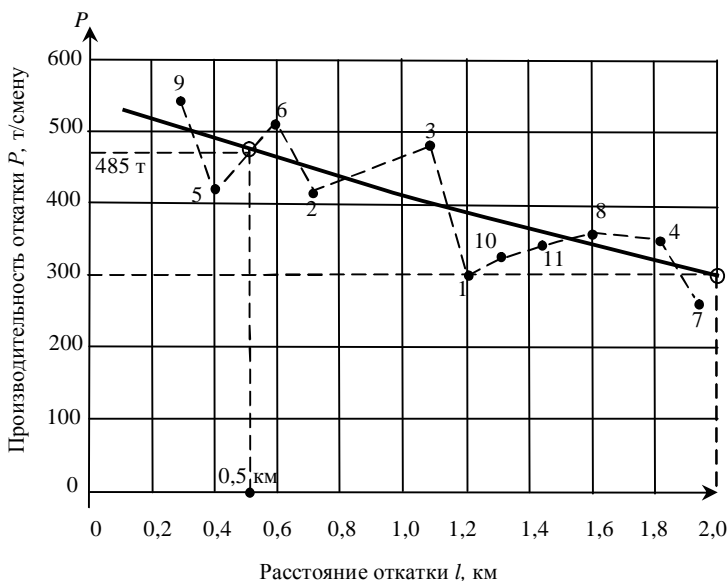


Рисунок 8.1 – Результаты экспериментальных наблюдений

руживается, что точки отдельных наблюдений не располагаются на одной плавной линии, а наблюдается их разброс. Это объясняется, в первую очередь, неполной идентичностью условий отдельных наблюдений на различных шахтах. В самом деле, при наблюдениях фиксировали только ведущий фактор, расстояние откатки, от которого зависит производительность электровоза. Но, разумеется, на P может влиять и много других факторов, даже при одном и том же типе электровоза.

Например, состав поезда, наклон и состояние рельсовых путей; время работы в течение суток; продолжительность маневровых и погрузочно-разгрузочных работ на конечных пунктах и др. Эти и им подобные факторы, будучи неодинаковыми при отдельных наблюдениях, и обуславливают разброс точек.

При таких наблюдениях, имеющих небольшую степень точности, вполне достаточным оказывается простейший графический способ построения зависимости, который заключается в следующем:

- отдельные точки наблюдений соединяют ломаной линией;
- проводят кривую так, чтобы суммы площадей над и под кривой были одинаковыми.

Такой кривой уже можно пользоваться непосредственно или на основе ее составлять числовые таблицы с равными интервалами состояний (графическое решение). По установленным наблюдениям можно подобрать эмпирическую формулу, приближенно описывающую эту кривую.

Для подбора эмпирической формулы в простейших случаях достаточно поступить следующим образом. По внешнему виду кривой подбирают тип уравнения, с помощью которого можно описать имеющуюся зависимость. Зависимость, представленную на рисунке, можно попытаться рассматривать как гиперболу, т.е. предположить, что она может быть аппроксимирована уравнением

$$y = \frac{a}{b+x}, \quad (8.1)$$

где y – сменная производительность;

a, b – коэффициенты (параметры аппроксимации);

x – расстояние транспортирования.

Для определения значений коэффициентов, что необходимо для получения расчетной формулы, берем на кривой две произвольные, отдаленные одна от другой, точки с координатами:

I – $l = 0,5$ км и $P = 485$ т;

II – $l = 2,0$ км и $P = 300$ т.

и подставляем эти значения в исходное уравнение.

$$\begin{cases} 485 = \frac{a}{b+0,5}; \\ 300 = \frac{a}{b+2}. \end{cases}$$

Мы имеем два линейных уравнения, решая систему находим неизвестные коэффициенты:

$$a = 1179,7; \quad b = 1,93.$$

То есть искомое уравнение имеет следующий вид:

$$y = \frac{1179}{1,93+l}. \quad (8.2)$$

Для проверки этого результата берем другую пару точек, например $l = 0,3$ км; $P = 520$ т и $l = 1,7$ км, $P = 330$ м, и аналогично получаем другое уравнение

$$y = \frac{1264}{2,13+l}, \quad (8.3)$$

с несколькими иными коэффициентами.

Это можно объяснить неполным соответствием эмпирической кривой предложенному виду уравнения или приближенностью отсчета значений координат. Следует также отметить не совсем удачный выбор формы зависимости, так как при $l = 0$ получаем $P = 600$ т/сутки, что невозможно объяснить.

Для более точного исследования интересующей нас зависимости проводятся эксперименты в специально организованной обстановке, чтобы влияние прочих факторов сделать более или менее одинаковым. При невозможности организовать такой эксперимент в производственных условиях, опыты проводят в лабораториях.

В нашем случае, исследуя сменную производительность электроваза, можно организовать специальные экспериментальные работы по одной шахте с разными способами маневров с вагонами и составами на конечных пунктах; с различным количеством вагонов в составе; фиксировать время работы (первая или ночная смена) и т.д. Обработку наблюдений производят также, но благодаря большей однородности условий разброс точек будет меньше и графики оказывают более плавными.

8.2 Аналитический метод

Для исследования интересующей нас зависимости аналитическим методом, в первую очередь, следует составить рабочую гипотезу о протекании процесса электровозного транспорта в форме, допускающей выразить ее количественно.

Применительно к рассматриваемому конкретному примеру определения производительности электровоза, прежде всего, следует проанализировать изучаемый производственный процесс во времени. Во времени он представляет собой последовательно повторяющиеся циклы (обороты), в течение каждого из которых, в свою очередь, может быть выделены:

- время, необходимое для операций электровоза на погрузочном пункте;

- время транспортирования груженого состава;

- время на операции на разгрузочном пункте;

- время транспортирования порожнего состава.

Введем обозначения: P – сменная производительность электровоза, т/смену; l – расстояние транспортирования, м; v_2 – средняя скорость движения с грузом, м/мин; v_n – средняя скорость движения с порожняком, м/мин; V – емкость вагонетки, м³; γ – объемный вес горной массы, т/м³; n – число вагонеток в составе, шт; t – суммарное время операций на конечных пунктах пути за один оборот, мин; $(T_{см} - T_{пер})$ – длительность полезной работы; $T_{см}$ – продолжительность смены, мин; $T_{пер}$ – продолжительность перерыва, мин.

Принимая гипотезу о цикличности процесса, сделаем ряд допущений:

- длительность циклов транспортирования в течение смены равна;

- средняя скорость движения состава постоянна;

- затраты времени на маневры за каждый цикла равны.

Учитывая принятые обозначения и допущения, время одного цикла можно выразить зависимостью

$$t_{об} = t + \frac{l}{v_2} + \frac{l}{v_n}. \quad (8.4)$$

Представляя время, затрачиваемое на конечных пунктах, в долях от продолжительности движения, $t = k \frac{2l}{v_{cp}}$, где v_{cp} – средняя скорость движения состава, $k < 1$ – доля времени на погрузочном и разгрузочном пунктах, получим:

$$t_{об} = 1 + k \frac{2l}{v_{cp}}. \quad (8.5)$$

Число циклов в смену равно

$$N_{об} = \frac{(T_{см} - T_{неп})}{t + \frac{l}{v_z} + \frac{l}{v_n}} = \frac{T_{см} - T_{неп}}{2 \frac{l}{v_{cp}} (1+k)} = \frac{v_{cp} (T_{см} - T_{неп})}{2l(1+k)}.$$

Отсюда получаем сменную производительность электровоза:

$$P = n \cdot g \cdot V \cdot N_{об} = n \cdot g \cdot \frac{V(T_{см} - T_{неп})}{t + \frac{l}{v_z} + \frac{l}{v_n}} = n \cdot g \cdot V \cdot \frac{v_{cp} (T_{см} - T_{неп})}{2l(1+k)}. \quad (8.6)$$

Итак, мы получили искомую зависимость в виде математической формулы. Пользуясь этой формулой и зная числовые значения входящих в нее величин, мы можем вычислить графики и построить числовые таблицы для анализа.

Так как, принимая гипотезу, мы сделали ряд допущений, то в заключение аналитических исследований следует убедиться, не отошли ли мы слишком далеко от действительности, возможно ли пользоваться формулой для практических расчетов.

Для выяснения этого обстоятельства единственно надежный путь состоит в опытной проверке результатов расчетов. Для этого, сравнив для нескольких характерных случаев степень совпадения расчетов по формуле с данными наблюдений, мы можем судить о правильности рабочей гипотезы.

Если подобной проверкой установлена приемлемость формулы, то ее использование для практических расчетов имеет большие удобства. Вместо того, чтобы наблюдать результаты производственного процесса в целом, т.е. фиксируя l и P , можно изучать отдельные вели-

чины ($V, n, \gamma, v_r, v_n, t, (T_{см} - T_{пер})$), которые являются переменными. Их принято называть параметрами, влияющими на процесс. Зная эти величины, можно без труда найти интересующую нас производительность электровоза путем вычислений по формуле (8.6).

С помощью этой же формулы можно судить, причем количественно, как изменяется функция $P = f(l)$, если варьировать параметрами $V, n, \gamma, v_r, v_n, t, (T_{см} - T_{пер})$, т.е. имеется возможность анализировать влияние этих величин на производительность электровоза. Согласно формуле, P будет тем больше, чем больше величины $V, n, \gamma, v_r, v_n, (T_{см} - T_{пер})$, и чем меньше t и l .

Этот анализ ни в коем случае нельзя делать формально. В каждом конкретном случае необходимо предварительно выяснить, какое значение того или иного параметра может быть принято. Например, зависимость говорит, что сменная производительность возрастает при увеличении числа n вагонок в составе, по n не может возрасти бесконечно. Для определенного типа электровоза существует наибольший состав поезда, обусловленный тяговыми усилиями и горнотехническими условиями. Другой пример, время полезной работы электровоза в смену даже при самой лучшей организации труда не может превысить 6 часов в 7-часовую рабочую смену. Выбор надлежащих значений параметров при аналитических расчетах имеет чрезвычайно важное значение.

8.3 Статистический метод

Количественную зависимость можно установить и путем обработки статистических данных. Изучаемый процесс происходит в обстановке действия многочисленных факторов, число которых велико. В этих условиях связь между сменной производительностью и расходом транспортирования теряет свою строгую функциональность. Здесь речь может идти лишь о *стохастической связи*. Она состоит в том, что одна случайная переменная реагирует на изменение другой изменением своего закона распределения. В практике статистических исследований чаще рассматривается частный случай такой связи, называемый *статистической связью*, когда условное математическое

ожидание одной случайной переменной является функцией значения, принимаемого другой случайной переменной, т.е.

$$M(y(x))=f(x) \quad (8.7)$$

Итак, чтобы изучить статистическую зависимость, нужно знать условное математическое ожидание случайной переменной. (Математическим ожиданием дискретной случайной величины называется сумма произведений всех ее возможных значений на их вероятности). Для определения математического ожидания случайной переменной необходимо знать двумерное распределение (x, y) , т.е. в нашем случае совокупность отдельных точек, соответствующих исходным цифровым данным и нанесенных на чертеж с координатными осями.

Вся совокупность однородных объектов подлежащего изучению распределения называется обычно генеральной совокупностью, а часть случайно отобранных объектов называется выборочной совокупностью или просто выборкой. Выводы, сделанные на основании ограниченной по объему выборке, могут привести к серьезным ошибкам. Для представительных выборок обычно идут на упрощение и переходят от математического ожидания случайной переменной к условному ее среднему значению, т.е. $M(y(x))=\bar{y}(x)$.

Зависимость между одной случайной переменной и средним значением другой случайной переменной называется в математической статистике корреляционной зависимостью.

Изучим корреляционную зависимость между нашими переменными (P и l). Вопрос о том, что следует принять за зависимую переменную, а что за независимую, следует решать в каждом конкретном случае. Для нашего примера: l – независимая переменная, P – зависимая переменная.

Для того чтобы выборка была более представительной, дополним наши наблюдения дополнительными исходными данными, собранными другими студентами. Пары случайных чисел (P, l) изобразим графически в виде точки с соответствующими координатами. Таким образом, можно изобразить весь набор пар случайных чисел, т.е. всю выборку. Такое изображение корреляционной зависимости называется

полем корреляции (рис. 8.2).

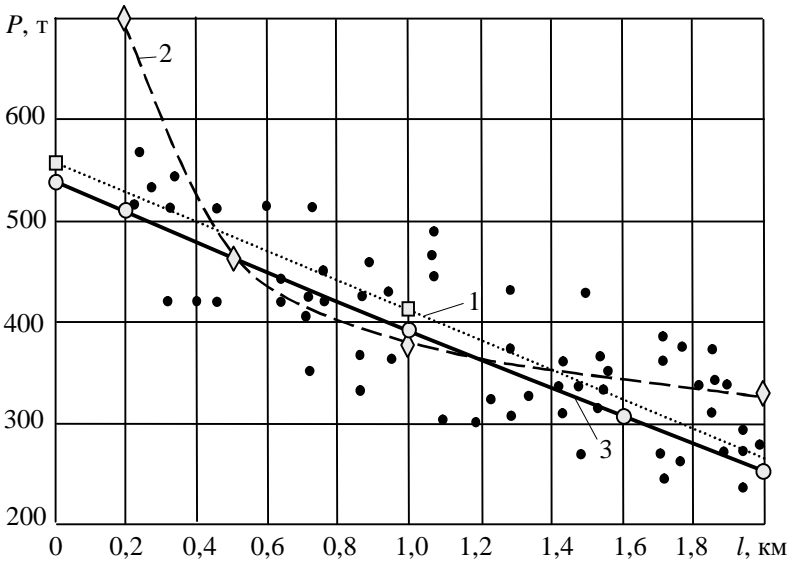


Рисунок 8.2 – Поле корреляции и регрессионные зависимости:

- 1 – линейная (8.9);
- 2 – гиперболическая (8.11);
- 3 – многочлен (8.13)

Задача упрощается, если выборку упорядочить. Для этого значения P и l разбивают на интервалы. Так, например, в ячейку с $x = 0,2 \div 0,4$ и $y = 500-600$ попало 5 точек. Это значит, что в данный интервал изменения P и l попало 5 пар значений x и y . По выборочным данным следует построить корреляционную таблицу. Для этого выборочные значения также разбивают на интервалы. В первой строке табл. 8.3 и первом столбце помещают соответственно интервалы изменения P и l и значения середин интервалов. Так, например, 0,3 – середина интервала изменения $l = 0,2 \div 0,4$, 550 – середина интервала изменения $P = 500 \div 600$. В ячейки, образованные пересечением строк и столбцов, заносятся частоты попадания пар значений (P и l). Например, частота 5 означает, что в выше рассмотренный интервал попало пять пар наблюдавшихся значений. Эти частоты обозначают через m_{yx} . В последней строке и столбце находятся значения m_x и m_y , а также

суммы m_{yx} по соответствующей строке или столбцу.

Таблица 8.3 – Корреляционная таблица

$I(x), \text{км}$ $P(y), \text{г}$	0,2-0,4 0,3	0,4-0,6 0,5	0,6-0,8 0,7	0,8-1,0 0,9	1,0-1,2 1,1	1,2-1,4 1,3	1,4-1,6 1,5	1,6-1,8 1,7	1,8-2,0 1,9	m_y	ym_y	y^2m_y
500-600 550	5	2	1							8	4400	$242 \cdot 10^4$
400-500 450	1	2	6	3	3	1	1			17	7650	$344 \cdot 10^4$
300-400 350			1	3	2	4	8	3	5	26	9100	$319 \cdot 10^4$
200-300 250							1	1	5	9	2250	$56 \cdot 10^4$
m_x	6	4	8	6	5	5	10	10	10	60	23400	$961 \cdot 10^4$
xm_x	1,8	2,0	5,6	5,4	5,5	6,5	15,0	15,0	19,0	71		
x^2m_x	0,54	1	3,92	4,86	6,05	8,45	22,5	22,5	36,1	100,76		

Корреляционная зависимость характеризуется формой и теснотой связи. Определить форму связи – это значит выявить механизм получения зависимой случайной переменной. Для характеристики формы связи при изучении корреляционной зависимости пользуются понятием кривой регрессии.

По данным табл. 8.3 определим вначале коэффициенты для линейного уравнения регрессии, используя метод наименьших квадратов. Для этого вычислим все суммы, необходимые для составления нормальных уравнений и запишем их в таблицу. Так как ряды значений разбиты на интервалы и подсчитаны частоты попадания пар в каждый интервал, то систему уравнений удобно представить в виде

$$\begin{cases} a_0 \sum m_{xy} + a_1 \sum xm_x = \sum ym_y; \\ a_0 \sum xm_x + a_1 \sum x^2m_x = \sum y(xm_{xy}). \end{cases} \quad (8.8)$$

$$n = \sum m_{xy} = 60; \quad \sum xm_x = 71; \quad \sum x^2m_x = 100,76;$$

$$\sum ym_y = 23400; \quad \sum y(xm_{xy}) = 25310.$$

$$\begin{cases} a_0 \cdot 60 + a_1 \cdot 71 = 23400; \\ a_0 \cdot 71 + 100,76 \cdot a_1 = 25310; \end{cases} \quad \begin{cases} a_0 + 1,18 \cdot a_1 = 390; \\ a_0 + 1,42 \cdot a_1 = 356,48. \end{cases}$$

$$a_1 = \frac{-33,52}{0,24} = -139,67; \quad a_0 = 390 - (1,18 \cdot 139,67) = 554,81.$$

Уравнение регрессии можно записать в виде

$$P = 554,81 - 139,67 \cdot l. \quad (8.9)$$

Рассмотрим нелинейную регрессию.

Предположим, что в данном случае имеется криволинейная связь вида

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1/x.$$

Нахождение коэффициентов регрессии a_0 и a_1 в этом случае аналогично линейной связи, т.е. записывается условие

$$Q = \sum \left(y - a_0 - \frac{a_1}{x} \right)^2 - Q_{\min}.$$

Дифференцируем по a_0 и a_1

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a_0} = -2 \sum \left(y - a_0 - \frac{a_1}{x} \right) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial a_1} = -2 \sum \left(y - a_0 - \frac{a_1}{x} \right) \cdot \frac{1}{x} = 0 \end{cases}$$

и получим:

$$\begin{cases} \sum a_0 + \sum a_1/x = \sum y; \\ \sum a_0/x + \sum a_1/x^2 = \sum y/x. \end{cases}$$

Вычислим необходимые суммы, для чего систему запишем в удобном виде:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum \frac{m_x}{x} = \sum y m_y, \\ a_0 \sum \frac{m_x}{x} + a_1 \frac{\sum m_x}{x^2} = \sum y \left(\frac{m_{xy}}{x} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 60 \cdot a_0 + a_1 \cdot 69,9 = 23400; \\ 69,9 \cdot a_0 + a_1 \cdot 122,8 = 30735,6; \end{cases} \quad \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot 1,165 = 390; \\ a_0 + a_1 \cdot 1,76 = 439,7. \end{cases}$$

$$a_0 = 291,4; \quad a_1 = 84,25.$$

Уравнение регрессии принимает вид:

$$P = 291,4 + 84,25/x. \quad (8.11)$$

Искомая зависимость может быть представлена и другими уравнениями. Общий случай нелинейной зависимости между двумя переменными может быть представлен многочленом.

Вычислим коэффициенты системы для нашего случая, предположив, что связь между переменными имеет вид

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2. \quad (8.12)$$

Для (8.12) система уравнений записывается в виде:

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 = \sum y; \\ a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 = \sum yx; \\ a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 = \sum yx^2. \end{cases}$$

Все суммы, необходимые для составления уравнений, приведены в табл. 8.3. Подставим их в уравнения:

$$\begin{cases} a_0 \cdot 60 + a_1 \cdot 71 + a_2 \cdot 100,8 = 23400; \\ a_0 \cdot 71 + a_1 \cdot 100,8 + a_2 \cdot 157,24 = 25310; \\ a_0 \cdot 100,8 + a_2 \cdot 157,24 + a_3 \cdot 258,84 = 34010. \end{cases} \begin{cases} a_0 + 1,18 \cdot a_1 + 1,68 \cdot a_2 = 390; \\ a_0 + 1,42 \cdot a_1 + 2,21 \cdot a_2 = 356,48; \\ a_0 + 1,56 \cdot a_1 + 2,57 \cdot a_2 = 337,4. \end{cases}$$

Решив данную систему уравнений, найдем значение коэффициентов регрессии:

$$a_0 = 541,84; \quad a_1 = 161,8; \quad a_2 = 10.$$

Уравнение регрессии в данном случае запишется в виде:

$$P = 541,8 - 161,8l + 10l^2. \quad (8.13)$$

Оценка тесноты связи регрессионной зависимости производится с помощью дисперсии или специального показателя, который называется теоретическим корреляционным отношением, а для случая линейной зависимости – коэффициентом корреляции. В общем случае зависимость для определения теоретического корреляционного отношения записывается в виде:

$$h_{y/x}^2 = \frac{d_{y/x}^2}{S_y^2}, \quad (8.14)$$

где $h_{yx/y}^2$ – представляет условную оценку тесноты связи в единицах от общей дисперсии S_y^2 ;

$d_{y/x}^2$ – дисперсия теоретической линии регрессии относительно условной генеральной средней. Она характеризует влияние фактора x на y ;

S_y^2 – полная дисперсия, т.е. дисперсия относительно условного генерального среднего m_y .

$$S_y^2 = M[y - \bar{y}(x)]^2 + M[\bar{y}(x) - m_y]^2;$$

где $M[y - \bar{y}(x)]^2$ – матожидание квадрата отклонений значений переменной относительно теоретической линии регрессии;

$M[\bar{y}(x) - m_y]^2$ – матожидание квадрата отклонений значений теоретической линии регрессии относительно условного генерального среднего.

Вычислим теоретическое корреляционное отношение для рассмотренных зависимостей. Ввиду того, что генеральное среднее m_y не известно, то воспользуемся его оценкой и запишем:

$$d_{y/x}^2 = \frac{1}{\sum m} \sum [y(x) - \bar{y}]^2 m_x;$$

$$S_y^2 = \frac{\sum y^2 m_y}{\sum m_y} - \left(\frac{\sum y m_y}{\sum m_y} \right)^2; \quad \bar{y} = \frac{\sum y m_y}{\sum m_y};$$

Данные, необходимые для вычисления $S_{y/x}^2$, сведены в табл. 8.4:

$$S_y^2 = \frac{961 \cdot 10^4}{60} - \left(\frac{2,34 \cdot 10^4}{60} \right)^2 = 160166,67 - 152100 = 8066,67; \quad \bar{y} = 390$$

$$1) d_{y/x}^2 = \frac{326686,26}{50} = 6533,73;$$

$$2) d_{y/x}^2 = 5602,02; \quad 3) d_{y/x}^2 = 7535,1.$$

Таблица 8.4 – Вычисление тесноты связи

l	$\bar{y}(x)$			$\bar{y}(x)-\bar{y}$			m_x	$[\bar{y}(x)-\bar{y}]^2 m_x$		
	(8.9) a_0+a_1l	(8.11) $a_0+\frac{a_1}{l}$	(8.13) $a_0+a_1l+a_2l^2$	(8.9)	(8.11)	(8.13)		(8.9)	(8.14)	(8.13)
0,3	512,85	572,4	509,84	122,85	182,4	1119,84	6	90552,74	199618,56	86169,75
0,5	484,95	460,0	463,4	94,95	70	73,4	4	36062,01	19600	21550,24
0,7	457,01	411,83	433,44	67,01	21,8	43,44	8	35922,72	3801,92	15096,27
0,9	429,07	385,07	404,28	39,07	-4,93	14,28	6	9158,79	145,83	1223,51
1,1	401,13	368,04	375,92	11,13	-21,96	-14,08	5	619,38	2411,2	991,23
1,3	373,19	356,25	348,36	-16,81	-33,75	-41,64	5	1412,88	5695,31	8669,45
1,5	345,25	347,6	321,6	-44,75	-42,4	-68,4	10	20025,63	17977,6	46785,6
1,7	317,31	340,99	295,64	-72,65	-49,01	-94,36	6	31668,14	1441,88	53422,86
1,9	289,37	335,77	270,48	-100,63	-54,23	-119,52	10	101263,97	29408,93	142850,30
Σ								326686,26	280101,23	376755
$d_{y/x}^2$								6533,73	5602,02	7535,1
$h_{ty/x}^2 = d_{y/x}^2 / S_y^2$								0,8099	0,6945	0,9341
$h_r = \sqrt{h_{ty/x}^2}$								0,89996	0,83337	0,9665

Значения h_r , приведенные в табл. 8.4, позволяют сделать вывод о наличии тесной связи между переменными, однако многочлен (8.13) имеет наибольшую тесноту связи.

Заключение

Итак, мы выяснили, что интересующую зависимость можно получить различными способами:

1) непосредственными наблюдениями или путем эксперимента с

получением эмпирической зависимости – $P = \frac{1179}{1,93+l}$;

2) аналитическим методом – $H = n \cdot g \cdot V \frac{V_{cp}(T_{cm} - T_{nep})}{2,2 \cdot l}$;

3) статистическим методом – $P = 541,8 - 161,8l + 10l^2$.

Важно подчеркнуть, что во всех случаях, даже при аналитических исследованиях, в основе зависимостей лежат эксперименты, которые используют не просто для проверки поставленной задачи, а для выявления значений входящих в расчетные формулы параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеевко С.Ф. Основы научно-дослідної роботи в гірничому виробництві: навч. посіб. / С.Ф. Алексеевко, Л.А. Штанько, В.П. Ромаменко. – К.: ІЗМН, 1996. – 344 с.
2. Алексеевко С.Ф. Основы моделирования при решении задач горной геомеханики / С.Ф. Алексеевко, А.Г. Заболотный, Л.А. Штанько – Техніка, 1996. – 173 с.
3. Грушко И.М. Основы научных исследований: учеб. пособ. / И.М. Грушко, В.М. Сиденко – 3-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Вища школа, Изд-во при Харьк. ун-те, 1983. – 224 с.
4. Ковальчук В.В. Основы научных исследований: навч. посіб. / В.В. Ковальчук, Л.М. Моїсєєв – К., 2005 – 240 с.
5. Математическая статистика: учебник для техникумов / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова, И.О. Решетникова. – М.: Высш. школа, 1975. – 398 с.
6. Моделирование в геомеханике / Ф.П. Глушихин [и др.] – М.: Недра, 1991. – 240 с.
7. Основы научных исследований. Горное дело / Е.Г. Баранов [и др.] – Киев; Донецк: Вища школа, 1984. – 176 с.
8. Романчиков В.І. Основы научных исследований: навч. посіб. / В.І. Романчиков – К.: ЦУЛ, 2007. – 256 с.
9. Соловйов С.М. Основы научных исследований: навч. посіб. / С.М. Соловйов – К.: ЦУЛ, 2007. – 168 с.
10. Основы научных исследований: учебник для техн. вузов / В.И. Крутов [и др.]. М.: Высш. шк., 1989. – 400 с.
11. Филатов Н.А. Фотоупругость в горной геомеханике / Н.А. Филатов, В.Д. Беляков, Г.А. Иевлев. – М.: Недра, 1975. – 184 с.
12. Фрумкин Р.А. Основы научных исследований: учебн. пособ. / Р.А. Фрумкин – Алчевск: ДГМИ, 2001. – 201 с.
13. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах: пер. с англ. / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 395 с.
14. Цехмістрова Т.С. Основы научных исследований: навч. посібн./ Т.С. Цехмістова. – К., 2004. – 240 с.
15. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства: учебник для вузов / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1989. – 446 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Тема 1. Общие сведения о науке и научных исследованиях.....	5
1.1 Основные понятия и определения	5
1.2 Методология и методы научного исследования.....	7
1.3 Основные закономерности, проблемы и противоречия развития науки	16
1.4 Горная наука и ее предмет	20
Тема 2. Организация научно-исследовательской работы	23
2.1. Классификация научно-исследовательских работ.....	23
2.2. Основные этапы научного исследования	25
2.3. Научные учреждения и кадры страны	31
2.4. Научно-исследовательская работа в вузах.....	35
2.5. Планирование и прогнозирование научных исследований.....	39
2.6. Организация научной работы и управление научными исследованиями.....	45
2.7. Применение вычислительной техники при проведении научно-исследовательской работы.....	47
Тема 3. Анализ научно-технической информации и обоснование темы научной работы	49
3.1. Государственная система научно-технической информации.....	49
3.2. Поиск научно-технической информации.....	52
3.3. Обоснование темы научных исследований.....	55
3.4. Составление технико-экономического обоснования НИР	58
3.5. Анализ информации и формулирование задач научного исследования.....	59
3.6. Разработка методики проведения научно-исследовательской работы	61
Тема 4. Методы теоретических исследований	63
4.1. Методология теоретических исследований	63
4.2. Составление модели объекта исследований	66
4.3. Аналитические методы исследований	77
4.4. Экспериментально-аналитические методы исследований	82
4.5. Вероятностно-статистические методы исследований	101
4.6. Методы системного анализа	109
Тема 5. Методы экспериментальных исследований.....	113
5.1. Методология экспериментальных исследований	113

5.2. Выбор средств измерений и их статистическая оценка.....	117
5.3. Рациональное планирование эксперимента.....	130
5.4. Лабораторные экспериментальные исследования.....	144
5.5. Экспериментально-производственные исследования.....	170
Тема 6. Обработка и обобщение результатов исследований.....	189
6.1. Графический анализ результатов эксперимента.....	189
6.2. Методы подбора эмпирических формул.....	191
6.3. Понятие о корреляционном анализе.....	201
6.4. Анализ теоретично-экспериментальных исследований.....	205
6.5. Прогнозирование многофакторных процессов и явлений.....	207
Тема 7. Анализ, оформление и использование результатов научных исследований.....	213
7.1. Анализ исследований и формулирование выводов и предложений.....	213
7.2. Составление отчетов о НИР.....	214
7.3. Подготовка научных материалов к опубликованию.....	216
7.4. Внедрение законченных научно-исследовательских работ.....	216
7.5. Оценка эффективности научных исследований.....	217
8. Пример комплексного решения научно-исследовательской задачи.....	229
Литература.....	245