

**И. М. Грушко
В. М. Сиденко**

ОСНОВЫ **научных** **исследований**

**ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ**

**Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования УССР
в качестве учебного пособия
для студентов технических вузов**

**ХАРЬКОВ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ВИЩА ШКОЛА»
1983**

Основы научных исследований. Грушко И. М., Сиденко В. М. 3-е изд., перераб. и доп.— Харьков: Вища школа. Під-во при Харьк. ун-те, 1983.— 224 с.

В учебном пособии изложены методология и методика научных исследований. Приведены сведения о науке, методы обоснования темы теоретических и экспериментальных исследований, средства и способы измерений, анализ и особенности оформления результатов исследований, методы внедрения и расчета экономической эффективности. Освещены вопросы планирования и организации научных исследований.

Нормативные материалы приведены по состоянию на 1 января 1983 г.

Для студентов технических вузов, аспирантов и научных работников.

Табл. 36. Ил. 44. Библиогр.: 21 назв.

Рецензент д-р техн. наук Ю. В. Верюжский
(Киевский инженерно-строительный институт)

Редакция естественнонаучной литературы
И. о. зав. редакцией Е. П. Ивищенко

ПРЕДИСЛОВИЕ

В большинстве вузов Украинской ССР в середине 70-х годов введена новая дисциплина «Основы научных исследований», которая оказывает положительное влияние на формирование у студентов творческих навыков. В настоящее время практически во всех вузах страны читаются такие курсы. Их цель — ознакомить студентов с методологией и методикой научных исследований. Элементы научных исследований используются также во всех формах учебного процесса: при чтении лекции, на практических и лабораторных занятиях, в учебных и производственных практиках, курсовом и дипломном проектировании.

В связи с этим в 1977 г. впервые в стране было издано учебное пособие «Основы научных исследований», в котором изложены основные сведения о науке, методы обоснования научных тем исследований, средства и способы измерения, анализ и особенности оформления результатов эксперимента, методы расчета экономической эффективности. Книга вызвала широкий отклик у читателей. В 1978 г. она была удостоена бронзовой медали ВДНХ СССР. В 1979 г. вышло второе, стереотипное издание, которое также быстро разошлось среди покупателей.

Естественно, что по содержанию учебного пособия были высказаны замечания, которые авторами с благодарностью учтены в работе над рукописью настоящего, третьего издания. В последнем издании расширены сведения об использовании ЭВМ в научном исследовании, написаны новые главы 5 и 7 о математическом планировании эксперимента и основах изобретательской работы, главы 1, 3, 4, 8 и 9 существенно переработаны.

В данной книге главы 5, 7 и 9 написаны проф. И. М. Грушко, главы 2, 8 — проф. В. М. Сиденко, остальные — совместно И. М. Грушко и В. М. Сиденко. В написании главы 5 и § 3 главы 3 принимал участие канд. техн. наук Б. А. Лишанский. Общее редактирование книги осуществлено проф. И. М. Грушко.

ВВЕДЕНИЕ

Коммунистическая партия разработала грандиозные планы дальнейшего повышения материального и культурного уровня жизни нашего народа на основе повышения эффективности производства, улучшения качества продукции, ускорения научно-технического прогресса. Интенсивное развитие общественного производства немыслимо без научно-технического прогресса, связи производства с наукой, позволяющей обществу творчески, целенаправленно воздействовать на окружающую среду в целях скорейшего получения материальных и духовных благ.

В. И. Ленин неоднократно указывал на решающее значение научно-технического прогресса в развитии социалистического общества. Основные принципы политики Коммунистической партии в области науки разработаны В. И. Лениным в ряде работ и в первую очередь в «Наброске плана научно-технических работ» (апрель 1918 г.). Смысл их состоит в связи науки с развитием производительных сил; государственном управлении наукой; планировании и прогнозировании научных исследований; организации и совершенствовании сети научных учреждений; формировании научных кадров, воспитании их мировоззрения на основе марксизма-ленинизма; установлении оптимального соотношения между фундаментальными и прикладными исследованиями; демократизации управления наукой; развитии связей отечественных научных учреждений с зарубежными.

В Программе КПСС подчеркнута, что только на основе ускоренного развития науки и техники может быть достигнута конечная цель социальной революции — построено коммунистическое общество. Поэтому и сейчас первоочередной задачей партии остается ускорение научно-технического прогресса.

Научно-технический прогресс представляет собой взаимообусловленный процесс развития науки и техники, позволяющий человеку воздействовать на окружающую среду для получения материальных и духовных благ. В настоящее время научно-технический прогресс проявляется в форме научно-технической революции (НТР). Особенности НТР являются возрастающая роль науки; возможность автоматизации не только физического, но и умственного нетворческого труда; бурный рост и обновление научно-технической информации; быстрая смена материалов, конструкций, машин, технологических процессов; резкое увеличение разновидностей инженерных решений; повышение уровня комплексной механизации и автоматизации, а также систем управления.

Сложность и уровень производства с каждым годом возрастают. Оно становится все более многогранным, объемным, базируется на применении физики, химии, математики, вычислительной техники, электроники, автоматике, кибернетики и др. В распоряжении инженера находятся значительные материальные, трудовые и денежные ресурсы. Выбор оптимальных решений в такой сложной и непрерывно меняющейся обстановке затруднен без использования научного творчества, элементарных приемов научных исследований.

Современный инженер должен не только обладать глубокими профессиональными теоретическими и практическими знаниями, но и иметь минимум знаний в области научных исследований. Все это позволит самостоятельно ставить и творчески решать различные сложные вопросы производства. Поэтому внедрение науки в производство обуславливает необходимость повышения уровня инженерно-технических работников.

Ускорение научно-технического прогресса, внедрение науки в производство, необходимость творческого решения производственных задач — все это непосредственно влияет на развитие высшей школы, которая должна готовить специалистов на уровне современных требований. Если практический опыт молодые специалисты приобретают непосредственно на производстве, то навыки научно-исследовательской работы они должны получить в вузах. Поэтому научная подготовка студентов — одна из важнейших форм обучения.

Научно-исследовательская работа студентов реализуется в следующих формах учебного процесса: изучение курса «Основы научных исследований», подготовка обзорного реферата на заданную тему, отдельные исследования при выполнении лабораторных работ и практических занятий, подготовка доклада и выступление на научном семинаре, разработка отдельных научно-исследовательских вопросов в периоды практики и в курсовых проектах, обобщение в дипломных проектах всего опыта НИР за период обучения. Наряду с этим во внеучебное время студент может принимать участие в выполнении научно-исследовательских работ кафедры, в подготовке статей к опубликованию, заявок на изобретения и др.

В результате изучения теоретического курса и выполнения экспериментальных исследований студент должен освоить методологию и методику, планирование и организацию научных исследований, а также уметь отбирать и анализировать необходимую информацию по теме научного исследования; формулировать его задачи и разрабатывать теоретические предпосылки; планировать и проводить эксперимент, обрабатывать результаты измерений и оценивать погрешности и наблюдения; сопоставлять результаты эксперимента с теоретическими предпосылками и формулировать выводы исследования; составлять отчет, доклад или статью по результатам научного исследования.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАУКЕ,
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ,
КАДРАХ И УЧРЕЖДЕНИЯХ**

**§ 1. Определение и основные
особенности науки**

Наука — это непрерывно развивающаяся система знаний об объективных законах природы, общества и мышления, которая создается и превращается в непосредственную практическую силу общества в результате специальной деятельности людей и учреждений.

Анализ науки как общественной сферы познания дан в трудах К. Маркса, Ф. Энгельса, В. И. Ленина. В них изложен многосторонний подход к понятию функций науки. Науку можно рассматривать как специфическую форму общественного сознания, основу которой составляет система знаний; процесс познания закономерностей объективного мира и процесс производства знаний и их использование в практике как определенный вид общественного разделения труда.

Одна из главных функций науки и ее целей — познание объективного мира. Наука создана для непосредственного выявления существенных сторон всех явлений природы, общества и мышления. Наука, говорил В. И. Ленин, «... во всех областях знания показывает нам проявление основных законов в кажущемся хаосе явлений»¹.

Наряду с этим ускорение прогресса общества в значительной мере зависит от развития науки. Современная наука является двигателем научно-технического прогресса. Она определяет его контуры и темпы развития. Внедрение науки в производство выражается в росте производительности труда, создании новых машин и материалов, улучшении эксплуатационных показателей, надежности и долговечности продукции, снижении ее себестоимости.

Современная наука имеет ряд характерных особенностей. Прежде всего это бурное лавинообразное развитие. История никогда не знала еще таких темпов развития науки. Только за послед-

ние 30 лет получено сведений примерно 75 % от объема знаний, накопленных человечеством за всю его историю.

Количество научных знаний о природе, обществе и мышлении все время возрастает. При этом, как указал Ф. Энгельс, количество вновь добываемых знаний прямо пропорционально уже известным. Анализ показывает, что основные характеристики научной деятельности за последние 250 лет возрастают по экспоненциальному закону. Через каждые 10—15 лет все показатели удваиваются. Поэтому считают, что основным законом анализа науки является экспоненциальный (рис. 1.1).

Многие науковеды полагают, что экспоненциальный закон развития науки со временем должен измениться. Темпы привлечения ресурсов (люди, ассигнования и т. п.) будут замедляться и подчиняться кривой 2 (рис. 1.1). Однако интенсивность использования ресурсов будет возрастать. Поэтому объем научной продукции, получение новой информации, по-видимому, будет приближаться к экспоненциальному закону.

Лавинообразность развития науки заключается в систематическом создании новых ее видов, направлений, проблем. Возникает дерево науки. Каждое новое направление (ветвь) рождает новые проблемы. Разветвление науки во многих случаях сопровождается слиянием отдельных ее ветвей. Рождаются пограничные науки на стыке двух, трех и более. Так, в последнее время возникли новые науки — математическая кибернетика, вычислительная техника, криогенная техника, физико-химическая механика, биофизика, биогеохимия, математическая экономика, квалиметрия и др.

Важная особенность науки — ее рентабельность. Став непосредственно производительной силой, базой технического прогресса, наука является самой эффективной отраслью, обеспечивающей благодаря внедрению законченных разработок наибольший экономический эффект. Несмотря на огромные капиталовложения в нее (15—25 млрд. р. в год), она обеспечивает годовой экономический эффект в десятки миллиардов рублей.

В настоящее время наблюдается интенсивное внедрение научных достижений в производство. Важнейшая задача научных организаций — систематическое внедрение законченных разработок в практическую деятельность. Для этого разрабатываются целевые комплексные программы во всех отраслях народного хозяйства, объединяющие исследовательские институты, вузы, конструкторские

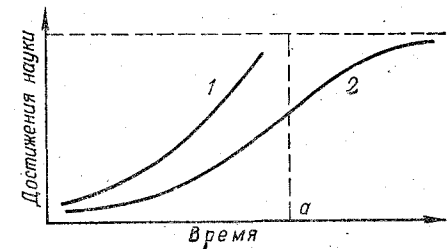


Рис. 1.1. Закономерности развития результатов научных исследований во времени: 1 — экспонента; 2 — вероятная кривая

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 25, с. 45.

бюро, заводы, строительные предприятия в научно-производственные комплексы. В научно-производственных объединениях возникновение новых научных идей определяется актуальной потребностью производства, а законченные научные разработки становятся базой коренной модификации производственных процессов, приводящей к созданию принципиально новых конструктивных решений и технологий, повышению эффективности и качества выпускаемой продукции.

Современная наука превращается в сложный и непрерывно растущий социальный организм, в наиболее подвижную практическую (производительную) силу общества. Развитие науки — исходный пункт для революционирования практики, создания новых отраслей производства и совершенствования общественных отношений.

Наука становится производительной силой общества, что проявляется в глубоких изменениях во взаимоотношениях науки и производства.

Во-первых, многие новые виды производства и технологические процессы первоначально зарождаются в недрах науки, научно-исследовательских институтах. Развитие атомной энергии, химической технологии, получение сверхтвердых материалов — все это подтверждает сказанное.

Во-вторых, сокращаются сроки между научным открытием и его внедрением в производство, а раньше для этого нужны были десятилетия. Например, от открытия лазера до его применения прошло всего несколько лет. Это же можно сказать об атомной энергии, полупроводниках и др.

В-третьих, в самом производстве успешно развиваются научные исследования, растет сеть научных учреждений в промышленности и сельском хозяйстве. Развивается творческое содружество ученых с инженерами и рабочими. Предприятия перерастают в научно-промышленные комплексы, включающие в свою технологию (наряду с конструированием и производством продукции) также и научные разработки. Теперь в состав «совокупного работника» научно-производственных объединений входят не только инженерно-технические работники и рабочие, но и ученые — сотрудники научно-исследовательских учреждений.

В-четвертых, резко поднялся профессиональный уровень рабочих, инженерно-технических работников, что позволяет им широко использовать научные знания в процессе производства. Массовое движение изобретателей и рационализаторов — важная форма сближения науки с производством.

Коммунистическая партия Советского Союза всемерно способствует дальнейшему, более интенсивному развитию всех прогрессивных процессов, позволяющих органически соединять достижения научно-технической революции с преимуществами социалистической системы хозяйства, объединять науку с производством.

§ 2. Наука как система знаний

Не всякое знание можно рассматривать как научное. Нельзя признать научными те знания, которые получает человек лишь на основе простого наблюдения. Эти знания играют в жизни людей важную роль, но они не раскрывают сущности явлений, взаимосвязи между ними, которая позволила бы объяснить, почему данное явление протекает так или иначе, и предсказать дальнейшее его развитие.

Научные знания принципиально отличаются от слепой веры, от беспрекословного признания истинным того или иного положения, без какого-либо логического его обоснования и практической проверки.

Раскрывая закономерные связи действительности, наука выражает их в абстрактных понятиях и схемах, строго ей соответствующих. Пока законы не открыты, человек может лишь описывать явления, собирать, систематизировать факты, но он ничего не может объяснить и предсказать.

Развитие науки идет от сбора фактов, их изучения и систематизации, обобщения и раскрытия отдельных закономерностей к связанной, логически стройной системе научных знаний, которая позволяет объяснить уже известные факты и предсказать новые.

Путь познания определяется знаменитой ленинской формулой: от живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике.

Процесс познания включает накопление фактов. Без систематизации и обобщения, без логического осмысливания фактов не может существовать никакая наука. Но хотя факты, как говорил И. П. Павлов, — это воздух ученого, сами по себе они еще не наука. Факты становятся составной частью научных знаний, если они выступают в систематизированном, обобщенном виде.

Факты систематизируют и обобщают с помощью простейших абстракций — понятий (определений), являющихся важными структурными элементами науки. Наиболее широкие понятия называют категориями. Это самые общие абстракции. К категориям относятся философские понятия о форме и содержании явлений, в политэкономии — это товар, стоимость и т. д.

Важная форма знаний — принципы (постулаты), аксиомы. Под принципами понимают исходные положения какой-либо отрасли науки. Они являются начальной формой систематизации знаний (аксиомы Евклидовой геометрии, постулат Бора в квантовой механике и т. д.).

Важнейшим составным звеном в системе научных знаний являются научные законы, отражающие наиболее существенные, устойчивые, повторяющиеся объективные внутренние связи в природе, обществе и мышлении. Обычно законы выступают в форме определенного соотношения понятий, категорий.

Наиболее высокой формой обобщения и систематизации знаний является теория. Под теорией понимают учение об обобщенном

опыте, практике, формулирующее научные принципы и методы, которые позволяют обобщить, познать существующие процессы и явления, проанализировать действие на них разных факторов и предложить рекомендации по использованию их в практической деятельности людей.

Когда ученые не располагают достаточным фактическим материалом, то в качестве средства достижения научных результатов они используют гипотезы — научно обоснованные предположения, выдвигаемые для объяснения какого-либо процесса, которые после проверки могут оказаться истинными или ложными. Гипотеза выступает часто как первоначальная формулировка, черновой вариант открываемых законов. Отмечая важную роль гипотез в развитии наук, Ф. Энгельс подчеркивал, что гипотезы являются формой развития естествознания. Большинство научных законов и теорий было сформулировано на основе ранее высказанных гипотез.

Формой осуществления и развития науки является исследование, т. е. изучение явлений и процессов, анализ влияния на них различных факторов, а также изучение взаимодействия между явлениями с целью получить убедительно доказанные и полезные для науки и практики решения с максимальным эффектом. Научное исследование имеет объект, предмет, на познание которого оно направлено. Объектом (предметом) исследования может быть предмет материального мира (например, автомобильная дорога), явление (например, теплообменные процессы в дороге), свойства (например, ровность, работоспособность дороги), а также связь между явлениями и свойствами.

Цель научного исследования — определение конкретного объекта и всестороннее, достоверное изучение его структуры, характеристик, связей на основе разработанных в науке принципов и методов познания, а также получение полезных для деятельности человека результатов, внедрение в производство и получение эффекта.

Материалистический принцип науки обуславливает ее предмет — законы природы, общества и мышления. Цель науки — познание законов развития природы и общества и воздействие на природу на основе использования знаний для получения полезных обществу результатов. Наука включает в себя также методы исследования.

Под методом понимают способ теоретического исследования или практического осуществления какого-либо явления или процесса. Метод — это инструмент для решения главной задачи науки — открытия объективных законов действительности. Метод определяет необходимость и место применения индукции и дедукции, анализа и синтеза, сравнения теоретических и экспериментальных исследований.

Наиболее общим методом исследования является метод материалистической диалектики. Ученый любой отрасли науки должен хорошо владеть законами марксистско-ленинской фило-

софии. Например, исследуя процесс твердения цементов, необходимо учитывать противоречивость (борьбу противоположностей) процессов, протекающих при твердении. С одной стороны, в этом случае происходит структурообразование, обусловленное появлением новых контактов в структуре цементного камня в результате процессов гидратации, гидролиза и образования кристаллов возникающих новых минералов. С другой — имеет место разрушения в твердеющем цементном камне, т. е. разрушение контактов вследствие протекания в бетоне теплообменных процессов. Это вполне согласуется с законом единства и борьбы противоположностей.

В настоящее время все чаще используется в качестве общего математический метод исследования, т. е. метод количественного изучения явлений и процессов. Это обусловлено бурным развитием кибернетики, вычислительной математики и ЭВМ. Наука достигла такого расцвета, когда качественные методы исследования в области естествознания все больше и больше заменяют количественными изучениями явлений, которые представляют собой более высокую ступень научного исследования. Кроме того, точные инженерные расчеты базируются только на научных знаниях, полученных в математической форме и позволяющих при расчете иметь численное выражение для тех или иных инженерных конструкций или технологических процессов.

Любая научная теория, объясняя характер тех или иных процессов действительности, всегда связана с определенным частным методом исследования. Опираясь на общие и частные методы исследования, ученый получает ответ на то, с чего надо начинать исследования, как относиться к фактам, как обобщать, каким путем идти к выводам.

Выполнение научного исследования неразрывно связано с его методологией, т. е. с исходными руководящими принципами его развития. В конечном счете методология — это совокупность методов, способов, приемов, их определенная последовательность, схема, принятая при разработке научного исследования.

Методология науки может быть общей и частной. Общая методология — это принципы материалистической диалектики, марксистско-ленинская теория познания, исследующая законы развития научного знания в целом. Любое научное исследование должно учитывать требования общей методологии. Частная методология основывается на законах отдельных наук, особенностях познания отдельных явлений. Она обусловлена и связана с принципами и законами конкретных наук, с частными методами исследования.

Важную роль в научном исследовании играют познавательные задачи, возникающие при решении научных проблем. Наибольший интерес представляют эмпирические и теоретические задачи.

Эмпирические задачи направлены на выявление, точное описание и тщательное изучение различных факторов изучаемых явлений и процессов. В научных исследованиях они

решаются различными методами познания — наблюдением и экспериментом.

Наблюдение — это метод познания, при котором объект изучают без вмешательства в него; фиксируют, измеряют лишь свойства объекта, характер его изменения. Например, наблюдение за осадкой здания, сползанием насыпи на косогорах и др.

Эксперимент — это наиболее общий эмпирический метод познания, в котором производят не только наблюдения и измерения, но и осуществляют перестановку, изменение объекта исследования и т. д. В этом методе можно выявить влияние одного фактора на другой. Эмпирические методы познания играют большую роль в научном исследовании. Они не только являются основой для подкрепления теоретических предпосылок, но часто составляют предмет нового открытия, научного исследования.

Теоретические задачи направлены на изучение и выявление причин, связей, зависимостей, позволяющих установить поведение объекта, определить и изучить его структуру, характеристику на основе разработанных в науке принципов и методов познания. В результате полученных знаний формулируют законы, разрабатывают теорию, проверяют факты и др. Теоретические познавательные задачи формулируют таким образом, чтобы их можно было проверить эмпирически.

В решении эмпирических и особо теоретических задач научного исследования важная роль принадлежит логическому методу познания, позволяющему на основе умозаключительных трактовок объяснять явления и процессы, выдвигать различные предложения и идеи, устанавливать пути их решения. Он базируется на полученных фактах и результатах эмпирических исследований.

Результаты научных исследований оценивают тем выше, чем выше научность сделанных выводов и обобщений, чем достовернее они и эффективнее. Они должны создавать основу для новых научных разработок.

Таким образом, система знаний представляется в виде научных фактов, понятий, принципов, гипотез, законов, теорий, которые позволяют предвидеть события и управлять общественными и производственными отношениями и производительными силами. Этот систематизированный научный опыт характеризуется рядом признаков.

Важнейшим из них является всеобщность. К. Маркс показал, что наука является общественной по своему происхождению, развитию и использованию. Всякое научное открытие есть труд всеобщий, в каждый момент времени наука выступает как суммарное выражение человеческих успехов в познании мира. Система научных знаний принадлежит всем, поэтому она по-настоящему эффективно может быть использована только с развитием общественного труда и производства в больших масштабах.

Проверяемость и воспроизводимость — важнейшие требования к научным знаниям.

Научные знания должны быть устойчивыми. Быстрое их устаревание свидетельствует о недостаточной их глубине и обобщении, неточности принятых гипотез и выявленных законов.

Систематизируя научные знания, прежде всего выделяют две большие группы — науку об обществе и науку о природе. В каждой из этих групп выделяют составляющие элементы — научные дисциплины. В первой группе — это философия, политэкономия, история и т. д. Во второй — физика, химия, технические науки.

Научные знания систематизированно изложены в книгах, статьях, авторских свидетельствах и патентах, отчетах и конструкторских разработках и др.

§ 3. Научные исследования, их особенности и классификация

Научное исследование должно быть творческим. Творчество направлено на создание новых ценностей, ранее неизвестных. Творчество характерно и для научной работы, так как основными ее результатами являются новая информация, новые ранее неизвестные факты, явления, открытия, законы, технические решения и т. д.

Получение новых научных данных — социальная потребность общества, которая углубилась в последнее время, в эпоху НТР. Это обусловлено необходимостью повышения производительности труда в условиях возрастающей потребности людей и экономного отношения к сырьевым ресурсам, ухудшения экономической и обострения социальной ситуации на нашей планете. Научные исследования направлены на решение этих задач, в результате чего ускоряется развитие научно-технического прогресса.

Иллюстрируем это на примере. Еще в начале XX века основным видом транспорта был гужевой. Однако развитие экономики резко увеличило транспортные потоки, гужевой транспорт не мог их обеспечить. В связи с этим в научных работах были решены научные задачи создания автомобильного транспорта, в несколько раз более производительного, чем гужевой.

Однако уже в настоящее время автомобильный транспорт далеко не в полной мере обеспечивает социальные потребности, т. е. вступает в противоречие с обществом. Автомобилизация общества привела к перенасыщению больших городов автомобилями, к загазованности среды, воздуха. В то же время резко возрос дефицит автомобильного топлива. В этих условиях ученые выдвигают новые смелые идеи, вплоть до замены автомобилей более эффективными транспортными средствами. Аналогичные примеры по существу составляют историю развития науки и техники.

Вместе с тем на развитие науки большое влияние оказывает и субъективный фактор, связанный с любознательностью людей. На протяжении всей своей жизни человек стремится познать окру-

жающий мир, особенно то, чего он не знал, не умел ранее. Особое эмоциональное удовлетворение он получает, если им впервые добыты новые сведения, ранее не известные обществу.

Отмеченные объективные и субъективные факторы предопределили развитие науки и техники. Однако управлять процессом добычи новой научной информации, новых фактов трудно. Поэтому еще недавно (первая половина XX столетия) господствовало мнение, что управлять научным творчеством практически нельзя. В последнее время изучению научной деятельности людей, развитию науки посвящается большое количество работ. В них показано, что в научной работе риск неизбежен, в фундаментальных работах он больше, в ряде случаев вероятность успеха не превышает и 10 %, в прикладных — риск меньше, вероятность успеха достигает 90 %. Творчество — это всегда риск, поэтому в научной работе можно получить и отрицательный результат. Кроме того, управлять научной работой, увеличивать вероятность получения положительного результата можно, если учитывать особенности научной деятельности людей. Отметим некоторые из этих особенностей.

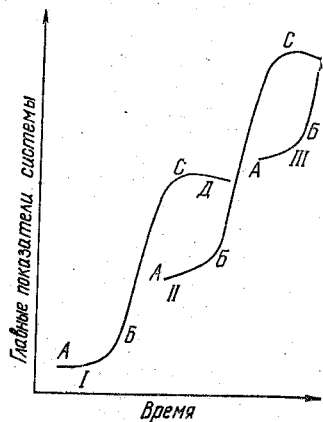


Рис. 1.2. Основные закономерности развития технических систем

Изучаемые объекты в научной работе рассматриваются в процессе их диалектического развития. Например, технические системы, транспорт развиваются по образным закономерностям (рис. 1.2). Участок кривой АБ соответствует начальному медленному развитию системы, затем наступает период ее зрелости — участок ВС, после этого наступает спад в развитии системы — СД. Так было с гужевым транспортом (система I). В какой-то период, обусловленный социальными процессами, рождается новая система II (автомобильный транспорт заменил гужевую). На смену автомобильному транспорту безусловно со временем придут более эффективные транспортные средства (система III).

Исследуемый объект рассматривается во взаимной связи и взаимобусловленности, поскольку явления природы, а также технические системы сами по себе не существуют. Например, автомобиль является подсистемой в системе ВАД (водитель, автомобиль, дорога), в свою очередь, система ВАД является подсистемой пассажира, грузопотока.

Системный подход к изучению объектов исследования — характерная черта современной науки. В этом случае объект исследования изучается не изолированно, а как сложное целое, выявляются не только строения и свойства объектов, но и связи его частей,

подсистем, их функции, устанавливается его взаимосвязь с окружающей средой, т. е. объект исследования рассматривается как часть более общей системы. Только ученый, владеющий диалектическим методом, может рассчитывать на успех в современной науке.

Наиболее часто в научном мышлении учитывают диалектический закон единства и борьбы противоположностей. Оптимизация технологических процессов (т. е. нахождение наилучших условий его развития) связана с проявлением этого закона и определением меры. Например, при определении оптимальных параметров автомобильной дороги учитывают противоречия между надежностью работы дороги, с одной стороны, и ее экономичностью — с другой.

Результаты научной деятельности характеризуются новизной, оригинальностью и уникальностью. Они ни при каких условиях не могут быть массовыми. Повторение в научной работе возможно лишь при необходимости повышения надежности результатов исследования.

В связи с этой особенностью научный работник должен мыслить оригинально, нестандартно, широко используя при этом научные абстракции — категории, понятия и т. п. В области сложившихся представлений трудно найти что-нибудь новое, к ним люди привыкают, что является серьезным препятствием для получения новых научных результатов.

В настоящее время предложен ряд методов, способствующих преодолению психологического барьера и стимулирующих появление новых идей — «генерирование идей» (например, метод «коллективного мозга» или «мозгового штурма»). Допустим, на каком-то этапе возникла сложная задача, которая не под силу одному человеку. В таком случае создается группа из научных работников — «генераторов идей» (любых идей по данной задаче, зачастую неверных). На этом этапе критика идей не разрешается. Затем предложенные идеи передаются в другую группу ученых-критиков, которые в результате анализа отбирают то, что полезно для решения поставленной задачи. Метод «генерирования» новых идей используется при решении как фундаментальных, так и прикладных исследований. Например, он был успешно использован при решении вопросов современной теории элементарных частиц и в изобретательской работе.

Самым эффективным способом интенсификации генерации новых научных идей и решений является настойчивая и целеустремленная работа. В этом случае наиболее эффективна интуиция и наиболее часто возникают неожиданные идеи, приводящие к решению поставленной задачи. Вдохновение и творческая удача не посещают ленивых и неподготовленных к научной работе людей. Работоспособность и трудолюбие — важнейшие черты ученого. Благодаря им расширяется эрудиция, тренируется и обогащается память необходимыми сведениями, развивается внимательность и наблюдательность, совершенствуются навыки, повышается квалификация научного работника.

Использование в научной работе научных категорий, понятий позволяет выделить суть явления, отвлечься от второстепенного, побочного. Известный физик И. Я. Померанчук говорил: «В науке так же, как и в искусстве, нужно знать, чем можно пренебречь». Вместе с тем существует принципиальная разница между истиной науки и истиной искусства. Задача науки — нахождение объективных законов природы, поэтому истина (основной научный результат) не зависит от личных качеств ученого. Задача искусства — познание мира через образы, созданные художником, поэтому произведение искусства всегда содержит в себе черты индивидуальности своего создателя. Ученый мыслит с помощью научных категорий, понятий, а художник — с помощью образов, формирующихся словами, красками, музыкальными звуками и т. д.

История науки свидетельствует в основном о трех путях получения истины, новых научных результатов.

В начале проблемы преобладает «стихийный эмпиризм». Исследователь ради получения новой истины пробует все, что ему кажется полезным. Этот способ получил наименование «метод проб и ошибок». Он был распространен в древности, в период развития алхимии, а также в работах известного изобретателя Эдисона. Этот путь получения новой научной информации малоэффективен, его недостатки очевидны, однако он все еще используется при изучении малоизвестных объектов.

Ньютон развил другой метод, суть которого сводится к следующему. Сначала прилежно изучают объект исследования с помощью наблюдения и эксперимента, а затем выдвигают гипотезу, строят теорию математическую или логическую. До настоящего времени эта последовательность выполнения научной работы была наиболее распространенной.

Сейчас все шире применяется дедуктивный, теоретический метод познания новой истины. На основании известных данных (обычно из литературы) формулируют гипотезу и строят математическую модель явления. Затем решают основные уравнения преимущественно с помощью цифровой ЭВМ, находят граничные условия и полученные результаты сравнивают с экспериментом. Этот способ наиболее перспективный, но его применение эффективно преимущественно при исследовании явлений, сведения о которых достаточно полны. В этом случае представляется возможным сформулировать адекватно исходные данные и соответственно построить математическую модель.

Однако нельзя абсолютизировать какой-нибудь путь познания истины. Все они нужны, чтобы изучать окружающий мир глубже и шире, необходимо лишь сознательно подходить к их выбору.

Научно-исследовательские работы (НИР) классифицируют по различным признакам. По видам связи НИР с общественным производством их разделяют на: работы, направленные на создание новых процессов, машин, конструкций и т. д., полностью исполь-

зуемых для повышения эффективности производства; работы, направленные на улучшение производственных отношений, повышение уровня организации производства без создания новых средств труда; работы в области общественных, гуманитарных и других наук, которые используются для совершенствования общественных отношений, повышения уровня духовной жизни людей и др.

По степени важности исследований для народного хозяйства НИР классифицируют так: важнейшие работы, выполняемые по государственному плану СССР и плану союзных республик; работы, выполняемые по планам АН СССР и академий союзных республик; работы, выполняемые по планам отраслевых министерств и ведомств; работы, выполняемые по плану (по инициативе) научно-исследовательских организаций.

В зависимости от источников финансирования НИР делят на госбюджетные, финансируемые из средств государственного бюджета, хоздоговорные, финансируемые в соответствии с заключаемыми договорами между организациями-заказчиками, которые используют НИР в данной отрасли, и организациями, выполняющими исследования.

По длительности разработки НИР разделяют на долгосрочные, разрабатываемые в течение нескольких лет, краткосрочные, выполняемые обычно за один год.

По целевому назначению НИР классифицируют на три вида — фундаментальные, прикладные и разработки.

Фундаментальные исследования направлены на создание новых принципов. Цель их — расширить знания общества, более глубоко понять законы природы, разработать новые теории.

Прикладные исследования базируются на результатах фундаментальных исследований и направлены на создание новых методов, на основе которых разрабатывают новое оборудование, новые машины и материалы, способы производства и организации работ и др. Они удовлетворяют потребность общества в развитии конкретной отрасли производства.

Цель разработок — преобразовывать прикладные (или теоретические) исследования в технические приложения. Они не требуют получения новых научных исследований. Конечная цель разработок, которые проводятся в опытно-конструкторских бюро (ОКБ), проектных, опытных производствах — подготовить материал для внедрения.

Взаимосвязь между основными типами научных исследований можно представить в виде схемы (рис. 1.3).

Исследовательскую работу проводят в определенной последовательности. Применительно к прикладным научно-исследовательским работам рекомендуется процесс выполнения исследований, состоящий из шести этапов.

1-й этап. *Формулирование темы.* Общее ознакомление с проблемой, по которой предстоит выполнять исследование. Предварительное ознакомление с литературой и классификация важнейших

направлений. Формулирование темы исследования. Составление аннотации (краткого плана) исследования. Разработка технического задания. Составление общего календарного плана НИР. Предварительное определение ожидаемого экономического эффекта.

2-й этап. *Формулирование цели и задач исследования.* Подбор и составление библиографических списков отечественной и зарубежной литературы (монографий, учебников, статей и др.). Изучение научно-технических отчетов по теме различных организаций соответствующего профиля. Составление аннотаций источников.



Рис. 1.3. Схема основных типов научных исследований: взаимосвязь науки и производства

3-й этап. *Теоретические исследования.* Изучение физической сущности, часто выполнение поисковых (предварительных) экспериментов. Формулирование гипотезы и выбор, обоснование физической модели. Математизация модели. Получение аналитических выражений. Теоретический анализ полученных выражений.

4-й этап. *Экспериментальные исследования.* Разработка цели и задач эксперимента. Планирование эксперимента. Разработка методики программы. Выбор средств измерений. Конструирование приборов, макетов, аппаратов, моделей стендов, установок и других средств эксперимента. Обоснование способов измерений. Проведение эксперимента в лаборатории, на опытных участках, заводах, строительных предприятиях. Обработка результатов наблюдений.

Составление рефератов по теме. Анализ, сопоставление, критика прорабатываемой информации. Собственные суждения по каждому анализируемому источнику. Обобщение прорабатываемой информации и освещение состояния вопроса по теме. Формулирование методических выводов по обзору информации, цели и задачи исследования.

5-й этап. *Анализ и оформление научных исследований.* Общий анализ теоретико-экспериментальных исследований. Сопоставление экспериментов с теорией. Анализ расхождений. Уточнение теоретических моделей, исследований и выводов. Дополнительные эксперименты в случае необходимости. Превращение гипотезы в теорию. Формулирование научных и производственных выводов,

составление научно-технического отчета. Рецензирование. Составление доклада. Исправление рукописи.

6-й этап. *Внедрение и определение экономической эффективности.* Внедрение результатов исследования на производстве. Определение экономического эффекта.

Затем следуют опытно-технологические или опытно-конструкторские разработки, включающие в себя:

а) *Формулирование темы, цели и задач исследования.*
 б) *Изучение литературы, проведение исследований (в случае необходимости) и подготовка к техническому проектированию экспериментального образца.*

в) *Техническое проектирование.* Разработка вариантов технического проекта. Расчеты. Разработка чертежей. Изготовление отдельных узлов, блоков и анализ их работы. Разработка и согласование технического проекта. Техничко-экономические обоснования проекта.

г) *Рабочее проектирование.* Разработка со всеми деталями рабочего проекта.

д) *Изготовление опытного образца.* Анализ и контроль технической документации. Проектирование технологических процессов, разработка карт, составление проекта организации работ. Изготовление деталей, блоков и узлов опытного образца, сборка их. Опробование, доводка и регулировка образца. Стендовые и производственные испытания.

е) *Доработка опытного образца.* Анализ работы узлов образца после производственных испытаний. Замена отдельных узлов.

ж) *Государственные испытания.* Передача образца специальной комиссии на государственные испытания.

Трудоемкость выполнения НИР на разных этапах не одинакова. Теоретическая часть требует больших затрат умственного труда. Это наиболее творческий этап.

Экспериментальная часть НИР наиболее трудоемкая, громоздкая, требующая большой аккуратности, внимания, терпения в течение длительного периода. В ряде случаев возникает необходимость в повторных проведениях экспериментов.

Обычный цикл работ, начиная от фундаментальных исследований и заканчивая серийным выпуском продукции, составляет от 5 до 10 лет, в зависимости от отрасли и уровня организации работ. Необходимо стремиться к сокращению длительности этого цикла.

§ 4. Научные учреждения и кадры страны

В нашей стране исследования ведутся в научных организациях, среди которых могут быть выделены:

научно-исследовательские институты, входящие в состав Академии наук СССР (АН СССР), отраслевых академий и академий союзных республик;

высшие учебные заведения (вузы); научно-исследовательские институты, подчиненные отраслевым министерствам.

Наряду с этим научные исследования и разработки могут проводиться в проектно-конструкторских и технологических институтах, лабораториях и бюро, обсерваториях, на опытных станциях, в ботанических садах, музеях, научных библиотеках, архивах, заповедниках и других учреждениях, подчиненных различным ведомствам.

Основные задачи, права и обязанности научно-исследовательских организаций определены в их индивидуальных уставах, разработанных на основе типовых и утвержденных органами, в ведении которых эти организации находятся.

Ряд научно-исследовательских организаций являются головными. Помимо общих задач они осуществляют внутреннюю и междуведомственную координацию научных исследований, контролируют выполнение заданий другими научными учреждениями, работающими над общей темой.

Высшим научным учреждением страны является Академия наук СССР. Она осуществляет общее научное руководство исследованиями по важнейшим проблемам естественных и общественных наук, проводимыми в академиях наук союзных республик, вузах и других научно-исследовательских учреждениях. Кроме того, по отношению к подведомственным академическим институтам АН СССР выступает и как орган государственного управления.

Основным органом научно-исследовательской деятельности согласно уставу АН СССР является институт, важнейшие задачи которого — проведение по своему профилю фундаментальных исследований, выявление новых возможностей технического прогресса, подготовка рекомендаций по использованию научных результатов исследования в народном хозяйстве, участие во внедрении этих результатов, изучение и обобщение достижений мировой науки в целях использования их на практике. Наряду с проведением научных исследований институт координирует свою работу с исследованиями других учреждений, готовит научные кадры, организует дискуссии, конференции и совещания, пропагандирует научные знания и широко информирует о полученных научных результатах. Основными структурными подразделениями институтов являются отделы, лаборатории, секторы, вычислительные центры, экспериментальные базы и др.

В состав АН СССР входит более 250 научных учреждений. Около 400 научно-исследовательских институтов и других научных организаций входит в систему академий союзных республик и более 200 научных учреждений — в состав отраслевых академий: Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина, Академии медицинских наук СССР, Академии педагогических наук.

Научные исследования, которые выполняются в АН СССР, академиях союзных республик, координирует совет АН СССР по ко-

ординации научной деятельности, во главе которого стоит президент АН СССР.

Научно-исследовательские институты АН СССР и академий союзных республик выполняют главным образом фундаментальные исследования. Однако с каждым годом возрастает ответственность академий за внедрение результатов исследования.

Разнообразные фундаментальные и прикладные исследования выполняются в учебных институтах. Подготовка специалистов для народного хозяйства СССР и проведение научных исследований — эти две функции неразрывно связаны между собой. Научные исследования в вузах дают возможность преподавателям активно участвовать в решении актуальных проблем и являются важнейшим средством улучшения подготовки специалистов.

Среди высших учебных заведений выделяют университеты, политехнические институты, специализированные (отраслевые) институты.

Университеты готовят специалистов и проводят научные исследования в области естественных и гуманитарных наук.

Политехнические институты готовят специалистов и ведут научную работу по различным отраслям техники.

Отраслевые институты готовят специалистов для отдельных отраслей народного хозяйства и культуры и ведут научную работу в соответствующей отрасли знаний.

В нашей стране функционирует большое количество вузов, насчитывающих около 450 тыс. научно-педагогических работников, в том числе более 19 тыс. докторов и 180 тыс. кандидатов наук. Ученые вузов изучают и обобщают опыт коммунистического строительства, разрабатывают теоретические проблемы естественных и общественных наук, решают наиболее актуальные проблемы народного хозяйства, внедряют в народное хозяйство результаты научных исследований, создают учебники и учебные пособия, выполняют работы научно-методического характера, пропагандируют достижения науки, техники и культуры, осуществляют подготовку научных кадров. Большинство вузов страны входит в состав Министерства высшего и среднего специального образования СССР и союзных республик. Большая группа вузов (педагогические, медицинские, железнодорожные, культуры) подчинены отраслевым министерствам, однако они руководствуются общими положениями и решениями, принятыми Минвузом СССР.

Важным преимуществом вузов в вопросах выполнения научной работы по сравнению с другими научными организациями является наличие комплекса специалистов, что позволяет проводить крупные научные исследования на стыках научных дисциплин. Наряду с этим вузы имеют больше возможностей отобрать талантливую молодежь.

Основным структурным подразделением высшего учебного заведения, осуществляющим учебную и научную работу, является

кафедра. Помимо кафедр при вузах могут быть организованы научно-исследовательские учреждения: институты, проблемные и отраслевые лаборатории, учебно-опытные и экспериментальные хозяйства, заводы, счетно-вычислительные центры и другие структурные подразделения. Научными подразделениями в вузах руководит научно-исследовательский сектор или отдел.

Проблемные лаборатории создаются для решения актуальных проблем науки и техники. Отраслевые лаборатории выполняют конкретные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выдвигаемые заинтересованными министерствами и ведомствами.

Важным средством по внедрению результатов научных работ являются хозяйственные договоры вузов с предприятиями и учреждениями. Эти договоры взаимовыгодны. Производству они выгодны тем, что для решения стоящих перед ним задач можно привлечь коллективы вузов, способные вести исследования на уровне современной науки. Вузам хоздоговоры позволяют расширять связи с производством, выполнять исследования научно-технического порядка. Наряду с этим вузы имеют возможность укреплять свою материальную базу путем использования средств, предусмотренных в хоздоговорах.

В проведении научной работы участвуют студенты. В настоящее время научная работа студентов включена в учебный план. Студент выполняет самостоятельно научную работу в стенах вуза или на практике. Наибольший эффект получается тогда, когда студентов привлекают к решению проблем, над которыми работают кафедры и лаборатории данного вуза. Особенно перспективны студенческие проектно-конструкторские бюро (СПКБ), выполняющие реальные заказы предприятий. СПКБ имеются почти в каждом третьем вузе страны, они выполняют объем работ ежегодно более чем на 20 млн. р.

Научно-исследовательские организации, входящие в состав отраслевых министерств, выполняют главным образом прикладные исследования, которые служат каналом обеспечения связи науки с производством. Здесь на основе результатов фундаментальных работ определяют направления технического прогресса, формируют техническую политику, разрабатывают, испытывают новую технологию и продукцию. В отраслевых научных учреждениях страны трудится более 45 % всех научных работников.

Обычно в определенной отрасли выделяют головной институт, который выполняет работу по основной тематике данного направления или проблемы и координирует деятельность других учреждений в той же области. Головной институт дает экспертные заключения важнейшей продукции, обобщает зарубежный опыт, руководит разработкой прогнозов развития техники и производства.

Отраслевыми научными учреждениями непосредственно руководят отраслевые министерства.

В настоящее время наблюдается процесс взаимного проникновения науки в сферу производства, и наоборот, отдельные предприятия создаются в сфере науки. Создана сеть научно-производственных объединений (НПО). С одной стороны, они созданы при крупных предприятиях. Например, на базе Харьковского тракторного завода им. С. Орджоникидзе создано научно-производственное объединение, включающее завод, научно-исследовательский институт, конструкторское бюро, опытные полигоны, базы. С другой стороны, крупные производства создаются при ведущих научно-исследовательских институтах, которые могут выступать не только в качестве опытных баз, но и производить серийную продукцию. Такие производства созданы, например, при НИИ электросварки им. Патона АН УССР, при НИИ материаловедения АН УССР. Главной задачей НПО является ускорение научно-технического прогресса, повышение эффективности научно-исследовательских работ, сокращения сроков по созданию и внедрению в производство новой продукции и новых технологических процессов. Опыт работы НИИ электросварки им. Патона и НИИ материаловедения АН УССР показал, что продолжительность цикла «научная идея — серийное производство» сокращается в этом случае почти в два раза.

Широкие права по проверке деятельности научных организаций предоставлены Государственному комитету Совета Министров (СССР по науке и технике (ГКНТ), который обеспечивает в соответствии с директивами партии и правительства проведение единой государственной политики в области научно-технического прогресса и использования достижений науки и техники в народном хозяйстве. ГКНТ является высшим органом государственной власти в нашей стране в области науки и техники, он имеет право проверять деятельность научных учреждений, давать обязательные для министерств и ведомств указания о прекращении неоправданно дублируемых или не имеющих теоретического и практического значения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и их финансирования. ГКНТ разрабатывает научно-технические программы и предложения по основным направлениям науки и техники, проекты Государственного пятилетнего плана научно-исследовательских работ, планы подготовки научных кадров, утверждает координационные планы по решению основных научно-технических проблем, разрешает финансирование научно-исследовательских работ, вносит предложения по развитию сети научных учреждений, осуществляет общегосударственный контроль за техническим уровнем отраслей народного хозяйства, ведает вопросами научно-технической информации и координации международных научно-технических связей.

Важную роль в постановке и обсуждении многих проблем науки и техники играют научные и технические общества, объединяющие на добровольных началах научных и практических работников одной или нескольких родственных специальностей независимо от места их работы. Массовые научно-технические общества (НТО)

организованы по производственно-отраслевому принципу, их первичные организации находятся в академиях, НИИ, вузах, предприятиях. Деятельность НТО объединяет Всесоюзный совет научно-технических обществ (ВСНТО). Большую работу по внедрению новой техники и технологии проводит Всесоюзное общество изобретателей и рационализаторов (ВОИР).

В последнее время в нашей стране организована система научных центров. Это обусловлено большим количеством районов, характеризующихся разнообразными богатейшими ресурсами в отдаленных от уже сложившихся культурных центрах. Выделяют два типа научных центров: регионально-комплексные и отраслевые.

Регионально-комплексные научные центры — крупные объединения научных учреждений. Цель их — ускорение развития фундаментальных исследований и разработка проблем, способствующих развитию производительных сил в районе размещения данного научного центра. Больше внимания уделяют подготовке научных кадров и координации исследований. К комплексным центрам относят, например, Сибирское отделение, которое за короткий срок своего существования приобрело мировую известность. Здесь сложился научный центр со всеми непременными составляющими цикла «исследование — производство»: академические НИИ, отраслевые НИИ, вузы, сеть проектных институтов и конструкторские бюро, опытные заводы. Ряд научных центров создано на Украине: в Киеве, Харькове, Донецке, Днепропетровске, Львове, Одессе.

Отраслевые центры — объединение научных учреждений одной или близких отраслей знания с целью разработать комплекс проблем преимущественно одной науки или отрасли народного хозяйства. Деятельность отраслевых научных центров носит общесоюзный характер. Примером является научный центр АН СССР по изучению фундаментальных исследований в биологии, расположенный в г. Пущино, а также отраслевые академии наук, выполняющие в основном прикладные исследования.

К научным кадрам или научным работникам относят лиц, имеющих высшее образование и ведущих научно-исследовательскую или научно-педагогическую работу по утвержденному в установленном порядке плану. Научным работникам, успешно выполняющим в соответствии с установленными требованиями научную и педагогическую работу, присуждают ученые степени и ученые звания (рис. 1.4).

В нашей стране установлены две ученые степени — кандидат наук и доктор наук. Они присуждаются ученым после успешной защиты диссертации, содержащей результаты самостоятельной научно-исследовательской работы соискателя ученой степени.

Ученые звания в СССР — академик и член-корреспондент АН СССР и академии наук союзных республик, действительный член и член-корреспондент отраслевых академий, профессор, доцент, старший и младший научный сотрудник, ассистент. Ученые звания

присваивают лицам, которые занимают должности, соответствующие этим званиям, и успешно выполняют обязанности, установленные для этих должностей. При этом в первую очередь учитываются результаты научно-исследовательской и научно-педагогической деятельности научного работника.

В нашей стране к ученым предъявляют большие требования, прежде всего соответствующие моральному кодексу строителя коммунизма. Научный работник должен быть политически грамотным, идейно убежденным, преданным идеям марксизма-ленинизма. Он является не только высококвалифицированным специалистом в той или иной отрасли знаний, но и политическим бойцом, агитатором и пропагандистом. Любовь к социалистической родине, странам социализма, преданность идеям интернационализма, нетерпимость к национальной и расовой неприязни, к врагам коммунизма, мира и свободы народов — неотъемлемые черты советского ученого.

Авторитет ученого определяется прежде всего результатами его работы, эрудицией и квалификацией.

Под эрудицией понимают широкое и глубокое знание той отрасли науки, в которой работает ученый, а также знание смежных областей других наук. Наиболее достоверны и прочны знания, добытые из первоисточников. Ученый подвергает их критическому анализу, творческой переработке, систематически использует в своей деятельности.

Отсутствие эрудиции часто приводит к кустицизму и фабрикации различных схем на недостаточно проверенных и неглубоко анализированных материалах, к повторению в худшем виде ранее сделанного другими. Ученый, обладающий широкой эрудицией и творческими навыками, способен критически осмыслить научную информацию, оценивать ее достоинства и недостатки; он должен «нестандартно» мыслить, находить новые решения, выдвигать новые научные идеи, уметь работать с научными приборами, проводить самостоятельно эксперимент, накапливать и анализировать нужные факты, обобщать их, систематизировать, теоретически их объяснять, оформлять в виде научных отчетов, статей, докладов, монографий, авторских свидетельств, владеть основами научной организации научного труда.

Основной формой подготовки научных кадров является аспи-

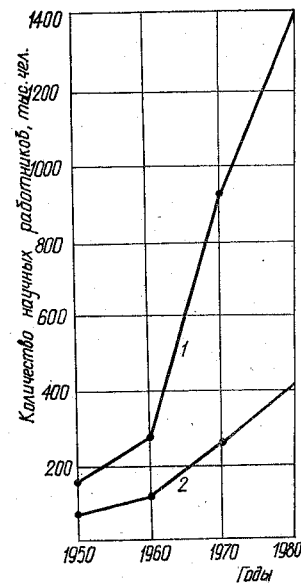


Рис. 1.4. Рост количества научных работников в СССР: 1 — общее количество; 2 — научные работники со степенями

рантура. В нашей стране более 70 % научных работников прошли аспирантскую подготовку.

Аспирантура (очная, в которой аспиранты обучаются в течение трех лет, заочная — в течение четырех лет) организуется при научных учреждениях, вузах, научно-исследовательских институтах и других учреждениях, которые располагают высококвалифицированными кадрами научных руководителей, научно-лабораторной и экспериментальной базой, позволяющей проводить исследования на современном уровне. Аспиранты работают под руководством научных руководителей по избранной теме, являющейся составной частью работ, выполняющихся в научном учреждении.

Около 10 % выпускников вузов вовлекаются в сферу науки. В последнее время молодых специалистов направляют в научно-исследовательские институты и вузы в качестве стажеров-исследователей. В течение одного-двух лет стажеры овладевают методикой исследования, осваивают технику эксперимента и изучают новейшие достижения науки и техники по специальности.

Подготовка докторов наук осуществляется, как правило, без отрыва соискателя от основной работы.

Бурное развитие научно-технической революции, ускоренное развитие науки, быстрый рост новых отраслей и направлений вызывают потребность в систематическом повышении квалификации научных кадров. Поэтому в последнее время регулярно проводятся семинары научных работников. Сложилась система повышения квалификации: факультеты и институты повышения квалификации научно-педагогических кадров, их стажировка на передовых предприятиях и в вузах, НИИ, семинары заведующих кафедрами и др.

Научных и научно-педагогических работников избирают на вакантные должности, соответствующие их ученому званию, по конкурсу на Совете научного учреждения путем тайного голосования и через определенное время переизбирают. Избрание и переизбрание по конкурсу является одной из форм аттестации научных и научно-педагогических кадров. Перед переизбранием на новый срок ученый или преподаватель вуза отчитывается о своей работе за время пребывания его в этой должности после последних выборов. Научный коллектив, где работает ученый, партийная и общественные организации характеризуют и дают рекомендации о его переизбрании в установленном порядке.

Вопросы, связанные с подготовкой и повышением квалификации научных кадров, являются важнейшими в научной политике и поэтому находятся в центре внимания нашей партии. ЦК КПСС, Совет Министров СССР осуществили широкую программу мероприятий по совершенствованию системы подготовки научных работников, улучшению их качественного состава и образовали Высшую аттестационную комиссию (ВАК) при Совете Министров СССР, которая несет ответственность за аттестацию научных и научно-педагогических кадров.

ГЛАВА 2

ВЫБОР ТЕМЫ, ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Методы обоснования тем научных исследований

В научно-исследовательской работе различают научные направления, проблемы и темы.

Под *научным направлением* понимают сферу научных исследований научного коллектива, посвященных решению каких-либо крупных, фундаментальных теоретически-экспериментальных задач в определенной отрасли науки. Успех научной работы, эффективность ее во многом зависят от того, насколько удачно обосновано научное направление.

Структурными единицами направления являются комплексные программы и проблемы, темы и вопросы. Комплексная проблема включает в себя несколько проблем.

Под *проблемой* понимают сложную научную задачу, которая охватывает значительную область исследования и имеет перспективное значение. Полезность таких задач и их экономический эффект иногда можно определить только ориентировочно.

Проблема состоит из ряда тем. *Тема* — это научная задача, охватывающая определенную область научного исследования. Она базируется на многочисленных исследовательских вопросах. Под *научными вопросами* понимают более мелкие научные задачи, относящиеся к конкретной области научного исследования.

Результаты решения этих задач имеют не только теоретическое, но главным образом и практическое значение, поскольку можно сравнительно точно установить ожидаемый экономический эффект.

При разработке темы или вопроса выдвигается конкретная задача в исследовании — разработать новый материал, машину, конструкцию, прогрессивную технологию и т. д. Решение проблем ставит более общую задачу — сделать открытие, решить комплекс научных задач, обеспечивающих ускорение теоретических разработок и процесса общественного производства.

Постановка (выбор) проблем или тем является трудной, ответственной задачей, включает в себя ряд этапов.

Первый этап — *формулирование проблем*. На основе анализа противоречий исследуемого направления формулируют основной вопрос-проблему и определяют в общих чертах ожидаемый результат.

Второй этап включает в себя *разработку структуры проблемы*. Выделяют темы, подтемы, вопросы. Композиция этих компонентов должна составлять древо проблемы (или комплексной проблемы). По каждой теме выявляют ориентировочную область исследования.

На третьем этапе устанавливают *актуальность проблемы*, т. е. ценность ее на данном этапе для науки и техники. Для этого по каждой теме выставляют несколько возражений и на основе анализа методом последовательного приближения исключают возражения в пользу реальности данной темы. После такой «чистки» окончательно составляют структуру проблемы и обозначают условным кодом темы, подтемы, вопросы.

При выборе важно уметь отличать псевдопроблемы от научных проблем. Псевдопроблемы (ложные, мнимые), какую бы не имели внешнюю форму, в основе своей имеют антинаучный характер.

В технических направлениях наибольшее количество псевдопроблем связано с трудностями в развитии науки. Особое место среди них занимают проблемы, которые повторяют решаемые или уже решенные. Дублируемые псевдопроблемы обуславливают дополнительные затраты труда ученых и средств. Иногда дублирование проблем не совсем бесполезно. Так, в науке известны случаи, когда при повторной разработке проблемы достигали более значительных результатов. Однако в целом разработка таких псевдопроблем приносит больше вреда, чем пользы.

В последнее время в науку вовлечена огромная армия работников, непрерывно выдающих информацию. Кроме того, имеются большие трудности в освоении научной информации. Все это создает предпосылки для разработки уже решенных проблем.

Более 50 % направляемых заявок на изобретение в той или иной степени дублируют уже решенные вопросы. В науке около 60 % повторений в исследованиях приходится на одиночек, которые допускают ошибки при выборе тем. Значительно меньше ошибок в выборе направлений, проблем и тем наблюдается в хорошо организованных коллективах.

При обосновании проблем их коллективно обсуждают на заседаниях научно-технических советов, ученых советов, кафедр в виде публичной защиты, на которой выступают оппоненты и принимают окончательное решение.

После обоснования проблемы и установления ее структуры научный работник или коллектив, как правило, самостоятельно приступают к выбору темы научного исследования, что зачастую более сложно, чем провести само исследование.

К теме предъявляют ряд требований.

Она должна быть *актуальной*, т. е. важной, требующей скорейшего разрешения в настоящее время. Это требование одно из основных.

Четкого критерия для установления степени актуальности пока нет. Так, при сравнении двух тем теоретических исследований степень актуальности может оценить крупный ученый отрасли или научный коллектив. При оценке актуальности прикладных научных разработок ошибки не возникнет, если более актуальной окажется та тема, которая обеспечит больший экономический эффект.

Тема должна иметь *научную новизну*, вносить вклад в науку. Это значит, что тема в такой постановке никогда не разрабатывалась и в настоящее время не разрабатывается, т. е. дублирование исключается. Дублирование возможно лишь в отдельных случаях, когда по заданию руководящих организаций одинаковые темы разрабатывают два конкурирующих коллектива в целях разрешения важнейших государственных проблем в кратчайшие сроки.

Грань между научными и инженерными исследованиями стирается с каждым годом. Однако при выборе тем новизна должна быть не инженерной, а научной, т. е. *принципиально новой*. Если разрабатывается пусть даже новая задача, но на основе уже открытого закона, то это область инженерных, а не научных разработок. Поэтому необходимо отличать научную задачу от инженерной. Все то, что уже известно, не может быть предметом научного исследования.

Тема должна быть *экономически эффективной* и иметь *значимость*. Любая тема прикладных исследований должна давать экономический эффект в народном хозяйстве. Это одно из важнейших требований. Выбор темы должен базироваться на специальном технико-экономическом расчете.

На стадии выбора темы исследования предполагаемый экономический эффект может быть определен, как правило, ориентировочно. Иногда экономический эффект на начальной стадии установить вообще нельзя. В таких случаях для ориентировочной оценки эффективности можно использовать аналоги (близкие по названию и разработке темы).

При разработке теоретических исследований иногда требование экономичности может уступать требованию значимости. Значимость, как главный критерий темы, имеет место при разработке исследований, определяющих престиж отечественной науки или составляющих фундамент для прикладных исследований, или направленных на совершенствование общественных и производственных отношений и др.

Тема должна *соответствовать профилю* научного коллектива. Каждый научный коллектив (вуз, НИИ, отдел, кафедра) по сложившимся традициям имеет свой профиль, квалификацию, компетентность. Такая специализация, способствующая накоплению опыта исследований, дает свои положительные результаты — повышается теоретический уровень разработок, качество и экономическая эффективность, сокращается срок выполнения исследования.

Однако нельзя впадать в крайность, применяя этот принцип. Если допускать монополию в науке, то исключается соревнование идей. Это может снизить эффективность научных исследований. Заказчику будет представляться научная продукция, которая всегда может отражать наилучшие показатели.

Выполняя длительное время работу по узкоспециализированной тематике с устоявшейся методикой, некоторые научные работники теряют к ней интерес. Поэтому в коллективе может быть несколько непрофильных тем (до 10%), не отличающихся резко от основной тематики коллектива. Это может вызвать энтузиазм инициативу и прилив творческих сил в коллективе.

Важной характеристикой темы является возможность быстрого внедрения в производство. При разработке темы следует оценить возможность ее окончания в плановый срок и внедрение в производственных условиях заказчика. Если это нельзя осуществить или осуществить в сроки, которые не устраивают заказчика, то эффективность таких тем существенно снижается.

Обосновывая тему, научный работник должен хорошо знать производство и его запросы на данном этапе. Для этого необходимо организовывать командировки в крупные производственные объединения, тресты, организации, занимающиеся внедрением.

Большое значение имеет посещение отраслевых и академических институтов, кафедр родственных вузов. Приобретают важность беседы с ведущими научными работниками, крупными специалистами-производственниками. Выбору темы должно предшествовать тщательное ознакомление с отечественными и зарубежными литературными источниками данной и смежных специальностей.

Существенно упрощается методика выбора тем в научном коллективе, имеющем научные традиции (свой профиль) и разрабатывающем комплексную проблему. В таких коллективах научные исследования выполняют не одиночки, а группы, специализирующиеся на разработке тем или вопросов. Здесь начинающий работник, как правило, получает тему, которая была обоснована ранее. Вероятность получить не актуальную, не новую, не эффективную тему исключена. При коллективной разработке научных исследований большую роль приобретает критика, дискуссия, обсуждение проблем и тем. В процессе дискуссии выявляются новые, еще не решенные актуальные задачи разной степени важности, объема, сроков разработки.

Все это создает благоприятные условия для участия студентов в научно-исследовательской работе кафедр. Выбор тем для студенческой работы не представляет какой-либо сложности.

После ознакомления с темой научный работник делает доклад руководителю и коллективу, в котором обосновывает постановку вопроса и его состояние на момент получения темы.

Эффективно на этом этапе подготовить 1—2 реферата, провести

консультации с работниками НИИ и производства. Это позволит шире и глубже представить научно-исследовательскую тему.

Большое значение для выбора прикладных тем имеет четкая формулировка задач заказчиком (министерством, объединением и т. д.).

Научный руководитель коллектива должен с большим вниманием отнестись к предложениям сотрудников, которые могут выставить ряд тем и вопросов. Перед окончательным решением целесообразно организовать широкую дискуссию.

При составлении общей программы исследований необходимо иметь в виду, что в процессе научных разработок возможны некоторые изменения в тематике. Определенная роль в этом принадлежит заказчику, который в зависимости от складывающейся производственной обстановки вносит коррективы, выдвигая на первое место первоочередные темы.

Важное значение при разработке общей программы исследования имеет выделение долгосрочных и краткосрочных исследований, фундаментальных и прикладных. Соотношение между ними зависит от многих факторов — требований заказчика, научного потенциала коллектива, наличия современного экспериментального оборудования, научного задела коллектива и его работоспособности и т. д.

Приведенные выше требования (критерии), предъявляемые к выбору тем, позволяют всесторонне оценить и установить пригодность их для данной научно-исследовательской организации.

В ряде случаев при планировании тем возникает потребность в выборе наиболее перспективных, экономически обоснованных тем. Так, научному коллективу заказчик может предложить несколько тем, или наоборот, отраслевому министерству, вузам и НИИ может быть представлен ряд тем для включения в план. В этом случае оценку народнохозяйственной необходимости разработки тем необходимо определять численными критериями.

Простейшим является критерий экономической эффективности

$$K_3 = \frac{\Delta_n}{Z_n} \quad (2.1)$$

где Δ_n — предполагаемый экономический эффект от внедрения, Z_n — затраты на научные исследования.

Чем больше значение K_3 , тем эффективнее тема и выше ее народнохозяйственная эффективность. Величина K_3 в нашей стране колеблется от 1,5—2 до 10 р. на рубль затрат.

Однако критерий K_3 не учитывает объем внедряемой продукции, период внедрения. Более объективным является критерий, вычисляемый по формуле

$$K_3 = \frac{C_T \sqrt{T}}{Z_0} \quad (2.2)$$

Здесь C_T — стоимость продукции за год после освоения научного исследования и внедрения в производство, T — продолжительность

производственного внедрения в годах; Z_0 — общие затраты на выполнение научного исследования, опытное и промышленное освоение продукции и годовые затраты на ее изготовление по новой технологии.

Важнейшим критерием перспективности темы является ее экономичность. Однако при оценке крупных тем иногда этого критерия недостаточно. Требуется более общая оценка, учитывающая и другие показатели. В этом случае наиболее достоверной является экспертная оценка.

Методика такой оценки сводится к следующему. Подбирают состав и количество (не менее 7, обычно 7—15) экспертов. В зависимости от специфики тематики направления или комплексной программы назначают или устанавливают с помощью экспертов оценочные показатели тем. Каждому показателю назначают коэффициенты значимости. Коэффициент значимости показывает вес данного показателя в народнохозяйственной необходимости разработки данной темы. Экспертам выдается оценочная балльная шкала, с помощью которой они устанавливают баллы по каждому показателю. Тема, получившая максимальный балл, считается наиболее перспективной. Суммарный балл вычисляют по формуле

$$q = \sum_{i=1}^n p_i m_i, \quad (2.3)$$

где p_i — балл i -го оценочного показателя, выставляемый экспертом; m_i — коэффициент значимости i -го показателя; n — число оценочных показателей по теме.

Таблица 2.1

Оценочные показатели и коэффициент весомости	Критерии показателей	Баллы
Актуальность темы 0,35	Очень актуальная	5
	Актуальная	4
	Не особо актуальная	3
Экономичность темы 0,40	Высокая, $K_3 \geq 7$	5
	Средняя, $K_3 = 3-6$	4
	Низкая, $K_3 < 3$	3
Реализация внедрения 0,25	Легкая, требуются незначительные затраты	5
	Средняя, требуются затраты	4
	Трудная, необходимы большие затраты	3

оценочных показателей по теме.

В качестве примера в табл. 2.1 приведена оценочная шкала. Как видно из табл. 2.1, эксперты при установлении коэффициентов значимости народнохозяйственной необходимости отдали предпочтение экономичности, а далее соот-

Таблица 2.2

Критерии P_i	Номера тем				
	1	2	3	4	5
P_1	3	3	5	4	5
P_2	3	4	5	5	4
P_3	3	3	5	3	4

ветственно актуальности и реализации. Естественно, возможны и другие варианты.

В табл. 2.2 приведены результаты экспертной оценки пяти тем по критериям, приведенным в табл. 2.1.

Вычисленный суммарный балл j -го эксперта пяти тем по формуле (2.3) соответственно равен: по теме № 1 $q_1 = 0,35 \cdot 3 + 0,4 \cdot 3 + 0,25 \cdot 3 = 3$; по теме № 2 $q_2 = 3,4$ и далее $q_3 = 5$; $q_4 = 4,15$; $q_5 = 4,35$. Следовательно, оценка народнохозяйственной необходимости разработки тем j -м экспертом ранжирована так: первое место заняла тема № 3, далее № 5, 4, 2, 1.

§ 2. Составление технико-экономического обоснования на проведение научно-исследовательских работ

Рост эффективности общественного производства требует наискорейшего внедрения достижений науки и техники. Это обуславливает необходимость разработки прежде всего тех тем, которые приносят наибольший эффект народному хозяйству.

Высокая эффективность темы может быть достигнута при условии, что еще до ее разработки выполнено технико-экономическое обоснование (ТЭО). Поэтому непременным условием перед проведением исследований по выбранной теме является проведение ТЭО на НИР или ОКР с осуществлением предварительной патентной проработки на новизну и перспективность. ТЭО является основным исходным предплановым документом. Только при наличии такого обоснования возможно дальнейшее планирование и финансирование тем заказчиком.

Цель составления ТЭО — установить данные о новейших достижениях науки и техники по рассматриваемой теме в СССР и за рубежом. В нем обосновывается народно-хозяйственная потребность, предполагаемые объемы внедрения, ожидаемые технико-экономические и социальные результаты.

Состав ТЭО включает в себя такие разделы: исходные положения, результаты предварительно выполненных патентных поисков на новизну и перспективность, народнохозяйственная необходимость, объем и место внедрения, технико-экономические и социальные результаты.

В первом разделе ТЭО указывают причины разработки темы, что послужило основанием для ее выполнения.

Основу раздела составляет краткий литературный обзор, в котором описан уже достигнутый уровень исследований и полученные результаты. Особое внимание уделяется еще нерешенным вопросам, обосновывается актуальность, значимость и важность работы для отрасли и народного хозяйства страны.

Такой обзор позволяет обосновать задачи исследования, описать существующие методы решения и аргументировать возможность применения новых, более прогрессивных методов и методик, методы тематического аппарата и ЭВМ. Далее разрабатывают общую методологию проведения исследований, выделяют этапы (по отдельным вопросам и годам), планируют получение конечной продукции в результате выполнения темы — инструкций, технических указаний и правил.

Патентную проработку производят на последние 5—7 лет. Это дает возможность выявить отличие планируемой темы от уже разработанных аналогичных тем в стране и за рубежом, целесообразность закупки лицензий. Особое внимание необходимо уделить возможности патентования предполагаемого результата, что позволяет наиболее правильно сформулировать тему, выявить ее специфику и отличие от ранее выполненных. На основе патентной проработки создаются условия для сопоставления планируемых исследований с имеющимся уровнем исследований по данной теме.

На стадии составления ТЭО нужно установить народнохозяйственную необходимость, область использования ожидаемых результатов НИР, возможность их практической реализации в данной отрасли.

Большое значение приобретает установление объема внедрения в соответствии с пятилетними планами развития отрасли и прогнозов на более продолжительный период. От правильности прогнозов внедрения зависит достоверность получаемого экономического эффекта.

В результате разработки темы должны быть созданы прогрессивные варианты новой техники — материалов, изделий, технологий машин. На стадии обоснования НИР необходимо определить предполагаемый (потенциальный) экономический эффект за период применения новой техники. Этот период зависит от продолжительности разработки НИР и ОКР, этапов завершения и внедрения отдельных вопросов и составляет около пяти лет.

Кроме экономического эффекта в ТЭО необходимо указать предполагаемые социальные результаты: рост производительности труда и качества продукции, повышение уровня техники безопасности и производственной санитарии, обеспечение охраны природы и окружающей среды.

В результате составления ТЭО делается вывод о целесообразности и необходимости выполнения НИР и ОКР. ТЭО утверждается отраслевым министерством.

§ 3. Научно-техническая информация

Характерной чертой развития современной науки является бурный рост новых научных данных, получаемых в результате исследований. Ежегодно в мире издается около 0,5 млн. книг по различным вопросам, несколько миллионов публикаций, регистрируется несколько сот тысяч диссертаций. Большое количество научно-технической информации содержится в виде рукописей.

Информация имеет свойство «стареть». Это объясняется появлением новой печатной и неопубликованной информации или уменьшением потребности в данной информации. На рис. 2.1 приведены закономерности «старения» информации. Интенсивность падения ценности информации («старения») ориентировочно составляет 10 % в день для газет, 10 % в месяц для журналов и 10 % в год для книг.

Отыскать новое, передовое, научное в решении данной темы — сложная задача не только для одного научного работника, но и для большого коллектива. Чтобы ускорить отбор необходимой документации из общего объема и повысить эффективность труда научных работников, в стране создана общегосударственная служба научно-технической информации (НТИ), которая включает в себя следующие основные организации.

ВИНИТИ — Всесоюзный институт научной и технической информации. Он обрабатывает огромный поток зарубежной и отечественной информации и издает реферативные журналы, ежегодные сборники по научно-технической информации.

ВНИИЦ — Всесоюзный научно-технический информационный центр. Он проводит регистрацию научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, диссертаций и готовит информационный материал по этим вопросам.

ВНИИКИ — Всесоюзный научно-исследовательский институт технической информации, классификации и кодирования. Он осуществляет работу по информации в области стандартизации, измерений и измерительной техники. В институте создан Всесоюзный информационный фонд стандартов и технических условий. Институт издает указатели стандартов и технических условий.

ЦНИИПИ — Центральный научно-исследовательский институт патентной информации. Он является центром информации об отечественных и зарубежных изобретениях, осуществляет обработку патентных фондов на изобретения и открытия.

ГПНТБ — государственная публичная научно-техническая библиотека. Она содержит всю научно-техническую литературу и документацию страны. Библиотека снабжает министерства и ведомства страны, промышленные предприятия и вузы, НИИ научно-технической литературой, издает журнал «Новости технической литературы».

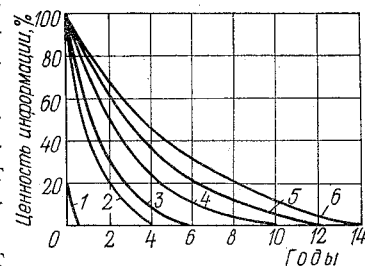


Рис. 2.1. Закономерности «старения» информации:

- 1 — листки технической информации;
- 2 — экспресс-информация;
- 3 — прикладные журнальные статьи;
- 4 — теоретические журнальные статьи;
- 5 — монографии;
- 6 — изобретения

Общегосударственная служба включает в себя отраслевые информационные центры — республиканские институты НТИ, подчиненные госплану республики; информационные центры при Главных НИИ; отделы НТИ (ОНТИ) в НИИ, конструкторских бюро, на предприятиях.

В области строительства всю НТИ организует Госстрой СССР, которому подчинен Центральный институт научной информации по строительству и архитектуре (ЦИНИС). Во всех строительных министерствах имеются ОНТИ, а в низовых организациях — группах и объединениях — группы по технической информации. ЦИНИС изучает мировую литературу по всем вопросам строительства и издает различные информационные документы.

Вторым крупным информационным строительным органом является центральная научно-техническая библиотека по строительству и архитектуре Госстроя СССР (ЦНТБ). Это крупнейшая в мире библиотека по различным вопросам строительства. Книжный фонд ее составляет более 1 млрд. экземпляров.

Носителями информации могут быть различные документы: книги (монографии, учебники, учебные пособия); периодические издания (журналы, бюллетени, труды институтов, научные сборники); нормативные документы (стандарты, СНиПы, технические условия, инструкции, указания и др.); каталоги и прейскуранты; патентная документация (патенты, изобретения); отчеты организаций о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах; информационные издания (сборники НТИ, аналитические обзоры, информационные листки, экспресс-информации, выставочные проспекты и др.); переводы иностранной научно-технической литературы; материалы научно-технических и производственных совещаний; диссертации, авторефераты; производственно-техническая документация организаций (отчеты, акты приемки работ, акты приемки дорог в эксплуатацию); вторичные документы (реферативные обзоры, библиографические указатели и др.).

Эти документы создают огромные информационные потоки, темпы роста которых ежегодно возрастают.

Различают восходящий и нисходящий потоки информации.

Восходящий — это поток информации от исполнителей в регистрирующие органы. Вся научно-техническая информация регистрируется ВНИИЦ. Исполнитель научно-технической работы (НИИ, вузы, ОКБ) после утверждения плана работ обязан в месячный срок представить информационную карту в ВНИИЦ. К восходящему потоку относят также статьи, направленные в различные журналы.

Нисходящий — это поток информации в виде библиографических обзорных реферативных и других данных, который направляется в низовые организации по их запросам.

Сбор, хранение и выдачу информации осуществляют справочно-информационные фонды (СИФ). В стране имеются всесоюзный,

центральные отраслевые, республиканские и местные (в НИИ, вузах, ОКБ и т. д.) СИФ.

В строительстве действует единая система СИФ, которая обслуживает различные организации независимо от принадлежности. Эта система должна обеспечивать научно-исследовательских и инженерно-технических работников полной информацией в области строительства с целью эффективно выполнять все исследовательские работы, внедрять достижения науки и техники и передовой опыт в производство.

Единые СИФ охватывают такие виды строительства: промышленное, транспортное, жилищно-гражданское, энергетическое, мелиоративное, спецмонтажное, магистральных трубопроводов (газопроводов, нефтепроводов, нефтепродуктопроводов).

В соответствии с единой системой для получения информации научный работник может обратиться в следующие инстанции: центральный СИФ при ЦИНИСе; СИФ Минстроя, Минтяжстроя, Минтранстроя, Минсельхозстроя, Минпромстроя СССР, а также СИФ главков в городах Москве, Ленинграде, Киеве, Ташкенте; систематические СИФ НИИ Госстроя и строительных министерств; СИФ в республиканских институтах и республиканских центрах НТИ по строительству.

В СИФ установлен определенный порядок хранения информации. Имеются основной и справочный фонды.

Основной фонд (книги, журналы, переводы, отчеты, бюллетени и др.) размещается на полках в алфавитном порядке по видам информации. Диссертации, отчеты, проектные материалы и другие производные документы микрофильмируются с уменьшением в 200 и более раз. Отчет или диссертация объемом до 150 с. помещается в контейнере диаметром 35 мм. Удобны также микрокарты (150 × 148 мм). На одной карте размещается до 80 с. текста.

Справочный фонд — это вторичные информационные документы основного фонда. Он представлен в основном библиографическими и реферативными карточками (125 × 75 мм), хранимыми в каталожных выдвижных ящиках.

Справочный фонд состоит из главной картотеки, содержащей все опубликованные и неопубликованные документы, хранимые в данном СИФ, а также каталогов и карточек.

По алфавитному каталогу можно отыскать любую информацию в данном СИФ по фамилии автора, редактора или названию первоисточника.

По систематическому каталогу можно подбирать информацию для различных отраслей знаний. Чтобы отыскать нужную информацию, к каталогу прилагается ключ — алфавитный предметный указатель.

В регистрационной карточке периодических изданий содержатся сведения о журналах, сборниках, бюллетенях, хранимые в данном СИФ (по годам и номерам).

Патенты и авторские свидетельства можно отыскать в картотеке описаний изобретений. Картотека стандартов содержит различные

нормативные документы — стандарты, нормали, ТУ, временные указания и др.

Хорошее знание справочного фонда СИФ позволит сократить время научным работникам на поиск необходимой информации и повысить эффективность исследовательского труда.

§ 4. Информационный поиск

После выбора и технико-экономического обоснования темы производят информационный поиск (совокупности операций, направленных на отыскание литературы по разработанной теме). Цель поиска — всесторонний анализ информации по теме, освещение состояния вопроса (составление аналитического обзора), уточнение при необходимости темы, обоснование (уточнение после ТЭО) цели и задач научного исследования.

Поиск включает два этапа: отыскание необходимой информации и проработку источников.

Поиск нужной информации с каждым годом становится все труднее. Поэтому каждый научный работник должен знать основные положения, связанные с информационным поиском.

Поиск может быть ручным, механическим, механизированным и автоматизированным. Ручной поиск осуществляют по обычным библиографическим карточкам, картотекам, печатным указателям. При механическом поиске носителем информации являются перфокарты. Механизированный поиск основан на применении счетно-перфорационных машин, автоматизированный — на применении ЭВМ.

Информационный поиск осуществляется с помощью информационно-поискового языка (ИПЯ). Он представляет собой семантическую (смысловую) систему символов и правил их сочетания. В информационно-поисковой системе применяют различные варианты 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 мелких частей. Каждая часть детализируется до требуемой степени. Структура УДК состоит из групп основных индексов и определителей. Группы делятся на подгруппы общих и специальных определителей.

Таблицы УДК по строительству подготовлены ЦИНИС Госстроя СССР в 1965 г. и переизданы в 1971 г. Различные отрасли строительства имеют следующие индексы УДК:

69 — строительные материалы, строительного-монтажные работы, экономика и организация строительства;

624 — теория строительства, расчеты сооружений и зданий, земляные работы, устройство фундаментов, инженерные сооружения (мосты, тоннели, башни и др.);

625 — транспортное строительство;

728,9 — сельскохозяйственное строительство.

Каждый индекс имеет дополнительное разделение. Например, 625.122 — сооружение и уплотнение земляного полотна дорог.

УДК имеет ряд преимуществ: простота усвоения работниками издательств и библиотек, удобство шифрования, относительная быстрота поиска информации для узкоспециализированных тем. Однако она очень громоздка и малоприменима для механизированных и автоматизированных систем поиска, применяемых в последнее время за рубежом и у нас в стране.

Для ускорения поиска необходимо прибегнуть к помощи ВИНИТИ, ВНИИЦ, ВНИИКИ, ЦНИИПИ, ГПНТБ, ЦИНИС, а также региональных центров НТИ и местных ОНТИ.

В зависимости от оснащенности организации поиск производят самостоятельно (ручной способ, по перфокартам) или механизированно-автоматизированным отбором специалистами НТИ.

Следует уделить внимание изучению различных литературных источников как в оригинале, так и по переводным изданиям. Анализ иностранной информации позволит исключить дублирование по исследуемой теме. Это требует от научного работника знания одного или двух иностранных языков (предпочтительно английский и немецкий).

Без личного ознакомления с оригиналом или квалифицированным переводом ссылаться на литературный анализ иностранной информации других авторов не рекомендуется, поскольку каждый автор прорабатывает литературу применительно к своей теме исследования.

Решение этого вопроса в последнее время упрощается, поскольку из ЦИНИС, ЦНИИПИ и ВИНИТИ можно получать обзоры, новости техники, экспресс-информацию о зарубежных исследованиях с высоким качеством переводов. Кроме непосредственно относящейся к теме информации необходимо проработать основную литературу по родственным специальностям.

Очень важно ознакомиться с циклом дисциплин, близких к теме, анализ которых может быть полезен при разработке отдельных вопросов темы. Например, при разработке темы по устойчивости земляного полотна полезно ознакомиться с вопросами по физике (теплопередача; диффузия газов, паров, жидкости; физика твердых тел), математике (выбор системы дифференциальных уравнений и их решение), химии (анализ взаимодействия грунтов с водой, минералами; анализ засоления почв), прикладной механике (анализ нагрузок, напряжений и деформаций) и т. д.

Для всестороннего анализа информационного материала необходимо ознакомиться с тематикой научных исследований, которые проводятся в инженерно-строительных вузах и факультетах страны. В состав научно-технического совета Министерства высшего и среднего специального образования СССР входят секции по различным отраслям строительства. Секции ежегодно издают сводные

и тематические координационные планы научно-исследовательских работ по бюджетной и договорной тематике, диссертационным исследованиям. Просмотр таких планов позволяет научному работнику узнать, в каких вузах разрабатывают тематику, представляющую интерес для его научной работы.

В научно-исследовательских институтах накоплены значительные объемы информации. Научный работник может ознакомиться с отчетами, планами, методиками исследований, текущими делами и др. Прорабатывая архивный материал этих организаций, нужно делать записи только необходимых сведений с указанием номера отчета, года, темы, исполнителей. С содержанием отчетов можно познакомиться и по микрофотокопиям, полученным из ВИНИТ по заявкам организаций.

На стадии сбора и анализа информации полезны командировки в проектные, особенно в крупные передовые строительные и эксплуатационные организации. Научные командировки позволяют выяснить, в какой степени исследуемая тема решается на производстве, на какие ее стороны следует обратить особое внимание, какие вопросы представляют первоочередной практический интерес. Желательно знать мнение производственных коллективов о теме научного исследования.

После сбора литературных, архивных, производственных и других информационных данных и их обобщения полезно узнать мнение крупных ученых. Они могут оказать существенную помощь в разработке темы.

Таким образом, научный работник, прорабатывая тему, накапливает большое количество различной информации. В зависимости от названия и научной значимости темы объем информации может достигать 100—200 и более наименований.

Для эффективного анализа этой информации необходимо знать методы ее учета, проработки и анализа.

Учет проработанной информации сводится к составлению библиографии. Библиография — это перечень различных информационных документов с указанием следующих данных: фамилия и инициалы автора, название источника, место издания, издательство, год издания, объем источника в страницах.

Библиографический перечень составляют в алфавитном порядке по фамилиям авторов. Это ускоряет отыскание нужной информации. 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 документов является установка, т. е. цель чтения, направленность. Она активизирует мышление, повышает память, помогает понять читаемое, делает восприятие более точным. Этот психологический фактор требует от работника заранее создать определенное настроение для осмысливания читаемого; настроить себя «на определенную волну».

Изучение научно-технической информации требует творческого подхода, для чего необходимо вдохновение. Оно повышает эффективность проработки информации. Но даже если нет вдохновения, нужно усилием воли заставить себя работать над книгой творчески.

Внимание, сосредоточенность над текстом во многом определяют качество проработки информации.

В процессе чтения действуют различные раздражители — музыка, шум, разговоры, собственные мысли и др. Они независимо от воли человека действуют на центральную нервную систему, ухудшают условия мышления. При определенном уровне шума наше внимание отвлекается, быстрее наступает утомление и качество усвоения информации существенно ухудшается.

Поэтому, чтобы повысить работоспособность умственного труда, различные помехи следует устранять. Некоторые читатели полагают, что шум, музыка им не мешают. Это не совсем так. Если помехи не замечаются сознанием, то их фиксирует нервная система. Особо заметна роль помех при проработке сложной научно-технической информации.

Вместе с тем, как показывают психологические опыты, работа в полной изоляции от внешней среды также не оптимальна. В качестве помех в таких случаях являются собственные мысли, отвлечения. Без напряжения мысли и воображения эффективность изучения информации снижается.

Самостоятельность труда — важный фактор успешной работы над информацией. Каждая страница должна быть неторопливо проанализирована, обдумана применительно к поставленной цели. Только вдумчивый, самостоятельный анализ прочитанного позволит убедиться в своих суждениях, закрепить мысль, понятие, представление.

Очень важным фактором при проработке литературы является настойчивость и систематичность. Часто, особенно при чтении сложного нового текста четко осмыслить его с первого раза невозможно. Приходится читать и перечитывать, добиваясь полного понимания материала.

Последовательное, систематическое чтение улучшает усвоение прорабатываемого материала. Отвлечение срывает, расстраивает логически настроенную мысль, приводит к утомлению.

Систематическое усидчивое чтение по плану, с обдумыванием и анализом прочитанного намного производительнее бессистемного.

Производительность проработки информации существенно зависит от умственной работоспособности. Последняя зависит от умения правильно распределить свою работу во времени, умело использовать физиологические перерывы. После 1—2 часов работы рекомендуется делать перерывы на 5—7 минут, физические упражнения, обливания тела и лица теплой водой или усиленное глубокое дыхание. Все это стимулирует центральную нервную систему и повышает работоспособность. Иногда при чтении трудного текста полезно отключиться на 2—3 минуты.

Прорабатывая текст, необходимо добиваться, чтобы каждое место было понятно. В отдельных случаях нужно не только понять, но и запомнить текст на тот или иной период. Каждый научный работник должен владеть искусством запоминания.

Существуют различные способы запоминания.

Механический — основан на многократном повторении и заучивании прочитанного. При таком запоминании («зазубривании») отсутствует логическая связь между отдельными элементами. Этот способ наименее эффективен, он применим для ограниченных случаев — запоминание дат, формул, цитат, иностранных слов и др.

Установлено, что тренировка памяти многочисленными повторениями малоэффективна. Память должна базироваться не на формальном восприятии, а на активной мыслительной деятельности прорабатываемой информации. Запомнить — значит мыслить. Это основа эффективности памяти, повышение производительности умственного труда.

Смысловой способ основан на запоминании логических связей между отдельными элементами. При чтении необходимо понять не отдельные элементы, а весь текст в целом, его смысл, направленность, значение. Часто достаточно быстро прочесть текст один раз, чтобы его запомнить. Однако при этом особое внимание необходимо уделять логическим связям. Логически смысловой способ запоминания во много раз эффективнее механического. Например, трудно механически запомнить число 149 162 536 496 481. Однако оно легко запоминается смысловым способом — это квадраты чисел от 1 до 9.

Текст хранится в памяти определенное время. Постепенно он начинает забываться. Вначале после восприятия информации процесс забывания происходит наиболее быстро, со временем темп его замедляется. Так, в среднем через один день теряется около 23—25 % заученного, через 5 дней — около 35 % и через 10 дней — 40 %.

Повторение — один из эффективных способов запоминания. Повторение бывает *пассивным* (перечитывание несколько раз) и *активным* (перечитывание с пересказом). Второй способ более эффективный, в нем сочетается заучивание и самоконтроль. Иногда полезно совмещать активное повторение с пассивным.

Чтобы лучше запомнить, нужно правильно выбрать время для повторения. Учитывая характер забывания, материал лучше повторить в день чтения или же на следующий день, а затем повторять только периодически и лишь то, что представляет наибольший интерес. Небольшой по объему текст лучше повторить полностью. Большие тексты вначале осваивают в целом, затем повторяют особые трудные фрагменты.

Работоспособность — важный фактор при повышении запоминания. Для соблюдения высокой работоспособности рекомендуется устранять до минимума раздражители (шум, громкая музыка и т. д.), правильно распределять время проработки, делать физиологически

перерывы (см. выше); сохранять оптимальный для данного человека темп чтения (очень быстрое или медленное чтение утомляет и отвлекает внимание); разнообразить чтение, менять трудоемкость информации, переходить от тяжелого текста к легкому, и наоборот.

Неотъемлемым требованием проработки научно-технической информации является запись прочитанного. Она позволяет лучше его понять и усвоить; удлинить процесс восприятия информации, следовательно, лучше запомнить; восстановить в памяти забытое, развить мышление, проанализировать текст; отобрать наиболее важные фрагменты информации для разрабатываемой темы.

Однако запись требует дополнительного времени. Часто ее выполняют неправильно. Так, очень краткая запись обедняет проработанную информацию. Наоборот, излишняя подробность в записи означает не только трату времени, но и неумение понять и отразить главное. Иногда при записи основное подменяется второстепенным или искажается смысл текста. Поэтому очень важно уметь правильно записать проработанный текст.

Прорабатывая научно-техническую информацию, применяют выписки, аннотации, конспекты.

Выписка — краткое (или полное) содержание отдельных фрагментов (разделов, глав, страниц) информации.

Ценность выписок очень высока. Они могут заменить сплошное конспектирование текста, краткость их позволяет в малом объеме накопить большую информацию. Удачно отобранные выписки могут быть основой для дальнейшей мыслительной творческой деятельности научного работника.

Аннотация — это краткая характеристика произведения печати (их совокупности или их частей) с точки зрения содержания, назначения, формы и других особенностей. Аннотации составляют на данный документ информации в целом. Их удобно накапливать на отдельных картах по различным вопросам прорабатываемой темы. С помощью аннотации можно быстро восстановить в памяти текст.

Конспект — это подробное изложение содержания информации. Главное в составлении конспекта — это уметь выделить рациональное зерно применительно к разрабатываемой теме. Конспект должен быть содержательным, полным и по возможности кратким. Полнота записи означает не объем, а все то, что является главным в данной информации.

Для того чтобы конспект был кратким, необходимо текст составлять своими словами, что требует осмысливания, анализа прочитанного, следовательно, приносит большую пользу. При этом следует применять сокращение слов, но так, чтобы не был потерян смысл. Не рекомендуется, например, сокращать подряд несколько слов. В сокращенном тексте следует сохранить все знаки препинания. Эффективно каждому научному работнику иметь свой словарь сокращенных слов.

Конспект должен быть правильно оформлен. Каждое произведение желательно законспектировать в отдельной тетради. Запись

необходимо вести только с одной стороны листа с полями около 1/4 ширины листа. Текст должен иметь абзацы и иерархическое деление на пункты, например 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, ..., 1.2.1, 1.2.2. Для выделения главных мыслей нужно применять подчеркивание сплошной и пунктирной линиями.

Иногда конспект необходимо дополнить новым материалом своими предложениями, анализом и т. д. По тексту ставят номера которыми отмечают соответствующие дополнения на полях или обратной (чистой) странице листа.

Существует два способа составления конспектов.

Первый заключается в том, что подобранная информация по данной теме прорабатывается последовательно. Вначале составляют конспект на каждую информацию, а затем все объединяют в одно обзорное произведение. Хотя этот способ наиболее распространенный, однако он не достаточно эффективен — требует большой затраты времени.

Второй способ, выборочный, заключается в следующем. Подобранную информацию располагают в ряд по степени полноты, актуальности, новизны.

Вначале изучают самую полную современную информацию с высоким научным уровнем. С помощью оглавления составляют полный план темы. Далее приступают к беглой проработке менее важной второстепенной информации, дополняя ею план основного первоисточника. В случае повторения второстепенную информацию опускают.

Второй способ сокращает время на подготовку обобщенного конспекта.

§ 5. Анализ информации и формулирование задач научного исследования

Анализ информации — одна из важнейших задач.

Всю информацию необходимо классифицировать и систематизировать. Источники можно систематизировать в хронологическом порядке или по тематике анализируемых вопросов.

В первом случае всю информацию по теме систематизируют по этапам. Для этого целесообразно в истории разработки данной темы выделить научные этапы, которые характеризуются качественными скачками.

На каждом этапе литературные источники нужно подвергнуть тщательному критическому анализу. Для этого необходимо иметь определенную эрудицию, уровень знаний.

Анализ должен быть критичным. Критику недостатков (методов, методик, формул, принципов и т. д.) следует производить корректно, интеллигентно, приводя обоснованные аргументы. Совершенно неверно руководствоваться положением: все, что сделано ранее, — неправильное, устаревшее, не соответствует новым требованиям.

Необходимо соблюдать принцип преемственности. Без прошлых исследований и достижений невозможно было бы ставить задачи на будущее, т. е. нельзя было бы получить эффект в настоящем и будущем.

Вместе с тем нельзя безоговорочно соглашаться с прежними достижениями, если они даже получены авторитетными учеными. Их нужно подвергать творческому критическому анализу с учетом достигнутого уровня в науке и технике, извлекать рациональные положения и базировать на них свои предположения.

При таком критическом анализе различные идеи, факты, теории сопоставляют друг с другом. Ценным является умение научного работника установить этап в истории исследуемого вопроса, определить рубеж, после которого в данной теме появились идеи, качественно изменившие направление исследований.

В процессе активного анализа возникают собственные соображения и мнения, выявляются наиболее актуальные вопросы, подлежащие исследованию в первую и вторую очередь, формируются представления. Все это постепенно формирует фундамент будущей гипотезы научного исследования.

Бывают случаи, когда в процессе аналитического обзора научный работник лишь перечисляет авторов и приводит аннотации их работ, не высказывая при этом своего мнения. Такой пассивный, формальный обзор информации совершенно недопустим.

Иным вариантом анализа является тематический. Весь объем информации систематизируют по вопросам разрабатываемой темы. При этом рассматривают последние издания научно-технической информации, по возможности монографии, в которых подведен итог исследований данного вопроса. Дополнительно выборочно анализируют источники, представляющие особый интерес.

Этот вариант обзора информационных источников более простой, его чаще применяют, он требует меньших затрат времени. Однако он менее полно позволяет проанализировать имеющуюся по теме информацию.

Руководящей идеей всего анализа информации должно быть обоснование актуальности и перспективности предполагаемой цели научного исследования. Каждый источник анализируют с точки зрения исторического научного вклада в решение и развитие данной темы. При этом тщательно разбирают роль теории, эксперимента и ценность производственных рекомендаций.

На основании результатов проработки информации делают методологические выводы, в которых подводят итог критического анализа. В выводах должны быть освещены следующие вопросы: актуальность и новизна темы; последние достижения в области теоретических и экспериментальных исследований по теме (в СССР и за рубежом); важнейшие, наиболее актуальные теоретические и экспериментальные задачи, а также производственные рекомендации, подлежащие разработке в данный момент; техническая целесообразность и экономическая эффективность этих разработок.

На основе указанных выводов формулируют в общем виде цели и конкретные задачи научного исследования. Обычно количество задач, подлежащих исследованию по теме одним научным работником, колеблется от 3 до 5—8. При этом важная роль принадлежит научному руководителю. Он ограничивает и направляет поиск, помогает разобраться (особенно начинающему научному работнику) в огромном потоке информации, отбросить второстепенные источники.

На этом заканчивается первый этап разработки научного исследования.

ГЛАВА 3.

МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Методология теоретических исследований

Теоретические исследования должны быть творческими, их целью является получение новой, ценной информации. Опровергнуть существующие или создать новые научные гипотезы, глубоко объяснить процессы или явления, которые раньше были непонятными или слабоизученными, связать воедино различные явления, т. е. найти стержень изучаемого процесса, научно обобщить большое количество опытных данных — все это невозможно без теоретического творческого мышления.

Творческий процесс совершенствует известное решение. Совершенствование является процессом переконструирования объекта мышления в оптимальном направлении. Когда переработка достигает границ, определенных ранее поставленной целью, создается продукт умственного труда, например гипотеза исследования, т. е. научное предвидение. Процесс совершенствования приводит к своеобразному, оригинальному решению. Оригинальность проявляется в самостоятельной, неповторимой точке зрения на процесс или явление.

Теоретическое исследование имеет несколько стадий: выбор проблемы, знакомство с известными решениями, отказ от известных путей решения аналогичных задач, перебор различных вариантов решения; решение. Творческое решение часто не укладывается в заранее намеченный план. Иногда оригинальные решения появляются «внезапно», после казалось бы длительных и бесплодных попыток. Часто удачные решения возникают у специалистов смежных областей, на которых не давит груз известных решений. Творческий процесс представляет по существу разрыв привычных представлений и взгляд на явления с другой точки зрения.

Собственные творческие мысли, оригинальные решения возникают тем чаще, чем больше сил, труда, времени затрачивается на постоянное обдумывание объекта исследования, чем глубже научный работник увлечен исследовательской работой.

Успешное выполнение теоретических исследований зависит не только от кругозора, настойчивости и целеустремленности научного работника, но и от того, в какой мере он владеет методами и способами научного исследования, и в первую очередь — диалектическим методом.

Важное место при выполнении теоретических исследований занимают способы дедукции и индукции.

Д е д у к т и в н ы й — это такой способ исследования, при котором частные положения выводятся из общих. Так, на основе общих законов механики получают уравнения движения автомобиля. Этот способ определяет конечный результат исследования, базирующийся на определенных известных логических связях, за пределами которых он не может быть использован. Недостатком дедуктивного способа исследования являются ограничения, вытекающие из общих закономерностей, на основе которых исследуется частный случай. Чтобы всесторонне исследовать движение автомобиля, недостаточно знать лишь законы механики. Необходимо применить и другие принципы, вытекающие из анализа системы: «водитель — автомобиль — внешняя среда».

И н д у к т и в н ы й — это такой способ исследования, при котором по частным фактам и явлениям устанавливаются общие принципы и законы. Данный способ широко применяют в теоретических исследованиях. Так, Д. И. Менделеев, используя частные факты о химических элементах, сформулировал периодический закон.

Однако при теоретических исследованиях используют как индукцию, так и дедукцию. Научный работник, обосновывая гипотезу научного исследования, устанавливает ее соответствие общим законам диалектики и естествознания (дедукция). В то же время гипотезу формулируют на основе частных фактов (индукция).

Особую роль в теоретических исследованиях играют способы анализа и синтеза.

Анализ — это способ научного исследования, при котором явление расчленяется на составные части. **Синтез** — противоположный анализу способ, заключающийся в исследовании явления в целом,

на основе объединения связанных друг с другом элементов в единое целое.

Так, выделяя минералы при исследовании цемента, применяют метод анализа; изучая цемент как систему, состоящую из минералов, используют метод синтеза. Способ синтеза позволяет обобщать понятия, законы, теории.

Методы анализа и синтеза взаимосвязаны, их одинаково используют в научных исследованиях.

При анализе явлений и процессов возникает потребность рассмотреть большое количество фактов (признаков). Важно уметь выделить главное. В этом случае может быть применен способ *ранжирования*, с помощью которого исключают все второстепенное, не влияющее существенно на исследуемое явление. Этот метод допускает усиление основных и ослабление второстепенных фактов, позволяет изучать главные особенности процессов и явлений в равных условиях. Например, при изучении прогибов балок принимают постоянными сечения, расстояния между опорами, характер загрузки, температуру балки и т. д.

В научных исследованиях широко применяется способ *абстрагирования*, т. е. отвлечение от второстепенных фактов с целью сосредоточиться на важнейших особенностях изучаемого явления. Например, при исследовании работы какого-либо механизма анализируют расчетную схему, которая отображает основные, существенные свойства механизма.

В ряде случаев используют способ *формализации*. Сущность его состоит в том, что основные положения процессов и явлений представляют в виде формул и специальной символики. Применение символов и других знаковых систем позволяет установить закономерности между изучаемыми фактами.

В теоретических исследованиях возможны два метода: логический и исторический. Логический метод включает в себя гипотетический и аксиоматический.

Гипотетический метод основан на разработке гипотезы, научного предположения, содержащего элементы новизны и оригинальности. Гипотеза должна полнее и лучше объяснять явления и процессы, подтверждаться экспериментально и соответствовать общим законам диалектики и естествознания. Этот метод исследования является основным, наиболее распространенным в прикладных науках.

Гипотеза составляет суть, методологическую основу, теоретическое предвидение, стержень теоретических исследований. Являясь руководящей идеей всего исследования, она определяет направление и объем теоретических разработок.

Сформулировать наиболее четко и полно рабочую гипотезу, как правило, трудно. От того, как сформулирована гипотеза, определяется степень ее приближения к окончательному теоретическому решению темы, т. е. трудоемкость и продолжительность теоретических разработок. Успех зависит от полноты собранной информа-

ции, глубины ее творческого анализа, стройности и целенаправленности методических выводов по результатам анализа, четко сформулированных целей и задач исследования, опыта и эрудиции научного работника.

На стадии формулирования гипотезы теоретическую часть необходимо расчленить на отдельные вопросы, что позволит упростить их проработку. Основой для проработки каждого вопроса являются теоретические исследования, выполненные различными авторами и организациями. Научный работник на основе их глубокой проработки, критического анализа и формулирования (в случае необходимости) своих предложений развивает существующие теоретические представления или предлагает новое, более рациональное теоретическое решение темы.

Аксиоматический метод основан на очевидных положениях (аксиомах), принимаемых без доказательства. По этому методу теория разрабатывается на основе дедуктивного принципа. Более широкое распространение он получил в теоретических науках (математика, математическая логика и др.).

Исторический метод позволяет исследовать возникновение, формирование и развитие процессов и событий в хронологической последовательности с целью выявить внутренние и внешние связи, закономерности и противоречия.

Данный метод исследования используется преимущественно в общественных и главным образом в исторических науках. В прикладных же науках он применяется, например, при изучении развития и формирования тех или иных отраслей науки и техники.

В соответствии с марксистско-ленинской теорией познания между логическим и историческим методами существует единство, основанное на том, что любое логическое познание должно рассматриваться в историческом аспекте.

В прикладных науках основным методом теоретических исследований является гипотетический. Его методология включает в себя следующее: изучение физической, химической и т. п. сущности исследуемого явления с помощью описанных выше способов познания, формулирование гипотезы и составление расчетной схемы (модели) и ее изучение, анализ теоретических исследований и разработка теоретических положений.

Описание физической сущности исследуемого явления (или процесса) составляет основу теоретических разработок. Такое описание должно всесторонне освещать суть процесса и базироваться на законах физики, химии, механики, физической химии и др. Для этого исследователь должен знать классические законы естественных наук и уметь их использовать применительно к рабочей гипотезе научного исследования.

Процессы, встречающиеся в технике, имеют ряд общих принципиальных положений, так как протекают в соответствии с законами диалектики и основными законами термодинамики (первый, второй, третий).

В большинстве случаев одновременно развиваются два противоположных процесса. Например, твердение вяжущих наряду со структурообразованием (синтезом прочности) сопровождается деструкцией, а при воздействии разрушающих нагрузок вместе с разрушением происходит упрочнение. На различных этапах одни процессы преобладают над другими. При больших механических нагрузках преобладают процессы разрушения, при небольших — возможно заметное упрочнение материалов. Для материалов раннего возраста характерно структурообразование, позднего — деструкция. Кроме того, процессы и явления, изучаемые в строительстве, обладают свойствами инерционности, наследственности, периодичности. Многие из этих процессов развиваются по принципу цепных реакций ($\frac{dy}{dt} = ky^m$) или по принципу теплопроводности ($\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t$).

Наряду с детерминированными в технике широко распространены и случайные процессы, особенно это относится к планированию, организации и управлению.

Учитывая изложенное, можно более эффективно и экономично сформулировать гипотезу научного исследования и наметить план его выполнения.

Этап теоретических разработок научного исследования включает в себя следующие основные разделы: анализ физической сущности процессов, явлений; формулирование гипотезы исследования, построение, разработка физической модели; проведение математического исследования; анализ теоретических решений, формулирование выводов.

Может быть принята и другая структура теоретической части исследования. Например, если не удастся выполнить математическое исследование, то формулируют рабочую гипотезу в словесной форме, привлекая графики, таблицы и др. Однако в технических науках, в том числе и строительной, необходимо стремиться к применению математизации выдвинутых гипотез и других научных выводов.

§ 2. Модели исследований

Первичным в познании физической сущности процессов выступают наблюдения. Любой процесс зависит от многих действующих на него факторов. Каждое наблюдение или измерение может зафиксировать лишь некоторые из них. Для того чтобы наиболее полно понять процесс, необходимо иметь большое количество наблюдений и измерений. Выделить главное и затем глубоко исследовать процессы или явления с помощью обширной, не систематизированной информации затруднительно. Поэтому такую информацию стремятся «сгустить» в некое абстрактное понятие — модель.

Под моделью понимают искусственную систему, отображающую с определенной степенью точности основные свойства изучаемого

объекта — оригинала. Модель находится в определенном соответствии с изучаемым объектом, может заменить его при исследовании и позволяет получить информацию об изучаемом объекте.

Метод моделирования — изучение явлений с помощью моделей — один из основных в современных исследованиях. Основой моделирования является ленинское положение о том, что «единство природы обнаруживается в «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям явлений»¹.

Различают физическое и математическое моделирование. При физическом моделировании физика явлений в объекте и модели и их математические зависимости одинаковы. В случае математического моделирования физика явлений может быть различной, а математические зависимости одинаковыми. Математическое моделирование приобретает особую ценность, когда возникает необходимость изучить особо сложные процессы.

При построении модели свойства и сам объект обычно упрощают, обобщают. Чем ближе модель к оригиналу, тем удачнее она описывает объект, тем эффективнее его исследование и тем ближе полученные результаты к истине, добываемой в исследовании.

Модели могут быть физические, математические, натурные. Физические модели позволяют наглядно представлять протекающие в натуре процессы. С помощью физических моделей можно изучать влияние отдельных параметров на течение физических процессов. Математические модели позволяют количественно исследовать явления, порой трудно поддающиеся изучению на физических моделях. Натурные модели представляют собой масштабно изменяемые объекты, позволяющие наиболее полно исследовать процессы, протекающие в натуральных условиях.

Стандартных рекомендаций по выбору и построению моделей не существует. Модель должна отображать существенные явления процесса. Мелкие факторы, излишняя детализация, второстепенные явления и т. п. лишь усложняют модель, затрудняют теоретические исследования, делают их громоздкими, нецеленаправленными. Поэтому модель должна быть оптимальной по своей сложности, желательна наглядной, но главное — достаточно адекватной, т. е. описывать закономерности изучаемого явления с требуемой точностью. Естественно, что при построении модели необходимо учитывать особенности исследуемого явления: линейность и нелинейность, детерминированность и случайность, непрерывность и дискретность и др.

Для построения наилучшей модели необходимо иметь глубокие и всесторонние знания не только по теме, смежным наукам, но и хорошо знать практические аспекты исследуемой задачи.

В отдельных случаях модель исследуемого явления может быть ограничена лишь описанием сущности. Так, при изучении укрепления грунтов вяжущими физико-химическую сущность взаимодей-

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 18, с. 306.

ствия минералов грунта с вязкими представить в виде математической модели очень трудно из-за большой сложности процесса. Однако по мере накопления научных данных качественные методы их изучения будут заменяться математическими. Это закономерно, поскольку наука может достичь наибольшего совершенства лишь при широком использовании математических методов.

Изучить и проанализировать объект наиболее полно можно лишь при условии, что его модель представлена описанием физической сущности и имеет математический вид. Рассмотрим пример по составлению моделей.

Анализируя работу строительных материалов и конструкций необходимо знать закономерности деформирования их элементов. В зависимости от вида и характера нагрузки, свойств материала элемента могут быть различные условия деформирования.

На рис. 3.1 приведена модель деформирования. Модель 1, представленная пружиной, характеризует упругие свойства и подчиняется закону Гука — величина деформации прямо пропорциональна прилагаемой нагрузке P . Такой закон деформирования характерен для твердых упругих тел.

Модель 2, представленная движением поршня в заполненном вязкой жидкостью цилиндре, характеризует вязкие свойства тел. Деформации тел в данном случае происходят медленно, развиваясь во времени, и подчиняются закону Ньютона — сопротивление пропорционально скорости деформирования.

При параллельном соединении двух моделей в единое целое имеем модель деформирования упруговязкого тела, что характерно для строительных материалов и конструкций. Такое деформирование подчиняется закону Кельвина.

Математическая модель, соответствующая физической модели (рис. 3.1), может быть представлена в виде

$$P = P_y + P_v = E_y S_y + \eta \frac{dS}{dt}, \quad (3.1)$$

где P_y , P_v — упругое сжатие пружины и вязкое сопротивление жидкости; E_y , S_y — модуль упругости и относительная деформация пружины; η — коэффициент вязкости; $\frac{dS}{dt}$ — скорость деформирования.

Решая (3.1) при $t = 0$, $S = 0$, имеем

$$S = \frac{P}{E_y} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_y t}{\eta}\right) \right]. \quad (3.2)$$

Зависимость (3.2) в ряде случаев хорошо согласуется с экспериментом и позволяет изучить законы деформирования упруговязких материалов, например грунтов, бетонов и др.

Приведенный пример иллюстрирует процесс познания в соответствии с ленинской формулой — от живого созерцания (наблюдение

за поведением материала) к абстрактному мышлению (физическая модель — рис. 3.1 и уравнение (3.1)) и от него к практике — уравнение (3.2).

Рассмотренная модель соответствует функциональной зависимости, когда одному значению аргумента соответствует только одно значение функции. Однако в природе встречаются процессы, когда одному значению аргумента соответствует несколько значений функции вследствие действия на явление различных случайных факторов.

На рис. 3.2 приведена физическая модель, характеризующая закон вероятностного распределения песка, который вытекает непрерывной струей из лейки через решето в ящик с вертикальными секциями. Наблюдения показывают, что распределение песка в ящике подчиняется закону нормального распределения:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.3)$$

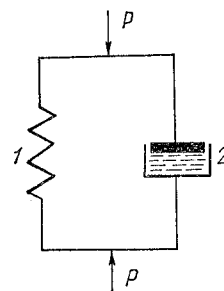


Рис. 3.1. Модель деформирования упруговязких материалов

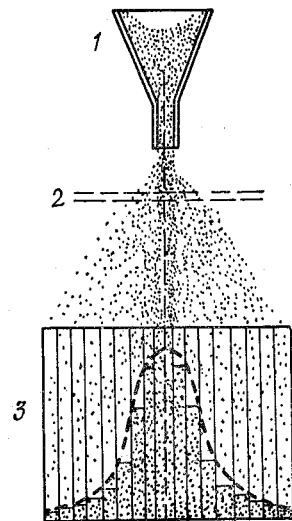


Рис. 3.2. Закономерность распределения песка: 1 — воронка; 2 — решето; 3 — ящик с секциями

где y — ордината, частота распределения песка или количество песка в секции; x — абсцисса, номер секции в ящике, отсчитываемой от середины; σ — среднеквадратическое отклонение. Выражение (3.3) является математической моделью вероятностного процесса, приведенного на рис. 3.2.

В последнее время широкое распространение получили модели, обеспечивающие оптимизацию технологических процессов и их управления. В связи с этим рассмотрим так называемую транспортную задачу. Пусть имеется A_1, A_2, A_3 объектов строительства, потребляющих соответственно a_1, a_2, a_3 щебня (рис. 3.3). В местах B_1 и B_2 есть притрассовые карьеры с запасами щебня b_1 и b_2 . При этом $a_1 + a_2 + a_3 = b_1 + b_2$.

Стоимость единицы продукции из карьера B_1 на объект A_1 равна C_{11} , A_2 — C_{12} на объект A_3 — C_{13} . Количество щебня x_{ij} транспортируемое на объект A_i из карьера B_j , взаимосвязано с другими величинами системой уравнений

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{21} &= a_1; \\ x_{12} + x_{22} &= a_2; \\ x_{13} + x_{23} &= a_3; \\ x_{11} + x_{12} + x_{13} &= b_1; \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} &= b_2. \end{aligned} \quad (3.4)$$

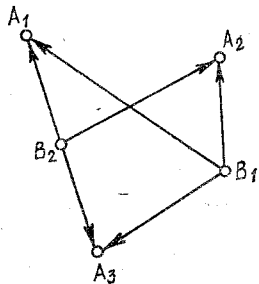
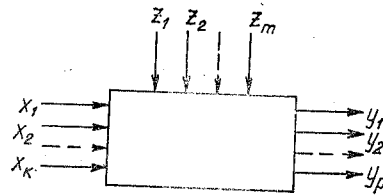


Рис. 3.3. Схема транспортных связей: A — объекты строительства; B — карьеры

Рис. 3.4. Схема «черного ящика»: x_1, x_2, \dots, x_k — управляемые факторы; z_1, z_2, \dots, z_m — неуправляемые факторы; y_1, y_2, \dots, y_p — параметры оптимизации



В системе (3.4) первое уравнение означает количество щебня, транспортируемое из карьеров B_1 и B_2 на объект A_1 ; второе — на объект A_2 . Последнее уравнение — количество щебня, доставляемое на объекты A_1, A_2, A_3 из карьера B_2 , и т. д.

Все исходные данные сведены в матрицу условия задачи (табл. 3.1). Задача имеет много решений, так как есть шесть неизвестных в системе (3.4), состоящих из пяти уравнений. Требуется определить наиболее выгодный (экономичный) вариант перевозки щебня. В этом случае численными методами с помощью линейного программирования и ЭВМ находят функцию, которая удовлетворяет усло-

вию $C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} x_{ij} = \min$ (3.5). Уравнения (3.4), (3.5) — математическая модель, позволяющая оптимизировать транспортный процесс. Физическая модель изображена на рис. 3.3.

Большой интерес представляет кибернетическая модель «черного ящика» (рис. 3.4), описывающая систему, структура которой неизвестна и недоступна для наблюдения. Известны лишь « x » (ввод) и « y » (вывод). Задача сводится к подбору таких значений x , которые обеспечили бы соответствующие (в большинстве случаев) оптимальные значения y . Статистическим путем, с помощью ЭВМ

можно построить модели исследуемого процесса. Во многих случаях для построения таких моделей целесообразно использовать метод математического планирования эксперимента.

В теоретических исследованиях применяют модели-аналоги и модели-подобия. Основываясь на подобии или аналогии объекта и процессов и т. п., изучают экспериментально теоретическим путем явления на модели, а затем с помощью соответствующего математического аппарата устанавливают закономерности в натуре.

На рис. 3.5 приведена электрическая модель-аналог для изучения напряженно-деформированного состояния балки на двух опорах. Реакции на опорах балки вычисляются по формулам

$$P_A = \frac{P_1(l_2 + l_3) + P_2 l_3}{l_1 + l_2 + l_3}; \quad P_B = \frac{P_1 l_1 + P_2(l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3}. \quad (3.6)$$

Силу тока на входе и выходе электрической цепи вычисляют аналогично:

$$I_A = \frac{I_1(R_2 + R_3) + I_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad I_B = \frac{I_1 R_1 + I_2(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (3.7)$$

Таким образом, меняя силу тока I_1, I_2 и сопротивление R_1 , можно изучать реакции опор балки в зависимости от значения P_1 и P_2 . Модели подобия используют давно. Например, нет необходимости

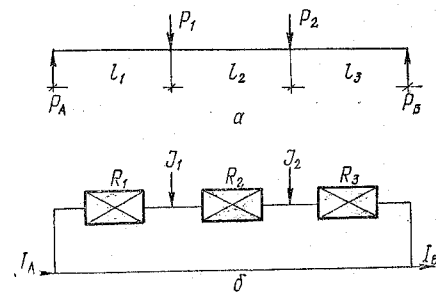


Рис. 3.5. Схема балки на опорах (а) и ее электрическая модель — аналог (б): P_1, P_2 — нагрузки P_A, P_B реакции; R_1, R_2, R_3 — электрические сопротивления; I_1, I_2 — сила тока, моделирующая нагрузки P_1 и P_2

измерять высоту H Останкинской башни в Москве. Для этой цели достаточно использовать простейшую модель — треугольник и с помощью теоремы о подобии треугольников путем измерения расстояния к башне z определить ее высоту по формуле $H = hK_p$ (3.8), где K_p — критерий подобия, равный $K_p = z : l$ (h и l — катеты треугольника).

Аналогичный прием широко используют и при исследовании процессов, но критерий подобия и уравнения

Таблица 3.1

Карьеры	Объекты			Запасы
	A_1	A_2	A_3	
B_1	C_{11} x_{11}	C_{12} x_{12}	C_{13} x_{13}	b_1
B_2	C_{21} x_{21}	C_{22} x_{22}	C_{23} x_{23}	b_2
Общая потребность	a_1	a_2	a_3	—

в этом случае значительно сложнее. Анализ многообразных физических моделей изучаемых процессов исследуется математическими методами, которые могут быть разделены на такие основные группы:

Аналитические методы исследования (элементарная математика, дифференциальные и интегральные уравнения, вариационное исчисление и другие разделы высшей математики), используемые для изучения непрерывных детерминированных процессов. *Методы математического анализа с использованием эксперимента* (метод аналогий, теория подобия, метод размерностей). *Вероятностно-статистические методы исследования* (математическая статистика, дисперсионный и корреляционный анализы, теория надежности, метод Монте-Карло, марковские процессы и др.), используемые для изучения случайных процессов — дискретных и непрерывных.

Методы системного анализа (исследование операций, теория массового обслуживания, теория управления, теория мнжеств и т. д.). Они применяются для исследования сложных моделей — систем с многообразными и сложными взаимосвязями элементов, характеризующих непрерывностью и детерминированностью, а также дискретностью и случайностью. Методы системного анализа получили широкое распространение, что в значительной степени обусловлено развитием ЭВМ, обеспечивающим быстрое решение и анализ сложных математических задач.

В технических науках широко применяют прикладную математику, которая использует так называемые рациональные методы, допускающие наличие формулировок и утверждений, справедливые лишь в данных реальных условиях. При этом они могут уточняться в ходе исследования, базироваться на доводах, основанных на приближенных решениях, аналогиях или экспериментах и т. п., что не приемлемо в «чистой» математике.

Большое влияние на развитие математических методов исследования, особенно в прикладной математике, оказали ЭВМ, с созданием которых связывают новый современный этап математики. Использование ЭВМ многократно ускоряет математические преобразования и вычисления, в то же время не освобождает исследователя от необходимости владеть математическим аппаратом. Обычно наибольший эффект получают в том случае, если исследователь физического процесса хорошо знает возможности ЭВМ, специфику методов работы с ним, а привлекаемый им математик-вычислитель отчетливо представляет физические особенности исследуемой задачи. Это позволяет квалифицированно обсуждать все вопросы, возникшие в исследовании, что способствует наиболее успешному и эффективному выполнению научно-исследовательских работ.

Иногда построение физических моделей и математическое описание явления невозможно. Однако и при этом необходимо сформулировать рабочую гипотезу, проиллюстрировать ее графиками, таблицами, предположить и оценить результаты, которые должны быть получены на основе этой гипотезы, спланировать и провести научно-исследовательскую работу.

§ 3. Аналитические методы исследований

В исследованиях часто используют аналитические методы, с помощью которых устанавливают математическую зависимость между параметрами изучаемого объекта. Эти методы позволяют глубоко и всесторонне изучить исследуемые процессы, установить точные количественные связи между аргументами и функциями, глубоко проанализировать исследуемые явления. При этом широко применяют элементарные функции и уравнения, особенно когда стремятся упростить исследуемую модель и получить приближенные решения поставленной задачи. Достаточно часто используют линейные функции и уравнения, например при исследовании слоистых строительных материалов. Полагая, что напряжения в слоистом материале распределяются прямо пропорционально модулям упругости его компонентов, с помощью элементарных линейных уравнений можно получить ряд полезных сведений.

В практике часто встречаются процессы, протекающие по принципу «цепного» механизма (растворение, охлаждение, перемешивание и др.). Для их исследования используют экспоненциальные, параболические, показательные функции. Чтобы изучить колебательные процессы, применяют тригонометрические функции. В большинстве случаев элементарные функции непрерывны, что позволяет их дифференцировать и интегрировать. Это дает возможность определить наилучшие или наихудшие условия протекания исследуемого процесса путем нахождения экстремумов.

Например, производительность труда Π строительной организации зависит от ее годового объема работы V : $\Pi = C_0 + C_1V - C_2V^2 \dots$ (3.9), где C_0, C_1, C_2 — постоянные.

Анализ этой зависимости показывает, что по мере увеличения объема работ организации V производительность вначале возрастает, потом убывает. Увеличение производительности объясняется тем, что более крупная организация имеет больше резервов. В таких организациях лучше организован труд. Однако в очень больших организациях, с большим объемом работ, сложно организовать производство. Этим объясняется трудность управления большими организациями. Оптимальный объем работ для организации $V_{оп}$ можно найти, определив экстремум функции (3.9), который обеспечивает максимальную производительность:

$$V_{оп} = \frac{C_1}{2C_2} \dots \quad (3.10)$$

При анализе форм и размеров инженерных конструкций пользуются методами элементарной, начертательной и аналитической геометрии. Обыкновенные дифференциальные уравнения исполь-

зуют для теоретического анализа только одной переменной. Уравнения 1-го порядка имеют вид

$$f\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) = 0; \quad \frac{dy}{dx} = f(x, y). \quad (3.11)$$

Применяют также уравнения высших порядков:

$$f\left(x, y, \frac{dy}{dx}; \frac{d^2y}{dx^2}; \dots; \frac{d^ny}{dx^n}\right) = 0. \quad (3.12)$$

Общие решения таких уравнений представляет семейство кривых на плоскости. Кривая $f(x, y)$ будет решением (3.11), если она в каждой точке касается вектора поля направления. Поэтому каждое уравнение имеет множество решений (кривых): $F(x, y, C_1, C_2, \dots, C_n) = 0$, (3.13), где C_1, C_2, \dots, C_n — постоянные интегрирования.

Для нахождения частного решения указывают начальные условия — задают значения F в некоторых известных точках x и y . Это позволяет определить постоянные C_1, C_2, \dots, C_n , а затем частные решения. Обыкновенные дифференциальные уравнения применяют при теоретическом анализе различных моделей простых и средних по сложности процессов: миграции влаги в грунтах как капиллярных средах, движения жидкости в трубах, линейного распределения тепла в стержнях, осаднения грунта в пульте при гидронасывах насыпей, уплотнения грунтов насыпей, напряженного состояния в полотне и т. д.

Например, в технологии вяжущих исследуют их растворение полагая, что скорость растворения пропорциональна их количеству:

$$\frac{dm}{dt} = -km. \quad (3.14)$$

Здесь m — количество вяжущего; t — время; k — коэффициент пропорциональности. После интегрирования этого уравнения получим $m = Ce^{-kt}$. Постоянную интегрирования C находят из условия, что при $t = 0$ $C = m_0$ (начальное количество). Следовательно $m = m_0 e^{-kt}$. Последнее выражение содержит конкретную информацию о процессе растворения, которое со временем затухает. Скорость затухания этого процесса зависит от коэффициента k который, в свою очередь, обуславливается природой вещества и температурой раствора.

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

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (3.15)$$

Общее решение этих уравнений зависит не от произвольных постоянных, а от произвольных функций. В них искомые решения представляют собой функции нескольких независимых переменных

Обычно суть задачи сводится к тому, чтобы найти соотношение между переменными u, x, y , установить функциональную зависимость $u = f(x, y)$, удовлетворяющую дифференциальному уравнению с частными производными и частным условиям задачи. Эти дополнительные условия определяются физическим смыслом. Например, из анализа теплового баланса тела следует, что температура t в любой точке тела при остывании или нагревании его является функцией времени T и координат x, y, z и должна удовлетворять дифференциальному уравнению в частных производных

$$\frac{\partial t}{\partial T} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3.16)$$

где a — коэффициент температуропроводности.

Дифференциальные уравнения в частных производных находят широкое применение в научном анализе, так как они описывают процессы течения жидкостей, колебательные процессы, диффузию газов, тепловые и другие процессы. При исследовании многообразных тепловых процессов в строительстве (водно-тепловой режим дорог, расчеты по охлаждению ограждающих конструкций зданий, пропаривание железобетонных изделий, приготовление асфальтобетонных смесей, теплотехнические расчеты при зимней технологии строительства и др.) обычно применяют систему связанных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка:

$$\frac{\partial t}{\partial T} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + b \frac{\partial w}{\partial T}; \quad \frac{\partial t}{\partial T} = a_1 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + a_1 b_1 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (3.17)$$

где a, a_1 — коэффициенты температуро- и влагопроводности; b — критерий теплообмена вследствие фазовых превращений (испарение, оттаивание, промерзание) мигрирующего вещества; b_1 — коэффициент термоградиентный влагопроводности.

В уравнении (3.17) коэффициенты a, b, a_1, b_1 постоянны. Если они переменные, то система принимает более сложный вид.

Любые дифференциальные уравнения являются моделью целого класса явлений, т. е. совокупностью явлений, характеризующихся одинаковыми процессами. При интегрировании уравнений получают большое количество решений, удовлетворяющих исходному дифференциальному уравнению. Чтобы получить из множества возможных решений одно, удовлетворяющее только рассматриваемому процессу, необходимо задать дополнительные условия к дифференциальному уравнению. Они должны четко выделить изучаемое явление из всего класса явлений. Условия, которые характеризуют все особенности данного уравнения, называются условиями однозначности и характеризуются следующими признаками: геометрией системы (форма и размеры тела); физическими свойствами тела (теплопроводность, влагопроводность, упругость, вязкость и т. д.); начальными условиями, т. е. состоянием системы в началь-

ный момент; граничными условиями, т. е. взаимодействием системы на границах с окружающей средой.

Начальные и граничные условия называют краевыми. Задачи теплообмена и им подобные, относимые к задачам математической физики, эффективно решают методами операционного 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. 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 $f^*(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$ (3.18),

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 простые операции с $f^*(p)$, производят обратный переход к $f(t)$. Применение таких преобразований имеет ряд преимуществ — простота, возможность решения задач с различными краевыми условиями и др. Однако с помощью этих методов можно решать задачи со сравнительно простыми краевыми условиями. При решении нелинейных задач со сложными краевыми условиями точные аналитические методы встречают значительные трудности.

В строительстве ряд задач исследуется с помощью интегральных уравнений, содержащих искомую $\varphi(s)$ функцию под знаком

интеграла: $h(x)\varphi(x) - \lambda \int_a^s k(x,s)\varphi(s) ds = f(x)$ (3.19). Здесь $h(x)$,

$\varphi(x)$ — известные функции x ; λ — постоянный параметр, который называют собственным числом; $k(x,s)$ — заданная функция, которую называют ядром интегрального уравнения.

Общего метода решения интегральных уравнений даже линейного типа $h(x) = 0$, $\varphi(x) = 0$ не существует. Интегральное уравнение является решением дифференциального. Например, решением дифференциального уравнения (3.1)

$$p = E_y s_y + \eta \frac{ds}{dt}$$

является интегральное уравнение $s = e^{-\frac{E_y t}{\eta}} \left(S_y + \frac{1}{\eta} \int_0^t p e^{-\frac{E_y t}{\eta}} dt \right)$

(3.20). Если $p = p_0 = \text{const}$, имеем $s = \frac{p_0}{E_y} \left(1 - e^{-\frac{E_y t}{\eta}} \right)$.

Это позволяет сводить решение дифференциальных уравнений к решению интегральных, и наоборот. Одним из методов решения интегральных уравнений является метод последовательных приближений, который может быть иллюстрирован примером.

Пусть дано дифференциальное уравнение $y = b(x, y)$ с начальными условиями при $x = x_0, y = y_0$. Его можно представить в виде

интегрального уравнения $y = y_0 + \int_{x_0}^{x_1} b(x, y) dx$ (3.21). Подставляя под знак интеграла вместо y_x его начальное значение y_0 ,

получаем $y_1 = y_0 + \int_{x_0}^x b(x, y_0) dx$. Таким же образом можно по-

лучить вторые и более высокие приближения, соответствующие $y = y_1; y = y_2$ и т. д.

Для решения интегральных уравнений применяется метод полуобращения, суть которого заключается в том, что ядро разбивается на две функции. Первая функция позволяет представить интегральное уравнение в виде системы алгебраических уравнений, что упрощает ее решение. Вторая позволяет получить решение интегрального уравнения методом последовательных приближений.

Многие задачи исследуются с помощью вариационного исчисления. Чтобы сформулировать задачу вариационного исчисления, вводят понятие функционала. Пусть имеем плоскую кривую $y = f(x)$ в области определения $x_0 \leq x \leq x_1$ (рис. 3.6). Нетрудно видеть, что длина кривой S_1 , площадь P криволинейной трапеции, объем тела вращения V зависят от вида заданной кривой $y = f(x)$:

$$S_1 = \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{1 + [y'(x)]^2} dx; P = \int_{x_0}^{x_1} y(x) dx; V = \pi \int_{x_0}^{x_1} [y(x)]^2 dx. \quad (3.22)$$

Таким образом, функция $y = f(x)$ однозначно определяет значение S_1, P, V , т. е. она играет роль своеобразного «аргумента».

В этом случае S_1, P, V называют функционалом 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 $y = f(x)$ в заданной области определения функционала $F(y)$, при которой этот функционал принимает минимальное или максимальное значение.

При исследовании процессов методами вариационного исчисления находят такие закономерности, при которых их развитие энер-

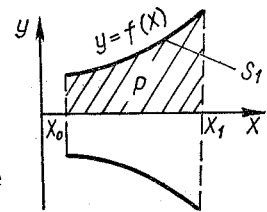


Рис. 3.6. Схема к понятию функционала

гетически наиболее экономно. Очень часто они описываются экспоненциальными функциями, удовлетворяющими принципам вариационного исчисления.

В области строительных наук широко используется теория функций комплексной переменной. В основе этой теории лежит положение о комформном преобразовании, согласно которому две пересекающиеся кривые z_1z_2 и z_1z_3 из области z всегда можно перенести в область W соответственно кривым $\omega_1\omega_2$ и $\omega_1\omega_3$, сохраняя равенство углов между кривыми в каждой паре. Это позволяет изменить координаты таким образом, чтобы упростить громоздкие математические преобразования. Теория функций комплексной переменной используется, например, в теории упругости для определения концентраций напряжений в плоскости или пространстве, содержащем различные включения.

Рассмотренные аналитические методы, как правило, позволяют успешно решать только относительно простые задачи. В то же время все чаще возникает необходимость использования сложных дифференциальных уравнений или их систем с начальными и граничными условиями (часто нелинейными). Их решение сложно или неизвестно; в этих случаях прибегают к тем или иным приближенным вычислениям с помощью численных методов.

Идея численных методов (методы конечных разностей или сеток) заключается в следующем.

1. В плоской области G , в которой разыскивают решение, строят сеточную область G_h , состоящую из одинаковых ячеек (рис. 3.7) и приближающуюся к области G .

2. Заданное дифференциальное уравнение заменяют в узлах построенной сетки соответствующим конечно-разностным уравнением.

3. На основании граничных условий устанавливаются значения искомого решения в граничных узлах области G_h .

Чтобы решить полученную систему конечно-разностных уравнений, необходимо получить решение алгебраической системы с большим числом неизвестных. В результате найдем значения искомой функции в узлах сетки, т. е. будем иметь численное решение поставленной задачи. Выбор сеточной области производится в зависимости от конкретной задачи, но во всех случаях контур сеточной области G_h следует выбирать так, чтобы он возможно лучше аппроксимировал контур заданной области G . Сеточная область может состоять из квадратных прямоугольных, треугольных и других клеток.

Примером использования численных методов может служить решение задачи виброформования бетонной смеси. Бетонная смесь при вибрации моделируется в виде сплошной упруговязкой среды, а математическая модель процесса виброформования представлена в виде

$$\rho \frac{dV_x}{dt} = E \frac{\partial^2 l}{\partial x^2} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right), \quad (3.23)$$

где ρ — плотность бетонной смеси; t — время; x, y — декартовы координаты; V_x — составляющая скорости бетонной смеси вдоль направления распространения колебаний; E — модуль упругости; l — смещение элемента бетонной смеси; η — коэффициент динамической вязкости. Первый член в правой части уравнения (3.23) представляет собой упругую составляющую среды, а второй — вязкую.

Решение полученного уравнения аналитическими методами чрезвычайно сложно и обычно в литературе не приводится. Для практического использования оно может быть решено с применением цифровой ЭВМ, но его необходимо представить в конечно-разностном безразмерном виде. С этой целью введем следующие обозначения: $u = l/A$, $W = V_x/lA\omega$, $dx = dy = cdt$, где c — скорость распространения колебаний в бетонной смеси; A — амплитуда колебаний. Тогда математическая модель процесса виброформования бетонной массы выразится уравнением

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{c^2}{\omega} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right). \quad (3.24)$$

При численном интегрировании на цифровой ЭВМ уравнение (3.24) представим в разностном виде, для чего производные заменим конечно-разностными отношениями. Выбрав шаг dx по оси x и dy по оси y , построим сетку $x_i = x_0 + idx$; $y_j = y_0 + jdy$ ($i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) (рис. 3.7). Тогда для первой производной функции f получим следующие варианты записи:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_{i+1} - f_i}{\delta x}; \quad \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_i - f_{i-1}}{\delta x}; \quad \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\delta x},$$

и для второй — $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \approx \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{\delta x^2}$, где f_{i+1} , f_i , f_{i-1} — значения функции f в узлах интегрирования $i+1, i, i-1$ соответственно. Значение функции в данном (нулевом) узле через шаг интегрирования по времени δt обозначается $W_0^{+\delta t}$, а в данный момент времени — W_0 . С учетом принятых обозначений уравнение (3.24) примет вид

$$W_0^{+\delta t} = W_0 + \frac{1}{\delta t} \left[\frac{\nu\omega}{c^2} (\Delta_x^2 W + \Delta_y^2 W) + \Delta_x^2 u \right]. \quad (3.25)$$

Здесь

$$\frac{\Delta_x^2 W}{\delta x^2} + \frac{\Delta_y^2 W}{\delta y^2} \approx \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, \quad \Delta_x^2 u \approx \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{W_{i,j+1} - 2W_{i,j} + W_{i,j-1}}{\delta x^2}, \quad \frac{\Delta_y^2 W}{\delta y^2} = \frac{W_{i+1,j} - 2W_{i,j} + W_{i-1,j}}{\delta y^2},$$

$$\frac{\Delta_x^2 u}{\delta x^2} = \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\delta x^2}, \quad \delta t = \delta t\omega — \text{безразмерное время,}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{W_0^{+\delta t} - W_0}{\delta t}.$$

Обозначив через $\delta W = W_0^{+\delta t} - W_0$ приращение безразмерной скорости за время δt и разделив левую и правую части уравнения (3.25) на δt , получим

$$a = \frac{\delta W}{\delta t} = \frac{1}{\delta t^2} [\bar{K} (\Delta_x^2 W + \Delta_y^2 W) + \Delta_x^2 u], \quad (3.26)$$

где a — безразмерное ускорение элементарного объема среды $\bar{K} = \frac{v\omega}{c^2} = \frac{\eta\omega}{E}$ — безразмерный критерий подобия, представляющий

отношение силы вязкостного трения к динамическому давлению

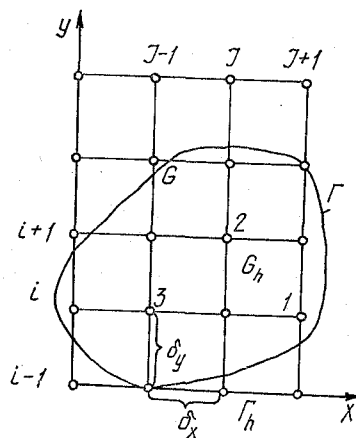


Рис. 3.7. Сеточная область G_h с контуром Γ для плоской области G , в которой производится решение двумерного дифференциального уравнения

Рис. 3.8. Распределение кривых равного значения динамического давления в модели формы с бетонной смесью при верхней свободной поверхности. Фазовый угол $\alpha = 0^\circ$, частота колебаний 20 Гц, амплитуда — 3,5 мм ($1 - \sigma = 2,0$ МПа; $2 - \sigma = 1,0$ МПа; $3 - \sigma = 0,3$ МПа; $4 - \sigma = 0,1$ МПа)

ных значений безразмерной скорости и перемещения в данный момент времени. Значения безразмерных перемещений и скорости в заданном узле сетки интегрирования в последующий момент времени определяют с помощью формул $u^{+\delta t} = u + W\delta t + \frac{1}{2} a\delta t^2$; $W^{+\delta t} = W + a\delta t$ (3.27).

Описанный процесс повторяется по всем узлам сетки интегрирования для данного момента времени. Это позволяет определять значения безразмерного ускорения для последующего момента времени по всем узлам сетки интегрирования.

С учетом начальных условий $u = -1$, $W = 0$ и граничных, выраженных в виде $u_r = f_1(t)$ и $W_r = f_2(t)$, можно последовательно получить численные значения скоростей и перемещений по всем

узлам сетки интегрирования в функции координат и времени. Использование полученных значений u и W позволяет сравнительно просто определить напряженное состояние вибрируемой бетонной смеси (рис. 3.8). Естественно, что вычисления в этом случае громоздки, поэтому необходимо использовать специальные программы и цифровые ЭВМ.

§ 4. Аналитические методы исследований с использованием экспериментов

Физические процессы можно исследовать аналитическими или экспериментальными методами.

Аналитические методы позволяют изучать процессы на основе математических моделей, которые могут быть представлены в виде функции, уравнения, системы уравнений, в основном дифференциальных или интегральных. Такие модели обычно содержат большое количество информации. Характерной особенностью математических моделей является то, что они как система уравнений описывают элементарные физические процессы, из которых складывается явление. Обычно в начале создают грубую модель, которую затем, после ее исследования, уточняют. Такая модель позволяет достаточно полно рассчитать физические характеристики явления. При этом исследователь получает новую информацию о функциональных связях и свойствах моделей.

Использование математических моделей является одним из основных методов современного научного исследования. Однако им свойственны существенные недостатки. Для того чтобы из всего класса найти частное решение, присущее лишь данному процессу, необходимо задать условия однозначности. Установление краевых условий требует проведения достоверного опыта и тщательного анализа экспериментальных данных. Неправильное принятие краевых условий приводит к тому, что подвергается теоретическому анализу не тот процесс, который планируется, а видоизмененный. Кроме указанного недостатка аналитических методов, во многих случаях отыскать аналитические выражения с учетом условий однозначности, наиболее реально отображающие физическую сущность изучаемого процесса, или вообще невозможно или чрезвычайно затруднительно.

Иногда, исследуя сложный физический процесс при хорошо обоснованных краевых условиях, упрощают исходные дифференциальные уравнения из-за невозможности или чрезмерной громоздкости их решения, что искажает его физическую сущность. Таким образом, очень часто реализовать аналитические зависимости сложно.

Экспериментальные методы позволяют глубоко изучить процессы в пределах точности техники эксперимента и сконцентриро-



вать внимание на тех параметрах процесса, которые представляют наибольший интерес. Однако результаты конкретного эксперимента не могут быть распространены на другой процесс, даже близкий по физической сущности, потому что результаты любого эксперимента отображают индивидуальные особенности только исследуемого процесса. Из опыта еще невозможно окончательно установить, какие из параметров оказывают решающее влияние на ход процесса и как будет протекать процесс, если изменять различные параметры одновременно. При экспериментальном методе каждый конкретный процесс должен быть исследован самостоятельно. В конечном счете экспериментальные методы позволяют установить частные зависимости между отдельными переменными в строго определенных интервалах их изменения. Анализ переменных характеристик за пределами этих интервалов может привести к искажению зависимости, грубым ошибкам.

Таким образом, и аналитические, и экспериментальные методы имеют свои преимущества и недостатки, которые часто затрудняют эффективное решение практических задач. Поэтому чрезвычайно плодотворным является сочетание положительных сторон аналитических и экспериментальных методов исследования.

Явления, процессы изучаются не изолированно друг от друга, комплексно. Различные объекты с их специфическими переменными величинами объединяются в комплексы, характеризующиеся едиными законами. Это позволяет распространить анализ одного явления на другие или целый класс аналогичных явлений. При таком принципе исследований уменьшается число переменных величин, они заменяются обобщенными критериями. В результате упрощается искомое математическое выражение. На этом принципе основаны методы сочетания аналитических и экспериментальных исследований с методами аналогии, подобия, размерностей, являющихся разновидностью методов моделирования.

Суть метода аналогии рассмотрим на примере. Тепловой поток зависит от температурного перепада (закон Фурье)

$$q_T = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (3.28)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности. Массоперенос или перенос вещества (газа, пара, влаги) определяется перепадом концентрации вещества c (закон Фика):

$$q_n = -\mu \frac{dc}{dx}, \quad (3.29)$$

μ — коэффициент массопереноса. Перенос электричества по проводнику с погонным сопротивлением обуславливается перепадом напряжения (закон Ома):

$$q_e = -\frac{1}{\rho} \frac{du}{dx}, \quad (3.30)$$

где ρ — коэффициент электропроводности. Все три рассматриваемые явления характеризуются различными физическими процессами, но имеют идентичные математические выражения, т. е. их можно исследовать методом аналогий.

В зависимости от того, что принимается за оригинал и модель, могут быть различные виды моделирования методом аналогий. Так, если тепловой поток q_T изучают на модели с движением жидкости, то моделирование называют гидравлическим; если тепловой поток исследуют на электрической модели, моделирование называют электрическим. Моделирование может быть механическим, акустическим и др. Целесообразность выбора вида моделирования зависит от сложности изучаемого процесса и модели, ее стоимости и эксплуатации, возможности постановки различных экспериментов, точности результатов.

Идентичность математических выражений процессов оригинала и модели не означает, что эти процессы абсолютно аналогичны. Для того чтобы на модели максимально моделировать изучаемый процесс оригинала, необходимо соблюдать критерий аналогий. Так, сравнивать q_T и q_e , коэффициенты теплопроводности λ и электропроводности ρ , температуру t и напряжение u нет смысла. Для устранения этой несопоставимости оба уравнения необходимо представить в безразмерных величинах: каждую переменную величину Π_n представить в виде произведения постоянной размерности на переменную безразмерную Π_6 : $\Pi = \Pi_n \Pi_6$ (3.31).

Имея в виду (3.31), выражения для q_T и q_e запишем так: $\sim q_T = q_{Tn} q_{T6}$; $\lambda = \lambda_n \lambda_6$; $t = t_n t_6$; $x = x_n x_6$; $q_e = q_{en} q_{e6}$; $\gamma = \gamma_n \gamma_6$; $u = u_n u_6$.

После простых преобразований с учетом (3.28) — (3.30) имеем

$$\left[\frac{q_{Tn} x_n}{\lambda_n t_n} \right] q_{T6} = \lambda_6 \frac{dt_6}{dx_6}; \quad \left[\frac{q_{en} x_n}{\gamma_n u_n} \right] q_{e6} = \gamma_6 \frac{du_6}{dx_6}.$$

Оба выражения записаны в безразмерном виде и их можно сравнивать. Уравнения будут идентичны, если

$$\left[\frac{q_{Tn} x_n}{\lambda_n t_n} \right] = \left[\frac{q_{en} x_n}{\gamma_n u_n} \right]. \quad (3.32)$$

Это равенство называют критерием аналогий. С его помощью устанавливают параметры модели по исходному уравнению объекта. Количество критериев аналогии на единицу меньше числа членов изучаемого исходного выражения. Поскольку число неизвестных больше числа уравнений, то некоторыми параметрами модели задаются. Обычно это время наблюдения или протекания процесса на модели. Оно должно быть удобным для наблюдения оператору.

В настоящее время широко распространено электрическое моделирование. Рассмотрим пример его. Необходимо изучить закономерности колебания массы m , подвешенной параллельно упругой

пружиной и демпфером к плоскости. Для этой системы дифференциальное уравнение имеет вид

$$m \frac{d^2s}{dt^2} + \alpha \frac{ds}{dt} + \frac{1}{\beta} s = F(T), \quad (3.33)$$

где α — коэффициент демпфирования; s — механическое перемещение; β — коэффициент, характеризующий упругость пружины (деформация пружины при действии единицы силы); $F(T)$ — сила, прилагаемая к системе. Чтобы определить параметры m , α , β , уравнение (3.33) можно исследовать методом электрических аналогов. Для электрической модели цепи уравнение имеет вид

$$c_1 \frac{d^2f}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{df}{dt} + \frac{1}{l} f = i(t_1), \quad (3.34)$$

где c_1 — емкость конденсатора; f — магнитный поток; t_1 — время процесса в электросети; R , l — сопротивление, индуктивность; i — ток электросети. После соответствующих преобразований (см. выше пример) безразмерные уравнения запишем так:

$$\left[\frac{m_p}{\alpha_p t_p} \right] = \left[\frac{c_1 R_p}{t_p} \right]; \quad \left[\frac{t_p}{\alpha_p \beta_p} \right] = \left[\frac{R_p t_p}{l_p} \right]; \quad \left[\frac{f_p t_p}{s_p \alpha_p} \right] = \left[\frac{R_p i_p t_p}{f_p} \right]. \quad (3.35)$$

Выбор критериев (3.35) представляет определенные трудности. Чтобы упростить построение модели, пользуются системой масштабных уравнений.

Поскольку механический (оригинал) и электрический (модель) процессы аналогичны, то переменные величины этих систем изменяются во времени закономерно в определенном соотношении — масштабе. Масштабный коэффициент той или иной переменной величины представляет собой отношение переменных величин модели и оригинала: $M_f = f/s$; $M_t = t_1/t$; $M_i = i/F$, где M_f , M_t , M_i — масштабы переменных величин.

С учетом масштабных переменных уравнения для модели и оригинала получим следующие:

$$\frac{c_1 R}{M_t} \frac{d^2s}{dt^2} + \frac{ds}{dt} + \frac{RM_t}{l} S = \frac{RM_t M_i}{M_f} F; \quad m \frac{d^2s}{dt^2} + \frac{ds}{dt} + \frac{1}{\alpha \beta} S = \frac{1}{\alpha} F.$$

Эти уравнения тождественны, если

$$\left[\frac{c_1 R}{M_t} \right] = \left[\frac{m}{\alpha} \right]; \quad \left[\frac{RM_t}{l} \right] = \left[\frac{1}{\alpha \beta} \right]; \quad \left[\frac{RM_t M_i}{M_f} \right] = \left[\frac{1}{\alpha} \right]. \quad (3.36)$$

Масштабные системы (3.36) идентичны критериям аналогов (3.35), но в более простой форме.

С помощью системы масштабных уравнений (3.28) вычисляют параметры модели, а на основе предельных отклонений переменных величин оригинала и модели — масштабные коэффициенты. Зная средними значениями параметров оригинала, по (3.28) вычисляют средние значения параметров модели и проектируют электрическую цепь. Далее оригинал исследуют на модели. Варьируя l , R , c , на модели изучают параметры m , α , β оригинала.

С помощью электрического моделирования можно изучать и анализировать различные физические процессы, которые описываются математическими зависимостями. Это моделирование универсально, простое в эксплуатации, не требует громоздкого оборудования.

При электрическом моделировании применяют аналоговые вычислительные машины. Под аналоговыми ВМ понимают определенное сочетание различных электрических элементов, в которых протекают процессы, описываемые математическими зависимостями, аналогичными для изучаемого объекта (оригинала). При этом должны соблюдаться масштабные коэффициенты независимых и переменных величин аналога и оригинала.

Аналоговые ВМ применяют для исследования определенного класса задач. Решение задач производится так, что можно одновременно получить значение искомых величин в различных зонах (точках) системы. С помощью аналоговых ВМ можно решать задачи в различном масштабном времени, в том числе и ускоренном, что в ряде случаев представляет большой научный интерес. Простота решения задач, быстрая обработка информации, возможность решения сложных задач обуславливают широкое применение аналоговых ВМ. Различают аналоговые ВМ общего и специального назначения. Аналоговые ВМ общего назначения решают дифференциальные уравнения высоких порядков (более 50) и предназначены для различных целей: расчета сетевых графиков, напряжений в основаниях и т. д.

При решении задач с уравнениями до 10-го порядка используют машины малой мощности МН-7, МН-10, ЭМУ-6, до 20-го порядка средней мощности МН-14, ЭМУ-10 и др.

Существенный недостаток аналоговых ВМ — сравнительно небольшая точность результатов, которая определяется точностью измерительных приборов, измеряющих соответствующие физические величины, например силу тока и напряжение в электрической цепи. Как правило, относительная ошибка измерения имеет порядок нескольких процентов или, в лучшем случае, нескольких десятых процента. Это означает, что в показаниях прибора, а значит и в результатах, выданных машиной, верными можно считать две или три значащие цифры. Дальнейшее повышение точности вызывает уже серьезные затруднения.

Другим недостатком аналоговых ВМ является их специализированность: для каждой задачи необходимо иметь свою схему, т. е. свою модель, а значит и другую машину. Для изменения схемы используются переключения, но эти возможности ограничены типом основных схем, имеющихся в данной машине. По этой причине машина непрерывного действия не может иметь универсального характера и область ее применения всегда ограничена задачами определенного класса.

Среди методов электрического моделирования имеются и другие: метод сплошных сред, электрических сеток, электрогидро-

намическая аналогия и др. Для простых задач применяют обычный метод сплошных сред с использованием электропроводящей бумаги (плоская задача) или электролитических ванн (объемная задача). Модель изготавливают из токопроводящей бумаги одинаковой электропроводимости. Геометрию объекта моделируют в определенном масштабе. К концам фигуры присоединяют электроды, моделирующие краевые условия. При моделировании процессов с токопроводными жидкостями (электролитами) ванны заполняют слабыми растворами солей, кислот, щелочей и др. Неоднородное поле моделируют с применением электролита разной концентрации. Метод сплошных сред предназначен для решения задач теплопроводности, распределения напряжений и др. Он прост, но ограничен решением краевых задач Лапласа.

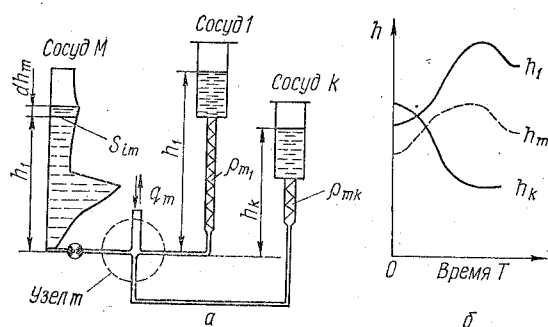


Рис. 3.9. Схема гидроинтегратора (а) и изменения уровня жидкости в сосудах во времени (б): М — сосуд с переменным сечением; 1, 2, ..., k — сосуды, соединенные с сосудом М через узел m; S_{im} — сечение сосуда М в высоте h_i ; ρ_{mi} — сопротивление течения жидкости в сосуде i; q_m — расход жидкости в сосуде М

В методе электрических сеток дифференциальные уравнения преобразуют в систему линейных, решаемых способом конечных разностей. С помощью сеточных моделей на электроинтеграторах можно исследовать стационарные и нестационарные задачи.

Широко распространенным методом моделирования является электрогидродинамическая аналогия. Она основана на электрическом моделировании движения жидкости, пара или газа и широко применяется для исследования водного режима оснований зданий, сооружений, плотин и т. д.

Иногда пользуются методом гидравлического моделирования на гидроинтеграторах. Гидроинтеграторы — это приборы, в которых вода передвигается по системе соединенных между собой трубок и узлов. Изучаемые постоянные и переменные величины моделируются напорами, уровнями и расходами воды в сосудах (рис. 3.9). Метод гидравлического моделирования позволяет решать различные задачи: стационарные и нестационарные; одно-, двух-

и трехмерные; с постоянными и переменными коэффициентами; для однородного или неоднородного поля, т. е. является универсальным. Он широко применяется при решении задач в области строительства: расчете температур и напряжений в различных конструкциях зданий и сооружений; анализе процесса увлажнения и влагонакопления в основаниях зданий, дорог и т. д.; анализе процессов деформирования и разрушения конструкций; оценке температурного поля при пропаривании железобетонных изделий; определении физико-тепловых характеристик материалов и конструкций; расчете теплового режима зданий, дорог и других сооружений при климатических воздействиях для изучения фильтрации воды в гидротехнических сооружениях; расчете промерзания грунтов полотна и оснований сооружений и в других случаях.

Данный метод характеризуется доступностью программирования, простотой решения сложных задач, хорошей наглядностью протекаемых процессов, достаточно высокой точностью расчетов, возможностью остановить и повторить процесс на модели. Однако оборудование для этого метода громоздко, выпускается пока в ограниченном количестве.

Теория подобия — это учение о подобии явлений. Она наиболее эффективна в том случае, когда на основе решения дифференциальных уравнений зависимости между переменными отыскать невозможно. Тогда необходимо произвести предварительный эксперимент и, воспользовавшись его данными, составить с применением метода подобия уравнение (или систему уравнений), решение которого можно распространить за пределы границ эксперимента. Этот метод теоретического исследования явлений и процессов возможен лишь на основе комбинирования с экспериментальными данными.

Суть теории подобия рассмотрим на простом примере. Пусть имеется ряд прямоугольников. Это класс плоских фигур, поскольку они объединены общими свойствами — имеют по четыре стороны и четыре прямых угла. Из этого класса можно выделить единичную фигуру, которая имеет конкретное значение сторон l_1 и l_2 . Численные значения l_1 и l_2 определяют из условия однозначности. Если стороны l_1 и l_2 умножать на K_l , которому можно придать любое значение, то получим серию подобных плоских фигур, объединяемых в определенную группу:

$$\frac{l'_1}{l'_2} = \frac{l''_1}{l''_2} = \frac{l'''_1}{l'''_2} \dots = K_l,$$

K_l называют критериями подобия.

Такой способ приведения подобия применим не только для плоских объединенных фигур, но и для различных физических величин: времени $K_m = \frac{T''}{T'}$, давлений $K_p = \frac{p''}{p'}$, вязкостей $K_\mu = \frac{\mu''}{\mu'}$, температуропроводности $K_a = \frac{a''}{a_1}$ и т. д.

Критерии подобия создают внутри данного класса явления группы путем преобразования условий однозначности в подобные системы. Все явления, входящие в одну группу, подобны и отличаются только масштабами. Таким образом, любое дифференциальное уравнение характерно для класса подобных явлений. Это же уравнение с граничными условиями и критериями подобия характерно только для группы подобных явлений. Если граничные условия представлены без критерия подобия, то дифференциальное уравнение можно применить для анализа только частного случая.

Теория подобия базируется на трех теоремах.

Теорема 1 (М. В. Кирпичева и А. А. Гухмана). *Два физических явления подобны, если они описываются одной и той же системой дифференциальных уравнений и имеют подобные (граничные) условия однозначности, и их определяющие критерии подобия — численно равны.*

Теорема 2. *Если физические процессы подобны, то критерии подобия этих процессов равны между собой.*

Теорема 3. *Уравнения, описывающие физические процессы, могут быть выражены дифференциальной связью между критериями подобия.*

В группе подобных между собой явлений, отличающихся только масштабом, можно распространять результаты единичного эксперимента. При использовании теории подобия удобно оперировать критериями подобия, которые обозначаются двумя латинскими буквами фамилий ученых.

Рассмотрим некоторые критерии подобия.

Изучая потоки жидкостей, применяют критерий Рейнольдса $Re = \omega l / \nu$ (3.37), где ν — динамическая вязкость; ω — скорость движения; l — характерный размер (расстояние, толщина, диаметр). Критерий Re является показателем отношения сил инерции к силам трения. Критерий Эйлера

$$Ei = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2} \quad (3.38)$$

Здесь Δp — падение давления при движении жидкости в трубопроводе вследствие трения; ρ — плотность. В тепло-массопереносе применяют различные критерии. Критерий Фурье $Fo = aT/l^2$ (3.39), где a — коэффициент температуропроводности; T — время; l — характерный размер тела (длина, радиус).

Этот критерий характеризует скорость выравнивания температуры в данном теле. Критерий Лыкова $Lu = a_1/a$ (3.40). Здесь a и a_1 — коэффициенты тепло- и массопереноса. Данный критерий характеризует интенсивность изменения массопереноса (влаги пара) относительно теплопереноса.

Он изменяется в широких пределах (от 0 до 1000). Критерий Кирпичева

$$Ki = \frac{q(T)l}{\lambda \Delta T} \quad (3.41)$$

$q(T)$ — поток тепла.

Этот критерий характеризует отношение потока тепла, подводимого к поверхности тела, к потоку тепла, отводимого внутрь тела. Все приведенные, а также другие критерии имеют безразмерный вид. Они независимы друг от друга, поэтому их сочетание дает новые критерии.

При исследовании явлений и процессов удобно использовать критерии подобия. Экспериментальные данные обрабатывают в виде обобщенных безразмерных переменных и составляют уравнения в критериальной форме, т. е. в дифференциальные уравнения вместо переменных l, a, t, q и т. д. ставят критерии подобия. Далее 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. Все это упрощает составление графиков и номограмм. Поэтому умение составлять дифференциальные уравнения в критериальном виде, решать их и анализировать представляет большой интерес для научного работника.

В ряде случаев встречаются процессы, которые не могут быть непосредственно описаны дифференциальными уравнениями. Зависимость между переменными величинами в таких процессах в конечном счете можно установить лишь экспериментально. Чтобы ограничить эксперимент и отыскать связь между основными характеристиками процесса, эффективно применять метод анализа размерностей.

Суть метода размерностей поясним на простом примере. Допустим, что в результате исследований получена функция $F_0 = f(V^x, S^y, \rho^z)$, где V — скорость, м/с; S — площадь, м²; ρ — плотность, кгс · с²/м⁴; F_0 — сила, кгс. Необходимо определить x, y, z . Если известно, что все коэффициенты безразмерны, то искомые величины определяются из системы уравнений, получаемых из условия равенства размерности правой и левой частей уравнения: кгс: $1 = z$; м: $0 = x + 2y - 4z$; с: $0 = -x + 2z$. Отсюда $z = 1$; $x = 2$; $y = 1$.

В более сложных случаях метод анализа размерностей позволяет составить функциональные зависимости в критериальном виде.

Пусть известна в общем виде функция F для какого-либо сложного процесса: $F = f(n_1, n_2, \dots, n_k)$ (3.42), содержащая K неизвестных постоянных или переменных размерных величин. Необходимо отыскать F и найти ее зависимость от основных 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 $k - 3$, входящие в функциональную зависимость (3.42), выбирают так, чтобы они были представлены в функции как безразмерные, в критериях подобия. В этом случае преобразование производят с помощью основных, выбранных единиц измерения.

При этом функция (3.42) принимает вид

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

Три единицы означают, что первые три числа являются отношениями n_1, n_2, n_3 к соответственно равным значениям a, b, c . Выражение (3.42) 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. Например, при обтекании опоры моста водой со скоростью V (м/с) на поверхность площади S (м²) действует сила F_0 (кГс). Плотность воды ρ (кГс · с²/м⁴).

Функциональную зависимость можно записать так: $F_0 = f\left(V, S, \rho, \mu, g, p, \frac{l}{B}\right)$, где l/B — отношение высоты к ширине опоры моста величина безразмерная, μ — вязкость воды $\left(\frac{\text{кГс} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}\right)$, g — ускорение (м/с²); p — давление (кГс/см²).

Переменные размерные значения μ, g, p , как и V, S, ρ , подлежат изучению при условии, что функция F_0 будет представлена в критериальном виде. При использовании метода анализа размерностей возможны только три безразмерные величины. Применительно к (3.42) запишем

$$\frac{F_0}{V^x S^y \rho^z} = f\left(1, 1, 1, \frac{\mu}{V^{x_1} S^{y_1} \rho^{z_1}}, \frac{g}{V^{x_2} S^{y_2} \rho^{z_2}}, \frac{p}{V^{x_3} S^{y_3} \rho^{z_3}}, \frac{1}{B}\right).$$

В качестве основных размерностей принимаем м/с, кГс · с²/м⁴, т. е. для V, S, ρ . При этом $[F] = [V^x, S^y, \rho^z]$ или кГс = (м/с)^x (м²)^y (кГс · с²/м⁴)^z. Из этого выражения находим показатели степеней, принимая числитель со знаком +, знаменатель — со знаком —, показатель кГс — 1 = z; показатель м — 0 = x + 2y — 4z; показатель с — 0 = —x + 2z.

Решая эти уравнения, имеем $z = 1, x = 2, y = 1$. Таким же образом $x_1 = 1; y_1 = 0,5; z_1 = 1; x_2 = 2; y_2 = -0,5; z_2 = 0; x_3 = 2; y_3 = 0; z_3 = 1$. Отсюда запишем $n = \frac{F}{V^2 S \rho}, n_4 = \frac{\mu}{V \rho V S}, n_5 =$

$\frac{g \sqrt{S}}{V^2}, n_6 = \frac{p}{\rho V^2}$, это определяется условием равенства размерностей числителя и знаменателя.

Выражения n_4 и n_6 представляют собой критерии подобия Рейнольдса и Эйлера, а n_5 — критерий Фруда Fr.

В результате исследуемая функция принимает вид

$$\frac{F}{V^2 S \rho} = f\left(\text{Re}, \text{Fr}, \text{Eu}, \frac{l}{B}\right).$$

Эта формула позволяет исследовать процесс обтекания опоры моста в различных вариантах размеров l, B , скоростей V при условии равенства критериев подобия. Ее можно также использовать для анализа процесса методом теории подобия на моделях.

§ 5. Вероятностно-статистические методы исследований

Во многих случаях необходимо исследовать не только детерминированные, но и случайные вероятностные (стохастические) процессы. Все строительные процессы выполняются в условиях непрерывно меняющейся обстановки (переброска бригад на объекты, вынужденные простои машин, перебои с поставками материалов, неравномерная работа транспорта, непрерывное изменение метеорологических факторов и т. д.). Те или иные события могут произойти или не произойти. В связи с этим приходится анализировать случайные, вероятностные или стохастические связи, в которых каждому аргументу соответствует множество значений функции. Наблюдения показали, что, несмотря на случайный характер связи, рассеивание имеет вполне определенные закономерности. Для таких статистических законов теория вероятностей позволяет предсказать исход не одного какого-либо события, а средний результат случайных событий и тем точнее, чем больше число анализируемых явлений.

Несмотря на случайный характер событий, они подчиняются определенным закономерностям, рассматриваемым в теории вероятностей. Теория вероятностей является математическим отражением законов, изучает случайные события и базируется на следующих основных показателях.

Под *совокупностью* понимают множество однородных событий. Совокупность случайной величины x составляет первичный статистический материал. Совокупность, содержащая самые различные варианты массового явления, называют генеральной совокупностью или большой выборкой N . Обычно изучают лишь часть генеральной совокупности, называемой выборочной совокупностью или малой выборкой N_1 .

Вероятностью $P(x)$ события x называют отношение числа случаев $N(x)$, которые приводят к наступлению события x к общему числу возможных случаев N : $P(x) = N(x)/N$ (3.43). Теория веро-

ятностей рассматривает теоретические распределения случайных величин и их характеристики. Математическая статистика занимается способами обработки и анализа эмпирических событий. Эти две родственные науки составляют единую математическую теорию массовых случайных процессов, широко применяемую для анализа научных исследований.

В математической статистике важное значение имеет понятие частоты события $\bar{y}(x)$, представляющего собой отношение числа случаев $n(x)$, при которых имело место событие, к общему числу событий n : $\bar{y}(x) = n(x)/n$ (3.44).

При неограниченном возрастании числа событий частота $\bar{y}(x)$ стремится к вероятности $P(x)$. Допустим, имеются статистические наблюдения за количеством автомобилей x_i , прибывающих ежедневно на склад:

x_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n(x_1)$	2	4	10	14	7	5	4	3	1	0
Частота относительная \bar{y}_{oi}	0,04	0,08	0,20	0,28	0,14	0,10	0,08	0,06	0,02	0

В рассматриваемом примере $\sum n(x) = 50$. Частота $\bar{y}_{oi} = \frac{n(x)}{\sum n(x)}$ характеризует вероятность появления случайной величины и представляет собой ряд распределения (рис. 3.10), а плавная кривая — закон (функцию) распределения $F(x)$.

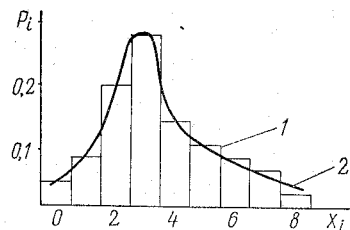


Рис. 3.10. Общий вид распределения случайных величин: 1 — гистограмма; 2 — кривая распределения

Вероятность случайной величины (события) — это количественная оценка возможности ее появления. Достоверное событие имеет вероятность $P = 1$, невозможное событие — $P = 0$. Следовательно, для случайного события $0 \leq P(x) \leq 1$, а сумма вероятностей всех возможных значений

$$\sum_0^n P_i = 1 \quad (3.45).$$

В исследованиях иногда недостаточно знать одну функцию распределения. Необходимо еще иметь ее характеристики: среднее арифметическое, математическое ожидание, дисперсию, размах ряда распределения.

Пусть среди n событий случайная величина x_1 повторяется n_1 раз, величина x_2 — n_2 раза и т. д. Тогда среднее арифметическое значение \bar{x} имеет вид

$$\bar{x} = \sum_1^n x_i \frac{y_i}{n} \quad (3.46).$$

Размах можно использовать для ориентировочной оценки вариации ряда событий: $R = x_{\max} - x_{\min}$ (3.47), где x_{\max} , x_{\min} —

максимальное и минимальное значения измеренной величины или погрешности. Если вместо эмпирических частот y_1, \dots, y_n принять их вероятности P_1, \dots, P_n , то получим важную характеристику функции распределения — математическое ожидание:

$$m(x) = \sum_1^n x_i P_i \quad (3.48).$$

Пример. Имеется 5 измерений одной выборки:

$$x_1 = 1; \quad x_2 = 2; \quad x_3 = 3; \quad x_4 = 4; \quad x_5 = 5;$$

$$P_1 = 0,10; \quad P_2 = 0,15; \quad P_3 = 0,45; \quad P_4 = 0,30; \quad P_5 = 0. \text{ Сред-$$

$$\text{нее значение } \bar{x} = \frac{15}{5} = 3,0.$$

По формуле (3.48) математическое ожидание $m(x) = 1 \cdot 0,10 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,45 + 4 \cdot 0,30 + 5 \cdot 0 = 2,95$.

Для непрерывных случайных величин математическое ожидание $m(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xP(x) dx$ (3.49), т. е. оно равно действительному значению x_D наблюдаемых событий. Таким образом, если систематические погрешности измерений полностью исключены, то истинное значение измеряемой величины равно математическому ожиданию, а соответствующая ему абсцисса называется центром распределения. Дисперсия характеризует рассеивание случайной величины по отношению к математическому ожиданию и вычисляется с помощью формулы

$$D(x) = \sum_1^n (x_i - m(x))^2 P_i \quad (3.50).$$

Для рассмотренного выше примера $D(x) = (1 - 2,95)^2 \cdot 0,10 + (2 - 2,95)^2 \cdot 0,15 + (3 - 2,95)^2 \cdot 0,45 + (4 - 2,95)^2 \cdot 0,30 + (5 - 2,95)^2 \cdot 0 = 0,83$.

Важной характеристикой теоретической кривой распределения является среднеквадратичное отклонение или стандарт: $\sigma(x) = \sqrt{D(x)}$ (3.51). Площадь, расположенная под кривой распределения, соответствует единице вследствие того, что кривая охватывает все значения случайных величин, т. е. все результаты измерений. Для одной и той же площади можно построить большое количество кривых распределения, т. е. они могут иметь различное рассеяние. Мерой рассеяния (точности измерений) является дисперсия или среднеквадратичное отклонение.

Коэффициент вариации $K_v = \sigma/m(x)$ (3.52) применяется для сравнения интенсивности рассеяния в различных совокупностях, определяется в относительных единицах: $K_v < 1$.

Выше были рассмотрены основные характеристики теоретической кривой распределения, которые анализирует теория вероятностей. В статистике оперируют с эмпирическими распределениями. Основной задачей статистики является подбор теоретических кривых по имеющемуся эмпирическому закону распределения.

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

группируют x_i в интервалы и устанавливают для каждого из них частоты y_i и \bar{y}_{0i} ; по значениям x_i и \bar{y}_{0i} строят ступенчатую гистограмму частот; вычисляют характеристики эмпирической кривой распределения. Основными характеристиками эмпирического распределения

являются среднеарифметическое значение $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i$ (3.53),

дисперсия $D = \frac{1}{n} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2$ (3.54) и среднеквадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{D}$.

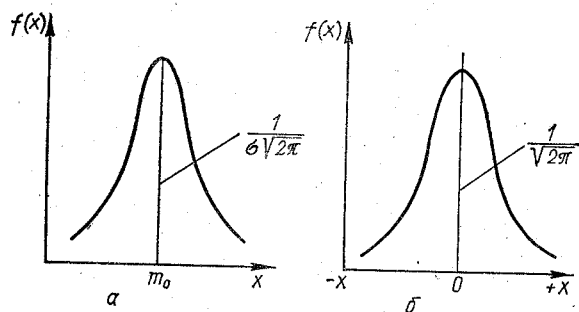


Рис. 3.11. Общий вид кривой нормального распределения:

$a - m(x) \neq 0; \quad b - m(x) = 0$

Значениям \bar{x} , D , σ эмпирического распределения соответствуют величины \bar{x} , $D(x)$, $\sigma(x)$ теоретического распределения.

Рассмотрим основные теоретические кривые распределения. Наиболее часто в исследованиях применяют закон нормального распределения (рис. 3.11):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - m(x))^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (3.55)$$

Это уравнение соответствует функции нормального распределения при $m(x) \neq 0$. Если совместить ось ординат с точкой m , т. е. $m(x) = 0$ и принять $\sigma^2 = 1$, то закон нормального распределения описывается зависимостью (за единицу масштаба принята дисперсия σ^2)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right). \quad (3.56)$$

Эта формула более проста и чаще применяется при анализе.

Для оценки рассеяния обычно пользуются величиной σ . Чем меньше σ , тем меньше рассеяние, т. е. большинство наблюдений мало отличается друг от друга (рис. 3.12).

С увеличением σ рассеяние возрастает, вероятность появления больших погрешностей увеличивается, а максимум кривой распределения (ордината), равный $\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$, уменьшается. Поэтому значение $y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}}$ при $\sigma = 1$ или $y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$ называют мерой точности. Таким образом, чем меньше σ , тем больше сходимость результатов измерений, а ряд измерений более точен. Как видно из уравнений (3.55) — (3.56), среднеквадратичное отклонение определяет закон распределения.

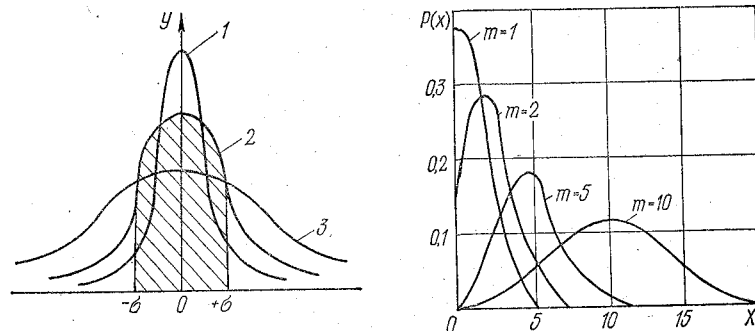


Рис. 3.12. Характер рассеяния кривой нормального распределения: 1 — $\sigma = 0,5$; 2 — $\sigma = 10$; 3 — $\sigma = 2$.

Рис. 3.13. Общий вид кривой распределения Пуассона

Среднеквадратичное отклонение $+\sigma$ и $-\sigma$ соответствует точкам перегиба кривой (заштрихованная площадь на рис. 3.12). Вероятность того, что случайные события не выйдут за эти пределы, равна 0,683. В общем случае, для предела $\pm t\sigma$ вероятность того, что событие x_i попадает в данный предел, вычисляется по распределению Лапласа $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-x^2/2} dx$ (3.57).

Функция $\Phi(x)$ табулирована и используется в исследованиях.

При анализе многих случайных дискретных процессов пользуются распределением Пуассона. Например, поток автомобилей, прибывающих на асфальто-бетонный завод, поток автомобилей перед светофором и другие краткосрочные события, протекающие в единицу времени.

Вероятность появления числа событий $x = 1, 2, 3 \dots$ в единицу времени выражается законом Пуассона (рис. 3.13):

$$P(x) = \frac{m^x}{x!} e^{-m} = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}, \quad (3.58)$$

где x — число событий за данный отрезок времени t ; λ — плотность, т. е. среднее число событий за единицу времени; $\lambda t = m$ — среднее число событий за время t , $\lambda t = m$. Распределение Пуассона относят к редким событиям, т. е. $P(x)$ — вероятность того, что событие в период какого-то испытания произойдет x раз при очень большом числе измерений m . Для закона Пуассона дисперсия равна математическому ожиданию числа наступления события за время t , т. е. $\sigma^2 = m$. Как видно из формулы (3.58), пуассоновский процесс можно задать двумя параметрами x и m . Табличные значения вероятностей $P(x)$ для x от 0 до 25 и m от 0,1 до 18 составляет соответственно от 0,904 до 0,023.

Рассмотрим пример. С помощью наблюдений установлено, что за пять минут на погрузку под экскаватор в среднем поступает 6 автосамосвалов. Какова вероятность поступления 10 автомобилей за 5 минут? В этом случае $\lambda t = 10$, $\lambda t = 6$, $P(x) = \frac{6^{10} e^{-6}}{10!} = 0,041$. Как видно, эта вероятность очень мала. Рассмотрим второй пример. Вероятность возникновения брака составляет 0,02. Какова вероятность того, что в партии из 100 единиц окажется пять бракованных изделий? Имеем $\lambda t = 100 \cdot 0,02 = 2$; $x = 5$, тогда $P(x) = \frac{2^5 e^{-2}}{5!}$, т. е. вероятность очень мала.

Для исследования количественных характеристик некоторых процессов (время обслуживания строительных машин в ремонтных

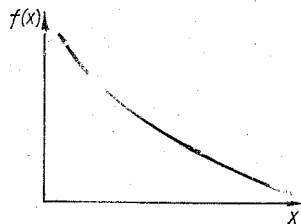


Рис. 3.14. Общий вид кривой показательного распределения

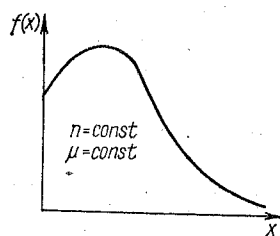


Рис. 3.15. Общий вид кривой распределения Вейбулла

мастерских и автомобилей на станции технического обслуживания, время отказов машин и изделий, длительность телефонных разговоров между диспетчером и передвижными оперативными пунктами и т. д.) можно применять показательный закон распределения (рис. 3.14).

Плотность вероятности показательного закона выражается зависимостью $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ (3.59), где λ — плотность или интенсивность (среднее число) событий в единицу времени. В показательном законе плотность является величиной, обратной математическому ожиданию $\lambda = 1/m(x)$. Кроме того, имеет место соотношение $\sigma^2 = [m(x)]^2$. В различных областях исследований широко применяется закон распределения Вейбулла (рис. 3.15): $f(x) =$

$n \mu^n x^{n-1} e^{-\mu^n x^n}$ (3.60). Здесь n , μ — параметры закона; x — аргумент, чаще принимаемый как время.

Исследуя процессы, связанные с постепенным снижением параметров (ухудшение свойств материалов во времени, деградация конструкций, процессы старения, износные отказы в машинах и др.), применяют закон гамма-распределения (рис. 3.16):

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}, \quad (3.61)$$

где λ , α — параметры. Если $\alpha = 1$, гамма-функция превращается в показательный закон (см. рис. 3.14) $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ (3.62). При исследовании многих процессов, связанных с анализом климатических и гидрологических воздействий на сооружения, установлении расчетных характеристик грунтов и материалов и т. д.

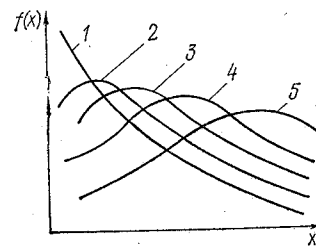


Рис. 3.16. Общий вид кривых гамма-распределения:

1 — $\alpha = 1$; $\lambda = 1$; 2 — $\alpha = 3$; $\lambda = 1$; 3 — $\alpha = 4$; $\lambda = 1,5$; 4 — $\alpha = 5$; $\lambda = 2$; 5 — $\alpha = 6$

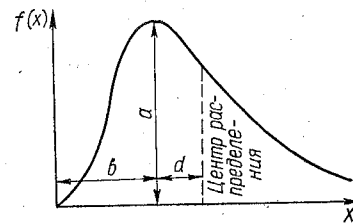


Рис. 3.17. Общий вид кривой распределения Пирсона

используют закон распределения Пирсона. Из двенадцати типов этого закона чаще всего применяется третий (рис. 3.17): $f(x) = a e^{dx} (1 + x/b)^{-db}$ (3.63). Здесь a — максимальная ордината; d , b — соответственно расстояния от максимальной ординаты до центра распределения и начала координат. Кроме приведенных выше применяют и другие виды распределений — Рэля, бета-распределение, Шарлье, Гудрича.

В исследованиях всегда возникает вопрос — в какой мере влияет тот или иной фактор или комбинация факторов на исследуемый процесс? Так, при измерении какой-либо величины результаты зависят от многих факторов, но основными являются следующие: техническое состояние прибора и внимание оператора.

Методы установления основных факторов и их влияние на исследуемый процесс рассматриваются в специальном разделе теории вероятностей и математической статистике — дисперсионном анализе. Различают одно- и многофакторный анализ. Суть однофакторного дисперсионного анализа рассмотрим на примере. Пусть необходимо проверить степень точности группы нивелиров (m приборов) и установить, являются ли их систематические ошибки одинаковыми, т. е. изучить влияние одного фактора-прибора на по-

грешность измерения. Каждым прибором выполнено n измерений одного и того же объекта. Всего выполнено nm измерений. Обозначим отдельные измерения через x_{ij} , где i — номер прибора; j — номер выполненного на этом приборе измерения. Значение i изменяется от 1 до m , j — от 1 до n .

Дисперсионный анализ допускает, что отклонения подчиняются нормальному закону распределения. Вычисляют для каждой серии измерений среднеарифметическое значение и среднюю из показаний первого прибора и т. д. для каждого из n_i измерений и m приборов. В результате таких расчетов устанавливают $Q_1 =$

$$= n \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \bar{x})^2; \quad Q_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2, \quad (3.64)$$

где \bar{x}_i — среднеарифметическое для n_i измерения; \bar{x} — среднеарифметическое для всех серий измерений (общее среднее значение); x_{ij} — отдельное i -е измерение на j -м приборе; \bar{x}_i — среднеарифметическое для соответствующей серии (группы) измерений. Значение Q_1 называют суммой квадратов отклонений между измерениями серий. Оно показывает степень расхождения в систематических погрешностях всех m приборов, т. е. характеризует рассеивание исследуемого фактора между приборами. Q_2 называют суммой квадратов отклонений внутри серии. Она характеризует остаточное рассеивание случайных погрешностей опыта (одного прибора).

Метод анализа допускает следующую гипотезу: центры нормальных распределений случайных величин равны (или равны с определенной степенью точности), следовательно, все mn измерений можно рассматривать как выборку из одной и той же нормальной совокупности. Вычисляют критерий

$$F = \frac{\frac{1}{m-1} Q_1}{\frac{1}{m(n-1)} Q_2}. \quad (3.65)$$

Нетрудно видеть, что числитель и знаменатель критерия F представляют собой дисперсии σ^2 для m и nm наблюдений. В зависимости от значений $K_1 = m - 1$ и $K_2 = m(n - 1)$ (числа степеней свободы) и вероятности P (например 0,95; 0,99 и др.) составлены табличные значения F_p . Если $F \leq F_p$, то гипотеза удовлетворяется, т. е. в данном примере все приборы имеют одинаковые (допустимые) систематические ошибки. При $F > F_p$ гипотеза не удовлетворяется.

Дисперсионный анализ называют многофакторным, если он имеет два и более факторов. Суть его не отличается принципиально от однофакторного, но усложняются выкладки и существенно увеличивается количество расчетов.

Очень часто применяют методы вероятностей и математической статистики в теории надежности, которая в настоящее время ши-

роко используется в различных отраслях науки и техники. Под надежностью понимают свойство изделия (объекта) выполнять заданные функции (сохранять установленные эксплуатационные показатели) в течение требуемого периода времени. Обеспечение надежности, исключение отказов (нарушения работоспособности) продукции стало одной из основных народнохозяйственных задач.

В теории надежности отказы рассматриваются как случайные события. Для количественного описания отказов применяют математические модели — функции распределения вероятностей интервалов времени. Наиболее часто применяют следующие законы: нормального и экспоненциального распределения, Вейбулла, гамма-распределения. Основной задачей теории надежности является прогнозирование (предсказание с той или иной вероятностью) различных показателей — безотказной работы, долговечности, срока службы и т. д. Она связана с нахождением вероятностей.

Для исследования сложных процессов вероятностного характера применяют метод Монте-Карло (с 1950 г.). С помощью этого метода в настоящее время решают широкий круг задач, в которых ставят цель найти наилучшее решение из множества рассматриваемых вариантов: отыскать наилучший вариант размещения баз, складов, предприятий; определить оптимальное количество автомобилей, обслуживающих экскаватор или смеситель; установить наилучшие параметры выпускаемой продукции; уточнить пропускную способность транспортных путей и др.

Метод Монте-Карло, называемый методом статистического моделирования или статистических испытаний, представляет собой численный метод решения сложных задач. Он основан на использовании случайных чисел, моделирующих вероятностные процессы. Результаты решения метода позволяют установить эмпирические зависимости исследуемых процессов. Математической основой метода является закон больших чисел, разработанный П. Л. Чебышевым, который формулируется так: при большом числе статистических испытаний вероятность того, что среднеарифметическое значение случайной величины стремится к ее математическому ожиданию, равна 1:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left| \frac{\sum x_i}{n} - m(x) \right| < \varepsilon \right\} \rightarrow 1, \quad (3.66)$$

где ε — любое малое положительное число. Из формулы (3.66) видно, что по мере увеличения числа испытаний n среднеарифметическое $\frac{\sum x_i}{n}$ неограниченно (асимптотически) приближается к математическому ожиданию. Последовательность решения задач методом Монте-Карло сводится к следующему: сбору, обработке и анализу статистических наблюдений исследуемого процесса; отбору главных и отбрасыванию второстепенных факторов и составлению адекватной математической модели (уравнения), графиков, циклограмм и т. д.; составлению алгоритмов и решению задачи на ЭВМ.

Для решения задач методом Монте-Карло необходимо иметь статистический ряд, знать закон его распределения, среднее значение \bar{x} и математическое ожидание $m(x)$, среднеквадратичное отклонение. С помощью метода можно получить сколько угодно данную точность решения, т. е. $\bar{x} \rightarrow m(x)$. При нормальном законе распределения оценить точность результатов, полученных методом Монте-Карло, можно по формуле $P\{|\bar{x} - m(x)| < 3\sigma/\sqrt{n}\}$ (3.67). Пусть по условию задачи задана допустимая ошибка ϵ_D . Если при имеющемся числе ряда n_1 и σ_1 ошибка ϵ_{D1} окажется больше, чем ϵ_D , то увеличивают число испытаний до n_2 и вычисляют новое значение ошибки ϵ_{D2} и т. д., пока не будет соблюдаться условие $\epsilon_{Dj} \leq \epsilon$.

Решение задач методом Монте-Карло эффективно лишь с использованием быстродействующих ЭВМ.

§ 6. Методы системного анализа

Под системным анализом понимают совокупность приемов и методов для изучения сложных объектов — систем представляющих собой сложную совокупность взаимодействующих между собой элементов. Взаимодействие элементов системы характеризуется прямыми и обратными связями. Сущность системного анализа состоит в том, чтобы выявить эти связи и установить влияние на поведение всей системы в целом.

Системный анализ используется для исследования движения таких сложных систем, как экономика отдельной отрасли, промышленное предприятие, строительная организация и др. Наиболее часто рассматривается развитие этих систем во времени. Эффективные методы системного анализа могут быть применены при планировании и организации технологии комплексных строительных процессов выполняемых несколькими строительными организациями.

Наиболее полно и глубоко можно выполнить системный анализ методами кибернетики, которая представляет собой науку о сложных динамических системах, способных воспринимать, хранить и перерабатывать информацию для целей оптимизации и управления. В настоящее время кибернетика и ее основное приложение, электронно-вычислительная техника проникают во все области науки, техники и производства. Важнейшим понятием кибернетики как основы управления в природе и технике является понятие обратной связи, которая проявляется в отраженном влиянии процесс его собственного действия. Методы кибернетики тесно связаны со многими общенаучными методами, поскольку характер закономерностей, принципов, средств и методов науки ярко выражен в кибернетике. Системный анализ складывается из четырех этапов.

Первый этап заключается в постановке задачи: определяют объект, цели и задачи исследования, а также критерии для изучения

объекта и управления им. Это важный этап системного анализа, поэтому его выполняет наиболее опытный исследователь. Неправильная, неполная постановка целей может свести на нет результаты всего последующего анализа.

Во время *второго* этапа очерчивают границы изучаемой системы и определяют ее структуру. Прежде всего, все объекты и процессы, имеющие отношение к поставленной цели, разбивают на два класса — собственно изучаемую систему и внешнюю среду. Различают замкнутые и открытые системы. При исследовании замкнутых систем влиянием внешней среды на их поведение пренебрегают. Затем выделяют отдельные составные части системы — ее элементы, устанавливают взаимодействие между ними и внешней средой.

Следует отметить, что в последнее время все большее внимание в технике привлекают замкнутые системы, которые описывают закрытые технологические циклы, например так называемую «безотходную технологию». Такие технологические процессы перспективны не только с позиций экономики, они также обусловлены требованиями экологии. В настоящее время утверждается принцип — «чем меньше отходов, тем выше уровень производства».

Третий, важнейший этап системного анализа заключается в составлении математической модели исследуемой системы. Вначале производят параметризацию системы, описывают выделенные элементы системы и элементарные воздействия на нее с помощью тех или иных параметров. При этом различают параметры, характеризующие непрерывные и дискретные, детерминированные и вероятностные процессы. В зависимости от особенностей процессов используют тот или иной математический аппарат.

Аналитические методы используют лишь для описания небольших систем вследствие их громоздкости или невозможности составить и решить системы уравнения. Для описания больших систем, все чаще исследуемых в настоящее время, используют дискретные параметры, например переменные, принимающие целочисленные значения. С их помощью можно изучить процессы и объекты, которые характеризуют не только качественно, но и количественно, используя для этой цели балльную систему. Например, твердость материалов оценивают баллами по шкале Мооса, морозостойкость бетонов — баллами по С. В. Шестоперову и др. Методы операций с дискретными параметрами излагаются в *теории множеств и алгебре высказываний* (математической логике). Эти разделы получили большое развитие в послевоенное время, они составляют основу математического обеспечения современных ЭВМ.

Наряду с аппаратом алгебры множеств и алгебры высказываний при исследовании сложных систем широко используют вероятностные методы, поскольку в них преобладают стохастические процессы. Поэтому наиболее часто исследуют развитие процессов с некоторой вероятностью или же определяют вероятность протекания изучаемых процессов.

Если исследуются сложные системы, именуемые как обобщенные динамические системы, характеризующиеся большим количеством параметров различной природы, то в целях упрощения математического описания их расчленяют на подсистемы, выделяют типовые системы, производят стандартизацию связей для различных уровней иерархии однотипных систем. В результате третьего этапа системного анализа формируются законченные математические модели системы, описанные на формальном, например алгоритмическом, языке.

Важным этапом системного анализа является *четвертый*. В это время анализируют полученную математическую модель, находят ее экстремальные условия в целях оптимизации процессов и управления системами и формулируют выводы.

Оптимизация заключается в нахождении оптимума рассматриваемой функции (математической модели исследуемой системы, процесса) и соответственно оптимальных условий поведения данной системы или протекания данного процесса. Оценку оптимизации производят по *критерию оптимизации*, принимающему в этом случае экстремальные значения (минимум, максимум, минимакс), которые могут выражать, например, максимальный сьем продукции с единицы объема аппарата, минимальную стоимость продукции при определенной производительности и т. д. Сложность выбора надлежащего критерия состоит в том, что на практике в задачах оптимизации и управления имеют дело со многими критериями, которые часто бывают противоречивыми. Математически правильная постановка задачи оптимизации предполагает наличие только одного критерия. Наиболее часто выбирают какой-либо один критерий, а для других устанавливают пороговые предельно-допустимые значения. Иногда применяют смешанные критерии, представляющие собой функцию от первичных параметров. На основании выбранного критерия оптимизации составляют зависимость критерия оптимизации от параметров модели исследуемого объекта (процесса).

Известны различные математические методы оптимизации исследуемых моделей. Наиболее распространенные из них — аналитические, градиентные, математическое программирование, вероятностно-статистические, а также автоматические методы с самонастраивающимися моделями.

Оптимизация процессов и системы аналитическими методами состоит в том, что необходимо определить (минимальное или максимальное) значение некоторой функции $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в определенной области s значений параметров x_1, x_2, \dots, x_n . Однако классические аналитические методы используют редко для оптимизации сложных реальных процессов. Сложные экстремальные процессы обычно решают другими методами. Для этой цели часто применяют метод наискорейшего (градиентного) спуска и подъема.

Суть метода поясним на следующем примере. Допустим, что необходимо найти экстремум целевой функции $f(x_1, x_2)$, описывающей некоторую поверхность (рис. 3.18). Нахождение экстремума

начинают с любой точки поверхности $A_0(x_{01}, x_{02})$. Из этой точки определяют направление подъема или спуска, которое является наиболее крутым; его называют градиентом и обозначают \vec{g} . Отсюда же начинают движение по направлению градиента к оптимуму с шагом \vec{cg} , где c — постоянная величина, зависящая от точности измерения. В результате получаем новую точку $A_1(x_{11}, x_{22})$, в которой снова повторяют описанную процедуру до тех пор, пока не определят экстремум.

На практике встречаются задачи оптимизации, когда при нахождении экстремума целевая функция f и граничные уравнения ее области s являются линейными. Решая задачи такого класса, чаще всего применяют методы линейного программирования.

В строительстве повседневно приходится решать различные задачи рационального распределения ресурсов — как наилучшим образом использовать рабочих, машины, строительные материалы и изделия, организовать процессы, управление ими, как наиболее рационально разместить производственные предприятия и т. д. Во время управления ходом строительного процесса возникает потребность в оптимальном решении с учетом изменяющейся обстановки.

Задача линейного программирования заключается в нахождении максимума или минимума критерия оптимальности в задачах с линейными уравнениями.

Целевая функция выражается в виде $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \min (\max)$ (3.68).

Ограничения задаются в виде линейных неравенств $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{im}x_m \geq b_i; x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0; i = 1, 2, \dots, m$ (3.69), где a_{ij}, b_i, c_i — константы; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ — независимые переменные.

В настоящее время задачи линейного программирования изучены достаточно полно, причем для их решения требуются сравнительно несложные вычисления. На многие из них имеются стандартные программы для цифровой ЭВМ.

В ряде случаев встречаются задачи нелинейного программирования, целевая функция которых записывается как сумма линейных и нелинейных: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_i x_j$

(3.70). Среди задач нелинейного программирования встречаются такие, в которых ограничения не имеют дискретных переменных. В них функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ непрерывные и выражаются

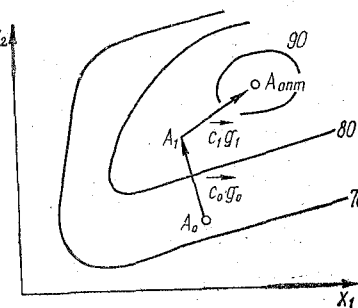


Рис. 3.18. Схема движения к оптимуму по градиенту (крутое восхождение)

частными производными. Эти задачи иногда называют классическими задачами оптимизации, поскольку решаются классическими методами на основе дифференциального исчисления.

Различают также другой вариант задач нелинейного программирования. Это задачи целочисленного линейного программирования. В этом случае в качестве ограничений выставляют особое требование о целостности переменных значений. Задача формулируется следующим образом: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j, i = 1, 2, \dots, n$ (3.71), $x_i \geq 0; j = 1, 2, \dots, n$ — целые числа.

Решение большого количества производственных задач методами линейного и нелинейного программирования обеспечивает в строительстве большой экономический эффект, в частности снижение сметной стоимости в результате оптимизации процессов составляет 3—7 %.

Некоторые практические процессы в строительном производстве непрерывно изменяются, особенно те, что связаны с управлением производством. В связи с изменением условий доставки материалов, наличием строительных и дорожных машин, изменением метеорологических и грунтовых условий, наличием бригад разных специальностей практически ежедневно на производстве приходится рассматривать новые ситуации. Таким образом, строительный процесс является динамическим.

Решение ряда практических задач в строительстве с учетом различных ситуационных изменений, особенно в управлении процессом, можно осуществить с помощью метода динамического программирования.

Динамическое программирование («динамическое планирование») представляет собой математический метод оптимизации решений, специально приспособленный к многошаговым (или многоэтапным) операциям. Предположим, что исследуемая операция представляет собой процесс, развивающийся во времени и распадающийся на ряд «шагов» или «этапов». Некоторые операции расчленяются на шаги естественно: например, при планировании хозяйственной деятельности группы предприятий естественным шагом является хозяйственный год. В других операциях разделение на шаги приходится вводить искусственно; например, процесс тепловлажностной обработки железобетонных изделий можно условно разбить на этапы (подъем температуры, изотермическая выдержка, остывание), каждый из которых занимает какой-то временной отрезок. Этот процесс является управляемым, т. е. на каждом шаге принимается какое-то решение, от которого зависит успех данного шага и операции в целом.

В основу задач динамического программирования положены принципы оптимальности. Оптимальное управление процессом определяется заданной целью и составлением системы в рассматриваемый период времени, независимо от изменившихся условий, которые привели систему в данное состояние.

Целевая функция выражается суммой

$$\omega = \sum_{k=0}^{N-1} f_0[x(k), u(k)] = \max(\min), \quad (3.72)$$

где N — общее число интервалов (шагов); $u(k)$ — управляющие воздействия; $x(k)$ — значение координаты в дискретные моменты времени t .

При оптимальном управлении функционал (3.72) должен быть минимизирован или максимизирован. Оптимальный процесс станет известен, если будут найдены значения управляющего воздействия u_0, u_1, \dots, u_{N-1} во все дискретные моменты времени $k = 0, 1, \dots, N-1$, имеющие определенные ограничения и минимизирующие (максимизирующие) сумму (3.72).

Чтобы решить задачу динамического программирования, необходимо отыскать минимум (максимум) сложной дискретной функции большого количества переменных. Метод динамического программирования сводит эту задачу к простой — минимизируются простые функции в обратном порядке — от конца к началу процесса.

Для оптимизации процессов методами линейного, нелинейного или динамического программирования нет стандартных решений. В каждом конкретном случае применяют свой подход (метод) к решению задачи. Особенно трудны задачи нелинейного и динамического программирования.

Следует иметь в виду, что при решении задач оптимизации строительного производства могут возникнуть случаи, когда вследствие оптимизации какого-либо процесса может ухудшиться другая. Поэтому необходимо соблюдать комплексность решения с учетом всех особенностей процесса и смежных его факторов. Рассматривая задачу по этапам, необходимо анализировать в целом обстановку, которая складывается в результате оптимизации исследуемого процесса.

Одним из вероятностно-статистических методов оптимизации процессов, применяемых в последнее время в строительстве, являются методы, основанные на теории массового обслуживания (ТМО). ТМО имеет целью отыскать оптимальные условия, т. е. обеспечить эффективность работы системы «требование — обслуживание».

Под обслуживанием понимают удовлетворение в потребности какой-либо заявки. Например, погрузка щебня в карьере в автомобиле-самосвалы. В этой системе в качестве требования выступает подача под погрузку автомобилей в карьер по заявкам, в качестве обслуживания — погрузка щебня средствами погрузки (экскаваторы, автопогрузчики, транспортеры и др.).

Таким образом, в ТМО система состоит из числа (потока) требований, обслуживающего прибора (аппарата) и выходящего потока. В зависимости от условий функционирования системы число требований создает очередь на обслуживание. Так, при избытке

автомобилей неизбежно возникают простои на погрузку перескаватером.

Основными характеристиками ТМО являются:

интенсивность поступления требований или заявок на обслуживание, λ ; интенсивность обслуживания (пропускная способность прибора обслуживания), μ ; коэффициент использования системы

$\psi = \frac{\lambda}{\mu}$; время ожидания в очереди до обслуживания, t_0 ; длительность обслуживания, t_1 ; время обслуживания в системе, $t_{об}$; число требований в очереди, n ; математическое ожидание числа требований в системе n_c .

Эти характеристики имеют следующие соотношения:

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{\mu}; t_{об} = t_0 + \bar{t}_1; \bar{n} = \bar{n}_c \psi; \bar{t}_0 = \frac{\bar{n}}{\lambda}. \quad (3.73)$$

Индекс «—» означает, что принимаются средние значения; λ , t_1 , t_0 , n , как правило, принимают случайные значения. Чаще всего распределение времени обслуживания по длительности выражается показательным законом.

В ТМО $\psi < 1$, т. е. интенсивность обслуживания выше интенсивности требования. Тем не менее возникает очередь на обслуживание, поскольку $t_{об}$ по ряду причин величина переменная, а интервал между обслуживанием неритмичен. В результате, несмотря на то что $\mu > \lambda$, возникают очереди.

Задачей ТМО в конечном счете является установление наиболее достоверных зависимостей между интенсивностью потока требований и производительностью (пропускной способностью) прибора их количеством и эффективностью обслуживания системы.

Показателями эффективности функционирования системы могут быть t_0 , t_1 , $t_{об}$, приведенная стоимость и др.

Теория массового обслуживания базируется на анализе случайных процессов. При решении тех или иных практических задач в каждом случае принимаются индивидуальные решения.

В качестве примера рассмотрим случай обслуживания асфальтобетонного смесителя на АБЗ автомобилями-самосвалами. Имеется система «смеситель — автосамосвалы». При обычном расчете требуемое количество автомобилей равно $N_a = \frac{t_1}{t_2}$, где t_1 — полное время одного цикла работы автосамосвала; t_2 — время погрузки самосвала.

Это выражение справедливо только при строгом соблюдении графика работы, цикличности подачи автомобиля, высокой надежности работы смесителя и самосвалов. Однако на практике такой синхронной работы не наблюдается. Время t_1 цикла автосамосвала неодинаковое и изменяется на 100—200 % в меньшую и большую сторону от среднего значения. Время погрузки также не одинаково

Таким образом, рассматриваемая система не является конвейерной. Она функционирует как система массового обслуживания, поскольку поток требований и обслуживание этого потока базируется на случайных воздействиях. Следовательно, анализ системы может быть выполнен методами теории вероятностей.

Анализ системы «смеситель-автосамосвал» показывает, что использование обычных методов расчета автомобилей приводит к тому, что смеситель используют неполностью (максимум до 75 %), а простои под погрузкой достигают 10 %.

С увеличением процента использования смесителя возрастает потребность в автомобилях. Поэтому для выбора оптимального соотношения в системе «смеситель — автосамосвалы» необходимо учитывать экономические критерии.

Для оптимизации процессов используют методы теории игр, которая рассматривает развитие процессов как случайные ситуации. Теория игр — это математическая теория конфликтов. Конфликт заключается в том, что интересы двух сторон не совпадают (борьба интересов) или стороны преследуют противоположные цели. Примером конфликтной ситуации являются спортивные игры. Игрок выбирает такую совокупность правил поведения (стратегию), которая обеспечивает ему желаемый результат — выигрыш. Как правило, теория игр рассматривает конфликтные ситуации, при которых приходится принимать решения с частным или полным отсутствием данных об обстановке. Поэтому могут быть и случайные ходы, эффект которых можно оценить в среднем математическим ожиданием. Результат игры оценивают количественными показателями или условными числами: выигрыш +1, ничья 0, проигрыш —1.

Методы теории игр применяются не только для исследования в буквальном понятии конфликтных ситуаций, но и для решения задач, в которых, например, в качестве «противника» выступает природа. Такие задачи возникают при строительстве различных сооружений, организации работ, организации транспортных процессов в сельском хозяйстве, метеорологии и др.

С помощью теории игр можно оценивать наиболее благоприятные и неблагоприятные ситуации и на основе полученных данных принять оптимальное для данных условий решение. В теории игр важное значение имеет понятие стратегии, под которой подразумевают правила поведения каждой стороны в ответ на действие другой. Цель игры — обеспечение выигрыша.

Чаще применяется наиболее полно разработанная теория парной игры, когда исследуется задача с двумя противоположными сторонами A и B . Если допустить, что каждая из сторон придерживается оптимальных стратегий, то они могут рассчитывать на равновесный средний выигрыш, называемый ценой игры γ . Решить игру — значит найти пару оптимальных стратегий для A и B и цену игры. Обычно расчеты ведут по принципу «осторожности», т. е. находят такую стратегию, когда сторона A получает наилучший результат

при наихудших действиях стороны B . Этот принцип является основным в теории игр, он обеспечивает определенный запас в инженерных расчетах.

Пример. Строительное управление планирует разработку грунта в зимний период. Имеется два варианта разработки, т. е. две стратегии: A_1 — в мерзлом состоянии мощными землеройными машинами; A_2 — менее мощными машинами, в непромерзшем состоянии, используя снег как уплотнитель ограничивающий промерзание грунта на заранее установленную допустимую глубину. В качестве противника выступает природа. Она имеет свою стратегию: B_2 — морозы наступают после выпадания снега (грунт промерзает на небольшую глубину); B_1 — сильные морозы наступают до выпадания снега

Таблица 3.4

Стратегия A	Стратегия		
	B_1	B_2	Минимумы строк
A_1	$a_{11} = -7$	$a_{12} = -8$	-8
A_2	$a_{21} = -12$	$a_{22} = -4$	-12
Максимумы столбиков	-7	-4	

грунт сразу же промерзает на большую глубину). В этой игре ценой будет экономический эффект.

На основе анализа климатических условий, опыта работы строительной организации за прошлые годы и ее возможностей составлена матрица (табл. 3.4) Цифры в матрице означают удорожание земляных работ в процентах при выполнении их в зимнее время. Анализ матрицы показывает, что наиболее надежной и эффективной стратегией строительной организации является применение мощных землеройных машин, в этом случае удорожание составляет 7—8 %, что в 1,5 раза меньше случая a_{21} (12 %). Вместе с тем заманчиво обеспечить и минимальное возможное удорожание работ на 4 %, что соответствует условию a_{22} (слабые морозы и машины небольшой мощности). Количественный анализ этой матрицы показал, что при благоприятных погодных условиях вероятность наименьшего удорожания работ на 4 % равна 55 %, а при неблагоприятных условиях — не превышает 12 %. Поэтому оптимальной является такая стратегия, когда производят работы в мерзлом грунте (без утепления снегом), чем создадут необходимые резервы для успешного выполнения работ в любых климатических условиях.

В процессе проведения системного анализа наряду с определением экстремальных условий исследуемых моделей объектов исследования выявляют другие закономерности в их поведении, что обуславливается целями исследования. После окончания этой работы формулируют выводы и принимают решения об использовании полученных результатов в дальнейших исследованиях и деятельности людей. Выше были изложены основные математические методы исследования. Естественно, что эффективно могут быть использованы и другие методы. В каждом конкретном случае читатель более глубоко может ознакомиться с ними в специальной литературе.

ГЛАВА 4

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Методология эксперимента

Наиболее важной составной частью научных исследований являются эксперименты.

Экспериментальное исследование — один из основных способов получить новые научные знания. В его основе лежит эксперимент, представляющий собой научно поставленный опыт или наблюдение явления в точно учитываемых условиях, позволяющих следить за его ходом, управлять им, воссоздавать его каждый раз при повторении этих условий. От обычного, обыденного пассивного наблюдения эксперимент отличается активным воздействием исследователя на изучаемое явление.

Основная цель эксперимента — проверка теоретических положений (подтверждение рабочей гипотезы), а также более широкое и глубокое изучение темы научного исследования. Эксперимент должен быть проведен по возможности в кратчайший срок с минимальной затратой материальных и денежных средств при самом высоком качестве полученных результатов.

Различают эксперименты естественные и искусственные. *Естественные* эксперименты характерны для социальных явлений (социальный эксперимент) в обстановке, например, производства, быта и т. п. *Искусственный* эксперимент широко применяется во многих отраслях и в первую очередь в технических науках. В этом случае изучают явление, изолированное до требуемой степени, чтобы оценить его в количественном и качественном отношении. Иногда возникает необходимость провести поисковые экспериментальные исследования. Они необходимы в том случае, если затруднительно классифицировать все факторы, влияющие на изучаемое явление вследствие отсутствия достаточных предварительных данных. На основе предварительного эксперимента строится программа исследований в полном объеме.

Экспериментальные исследования делятся на лабораторные и производственные.

Лабораторные опыты проводят с применением типовых приборов, специальных моделирующих установок, стендов, оборудования

и т. д. Эти исследования позволяют наиболее полно и добросовестно, с требуемой повторностью изучить влияние одних характеристик при варьировании других. Лабораторные опыты при достаточно полном научном обосновании эксперимента (математическое планирование) позволяют получить хорошую научную информацию с минимальными затратами. Однако такие эксперименты не всегда полностью моделируют реальный ход изучаемого процесса, поэтому возникает потребность в проведении производственных экспериментов.

Производственные экспериментальные исследования имеют целью изучить процесс в реальных условиях с учетом воздействия различных случайных факторов производственной среды. Такие эксперименты проводят на строящихся объектах, заводах, эксплуатируемых дорогах, зданиях и сооружениях. Вследствие, как правило, громоздкости опыта требуется особо тщательное продумывание и планирование эксперимента. Важную роль играет обоснование минимального потребного количества измерений. К производственным исследованиям относятся также специальные полевые экспедиции по обследованию эксплуатируемых объектов. Например, для изучения процессов деформаций и разрушений конструкций дорог создают специальные экспедиции, которые обследуют конструкции в осенние и весенние периоды повышенного увлажнения. Для изучения службы мостов создают специальные мостовые испытательные экспедиции, которые на основе статических и динамических нагрузений исследуют напряженно-деформируемое состояние элементов мостов.

Одной из разновидностей производственных экспериментов является собирание материалов в организациях, которые накапливают по стандартным формам те или иные данные. Ценность этих материалов заключается в том, что они систематизированы за многие годы по единой методике. Такие данные хорошо поддаются обработке методами статистики и теории вероятностей.

В ряде случаев производственный эксперимент эффективно проводится методом анкетирования. Для изучаемого процесса составляют тщательно продуманную методику. Основные данные собирают методом опроса производственных организаций по предварительно составленной анкете. Этот метод позволяет собрать очень большое количество данных наблюдений или измерений по изучаемому вопросу. К результатам анкетных данных следует относиться с особой тщательностью, поскольку они не всегда содержат достаточно надежные данные. Особую роль здесь играет метод статистической очистки измерений.

Производственные экспериментальные исследования могут быть заменены опытами на специальных полигонах. Полигонные испытания позволяют производить исследования без нарушения технологического производственного ритма, что повышает эффективность использования применяемого в эксперименте оборудования, машин и приборов.

В зависимости от темы научного исследования объем экспериментов может быть различным. В лучшем случае для подтверждения рабочей гипотезы достаточно лабораторного эксперимента, в худшем — приходится проводить серию экспериментальных исследований: предварительные (поисковые), лабораторные, полигонные, на эксплуатируемом объекте.

В ряде случаев на эксперимент затрачивается много средств. Научный работник производит огромное количество наблюдений и измерений, получает множество диаграмм, графиков, выполняет неоправданно большое количество испытаний. На обработку и анализ такого эксперимента затрачивается много времени. Иногда оказывается, что выполнено много лишнего, ненужного. Все это возможно, когда экспериментатор четко не обосновал цель и задачи эксперимента. В других случаях результаты длительного обширного эксперимента не полностью подтверждают рабочую гипотезу научного исследования. Как правило, это также свойственно для эксперимента, четко не обоснованного целью и задачами. Поэтому, прежде чем приступить к экспериментальным исследованиям, необходимо разработать методологию эксперимента.

Методология эксперимента — это общие принципы, структура эксперимента, его постановка и последовательность выполнения экспериментальных исследований. Методология эксперимента включает в себя следующие основные этапы: разработку плана-программы эксперимента; оценку измерений и выбор средств для проведения эксперимента; проведение эксперимента; обработку и анализ экспериментальных данных, установление адекватности.

Приведенное количество этапов справедливо для традиционного эксперимента. Наряду с этим широко применяют математическую теорию эксперимента, позволяющую резко повысить точность и уменьшить объем экспериментальных исследований. В этом случае методология эксперимента включает такие этапы: разработку плана-программы эксперимента, оценку измерений и выбор средств для проведения эксперимента, математическое планирование эксперимента с одновременным проведением экспериментального исследования, обработкой и анализом полученных данных.

§ 2. Разработка плана-программы эксперимента

План-программа включает наименование темы исследования, рабочую гипотезу, методику эксперимента, перечень необходимых материалов, приборов, установок, список исполнителей эксперимента, календарный план работ и смету на выполнение эксперимента. В ряде случаев включают работы по конструированию и изготовлению приборов, аппаратов, приспособлений, методическое их обследование, а также программы опытных работ на полигонах, строительстве и т. п.

Основу плана-программы составляет методика эксперимента. Методика представляет собой систему приемов или способов для последовательного наиболее эффективного экспериментального исследования и включает в себя: цель и задачи эксперимента; выбор варьирующих факторов; обоснование средств и потребного количества измерений; описание проведения эксперимента, обоснование способов обработки и анализа результатов эксперимента.

Определение цели и задачи эксперимента — один из наиболее важных этапов. На основе анализа информации, гипотезы и теоретических разработок обосновывают цель и задачи эксперимента. Вся научная информация позволяет в той или иной степени судить об ожидаемых закономерностях изучаемого процесса, а следовательно, и определить задачи эксперимента. Четко, конкретно обоснованные задачи — это большой вклад в их решение. Количество задач не должно быть слишком большим (3—4 задачи), в большинстве исследований их может быть 8—10.

Выбор варьирующих факторов — это установление основных и второстепенных характеристик, влияющих на исследуемый процесс. Вначале анализируют расчетные (теоретические) схемы процесса. На основе этого классифицируют все факторы и составляют из них убывающий по важности для данного эксперимента ряд. Правильный выбор основных и второстепенных факторов играет важную роль в эффективности эксперимента, поскольку эксперимент сводится к нахождению зависимостей между этими факторами. В отдельных случаях трудно сразу выявить роль основных и второстепенных факторов. При этом необходимо выполнить небольшое количество предварительных поисковых опытов.

Основным принципом установления степени важности характеристики является ее роль в исследуемом процессе. Для этого изучают процесс в зависимости от какой-то одной переменной при остальных постоянных. Такой принцип проведения эксперимента оправдывает себя только в тех случаях, когда переменных характеристик мало (1—3). Если же переменных величин много, целесообразен принцип многофакторного анализа, рассматриваемый в главе 5.

Обоснование средств измерений — это выбор необходимых для наблюдений и измерений приборов, оборудования, машин, аппаратов и др. Экспериментатор должен быть хорошо ознакомлен с выпускаемой в стране измерительной аппаратурой. Ежегодно издаются каталоги на средства измерения, по которым можно заказать выпускаемые отечественным приборостроением те или иные средства измерений. В первую очередь используют стандартные серийно выпускаемые машины и приборы, работа на которых регламентируется инструкциями, ГОСТами и другими официальными документами.

В отдельных случаях возникает потребность в создании уникальных приборов, аппаратов, установок, стендов, машин для разработки темы. При этом разработка и конструирование приборов

и других средств должны быть тщательно обоснованы теоретическими расчетами и практическими соображениями о возможности изготовления оборудования. Создавая новые приборы, необходимо использовать готовые узлы выпускаемых или реконструировать существующие приборы. Очень ответственной частью является установление точности измерений и погрешностей. Методы измерений должны базироваться на законах специальной науки — метрологии, изучающей средства и методы измерений.

При экспериментальном исследовании одного и того же процесса (наблюдения и измерения) повторные отсчеты на приборах, как правило, не одинаковы. Отклонения объясняются различными причинами — неоднородностью свойств изучаемого тела (грунт, материал, конструкция и т. д.), несовершенностью приборов и классом их точности, субъективными особенностями экспериментатора 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 потребным 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 наиболее объективных результатов при минимальных затратах времени и средств.

В методике подробно проектируют процесс проведения эксперимента. В начале составляют последовательность (очередность) проведения операций измерений и наблюдений. Затем тщательно описывают каждую операцию в отдельности с учетом выбранных средств для проведения эксперимента. Большое внимание уделяют методам контроля качества операций, обеспечивающих при минимальном (ранее установленном) количестве измерений высокую надежность и заданную точность. Разрабатывают формы журналов для записи результатов наблюдений и измерений.

Важным разделом методики является выбор методов обработки и анализа экспериментальных данных. Обработка данных сводится к систематизации всех цифр, классификации, анализу. Результаты экспериментов должны быть сведены в удобочитаемые формы записи — таблицы, графики, формулы, номограммы, позволяющие быстро сопоставлять полученные результаты.

Особое внимание в методике должно быть уделено математическим методам обработки и анализу опытных данных — установлению эмпирических зависимостей, аппроксимации связей между варьируемыми характеристиками, нахождению критериев и доверительных интегралов и др. Далее определяют объем и трудоемкость экспериментальных исследований, которые зависят от глубины теоретических разработок, степени точности принятых средств измерений. Чем четче сформулирована теоретическая часть исследо-

вания, тем меньше объем эксперимента. Возможны три случая проведения эксперимента.

1. Теоретически получена аналитическая зависимость, которая однозначно определяет исследуемый процесс. Например $y = 3e^{-2x}$. В этом случае объем эксперимента для подтверждения данной зависимости минимален, поскольку функция однозначно определяется экспериментальными данными.

2. Теоретическим путем установлен только характер зависимости. Например, $y = ae^{-bx}$. В этом случае задано семейство кривых. Экспериментальным путем необходимо определить a и b . При этом объем эксперимента возрастает.

3. Теоретически не удалось получить каких-либо зависимостей. Разработаны только предположения о качественных закономерностях процесса. Во многих случаях целесообразен поисковый эксперимент. Объем экспериментальных работ возрастает. Здесь уместен метод математического планирования эксперимента.

На объем и трудоемкость существенно влияет вид эксперимента. Полевые эксперименты, как правило, имеют большую трудоемкость. После установления объема экспериментальных работ составляют перечень необходимых средств измерений, объем материалов, список исполнителей, календарный план и смету расходов. План-программу рассматривает научный руководитель, обсуждают в научном коллективе и утверждают в установленном порядке.

§ 3. Статистические методы оценки измерений в экспериментальных исследованиях

Измерения являются основной составной частью любого эксперимента. От тщательности измерений и последующих вычислений зависят результаты эксперимента. Поэтому каждый экспериментатор должен знать закономерности измерительных процессов: уметь правильно измерить изучаемые величины; оценить погрешности при измерениях; правильно, с требуемой точностью вычислить значения величин и их минимальное количество; определить наилучшие условия измерений, при которых ошибки будут наименьшими, и произвести общий анализ результатов измерений.

Измерение — это процесс нахождения какой-либо физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств, это познавательный процесс сравнения величины чего-либо с известной величиной, принятой за единицу (эталон).

Теорией и практикой измерений занимается специальная наука — метрология.

Измерения бывают статическими, когда измеряемая величина не изменяется, и динамическими, когда измеряемая величина меняется (например, измерение пульсирующих процессов).

Кроме того, измерения разделяются на прямые и косвенные.

При прямых измерениях искомую величину устанавливают непосредственно из опыта, при косвенных — функционально от других величин, определенных прямыми измерениями: $b = f(a)$, где b найдено с помощью косвенных измерений, a — с помощью прямых измерений. Различают три класса измерений.

Особо точные — эталонные измерения с максимальной возможной точностью. Этот класс почти не применяется в экспериментальных исследованиях строительного производства. Высокоточные — измерения, погрешность которых не должна превышать заданных значений. Этот класс измерений используют при некоторых наиболее отечественных экспериментах, а также для контрольно-поверочных измерений приборов. Технические измерения, в которых погрешность определяется особенностями средств измерения.

Различают также абсолютные измерения и относительные. **Абсолютные** — это прямые измерения в единицах измеряемой величины, например абсолютная влажность грунта w в процентах. **Относительные** — измерения, представленные отношением измеряемой величины к одноименной величине, принимаемой за сравнимую. Например, относительная влажность грунта w/w_t , где w_t — абсолютная влажность грунта границы текучести. **Погрешность измерения** — это алгебраическая разность между действительным значением измеряемой величины x_g и полученным при измерении x_i : $\epsilon = x_g - x_i$ (4.1). Измерение x_g — это такое значение измеряемой величины, которое заведомо точнее, чем получаемое при измерении. С некоторым допущением x_g можно считать истинным или точным значением величины.

Значение ϵ называют *абсолютной ошибкой измерения*. *Относительная ошибка* измерения (в %)

$$\delta = \pm \frac{\epsilon}{x_g} 100. \quad (4.2)$$

Точность измерения — это степень приближения измерения к действительному значению величины.

Достоверность измерения показывает степень доверия к результатам измерения, т. е. вероятность отклонений измерения от действительных значений.

Чтобы повысить точность и достоверность измерений, необходимо уменьшить погрешности. Погрешности при измерениях возникают вследствие ряда причин: несовершенства методов и средств измерений, недостаточно тщательного проведения опыта, влияния различных внешних факторов в процессе опыта, субъективных особенностей экспериментатора и др. Эти причины являются результатом действия многих факторов.

Погрешности классифицируют на систематические и случайные.

Систематические — это такие погрешности измерений, которые при повторных экспериментах остаются постоянными (или

изменяются по известному закону). Если численные значения эти погрешностей известны, их можно учесть во время повторных измерений.

Случайными называют погрешности, возникающие чисто случайно при повторном измерении. Эти измерения не могут быть исключены как систематические. Однако при наличии многократных повторностей с помощью статистических методов можно исключить наиболее отклоняющиеся случайные измерения.

Разновидностью случайных погрешностей являются *грубые погрешности или промахи*, существенно превышающие систематические или случайные погрешности. Промахи и грубые погрешности вызваны, как правило, ошибками экспериментатора. Их легко обнаружить. В расчет эти погрешности не принимаются и при вычислении x_g их исключают. Таким образом, можно записать

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (4.3)$$

где ε_1 , ε_2 — систематические и случайные погрешности измерений.

В процессе эксперимента трудно отделить систематические погрешности от случайных. Однако при тщательном и многократном эксперименте все же можно исключить систематические погрешности (ошибки). Основная задача измерений заключается в том, чтобы получить по возможности результаты измерений с меньшими погрешностями. Ниже рассмотрены основные принципы и методы устранения систематических и случайных ошибок.

Систематические погрешности можно разделить на пять групп.

1-я — инструментальные погрешности, возникающие вследствие нарушения средств измерений дополнительных люфтов или трения, неточности градуировочной шкалы, износа и старения узлов и деталей средств измерения и т. п.

2-я — погрешности, которые возникают из-за неправильной установки средств измерений.

3-я — погрешности, возникающие в результате действия внешней среды: высоких температур воздуха, магнитных и электрических полей, атмосферного давления и влажности воздуха, вибрации и колебаний от движущегося транспорта и др.

4-я — субъективные погрешности, возникают вследствие индивидуальных физиологических, психофизиологических, антропологических свойств человека.

5-я — погрешности метода. Они появляются в результате небоснованного метода измерений (при различных упрощениях схем или функциональных зависимостей, отсутствии теоретических обоснований метода измерения, малом количестве повторностей и др.).

Систематические погрешности могут быть постоянными или переменными, увеличивающимися или уменьшающимися в процессе эксперимента. Их обязательно нужно исключать. Известны случаи, когда из-за наличия систематических погрешностей дела-

лись неправильные научные выводы из эксперимента. Систематические ошибки (погрешности) могут быть устранены следующими методами.

Часто от систематических погрешностей 1—5 групп можно избавиться до начала эксперимента путем регулировки или ремонта средств измерения, тщательной проверки установки средств измерений, устранения нежелательных воздействий внешней среды. Особое внимание должно быть уделено обоснованию теории и методики измерений. Одним из эффективных методов устранения систематических ошибок 1—3 групп является исключение их в процессе эксперимента. Основным принципом этого исключения является повторное измерение величин.

Применяют также метод замещения. При измерении x_i вместо исследуемого объекта устанавливают эталонированный, заранее измеренный с высокой точностью. Разность в измерениях позволит найти погрешность измерительного средства.

Если все же нельзя установить значение систематических погрешностей, то ограничиваются оценкой их границ.

Случайные погрешности. При проведении с одинаковой тщательностью тех или иных экспериментов результаты измерений одной и той же величины (даже с учетом известного закона систематических погрешностей), как правило, отличаются между собой. Как отмечалось выше, это свидетельствует о наличии случайных погрешностей.

Каждый экспериментатор, анализируя результаты измерений, должен уметь правильно оценить неизбежно возникающие случайные погрешности. К случайным ошибкам относят также, как уже известно, промахи и грубые погрешности.

Наиболее типичными причинами промахов являются ошибки при наблюдениях: неправильный отсчет по шкале измерительных приборов, описки (ошибки) при записи результатов измерений, различные манипуляции с приборами или их отдельными узлами (перестановка, замена блоков, проверка и др.). Грубые погрешности возникают вследствие неисправности приборов, а также внезапно изменившихся условий эксперимента.

Анализ случайных погрешностей основывается на *теории случайных ошибок*. Эта теория дает возможность с определенной гарантией вычислить действительное значение и оценить возможные ошибки, по которым судят о действительном значении искомой величины.

В основе теории случайных ошибок лежат предположения 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 ее величины, при бесконечно большом числе измерений истинное значение измеряемой величины равно среднеарифметическому значению всех результатов измерений: появление того или иного результата изме-

рения как случайного события описывается нормальным законом распределения.

Различают генеральную и выборочную совокупность измерений. Под генеральной совокупностью подразумевают все множество возможных значений измерений x_i или возможных значений погрешностей Δx_i . Для выборочной совокупности измерений n ограничено, и в каждом конкретном случае строго определяется. Обычно считают, что если $n > 30$, то среднее значение данной совокупности измерений \bar{x} достаточно 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 (заданную) точность и надежность измерения. Наряду с этим возникает необходимость исключить грубые ошибки ряда, определить достоверность полученных данных и др. Рассмотрим основные задачи.

Интервальная оценка с помощью доверительной вероятности
Для большой выборки и нормального закона распределения общепризнанной характеристикой измерения являются дисперсия D и коэффициент вариации

$$D = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}; \quad K_v = \frac{\sigma}{\bar{x}}. \quad (4.4)$$

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

Доверительным называется интервал значений x_i , в который попадает истинное значение x_d измеряемой величины с заданной вероятностью. Доверительной вероятностью (достоверностью) измерения называется вероятность P_d того, что истинное значение x_d измеряемой величины попадает в данный доверительный интервал. Эта величина определяется в долях единицы или в процентах. Необходимо установить вероятность того, что x_d попадет в зону $a \leq x_d \leq b$. Доверительная вероятность P_d описывается выражением

$$P_d = P(a < m(x) < b) = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{b - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - \bar{x}}{\sigma}\right) \right],$$

где $\Phi(t)$ — функция Лапласа, аргументом которой является отношение μ к среднеквадратичному σ , т. е. $t = \mu/\sigma$ (4.5), $\mu = b - \bar{x}$; $\mu = -(a - \bar{x})$, t — гарантийный коэффициент.

Функция $\Phi(t)$ — это интегральная функция Лапласа: $\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$. Численные значения $\Phi(t)$ приведены в табл. 4.1

Таблица 4.1

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,00	0,0000	0,75	0,5467	1,50	0,8664
0,05	0,0399	0,80	0,5763	1,55	0,8789
0,10	0,0797	0,85	0,6047	1,60	0,8904
0,15	0,1192	0,90	0,6319	1,65	0,9011
0,20	0,1585	0,95	0,6579	1,70	0,9109
0,25	0,1974	1,00	0,6827	1,75	0,9199
0,30	0,2357	1,05	0,7063	1,80	0,9281
0,35	0,2737	1,10	0,7287	1,85	0,9357
0,40	0,3108	1,15	0,7419	1,90	0,9426
0,45	0,3473	1,20	0,7699	1,95	0,9488
0,50	0,3829	1,25	0,7887	2,00	0,9545
0,55	0,4177	1,30	0,8064	2,25	0,9756
0,60	0,4515	1,35	0,8230	2,50	0,9876
0,65	0,4843	1,40	0,8385	3,00	0,9973
0,70	0,5161	1,45	0,8529	4,00	0,9999

В этой задаче возможен другой вариант. На основе определенных данных установлена доверительная вероятность P_d . Очень часто ее принимают равной 0,90; 0,95; 0,9973. Необходимо установить точность измерений, т. е. доверительный интервал 2μ .

Поскольку $P_d = \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)$, то по табл. 4.1 обратным интерполированием можно определить половину доверительного интервала: $\mu = \sigma_{\text{arg}} \Phi(P_d) = \sigma t$ (4.6), где $\text{arg} \Phi(P_d)$ — аргумент функции Лапласа или при $n < 10$ Стьюдента (табл. 4.2). Доверительный интервал характеризует точность измерения данной выборки, а доверительная вероятность — достоверность измерения.

Пример. Выполнено 30 измерений прочности одежды участка автомобильной дороги. При этом средний модуль упругости одежды $\bar{E}_s = 170$ Мпа. Вычисленное значение среднеквадратичного отклонения оказалось $\sigma = 3,1$ Мпа. Определить точность и достоверность эксперимента.

Требуемую точность измерений определим для разных уровней доверительной вероятности, приняв соответственно значения $\text{arg} \Phi(t)$ по табл. 4.1: $P_d = 0,9; 0,95; 0,9973$; $\mu = \pm 3,1 \cdot 1,65 = \pm 5,1$; $\pm 3,1 \cdot 2,0 = 6,2$; $\pm 3,1 \cdot 3 = 9,3$ Мпа.

Следовательно, для данного средства и метода доверительный интервал возрастает примерно в два раза, если P_d увеличить только на 10%. Необходимо определить достоверность измерений для установленного доверительного интервала, например $\mu = \pm 7$ Мпа. По

формуле (4.5) $t = \frac{\mu}{\sigma} = 7/3,1 = 2,26$. По табл. 4.1 для $t = 2,26$ определяем $P_d = 0,8$. Это означает, что в заданный доверительный интервал из 100 измерений не попадает только три.

Значение $1 - \Phi(t)$ называют уровнем значимости. Из него следует, что при нормальном законе распределения погрешность, превышающая доверительный интервал, будет встречаться один раз из n_d измерений:

$$n_d = \frac{P_d}{1 - P_d} \quad (4.7)$$

или иначе приходится браковать одно из n_d измерений.

Пример. Используя данные приведенного выше примера, вычислить количество измерений, из которых одно измерение превышает доверительный интервал.

По формуле (4.7) имеем для $P_d = 0,9$; $n = 0,9/(1 - 0,9) = 9$ измерений. Для P_d , равной 0,95 и 0,9973, соответственно 19 и 36 измерений.

Установление минимального количества измерений. Все экспериментальные исследования в технике базируются на измерениях. Для проведения опытов с необходимой точностью и достоверностью необходимо знать то количество измерений, при которых экспериментатор уверен в положительном исходе. Однако чрезмерно большое количество измерений требует значительных затрат времени и ресурсов. В связи с этим одной из первоочередных задач при статистических методах оценки является установление минимального, но достаточного для данных условий числа измерений.

Задача сводится к установлению минимального объема выборки (числа измерений) N_{\min} при заданных значениях доверительного интервала 2μ и доверительной вероятности. При выполнении измерений необходимо знать их точность Δ , которую обычно характеризуют σ_0 — среднееарифметическое значение среднеквадратического отклонения σ : $\sigma_0 = \sigma/\sqrt{n}$; $\Delta = \sigma_0/\sqrt{x}$ (4.8). Значение σ_0 часто называют средней ошибкой. Доверительный интервал ошибки измерения Δ определяется аналогично, как и для измерений $\mu = t\sigma_0$. С помощью t легко определить доверительную вероятность ошибки измерения из табл. 4.1.

В исследованиях часто по заданной точности Δ и доверительной вероятности измерения определяют минимальное количество измерений, гарантирующих требуемые значения Δ и $\Phi(t)$.

Аналогично уравнению (4.6) с учетом (4.8) запишем $\mu = \sigma_{\text{арг}}\Phi(P_d) = \sigma_0/\sqrt{nt}$ (4.9). Отсюда, полагая $N_{\min} = n$, имеем

$$N_{\min} = \frac{\sigma^2 t^2}{\sigma_0^2} = \frac{K_B^2 t^2}{\Delta^2} \quad (4.10)$$

Здесь K_B — коэффициент вариации (изменчивости), %; Δ — точность измерений, %. Для вычисления N_{\min} может быть принята следующая последовательность.

1. Проводят предварительный эксперимент с количеством измерений n , которое составляет в зависимости от трудоемкости опыта от 20 до 50.

2. Вычисляют среднеквадратичное отклонение σ (4.4).

3. В соответствии с поставленными задачами эксперимента устанавливают требуемую точность измерений μ , Δ , которая должна быть не менее точности прибора.

4. Устанавливают нормированное отклонение t , значение которого обычно задают; оно зависит также от точности метода. Например, при большой точности измерений можно принять $t = 3,0$, при малой — $t = 2,0$. Так, измеряя влажность грунта и материалов, можно принять $t = 2$, плотность, прочность, размеры тел — $t = 2,5-3,0$.

5. Из (4.9) определяют N_{\min} . В дальнейшем в процессе эксперимента число измерений не должно быть меньше N_{\min} .

Пример. При приемке сооружений комиссия в качестве одного из параметров замеряет их ширину. Согласно временной инструкции требуется выполнить 25 измерений; допускаемое отклонение параметра $\pm 0,1$ м. Необходимо определить, с какой достоверностью комиссия оценивает данный параметр. Предварительно вычисленное значение $\sigma = 0,4$ м.

Согласно инструкции $\Delta = 0,1$ м. Из уравнения (4.10) можно записать $t = \sqrt{n} \cdot \frac{\Delta}{\sigma} = \sqrt{25} \cdot \frac{0,1}{0,4} = 1,25$. В соответствии с табл. 4.1

доверительная вероятность для $t = 1,25$ $P_d = 0,79$. Это низкая вероятность. Погрешность, превышающая доверительный интервал $2\mu = 0,2$ м, согласно выражению (4.7) будет встречаться один раз из $0,79/(1 - 0,79) = 3,76$, т. е. из 4 измерений. Это недопустимо. Вычислим минимальное количество измерений с доверительной вероятностью P_d , равной 0,9 и 0,95. По формуле (4.10) имеем $N_{\min} = 0,4^2 \cdot 1,65^2/0,1^2 = 43$ измерения при $P_d = 0,90$ и 64 измерения при $P_d = 0,95$.

Оценки измерений с помощью σ и σ_0 по приведенным методам справедливы при $n > 30$. Для нахождения границ доверительного интервала при малых значениях применяют метод, предложенный в 1908 г. английским математиком В. С. Госсетом (псевдоним Стьюдент). Кривые распределения Стьюдента в случае $n \rightarrow \infty$ (практически при $n > 20$) переходят в кривые нормального распределения (рис. 4.1).

Для малой выборки доверительный интервал $\mu_{\text{ст}} = \sigma_0 \alpha_{\text{ст}}$ (4.11), где $\alpha_{\text{ст}}$ — коэффициент Стьюдента, принимаемый по табл. 4.2 в зависимости от значения доверительной вероятности $\Phi_{\text{ст}}$.

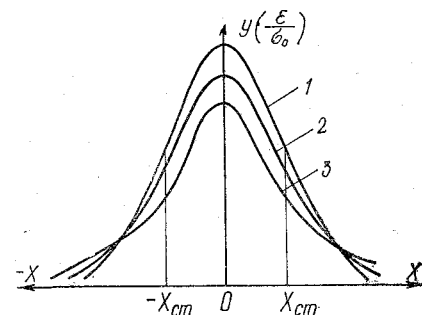


Рис. 4.1. Кривые распределения Стьюдента для различных значений n : 1 — $n \rightarrow \infty$; 2 — $n = 10$; 3 — $n = 2$

Таблица 4.2.

n	Значение $\alpha_{ст}$ при P_d					
	0,80	0,90	0,95	0,99	0,995	0,999
2	3,080	6,31	12,71	63,70	127,30	637,20
3	1,886	2,92	4,30	9,92	14,10	31,60
4	1,638	2,35	3,18	5,84	7,50	12,91
5	1,533	2,13	2,77	4,60	5,60	8,61
6	1,476	2,02	2,57	4,03	4,77	6,86
7	1,440	1,94	2,45	3,71	4,32	5,96
8	1,415	1,90	2,36	2,50	4,03	5,40
9	1,397	1,86	2,31	3,36	3,83	5,04
10	1,383	1,83	2,26	3,25	3,69	4,78
12	1,363	1,80	2,20	3,11	3,50	4,49
14	1,350	1,77	2,16	3,01	3,37	4,22
16	1,341	1,75	2,13	2,95	3,29	4,07
18	1,333	1,74	2,11	2,90	3,22	3,96
20	1,328	1,73	2,09	2,86	3,17	3,88
30	1,316	1,70	2,04	2,75	3,20	3,65
40	1,306	1,68	2,02	2,70	3,12	3,55
50	1,298	1,68	2,01	2,68	3,09	3,50
60	1,290	1,67	2,00	2,66	3,06	3,46
∞	1,282	1,64	1,96	2,58	2,81	3,29

Зная $\mu_{ст}$, можно вычислить действительное значение изучаемой величины для малой выборки: $x_d = \bar{x} \pm \mu_{ст}$ (4.12). Возможна иная постановка задачи. По n известных измерений малой выборки необходимо определить доверительную вероятность P_d при условии, что погрешность среднего значения не выйдет за пределы $\pm \mu_{ст}$. Задачу решают в такой последовательности. Вычисляют среднее значение \bar{x} , σ_0 и $\alpha_{ст} = \frac{\mu_{ст}}{\sigma_0}$. С помощью величины $\alpha_{ст}$, известного n и табл. 4.2. определяют доверительную вероятность.

Исключение грубых ошибок ряда. Появление этих ошибок вполне вероятно, а наличие их ощутимо влияет на результат измерений. Так, уже одна грубая ошибка в 25-ти измерениях и менее искажает экспериментальные данные. При анализе эксперимента необходимо прежде всего исключить грубые ошибки. Однако прежде чем исключить то или иное измерение, необходимо убедиться, что это действительно грубая ошибка, а не отклонение вследствие статистического разброса. Известно несколько методов определения грубых ошибок статистического ряда. Наиболее простым способом исключения из ряда резко выделяющегося измерения является правило трех сигм. Разброс случайных величин от среднего значения не превышает $x_{max, min} = \bar{x} \pm 3\sigma$ (4.13).

Более достоверными являются методы, базируемые на использовании доверительного интервала. Пусть имеется статистический

ряд малой выборки, подчиняющийся закону нормального распределения. При наличии грубых ошибок критерии их появления

$$\beta_1 = \frac{x_{max} - \bar{x}}{\sigma \sqrt{\frac{n-1}{n}}}; \quad \beta_2 = \frac{\bar{x} - x_{min}}{\sigma \sqrt{\frac{n-1}{n}}}, \quad (4.14)$$

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

Таблица 4.3

n	β_{max} при P_d			n	β_{max} при P_d		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
3	1,41	1,41	1,41	15	2,33	2,49	2,80
4	1,64	1,69	1,72	16	2,35	2,52	2,84
5	1,79	1,87	1,96	17	2,38	2,55	2,87
6	1,89	2,00	2,13	18	2,40	2,58	2,90
7	1,97	2,09	2,26	19	2,43	2,60	2,93
8	2,04	2,17	2,37	20	2,45	2,62	2,96
9	2,10	2,24	2,46	25	2,54	2,72	3,07
10	2,15	2,29	2,54	30	2,61	2,79	3,16
11	2,19	2,34	2,61	35	2,67	2,85	3,22
12	2,23	2,39	2,66	40	2,72	2,90	3,28
13	2,26	2,43	2,71	45	2,76	2,95	3,33
14	2,30	2,46	2,76	50	2,80	2,99	3,37

Из табл. 4.3 приведены в зависимости от доверительной вероятности максимальные значения β_{max} , возникающие вследствие статистического разброса. Если $\beta_1 > \beta_{max}$, то значение x_{max} необходимо исключить из статистического ряда как грубую погрешность. При $\beta_2 < \beta_{max}$ исключается величина x_{min} . После исключения грубых ошибок определяют новые значения \bar{x} и σ из $n-1$ или $n-2$ измерений.

Второй метод установления грубых ошибок основан на использовании критерия В. И. Романовского и также применим для малой выборки. Методика выявления грубых ошибок сводится к следующему. Задаются доверительной вероятностью P_d , и по

Таблица 4.4

n	Значения q при P_d			
	0,95	0,98	0,99	0,995
2	15,56	38,97	77,96	779,7
3	4,97	8,04	11,46	36,5
4	3,56	5,08	6,53	14,46
5	3,04	4,10	5,04	9,43
6	2,78	3,64	4,36	7,41
7	2,62	3,36	3,96	6,37
8	2,51	3,18	3,71	5,73
9	2,43	3,05	3,54	5,31
10	2,37	2,96	3,41	5,01
12	2,29	2,83	3,23	4,62
14	2,24	2,74	3,12	4,37
16	2,20	2,68	3,04	4,20
18	2,17	2,64	3,00	4,07
20	2,15	2,60	2,93	3,98
∞	1,96	2,33	2,58	3,29

табл. 4.4 в зависимости от n находится коэффициент q . Вычисляют предельно допустимую абсолютную ошибку отдельного измерения $\epsilon_{пр} = \sigma q$ (4.15).

Если $\bar{x} - x_{\max} > \epsilon_{пр}$, то измерение x_{\max} исключают из ряда наблюдений.

Этот метод более требователен к очистке ряда.

При анализе измерений можно применять для приближенной оценки такую методику: вычислить по (4.4) среднеквадратичное измерение σ ; определить с помощью (4.8) σ_0 ; принять доверительную вероятность P_d и найти доверительные интервалы $\mu_{ст}$ из (4.11) окончательно установить действительное значение измеряемой величины x_d по формуле (4.12). Приведенная методика целесообразна лишь для второстепенных экспериментов. В случае более глубокого анализа экспериментальных данных рекомендуется следующая методика.

1. После получения экспериментальных данных в виде статистического ряда его анализируют. Проведя повторные измерения в одних и тех же условиях, предварительно исключают систематические ошибки (см. выше).

2. Анализируют ряд в целях обнаружения грубых ошибок промахов:

устанавливают подозрительные значения x_{\max} или x_{\min} ; определяют среднеквадратичное отклонение σ ; вычисляют по (4.14) критерии β_1, β_2 и сопоставляют с $\beta_{\max}, \beta_{\min}$ или $\epsilon_{пр}$, исключают при необходимости из статистического ряда x_{\max} или x_{\min} и получают новый ряд из новых членов.

3. Вычисляют среднеарифметическое \bar{x} , погрешности отдельных измерений $\bar{x} - x_i$ и среднеквадратичное очищенного ряда σ .

4. Находят среднеквадратичное σ_0 серии измерений, коэффициент вариации K_v .

5. При большой выборке задаются доверительной вероятностью $P_d = \Phi(t)$ или уравнением значимости $1 - P_d$ и по табл. 4.1 определяют t . При малой выборке ($n \leq 20$) в зависимости от принятой доверительной вероятности P_d и числа членов ряда n принимают коэффициент Стьюдента $\alpha_{ст}$; с помощью формулы (4.5) для большой выборки или (4.11) для малой выборки определяют доверительный интервал.

6. Устанавливают по (4.12) действительное значение исследуемой величины.

7. Оценивают относительную погрешность результатов серии измерений при заданной доверительной вероятности P_d : $\delta = \frac{\sigma_0 \alpha_{ст}}{\bar{x}} 100\%$ (4.16).

Если погрешность серии измерений соизмерима с погрешностью прибора $\epsilon_{пр}$, то границы доверительного интервала $\mu_{ст} =$

$$= \sqrt{\sigma_0^2 \alpha_{ст}^2 + \left[\frac{\alpha_0(\infty)}{3} \right]_A^2} \quad (4.17). \text{ Формулой (4.17) следует пользо}$$

ваться при $\alpha_{ст} \sigma_0 \leq 3\epsilon_{пр}$, если же $\alpha_{ст} \sigma_0 > 3\epsilon_{пр}$, то доверительный интервал вычисляют с помощью (4.4) или (4.12).

Пример. Имеется 18 измерений (табл. 4.5). Необходимо их проанализировать. Анализ средств и результатов измерений показал, что систематических ошибок в эксперименте не обнаружено.

Выясним, не содержат ли измерения грубых ошибок. Воспользуемся первым методом (критерий β_{\max}). Вычислим среднеарифметическое \bar{x} отклонение σ .

При этом удобно пользоваться следующей формулой: $\bar{x} = \bar{x} + (x_i - \bar{x}')/n$, где \bar{x}' — среднее произвольное число. Для вычисления \bar{x} примем произвольно $\bar{x}' = 75$. Тогда $x = 75 - \frac{3}{18} = 74,83$. В формуле (4.4) σ значение $(\bar{x} - x_i)^2$ можно найти упрощенным методом:

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

В данном случае $(x - x_i)^2 = 737 - \frac{3^2}{18} = 736,5$. По (4.4) $\sigma = \sqrt{\frac{736,5}{18-1}} = 6,58$, коэффициент вариации $K_v = \frac{6,58}{74,83} 100 = 8,8\%$. Определяем

$$\beta_1 = \frac{92 - 74,83}{\sqrt{\frac{18-1}{18}} 6,58} = 2,68.$$

Как видно из табл. 4.3, при доверительной вероятности $P_d = 0,99$ и $n = 18$ $\beta_{\max} = 2,90$. Поскольку $2,68 < \beta_{\max}$, измерение 92 не является грубым промахом. Если $P_d = 0,95$, $\beta_{\max} = 2,58$, то значение 92 следует исключить. Воспользуемся вторым методом. Для $n = 18$ по табл. 4.4 $q = 3,00$, если $P_d = 0,99$. Предельная допустимая абсолютная ошибка отдельного измерения при $P_d = 0,95$ $\epsilon_{пр} = 6,58 \cdot 2,17 = 14,3$; при $P_d = 0,99$ $\epsilon_{пр} = 6,58 \cdot 3,00 = 19,7$. Следовательно, если доверительная вероятность $0,95 \times (92 - 74,8) > 14,3$, измерение 92 необходимо из

ряда исключить. Если же доверительную вероятность принять равной $0,99$, то $(92 - 74,8) < 19,7$ и измерение 92 следует оставить.

Таблица 4.5

x_i	$x_i - \bar{x}$	$x_i - \bar{x}'$	$(x_i - \bar{x})^2$
67	-8	-7,83	64
67	-8	-7,83	64
68	-7	-6,83	49
68	-7	-6,83	49
69	-6	-5,83	36
70	-5	-4,83	25
71	-4	-3,83	16
73	-2	-1,83	4
74	-1	-0,83	1
75	0	+0,17	0
76	+1	+1,17	1
77	+2	+2,17	4
78	+3	+3,17	9
79	+4	+4,17	16
80	+5	+5,17	25
81	+6	+6,17	36
82	+7	+7,17	49
92	+17	+17,17	289
$\bar{x} = 74,83$	$\sum = -3$	Проверка $-46,5$	$\sum = 737$
		+46,5	

Если исследуется функция многих переменных, то

$$\epsilon_{\text{пр}} = \pm \sum_1^n \left| \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} dx_i \right|, \quad (4.21)$$

$$\delta_{\text{пр}} = \pm d \left| \ln(x_1, x_2, \dots, x_n) \right|. \quad (4.22)$$

В (4.21) и (4.22) под знаком суммы и дифференциала принимают абсолютные величины. Методика определения ошибок с помощью этих уравнений следующая: а) Определяют абсолютные и относительные ошибки аргументов (независимых переменных). Обычно величина $x_d \pm \epsilon$ каждого переменного измерена, следовательно, абсолютные ошибки для аргументов известны, т. е. $\epsilon_{x_1}, \epsilon_{x_2}, \dots, \epsilon_{x_n}$. Вычисляют относительные ошибки независимых переменных:

$$\delta_{x_1} = \frac{\epsilon_{x_1}}{x_d}; \quad \delta_{x_2} = \frac{\epsilon_{x_2}}{x_d}, \dots, \quad \delta_{x_n} = \frac{\epsilon_{x_n}}{x_d}. \quad (4.23)$$

б) Находят частные дифференциалы функции и по формуле (4.21) вычисляют $\epsilon_{\text{пр}}$ в размерностях функции $f(y)$. в) С помощью (4.22) вычисляют $\delta_{\text{пр}}$, %.

Определение оптимальной зоны измерений. Одной из задач теории измерений является установление оптимальных, т. е. наиболее выгодных, условий измерений. Оптимальные условия измерений в данном эксперименте имеют место при $\delta_{\text{пр}} = \text{min}$. Методика решения этой задачи сводится к следующему. Если исследуют функцию с одним неизвестным переменным, то вначале берут первую производную по x . Приравняв ее нулю, определяют x_1 . Если вторая производная по x_1 будет положительной, то функция (4.18) в случае $x = x_1$ имеет минимум. При наличии нескольких переменных поступают аналогичным образом, но берут производные по всем переменным x_1, \dots, x_n . В результате минимизации функций устанавливают оптимальную область измерений (интервал температур, напряжений, силы тока, угла поворота стрелки на приборе и т. д.) каждой функции $f(x_1, \dots, x_n)$, при которой относительная ошибка измерений минимальна: $\delta x_i = \text{min}$.

В исследованиях часто возникает вопрос о достоверности данных, полученных в опытах. Проиллюстрируем это примером. В исследованиях влияние вибрационного перемешивания на прочность бетона установлено: прочность контрольных образцов $R_1 = \bar{R}_1 \pm \sigma_0 = 20 \pm 0,5$ МПа, прочность бетонных образцов после вибрационного перемешивания $R_2 = \bar{R}_2 \pm \sigma_0 = 23 \pm 0,6$ МПа. Прирост прочности составляет 15%. Это упрочнение относительно небольшое, его можно отнести за счет разброса опытных данных. В этом случае проводят проверку на достоверность экспериментальных данных по условию $\bar{x}/\sigma_1 \geq 3$ (4.24). В данном случае проверяется

Если применить правило 3σ , то $x_{\text{max}, \text{min}} = 74,83 \pm 3 \cdot 6,58 = 94,6 - 55,09$, т. е. измерение 92 следует оставить.

В случае, когда измерение 92 исключается, $\bar{x} = 73,8$, $\sigma = 5,15$. Вычисляем среднеквадратичное отклонение для всей серии измерений: при $n = 18$ $\sigma_0 = \frac{6,58}{18} = 1,55$; при очищенном ряде $n = 17$ $\sigma_0 = \frac{5,15}{17} = 1,25$.

Определим границы доверительного интервала. Поскольку $n < 20$, ряд следует отнести к малой выборке. Поэтому доверительный интервал вычислим с применением коэффициента Стьюдента $\alpha_{\text{ст}}$. По табл. 4.2 принимаем доверительную вероятность 0,95 и $\alpha_{\text{ст}} = 2,11$ в случае $n = 18$; $\alpha_{\text{ст}} = 2,12$, если $n = 17$. Вычисляем доверительный интервал: при $n = 18$ $\mu_{\text{ст}} = \pm 1,55 \cdot 2,11 = 3,2$; при $n = 17$ $\mu_{\text{ст}} = \pm 1,25 \cdot 2,12 = 2,7$. Вычислим действительное значение изучаемой величины: при $n = 18$ $x_d = 74,8 \pm 3,2$; при $n = 17$ $x_d = 73,8 \pm 2,7$.

Оценим относительную погрешность результатов серии измерений: при $n = 18$ $\delta = \frac{3,2 \cdot 100}{74,8} = 4,3\%$; при $n = 17$ $\delta = \frac{2,7 \cdot 100}{73,8} = 3,7\%$.

Таким образом, если принять $x_i = 92$ за грубый промах, погрешность измерения уменьшается на 14%. Если необходимо определить минимальное количество измерений при их заданной точности, проводят серию опытов, вычисляют σ , затем с помощью формулы (4.10) определяют N_{min} .

В данном случае $\sigma = 6,58$, $K_b = 8,91\%$. Допустим, задана точность $\Delta = 5\%$ и 3% при доверительной вероятности $P_d = 95\%$, $\alpha_{\text{ст}} = 2,11$. Имеем при $\Delta = 5\%$ $N_{\text{min}} = \frac{8,91^2 \cdot 2,11^2}{5^2} = 14$; при $\Delta = 3\%$ $N_{\text{min}} = \frac{8,91^2 \cdot 2,11}{3^2} = 40$.

Таким образом, повышение точности измерения значительно увеличивает повторность опытов.

Определение ошибки функции. Во многих случаях в процессе экспериментальных исследований приходится иметь дело с косвенными измерениями. При этом неизбежно в расчетах применяют те или иные функциональные зависимости типа $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (4.18). Поскольку в данную функцию подставляют не истинные, а приближенные значения, то и окончательный результат также будет приближенным. В связи с этим одной из основных задач теории случайных ошибок является определение ошибки функции, если известны ошибки их аргументов.

При исследовании функции одного переменного предельные абсолютные $\epsilon_{\text{пр}}$ и относительные $\delta_{\text{пр}}$ ошибки (погрешности) вычисляют так: $\epsilon_{\text{пр}} = \pm \epsilon_x f'(x)$ (4.19), $\delta_{\text{пр}} = \pm d \ln(x)$ (4.20), где $f'(x)$ — производная функции $f(x)$; $d \ln$ — дифференциал натурального логарифма функции.

разница $\bar{x} = R_1 - R_2 = 3,0$ МПа. Ошибка измерения равна $\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, поэтому

$$\frac{R_1 - R_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} + \frac{3,0}{\sqrt{0,25 + 0,36}} = 3,84 > 3. \quad (4.25)$$

Следовательно, полученный прирост прочности является достоверным.

Проверка воспроизводимости измерений. Выше были рассмотрены общие методы проверки экспериментальных измерений на точность и достоверность. Ответственные эксперименты должны быть проверены также и на воспроизводимость результатов, т. е. на их повторяемость в определенных пределах измерений с заданной доверительной достоверностью. Суть такой проверки сводится к следующему. Имеется несколько параллельных опытов (серий). Для каждой серии вычисляют среднеарифметическое значение \bar{x}_i (n — число измерений в одной серии, принимаемое обычно равным 3—4). Далее вычисляют дисперсию D_i .

Чтобы оценить воспроизводимость, рассчитывают критерий Кохрена (расчетный):

$$K_{кр} = \frac{\max D_i}{\sum_1^m D_i}, \quad (4.26)$$

где $\max D_i$ — наибольшее значение дисперсий из числа рассматриваемых параллельных серий m ; $\sum_1^m D_i$ — сумма дисперсий m се-

Таблица 4.6

m	Значение $K_{кр}$ при $P_d = 0,95$ в зависимости от $q = n - 1$									
	1	2	3	4	5	6	8	10	16	36
2	0,99	0,97	0,93	0,90	0,87	0,85	0,81	0,78	0,73	0,66
3	0,97	0,93	0,79	0,74	0,70	0,76	0,63	0,60	0,54	0,47
4	0,90	0,76	0,68	0,62	0,59	0,56	0,51	0,48	0,43	0,36
5	0,84	0,68	0,60	0,54	0,50	0,48	0,44	0,41	0,36	0,26
6	0,78	0,61	0,53	0,48	0,44	0,42	0,38	0,35	0,31	0,25
7	0,72	0,56	0,48	0,43	0,39	0,37	0,34	0,31	0,27	0,23
8	0,68	0,51	0,43	0,39	0,36	0,33	0,30	0,28	0,24	0,20
9	0,64	0,47	0,40	0,35	0,33	0,30	0,28	0,25	0,22	0,18
10	0,60	0,44	0,37	0,33	0,30	0,28	0,25	0,23	0,20	0,16
12	0,57	0,39	0,32	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,17	0,14
15	0,47	0,33	0,27	0,24	0,22	0,20	0,18	0,17	0,14	0,11
20	0,39	0,27	0,22	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,11	0,08
24	0,34	0,29	0,19	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,07
30	0,29	0,20	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06
40	0,24	0,16	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,04
60	0,17	0,11	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,02
120	0,09	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01

рий. Рекомендуется m принимать от 2 до 4. Опыты считают воспроизводимыми при $K_{кр} \leq K_{кт}$ (4.27), $K_{кт}$ — табличное значение критерия Кохрена (табл. 4.6), принимаемое в зависимости от доверительной вероятности P_d и числа степеней свободы $q = n - 1$. Здесь m — число серий опытов; n — число измерений в серии.

По формуле (4.26)

$$K_{кр} = \frac{2,96}{2,96 + 2,0 + 0,4} = 0,55.$$

Вычислим число степеней свободы $q = n - 1 = 5 - 1 = 4$. Для $m = 3$ и $q = 4$ согласно табл. 4.6 значение критерия Кохрена $K_{кр} = 0,74$. Поскольку $0,55 < 0,74$, то измерения в эксперименте следует считать воспроизводимыми. Если бы оказалось наоборот, т. е. $K_{кр} > K_{кт}$, то необходимо было бы увеличить число серий m или число измерений n .

Пример. Был проведен эксперимент по измерению прочности грунта пенетрационным методом. Измерялось количество ударов гири, необходимое для погружения конуса на глубину 3 см. Всего выполнено 3 серии ($m = 3$) по пять повторностей в каждой серии ($n = 5$) (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Серии опытов	Повторности, n					Вычисленные	
	1	2	3	4	5	\bar{x}_i	D_i
1	7	9	6	8	4	6,8	2,96
2	9	7	8	6	5	7,0	2,0
3	8	8	7	9	8	8,0	0,4

§ 4. Средства измерений

Неотъемлемой частью экспериментальных исследований являются средства измерений, т. е. совокупность технических средств (имеющих нормированные погрешности), которые дают необходимую информацию для эксперимента.

В настоящее время приборостроением СССР выпускается большое количество средств измерений и наблюдения. Среди них можно выделить такие основные группы приборов для измерения показателей: физических, механических, химических свойств, а также структуры материала и изделия.

Наряду с этим можно выделить средства измерения, позволяющие непосредственно определить испытуемый показатель (например, процесс для определения прочности материалов), и измерения, которые дают возможность косвенно судить об исследуемом показателе (ультразвуковые дефектоскопы, что позволяют оценить прочность материала по скорости прохождения ультразвука).

К средствам измерений относят измерительный инструмент, измерительные приборы и установки. Измерительные средства делят на образцовые и технические.

Образцовые средства являются эталонами. Они предназначены для проверки технических, т. е. рабочих, средств. Образцовые средства не обязательно должны быть точнее рабочих, но они должны

иметь большую стабильность и надежность в воспроизведении. Общепринятые средства не применяют для рабочих измерений. С целью повысить точность и чувствительность измерений, а также расширить диапазон измерений дополнительно используют измерительные преобразователи.

Измерительным прибором называют средство измерения, предназначенное для получения определенной информации об измеряемой величине в удобной для экспериментатора форме. В этих приборах измеряемая величина преобразуется в показание или сигнал. Они состоят из двух основных узлов: воспринимающего сигнал и преобразующего в показание.

Приборы классифицируют по различным признакам. По способу отсчета значения измеряемой величины их делят на показывающие и регистрирующие.

Наибольшее распространение получили показывающие аналоговые приборы, отсчетные устройства которых состоят из шкалы и указателя. Эти приборы дают показания без каких-либо дополнительных операций экспериментатора. Однако они имеют большую погрешности, чем цифровые. Более удобны и перспективны показывающие цифровые приборы (механические, электронные). Отсчетный механизм фиксирует измеряемую величину в виде цифр. Они дают меньшую погрешность.

Регистрирующие приборы бывают самопишущими и печатными. Самопишущие приборы (термограф, шлейфовый осциллограф) выдают график измерений. Печатные приборы выдают измерения в виде цифр на ленте. Приборы также классифицируют по точности измерений, стабильности показаний, чувствительности, пределам измерения и др.

Измерительная установка (стенд) представляет собой систему, состоящую из основных и вспомогательных средств измерения, предназначенных для измерения одной сложной или нескольких параметров.

Установки включают в себя различные приборы и преобразователи. Преобразователи предназначены для одно- или многоступенчатого преобразования сигнала до такого уровня, чтобы его можно было зафиксировать измерительным механизмом. Преобразователи, которые увеличивают в несколько раз на выходе величину без изменения ее физической сущности, называют масштабными преобразователями (трансформаторы, электронные усилители и др.). Они получили наибольшее распространение. Имеются также преобразователи, которые входной сигнал могут преобразовывать, меняя его физическую сущность. Так, электромеханический преобразователь изменяет электрический сигнал (на входе) на механический (на выходе). Один прибор может иметь несколько преобразователей, изменяющих на выходе измеряемую величину в различных диапазонах. В каждом случае при измерении определенной величины с помощью преобразователя выбирают необходимый диапазон измерений.

Измерительные установки могут вырабатывать также сигналы, удобные не только для снятия наблюдений, но и для автоматической обработки результатов измерений. Обычно при проведении экспериментов в строительном производстве приходится создавать измерительные установки с фиксацией различных физических величин.

Выходной сигнал измерительных средств фиксируется отсчетными устройствами, которые бывают шкальными, цифровыми и регистрирующими. Шкала является важной частью прибора. Расстояние в миллиметрах между двумя смежными отметками на шкале называют *длиной деления шкалы*. Разность между значениями измеряемой величины, соответствующую началу и концу шкалы, называют *диапазоном показаний прибора*.

Измерительные приборы (отсчетные устройства) характеризуются погрешностью и точностью, стабильностью измерений и чувствительностью.

П о г р е ш н о с т и п р и б о р о в. Под абсолютной погрешностью измерительного прибора понимают

$$b = \pm (x_n - x_d), \quad (4.27)$$

где x_n — показание прибора (номинальное значение измеряемой величины); x_d — действительное значение измеренной величины более точным методом.

Погрешность прибора — одна из важнейших его характеристик. Она возникает вследствие ряда причин: недоброкачественных материалов, комплектующих изделий, применяемых для изготовления приборов; плохого качества изготовления приборов; неудовлетворительной эксплуатации его и др. Существенное влияние оказывают градуировка шкалы и периодическая проверка приборов.

Кроме этих систематических погрешностей, возникают случайные, обусловленные сочетанием различных факторов — ошибками отсчета, параллаксом, вариацией и т. д. Таким образом, необходимо рассматривать не какие-либо отдельные, а суммарные погрешности приборов.

Часто для оценки погрешности приборов применяют относительную погрешность (в %):

$$b_{от} = \pm \frac{x_n - x_d}{x_d} 100. \quad (4.28)$$

Иногда применяют понятие приведенной погрешности

$$b_{пр} = \pm \frac{x_n - x_d}{x_{пр}}. \quad (4.29)$$

где $x_{пр}$ — какое-либо значение шкалы измерительного устройства (диапазон измерений), длина шкалы и др.

Суммарные погрешности, установленные при определенных условиях ($t_b = 20^\circ\text{C}$, влажность воздуха 80 %, $p = 760$ мм рт. ст.), называют *основными погрешностями* прибора.

Диапазоном измерений называют ту часть диапазона показаний прибора, для которой установлены погрешности прибора. Если известны погрешности прибора, то диапазоны измерений и показаний прибора совпадают.

Диапазон измерений является важной характеристикой прибора. Если шкала измерений изменяется от 0 до N , то в характеристике на прибор диапазон указывают в пределах $0 - N$. Ряд приборов с нижним пределом измерения 0 имеет большую погрешность в интервале $0 - 25\%$ от верхнего предела измерений, т. е. четверти длины шкалы (начало) может давать погрешность, превышающую

Приборы нельзя перегружать, т. е. верхний предел измерений не нужно превышать нагрузкой. Некоторые приборы выдерживают перегрузки. Однако со временем погрешности у верхнего предела измерений существенно возрастают. Ряд приборов может выдерживать только ограниченные перегрузки.

Разность между максимальным и минимальным показателями прибора называют размахом. Если эта величина непостоянная, т. е. если при обратном ходе имеется увеличение или уменьшение хода, то эту разность называют *вариацией показаний* ω . ω — это простейшая характеристика погрешности прибора. Другой характеристикой прибора является его чувствительность, т. е. способность отсчитывающего устройства реагировать на изменения измеряемой величины. Под порогом чувствительности прибора понимают наименьшее значение измеренной величины, вызывающее изменение показаний прибора, которое можно зафиксировать.

Точность прибора — основная его характеристика. Она характеризуется суммарной погрешностью.

Средства измерения делятся на *классы точности* в зависимости от допускаемых погрешностей. Способы обозначения классов точности приборов различны.

Класс точности прибора (1-й — наивысший, 4-й — наинизший) обозначает допустимую, суммарную, относительную погрешность от верхнего предела измерений. Так, если класс прибора равен 1, то допускаемая относительная погрешность равна $\pm 1\%$. Для прибора с верхним пределом измерения 3 г/см^3 допускаемая погрешность не должна превышать $0,03 \text{ г/см}^3$ всей рабочей шкалы. Если же предел равен ± 300 , или 3000 г/см^3 , допускаемая погрешность соответственно равна ± 3 и $\pm 30 \text{ г/см}^3$.

Стабильность или воспроизводимость прибора — это свойство отсчетного устройства обеспечивать постоянство показаний одной и той же величины. В результате старения материалов со временем нарушается стабильность показаний приборов.

Стабильность прибора определяется вариацией показания. Поэтому при установлении стабильности нормируют допускаемую вариацию — ω_1 . Поскольку вариация принимается с одним знаком, а допускаемая погрешность имеет плюс и минус, то $\omega_d = 0,5$.

На все измерительные приборы в той или иной мере действует магнитное поле земли. Поэтому ряд электроизмерительных прибо-

ров должен быть защищен от действия магнитного поля, а также электростатических явлений. В специальной метрологической литературе разработаны схемы защит I (более высокой) и II категорий.

В последние годы при исследовании процессов в строительном производстве стали широко применять электрические, электронные, частотные, радиоизотопные и другие приборы. Как правило, такие приборы требуют специальной защиты от пыли, вибрации, газа, света и др. Отсутствие такой защиты может вызвать погрешности, превышающие допустимые.

Проверка средств измерений предусматривает определение и по возможности уменьшение погрешностей приборов. Определение погрешностей позволяет установить, соответствует ли данный прибор регламентированной степени точности и может ли он быть применим для данных измерений.

При проверке средств измерений, если не требуется вносить поправок в погрешности, определяют и устанавливают, не выходят ли они за пределы допускаемых значений. Проверку средств измерений производят на различных уровнях: от специальных государственных организаций до низовых звеньев. Государственные метрологические институты и лаборатории по надзору за стандартами и измерительной техникой производят государственный контроль на обеспечением в стране единства мер.

На высокоточные измерительные средства государственные метрологические организации выдают специальное свидетельство, в котором после проверки указывают номинальные значения измеряемой величины, класс точности, предельную допускаемую погрешность, результаты проверки погрешности прибора в виде таблицы, вариацию измерений. Для приборов меньшей точности свидетельство можно не выдавать, а заменять только указанием, что прибор удовлетворяет требованиям стандарта или инструкции. Вместо инструкции прибор (футляр) снабжают клеймом проверки.

Измерительные приборы и установки различных организаций подвергают обязательной государственной проверке раз в 1—2 года. При хорошем обращении с приборами этого срока вполне достаточно для гарантированной эксплуатации. Однако в ряде случаев вследствие небрежного обращения с приборами их эксплуатационно-измерительные характеристики нарушаются, требуется проверка.

В периоды между государственными проводят *ведомственную проверку* средств измерений. Эти проверки по объему работ иногда мало чем отличаются от государственных. Однако, как правило, такие проверки проводят по сокращенной программе. Поэтому они более оперативные, чем государственные, проводятся по специальному графику, разработанному для данной организации.

Анализ эксплуатационных качеств измерительных средств показал, что приборы и установки, хранимые более или менее длительное время на складах (1—2 года), подвергаются старению и ухудшают свои свойства. Иногда при этом погрешности превышают

допустимые значения. Поэтому измерительные средства, хранящиеся на складе, перед применением необходимо подвергнуть рабочей поверке.

Рабочая поверка средств измерений проводится в низовых звеньях, т. е. непосредственно в организациях, проводящих измерения. Такие поверки проводятся каждым экспериментатором перед началом измерений и наблюдений. В процессе рабочей поверки приходится производить различные операции: определять диапазон измерений, вариации измерений и др. В отдельных случаях выполняют регулировку и градуировку средств измерений.

Под *регулировкой* прибора понимают операции, направленные на снижение систематических ошибок до величины, меньшей допустимой погрешности. Измерительные приборы снабжены двумя регулировочными узлами для регулировки нуля и чувствительности. Регулировка нуля предназначена для устранения систематических ошибок в диапазоне нужного предела измерений.

В ряде случаев возникают систематические погрешности, зависящие от возрастающих или убывающих с изменением измеряемой величины. Такую погрешность регулировкой нуля устранить не возможно. Ее можно уменьшить с помощью регулировки узла чувствительности. Поскольку погрешность различна на разных участках длины шкалы, то с помощью одновременной регулировки узла нуля и чувствительности достигают существенного снижения систематической ошибки прибора в начале, середине и конце диапазона измерения.

Под *градуировкой* понимают нанесение меток на шкалу отсчитывающего устройства по заранее известной измеренной величине. Если шкала равномерная, то градуировка не представляет каких-либо сложностей. При градуировке нелинейных шкал предварительно регулируют прибор, крепят к нему шкалу и наносят на ее феррблат деления, соответствующие заранее известным значениям измеряемой величины.

Наиболее распространенным способом поверки приборов является оценка его эксплуатационных характеристик сравнением с образцовым. Суть его сводится к сопоставлению поверяемого прибора с образцовым. Одна и та же измеряемая величина оценивается поверяемым и образцовым прибором. По отсчетам судят о погрешностях, которые вносят в поверяемый прибор.

Важным моментом в организации эксперимента является выбор средств измерений. Средства измерения должны: максимально соответствовать тематике, цели и задачам НИР; обеспечивать высокую производительность труда с наименьшей затратой времени; выполнение эксперимента в возможно кратчайший срок, требованием качества экспериментальных работ, т. е. заданную степень точности при минимальном количестве измерений, высокую воспроизводимость и надежность; эргономические требования эксперимента (антропометрические, санитарно-гигиенические, психофизиологические и др.); требования техники безопасности и пожарной пр

филактики; в наибольшей степени исключать систематические ошибки. Желательно также максимально использовать средства измерений с автоматической записью, иметь высокую экономическую эффективность при минимуме затрат людских, денежных и материальных ресурсов. Следует особо помнить, что стандартные или специально созданные средства измерений перед началом эксперимента должны обязательно пройти метрологическую поверку или аттестацию. В противном случае результаты экспериментов могут вызвать возражение или же быть полностью не признанными.

При выборке средств необходимо максимально использовать стандартно выпускаемую аппаратуру, которая приводится в специальных ежегодниках-каталогах: «Средства измерения, допущенные к выпуску в обращении в СССР».

§ 5. Проведение эксперимента

Проведение эксперимента является важнейшим и наиболее трудоемким этапом. Экспериментальные работы необходимо проводить в соответствии с утвержденным планом-программой и особенно методикой эксперимента. Приступая к эксперименту, окончательно уточняют методику его проведения, последовательность испытаний. Иногда при этом используют метод рандомизации, который заключается в том, что опыты проводят в случайной последовательности, определяемой с помощью перечня случайных чисел. Этим способом исключают систематические ошибки, которые могут возникнуть при субъективном назначении последовательности испытаний.

Перечень случайных чисел

06	66	25	32	38	64	70	26	27	67	77	40	34	63	98	
08	40	52	92	29	82	69	34	50	21	74	00	91	27	52	98
07	63	88	23	62	51	07	69	59	02	89	49	14	98	53	41
02	25	21	15	08	82	34	57	57	35	22	03	33	48	84	37
44	61	88	23	13	01	59	47	64	04	99	59	96	20	30	87
01	44	08	67	79	41	61	41	15	60	11	88	83	24	82	24
13	24	40	09	00	65	46	38	61	12	90	62	41	11	59	85
78	27	84	05	99	85	75	67	80	05	57	05	71	70	21	31
42	39	30	02	34	99	46	68	45	15	19	74	15	50	17	44
01	52	43	96	38	13	83	80	72	34	20	84	56	19	49	59
02	85	77	30	16	69	32	46	46	30	84	20	68	72	98	54
08	48	84	88	24	55	46	48	60	06	90	08	83	83	98	40
01	19	05	68	22	58	04	63	21	16	23	38	25	43	32	98
04	81	87	21	31	40	46	17	62	63	99	71	14	12	64	51
05	43	75	12	91	20	36	25	57	92	33	65	95	48	75	00
40	98	71	31	80	59	57	32	43	07	85	06	64	75	27	29
03	98	68	89	39	71	87	32	14	99	42	10	25	37	30	08
16	04	21	34	92	89	81	52	15	12	84	11	12	66	87	47
48	09	36	95	36	20	82	53	32	89	92	68	50	88	17	37
23	97	10	96	57	74	07	95	26	44	93	08	43	30	41	86
43	97	55	45	98	35	69	45	96	80	46	26	39	96	33	60
40	05	08	50	79	89	58	19	86	48	27	98	99	24	08	94
06	97	10	69	02	25	36	43	71	76	00	67	56	12	69	07
16	62	38	72	92	03	76	09	30	75	77	80	04	24	59	67

Допустим, необходимо определить последовательность проведения пяти опытов. Пронумеруем их: 1, 2, 3, 4, 5. Поставим им в соответствие любые пять последовательных чисел, взятых в любой строке или столбце случайных чисел, например, вторая строка: 88, 45, 52, 92, 29 т. е. 1—88; 2—40; 3—52; 4—92; 5—29. Расположив случайные цифры в порядке возрастания (убывания), получим последовательность проведения опытов: 4, 5, 2, 3, 1 или 1, 3, 2, 5, 4.

При экспериментальном исследовании сложных процессов часто возникают случаи, когда ожидаемый результат получают позже чем предусматривается планом. Поэтому научный работник должен проявить терпение, выдержку, настойчивость и довести эксперимент до получения результатов.

Особое значение имеет добросовестность при проведении экспериментальных работ. Экспериментатор должен фиксировать все характеристики исследуемого процесса, не допуская субъективного влияния на результаты измерений. Иногда молодые научные работники, стремясь быстрее получить нужный результат, подтверждая гипотезу, выбирают только те экспериментальные данные, которые хорошо согласуются с теоретическими предположениями. В этом случае иногда упускаются ценные данные об исследуемом процессе, которые впоследствии могут быть восстановлены с большим трудом.

В процессе проведения экспериментальных работ недопустимы небрежность, которая приводит к большим искажениям, ошибкам. В связи с этим эксперименты повторяют, что увеличивает продолжительность исследования.

Обязательным требованием проведения эксперимента является ведение журнала. Форма журнала может быть произвольной, но должна наилучшим образом соответствовать исследуемому процессу с максимальной фиксацией всех факторов. В журнале отмечают тему НИР и тему эксперимента, фамилию исполнителя, время и место проведения эксперимента, характеристику окружающей среды, данные об объекте эксперимента и средства измерения, результаты наблюдений, а также другие данные для оценки полученных результатов.

Журнал нужно заполнять аккуратно, без каких-либо исправлений. При получении в одном статистическом ряду результатов резко отличающихся от соседних измерений, исполнитель должен записать все данные без искажений и указать обстоятельства, сопутствующие указанному измерению. Это позволит установить причины искажений и квалифицировать измерения как соответствующие реальному ходу процесса или как грубые промахи. Если в процессе измерения необходимы простейшие расчеты, то они должны быть выполнены безупречно.

При проведении эксперимента исполнитель должен непрерывно следить за средствами измерений: устойчивостью аппаратов и установок, правильностью их показаний, характеристиками окружающей среды, не допускать посторонних лиц в рабочую зону. Испол-

нитель обязан систематически проводить рабочую поверку средств измерений. В случае, если рабочая поверка не обеспечивает требуемую точность приборов, эксперимент необходимо приостановить, а средства измерения передать на госповерку. Первостепенное внимание экспериментатор должен уделять контролю качества экспериментальных работ, т. е. обеспечивать надежность работы средств измерений, воспроизводимость измерений, соблюдать требуемую точность и достоверность получаемых результатов.

Одновременно с производством измерений исполнитель должен проводить предварительную обработку результатов и их анализ. Здесь особо должны проявляться его творческие способности. Такой анализ позволяет контролировать исследуемый процесс, корректировать эксперимент, улучшать методику и повышать эффективность эксперимента.

Важны при этом консультации с коллегами по работе и особенно с научным руководителем. В процессе экспериментальных работ необходимо соблюдать требования инструкций по промсанитарии, технике безопасности, пожарной профилактике. Исполнитель должен уметь организовать рабочее место, руководствуясь принципами научной организации труда.

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

Вначале результаты измерений сводят в таблицы по варьируемым характеристикам для различных изучаемых вопросов. Очень тщательно изучают сомнительные цифры, резко отличающиеся от статистического ряда наблюдений, от средних значений. При анализе цифр необходимо установить точность, с которой нужно производить обработку опытных данных. Точность обработки не должна быть выше точности измерений (см. § 3, гл. 4).

Особое место принадлежит анализу эксперимента. Это завершающая часть, на основе которой делают вывод о подтверждении гипотезы научного исследования. Анализ эксперимента — это творческая часть исследования. Иногда за цифрами трудно четко представить физическую сущность процесса. Поэтому требуется особо тщательное сопоставление фактов, причин, обуславливающих ход того или иного процесса и установление адекватности гипотезы и эксперимента.

§ 6. Методы графического изображения результатов измерений

При обработке результатов измерений и наблюдений широко используют методы графического изображения.

Результаты измерений, представленные в табличной форме, не позволяют достаточно наглядно характеризовать закономерности

изучаемых процессов. Графическое изображение дает наиболее наглядное представление о результатах экспериментов, позволяющее лучше понять физическую сущность исследуемого процесса, выявить общий характер функциональной зависимости изучаемых переменных величин, установить наличие максимума и минимума функции.

После обработки результатов измерений и оценки степени точности необходимо их свести в таблицы для анализа. Данные таких таблиц обрабатывают графическими методами.

Для графического изображения результатов измерений (наблюдений), как правило, применяют систему прямоугольных координат. Если анализируется графическим методом функция $y = f(x)$, то наносят в системе прямоугольных координат значения

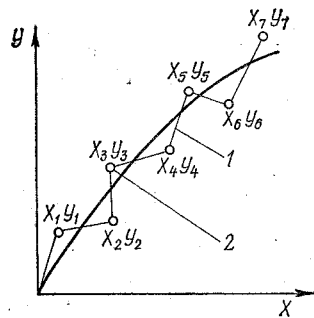


Рис. 4.2. Графическое изображение функции $y = f(x)$.

1 — кривая по результатам непосредственных измерений; 2 — плавная кривая

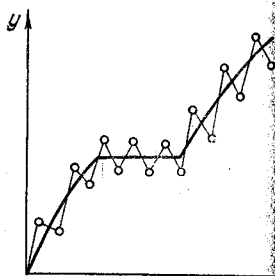


Рис. 4.3. Графическое изображение функции $y = f(x)$ при наличии скачка

функции $x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n$ (рис. 4.2). Прежде чем строить график, необходимо знать ход (течение) исследуемого явления. Как правило, качественные закономерности и форма графика экспериментатор ориентирующе известны из теоретических исследований.

Точки на графике необходимо соединять плавной линией, чтобы она по возможности ближе проходила ко всем экспериментальным точкам. Если соединить точки прямыми отрезками, то получится ломаную кривую. Она характеризует изменение функции по данным эксперимента. Обычно функции имеют плавный характер. Поэтому при графическом изображении результатов измерений следует проводить между точками плавные кривые. Резкое искривление графика объясняется погрешностями измерений. Если эксперимент повторили с применением средств измерений более высокой точности, то получили бы меньше погрешности, а ломаная кривая больше бы соответствовала плавной кривой.

Однако могут быть исключения. Так, иногда исследуются явления, для которых в определенных интервалах наблюдается быстрое скачкообразное изменение одной из координат (рис. 4.3). Это объясняется сущностью физико-химических процессов, например фа-

зными превращениями влаги при исследовании промерзающих систем, радиоактивным распадом атомов в процессе исследования радиоактивности и т. д. В таких случаях необходимо особо тщательно соединять точки кривой. Общее «осреднение» всех точек плавной кривой может привести к тому, что скачок функции подменяется погрешностями измерений.

Иногда при построении графика одна-две точки резко удаляются от кривой. Вначале нужно проанализировать физическую сущность явления, и если нет основания полагать наличие скачка функции, то такое резкое отклонение можно объяснить грубой ошибкой или промахом. Это может возникнуть тогда, когда данные измерений предварительно не исследовались на наличие грубых ошибок измерений. В таких случаях

необходимо повторить измерение в диапазоне резкого отклонения точки. Если предыдущее измерение оказалось ошибочным, то на график наносят новую точку. Если же повторные измерения дадут предыдущее значение, необходимо к этому интервалу кривой относиться очень внимательно и особо тщательно проанализировать физическую сущность явления. Часто при графическом изображении результатов экспериментов приходится иметь дело с тремя переменными: $b = f(x, y, z)$.

В этом случае применяют метод разделения переменных. Одной из величин в пределах интервала измерений $z_1 - z_n$

выдают несколько последовательных значений. 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 $y = f_1(x)$ для различных значений z (рис. 4.4).

Если необходимо графически изобразить функцию с четырьмя и более переменными $\alpha = f(b, x, y, z)$, то строят серию графиков типа предыдущих (рис. 4.4), но каждый из них при $b_1, \dots, b_n = \text{const}$, или принимают из N переменных $N - 1$ постоянными и строят графики: вначале $N - 1 = f_1(x)$, далее $N - 2 = f_2(x)$, $N - 3 = f_3(x)$ и т. д. Таким образом, можно проследить изменение любой переменной величины в функции от других при постоянных значениях остальных. Этот метод графического анализа требует тщательности, большого внимания к результатам измерений. Однако он в большинстве случаев является наиболее простым и наглядным.

При графическом изображении результатов экспериментов большую роль играет выбор системы координат или координатной сетки. Координатные сетки бывают равномерными и неравномерными. У равномерных координатных сеток ординаты и абсциссы имеют равномерную шкалу. Например, в системе прямоугольных коор-

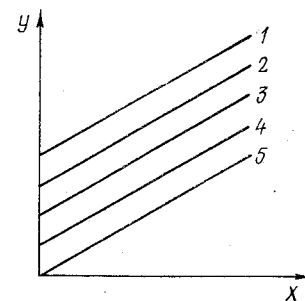


Рис. 4.4. Графическое изображение функции $b = f(x, y, z)$:

1 — z_5 ; 2 — z_4 ; 3 — z_3 ; 4 — z_2 ; 5 — z_1

Применение ЭВМ существенно снижает трудоемкость номограммирования.

Существует несколько методов построения номограмм. Для этого применяют равномерные или неравномерные координатные сетки. В системе прямоугольных координат функции в большинстве случаев на номограммах имеют криволинейную форму. Это увеличивает трудоемкость, поскольку требуется большое количество точек для нанесения одной кривой.

В полу- или логарифмических координатных сетках функции имеют прямоугольную форму и составление номограмм упрощается.

Методика построения номограмм функций одной $y = f(x)$ или многих $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ переменных описана ранее и сводится к построению кривой, семейства или серии семейств путем принятия постоянных и нахождения одной переменной. Сложные алгебраические выражения целесообразно сводить к простому произведению двух-трех значений, например: $d = abc$ где a, b, c — функции двух-трех переменных. В этом случае необходимо вначале, задавши переменными, вычислить a, b, c . Далее, придавая a, b, c постоянные значения, найти d ; a, b, c необходимо варьировать в определенных значениях, например от 0 до 100 через 5 или 10. Наиболее эффективным является такой способ построения номограмм, при котором a, b, c представляются как безразмерные критерии (см. гл. 3).

§ 7. Методы подбора эмпирических формул

В процессе экспериментальных измерений получают статистический ряд измерений двух значений, объединяемых функцией $y = f(x)$ (4.30). Каждому значению функции y_1, \dots, y_n соответствует определенное значение аргумента x_1, \dots, x_n . Экспериментатор должен быть уверенным в достоверности полученных им измерений (см. гл. 4, § 3). На основе экспериментальных данных можно подобрать алгебраические выражения, которые называют эмпирическими формулами. Такие формулы подбирают только в пределах измеренных значений аргумента $x_1 - x_n$. Эмпирические формулы имеют тем большую ценность, чем больше они соответствуют результатам эксперимента.

Необходимость в подборе эмпирических формул возникает во многих случаях. Так, если аналитическое выражение (4.30) сложное, требует громоздких вычислений, составления программ для ЭВМ, то часто эффективнее пользоваться упрощенной приближенной эмпирической формулой. Опыт показывает, что эмпирические формулы часто незаменимы для анализа измеренных величин. К эмпирическим формулам предъявляют два основных требования — по возможности они должны быть наиболее простыми и точно соответствовать экспериментальным данным в пределах изменения аргумента.

Таким образом, эмпирические формулы являются приближенными выражениями аналитических формул. Замену точных аналитических выражений приближенными, более простыми называют *аппроксимацией*, а функции *аппроксимирующими*.

Процесс подбора эмпирических формул состоит из двух этапов. На первом этапе данные измерений наносят на сетку прямоугольных координат, соединяют экспериментальные точки плавной кривой и выбирают ориентировочно вид формулы. На втором этапе вычисляют параметры формул, которые наилучшим образом соответствовали бы принятой формуле. Подбор эмпирических формул необходимо начинать с самых простых выражений.

Результаты измерений многих явлений и процессов аппроксимируются простейшими эмпирическими уравнениями типа

$$y = a + bx, \quad (4.31)$$

где a, b — постоянные коэффициенты.

Так, линеаризованным уравнением (4.31) можно выразить зависимость между влажностью и плотностью грунта, содержанием цемента и прочностью бетона, количеством проходов смесительной машины и степенью размельчения грунта, продолжительностью перемешивания асфальтобетонной смеси и степенью ее однородности и т. д.

Поэтому при анализе графического материала необходимо по возможности использовать линейную функцию. В этом случае применяют метод выравнивания. Он заключается в том, что кривую, построенную по экспериментальным точкам, представляют линейной функцией.

Для преобразования некоторой кривой (4.30) в прямую линию вводят новые переменные X и Y :

$$X = f_1(x, y); \quad Y = f_2(x, y). \quad (4.32)$$

В этом уравнении X и Y должны быть связаны линейной зависимостью

$$Y = a + bX. \quad (4.33)$$

Значения X и Y можно вычислить на основе решения системы (4.32). Далее строят прямую (рис. 4.8), по которой легко графически вычислить параметры a (ордината точки пересечения прямой с осью Y) и b (тангенс угла наклона прямой с осью Y):

$$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{Y_i - a}{X_i}.$$

При графическом определении параметров a и b обязательно, чтобы прямая (4.31) строилась на координатной сетке, у которой

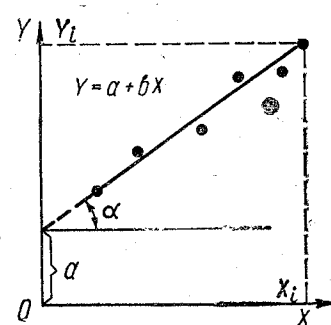


Рис. 4.8. Графическое определение параметров a и $b = \operatorname{tg} \alpha$

Применение ЭВМ существенно снижает трудоемкость номограммирования.

Существует несколько методов построения номограмм. Для этого применяют равномерные или неравномерные координатные сетки. В системе прямоугольных координат функции в большинстве случаев на номограммах имеют криволинейную форму. Это увеличивает трудоемкость, поскольку требуется большое количество точек для нанесения одной кривой.

В полу- или логарифмических координатных сетках функции имеют прямоугольную форму и составление номограмм упрощается.

Методика построения номограмм функций одной $y = f(x)$ и многих $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ переменных описана ранее и сводится к построению кривой, семейства или серии семейств путем принятия постоянных и нахождения одной переменной. Сложные алгебраические выражения целесообразно сводить к простому произведению двух-трех значений, например: $d = abc$ где a, b, c — функции двух-трех переменных. В этом случае необходимо вначале, задавши переменными, вычислить a, b, c . Далее, придавая a, b, c постоянные значения, найти d ; a, b, c необходимо варьировать в определенных значениях, например от 0 до 100 через 5 или 10. Наиболее эффективным является такой способ построения номограмм, при котором a, b, c представляются как безразмерные критерии (см. гл. 3).

§ 7. Методы подбора эмпирических формул

В процессе экспериментальных измерений получают статистический ряд измерений двух значений, объединяемых функцией $y = f(x)$ (4.30). Каждому значению функции y_1, \dots, y_n соответствует определенное значение аргумента x_1, \dots, x_n . Экспериментатор должен быть уверенным в достоверности получаемых им измерений (см. гл. 4, § 3). На основе экспериментальных данных можно подобрать алгебраические выражения, которые называют эмпирическими формулами. Такие формулы подбирают только в пределах измеренных значений аргумента $x_1 - x_n$. Эмпирические формулы имеют тем большую ценность, чем больше они соответствуют результатам эксперимента.

Необходимость в подборе эмпирических формул возникает в многих случаях. Так, если аналитическое выражение (4.30) сложное, требует громоздких вычислений, составления программ для ЭВМ, то часто эффективнее пользоваться упрощенной приближенной эмпирической формулой. Опыт показывает, что эмпирические формулы часто незаменимы для анализа измеренных величин. К эмпирическим формулам предъявляют два основных требования — по возможности они должны быть наиболее простыми и точно соответствовать экспериментальным данным в пределах изменения аргумента.

Таким образом, эмпирические формулы являются приближенными выражениями аналитических формул. Замену точных аналитических выражений приближенными, более простыми называют *аппроксимацией*, а функции *аппроксимирующими*.

Процесс подбора эмпирических формул состоит из двух этапов. На первом этапе данные измерений наносят на сетку прямоугольных координат, соединяют экспериментальные точки плавной кривой и выбирают ориентировочно вид формулы. На втором этапе вычисляют параметры формул, которые наилучшим образом соответствовали бы принятой формуле. Подбор эмпирических формул необходимо начинать с самых простых выражений.

Результаты измерений многих явлений и процессов аппроксимируются простейшими эмпирическими уравнениями типа

$$y = a + bx, \quad (4.31)$$

где a, b — постоянные коэффициенты.

Так, линейризованным уравнением (4.31) можно выразить зависимость между влажностью и плотностью грунта, содержанием цемента и прочностью бетона, количеством проходов смесительной машины и степенью размельчения грунта, продолжительностью перемешивания асфальтобетонной смеси и степенью ее однородности и т. д.

Поэтому при анализе графического материала необходимо по возможности использовать линейную функцию. В этом случае применяют метод выравнивания. Он заключается в том, что кривую, построенную по экспериментальным точкам, представляют линейной функцией.

Для преобразования некоторой кривой (4.30) в прямую линию вводят новые переменные X и Y :

$$X = f_1(x, y); \quad Y = f_2(x, y). \quad (4.32)$$

В этом уравнении X и Y должны быть связаны линейной зависимостью

$$Y = a + bX. \quad (4.33)$$

Значения X и Y можно вычислить на основе решения системы (4.32). Далее строят прямую (рис. 4.8), по которой легко графически вычислить параметры a (ордината точки пересечения прямой с осью Y) и b (тангенс угла наклона прямой с осью Y):

$$b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{Y_i - a}{X_i}$$

При графическом определении параметров a и b обязательно, чтобы прямая (4.31) строилась на координатной сетке, у которой

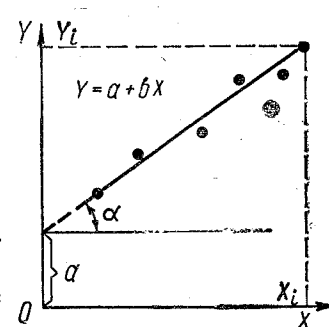


Рис. 4.8. Графическое определение параметров a и $b = \operatorname{tg} \alpha$

няя $x = \frac{1}{z}$, получаем прямую линию на сетке прямоугольных координат $y = a + bz$. Если график имеет вид рис. 4.9, *e*, нужно использовать формулу

$$y = \frac{1}{a + bx}. \quad (4.40)$$

Заменяя $y = \frac{1}{z}$, имеем $z = a + bx$, т. е. прямую на сетке прямоугольных координат. Аналогично для уравнения

$$y = \frac{1}{a + bx + cx^2} \quad (4.41)$$

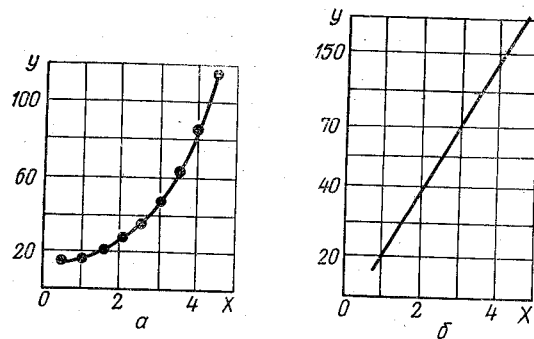


Рис. 4.10. Экспериментальная кривая (а) и спрямленная (б)

с $y = \frac{1}{z}$ имеем $z = a + bx + cx^2$. Сложную степенную функцию $y = ae^{nx+mx^2}$ (4.42) преобразуем в прямую линию. При $\lg y = z$, $\lg a = p$; $n \lg e = q$, $m \lg e = r$ имеем $z = p + qx + rx^2$. С помощью приведенных на рис. 4.9 графиков и выражений (4.34) — (4.42) практически можно всегда подобрать уравнение эмпирической формулы.

Пример. Подобрать эмпирическую формулу для следующих измерений;

1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
15,2	20,6	27,4	36,7	49,2	66,0	87,4	117,5

На основе этих данных строим график. Как видно из рис. 4.10 имеем типичный график для показательной функции (4.35) (рис. 4.9, б). В этой формуле необходимо найти параметры a и b . После логарифмирования этого выражения имеем $\lg y = \lg a + b \lg ex$. Если обозначить $\lg y = Y$, то $Y = \lg a + b \lg ex$, т. е. в полулогарифмических координатах выражение для Y представляет собой прямую линию, что подтверждается рис. 4.10. Подставим в уравнение координаты крайних точек; $\lg 15,2 = \lg a + b \lg e$

$$\lg 117,5 = \lg a + 4,5 \lg e \text{ или } \lg a = b \lg e = 1,183; \lg a + 4,5 \lg e = 2,070.$$

$$\text{Отсюда } b = \frac{0,887}{3,5} = 0,579; \lg a = 1,183 - 0,254 = 0,929; a = 1,85.$$

Окончательно эмпирическая формула имеет вид $y = 1,85e^{0,579x}$.

При подборе эмпирических формул широко используют полиномы $y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n$ (4.43), где A_0, \dots, A_n — постоянные коэффициенты.

Полиномами можно аппроксимировать любые результаты измерений, если они графически выражают непрерывные функции. Особо ценным является то, что даже при неизвестном точном выражении функции (4.43) можно определить значения коэффициентов A . Кроме графического метода, изложенного выше, для определения коэффициентов A применяют методы средних и наименьших квадратов.

Метод средних основан на следующем положении. По экспериментальным точкам можно построить несколько плавных кривых. Наилучшей будет та кривая, у которой разностные отклонения наименьшие, т. е. $\Sigma \varepsilon = 0$. Порядок расчета коэффициентов полинома сводится к следующему. Определяют число членов ряда (4.43). Обычно принимают не более 3—4. В принятое выражение последовательно подставляют координаты x и y m экспериментальных точек и получают систему из уравнений. Каждое уравнение приравнивают соответствующему отклонению

$$\begin{aligned} A_0 + A_1X_1 + A_2X_1^2 + \dots + A_nX_1^n - Y_1 &= \varepsilon_1; \\ A_0 + A_1X_1 + A_2X_2^2 + \dots + A_nX_2^n - Y_2 &= \varepsilon_2; \\ \dots &\dots \\ A_0 + A_1X + A_2X^2 + \dots + A_nX_m^n - Y_m &= \varepsilon_m. \end{aligned} \quad (4.44)$$

Обычно число точек, т. е. число уравнений, больше количества коэффициентов A , что позволяет их вычислить при решении системы (4.44). Разбивают систему начальных уравнений (4.44) последовательно сверху вниз на группы, число которых должно быть равно количеству коэффициентов A . В каждой группе складывают уравнения и получают новую систему уравнений, равную количеству групп (обычно 2—3). Решая систему, вычисляют коэффициенты A .

Метод средних обладает высокой точностью, если число точек достаточно велико (не менее 3—4). Степень точности можно повысить следующим образом. Начальные условия группируют по 2—3 варианта и вычисляют для каждого варианта эмпирическую формулу. Предпочтение отдают той формуле, у которой $\Sigma \varepsilon^2 = \min$.

Пример. Выполнено семь измерений:

4	5	6	7	8	9	10
10,2	6,7	4,8	3,6	2,7	2,1	1,7

Необходимо подобрать эмпирическую формулу для полинома $y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2$.

Подставим в это уравнение точки и разобьем систему начальных уравнений на три группы (1—2, 3—4, 5—7): $A_0 + 4A_1 + 16A_2 =$

Степень точности коэффициентов A в (4.43) должна быть такой, чтобы вычисленные значения y совпадали со значениями исходных табличных. Это требует вычислять A тем точнее, чем выше индекс A , т. е. A_4 должно быть точнее (больше число десятичных знаков), чем A_3 ; A_3 — точнее, чем A_2 и т. д. Для вычисления коэффициентов A методом наименьших квадратов расчеты необходимо проводить по типовым программам на ЭВМ.

§ 8. Регрессионный анализ

В реальных условиях часто встречаются ситуации, когда одному значению аргумента соответствует несколько измеряемых значений.

Под регрессионным анализом понимают исследование закономерностей между явлениями (процессами), которые зависят от многих иногда неизвестных факторов. Если две переменные зависят друг от друга так, что каждому значению x соответствует определенное значение y , то между ними существует функциональная или детерминированная связь.

Однако часто между переменными x и y существует связь, не вполне определенная. Одному значению x соответствует несколько значений (совокупность) y . В этом случае связь называют регрессионной. Функция $y = f(x)$ является регрессионной (корреляционной), если каждому значению аргумента соответствует статистический ряд распределения отклика y . Следовательно, регрессионные зависимости характеризуются вероятностными или статистическими связями. Поэтому установление регрессионных зависимостей между величинами y и x возможно лишь тогда, когда выполнимы статистические измерения. Статистические зависимости описывают математическими моделями процесса, т. е. регрессионными выражениями, связывающими независимые значения x (факторы) с зависимой переменной y (результативный признак, функция цели, отклик). Модель по возможности должна быть простой и адекватной. Например, модуль упругости грунта E зависит от его объемного веса γ . С возрастанием объемного веса увеличивается модуль упругости грунта. Эта закономерность проявляется только при наличии большого количества измерений. Для каждой отдельной парной связи $E = f(\gamma)$ наблюдаются большие отклонения.

Суть регрессионно-корреляционного анализа сводится к установлению уравнения регрессии, т. е. вида кривой между случайными величинами, аргументами x и функцией y , оценке тесноты связи между ними и достоверности и адекватности результатов измерений.

Чтобы предварительно определить наличие корреляционной связи между x и y наносят точки на график и строят так называемое корреляционное поле (рис. 4.11). По тесноте группирования точек вокруг прямой или кривой линии, по наклону линии можно визу-

ально судить о наличии корреляционной связи. Так, из рис. 4.11, а видно, что экспериментальные данные имеют определенную связь между x и y . В то же время измерения, приведенные на рис. 4.11, б, такой связи не имеют.

Корреляционное поле характеризует вид связи между x и y . По форме поля можно ориентировочно судить о форме графика, характеризующего прямолинейную и криволинейную зависимости. Даже для вполне выраженной формы корреляционного поля вследствие статистического характера связи исследуемого явления одно значение x может иметь несколько значений y . Если на корреляционном поле осреднить точки, т. е. для каждого значения x_i определить \bar{x}_i и соединить точки \bar{y}_i , то будет получена ломаная линия. Эту линию называют экспериментальной регрессионной зависимостью (линией).

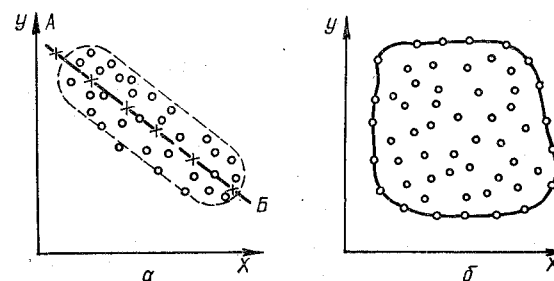


Рис. 4.11. Корреляционное поле

Наличие ломаной линии объясняется рядом причин: погрешностями измерений, недостаточным количеством измерений, физической сущностью исследуемого явления и др. Если на корреляционном поле провести плавную линию между \bar{y}_i , которая равноудалена от них, то получим новую теоретическую регрессионную зависимость (линию) (см. линию AB на рис. 4.11, а).

Различают однофакторные (парные) и многофакторные регрессионные зависимости.

Парная регрессия. Парная зависимость может быть аппроксимирована прямой линией, параболой, гиперболой, логарифмической, степенной или показательной функцией, полиномом и др. (см. рис. 4.9, а также § 7 гл. 4). Двухфакторное поле можно аппроксимировать плоскостью, параболоидом второго порядка, гиперболоидом. Для n -переменных факторов связь может быть установлена с помощью n -мерного пространства уравнениями второго порядка

$$y = b_0 + \sum_1^n b_i x_i + \sum_j^n b_{ij} x_i x_j + \sum_1^n b_{ii} x_i^2 \quad (4.47),$$
 где y — функция цели (отклика) многофакторных переменных; x_i — независимые факторы; b_i — коэффициенты регрессии, характеризующие влияние

фактора x_i на функцию цели; b_{ij} — коэффициенты, характеризующие двойное влияние факторов x_i и x_j на функцию цели.

При построении теоретической регрессионной зависимости оптимальной будет такая функция, в которой соблюдаются условия наименьших квадратов $\sum (y_i - \bar{y})^2 = \min$, где y_i — фактические ординаты поля; \bar{y} — среднее значение ординаты с абсциссой x , вычисленной по уравнению. Поле корреляции аппроксимируют уравнением прямой. Линию регрессии рассчитывают из условий наименьших квадратов: $y = a + bx$ (4.48). При этом кривая AB (рис. 4.11) наилучшим образом выравнивает значения постоянных коэффициентов a и b , т. е. коэффициентов уравнения регрессии. Их вычисляют по выражениям

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4.49), \quad a = y - bx = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n} \quad (4.50)$$

Критерием близости корреляционной зависимости между x и y к линейной функциональной зависимости является коэффициент парной или просто коэффициент корреляции r . Он показывает степень линейности связи x и y :

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (4.51)$$

где n — число измерений.

Значение коэффициента корреляции всегда меньше единицы. При $r = 1,0$ x и y связаны функциональной связью (в данном случае линейной), т. е. каждому значению x соответствует одно значение y . Если $r < 1$, то линейной связи не существует. При $r = 0$ между x и y линейной корреляционной связи не существует, однако может существовать нелинейная регрессия. Обычно считают тесноту связи удовлетворительной при $r \geq 0,5$; хорошей при $r = 0,8 - 0,9$. Для определения процента разброса (изменчивости) искомой функции y относительно ее среднего значения, определяемого изменчивостью фактора x , вычисляют коэффициент детерминации $K_d = r^2$ (4.52).

Уравнение регрессии прямой можно представить выражением (4.48) или

$$y = \bar{y} + r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) \quad (4.53)$$

Пример. Имеется статистический ряд парных измерений:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	11	14	16	21	26	27	32	34	41

Необходимо найти уравнение прямолинейной регрессии, оценить тесноту связей и оценить степень достоверности. Расчет ведем в табличной форме (табл. 4.9).

Таблица 4.9

x	y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	x^2	y^2	xy	$\frac{(x - \bar{x}) \times (y - \bar{y})}{(x - \bar{x}) \times (y - \bar{y})}$
1	8	-4,5	-15	20,25	225	1	64	8	67,5
2	11	-3,5	-12	12,25	144	4	121	22	42,0
3	14	-2,5	-9	6,25	81	9	196	42	22,5
4	16	-1,5	-7	2,25	49	16	256	64	10,5
5	21	-0,5	-2	0,25	4	25	441	105	1,0
6	26	0,5	+3	0,25	9	36	676	156	1,5
7	27	1,5	+4	2,25	16	49	729	189	6,0
8	32	2,5	+9	6,25	81	64	1024	256	22,5
9	34	3,5	+11	16,25	121	81	1156	306	31,5
10	41	4,5	+18	20,25	324	100	1681	410	81,0
55	230	—	—	82,50	1054	385	6344	1558	286,0

$$\bar{x} = \frac{55}{10} = 5,5; \quad \bar{y} = \frac{230}{10} = 23; \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{82,50}{10}} = 2,873; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1054}{10}} = 10,27$$

Коэффициент корреляции согласно (4.51)

$$r = \frac{10 \cdot 1558 - 55 \cdot 230}{(10 \cdot 385 - 55^2)(10 \cdot 6344 - 230^2)} = -0,99$$

Из (4.49) и (4.50) $b = \frac{10 \cdot 1558 - 55 \cdot 230}{10 \cdot 385 - 55^2} = 3,55; \quad a = \frac{230}{10} - 3,55 \frac{55}{10} =$

$= 3,48$. По (4.48) уравнение регрессии имеет вид $y = 3,48 + 3,55x$. В табл. 4.10 приведена сходимость экспериментальной (табл. 4.9) и теоретической регрессии.

Таблица 4.10

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
y	8	11	14	16	21	26	27	32	34	41
y_s	7,1	10,6	14,2	17,7	21,3	24,8	28,3	31,9	35,4	39,0

Как видно из расчетов, сходимость хорошая.

Коэффициент детерминации по формуле (4.52) $K_d = 0,99^2 = 0,98$. Это означает, что 98 % разброса определяется изменчивостью x , а 2 % — другими причинами, т. е. изменчивость функции y почти полностью характеризуется разбросом (природой) фактора x .

Пример. Необходимо исследовать выносливость бетонов (количество циклов нагружения бетонных образцов до их разрушения) в зависимости от степени их нагружения $\left(\frac{\sigma}{R_{ст}}\right)$.

Составим гипотезу научного исследования. Из литературных данных известно, что усталостное разрушение материалов, в том числе и бетонов, представляет собой в значительной степени вероятностный процесс, т. е. на усталостное разрушение влияет множество случайных факторов. Поэтому можно описать лишь наиболее вероятную зависимость между выносливостью бетонов и интенсивностью нагружения $\left(\frac{\sigma}{R_{ст}}\right)$.

Анализ литературных источников, а также поисковый эксперимент показали, что эта зависимость может быть описана экспоненциальной зависимостью $N = K_1 e^{K_2 \frac{\sigma}{R_{ст}}}$, или $N = K_1 10^{K_2 \frac{\sigma}{R_{ст}}}$, где σ — приложенное напряжение, МПа; $R_{ст}$ — прочность бетона при изгибе, МПа, определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-78; N — количество циклов нагружения σ , при которых бетон разрушается; K_1, K_2 — коэффициенты. Применим для этой кривой метод прямолинейной корреляции. Поисковый эксперимент показал, что разброс показателей измерения N очень высок, поэтому требуемое количество образцов для получения достоверных результатов при точности измерения $\pm 10\%$ и вероятности ее получения 95% составляет 15 образцов водной серии.

Зависимость исследуем в пределах $\frac{\sigma}{R_{ст}} = 0,9 - 0,5$. Выравнивание зависимости $N \frac{\sigma}{R_{ст}}$ приводит к результату $\lg N = K_1 + K_2 \frac{\sigma}{R_{ст}}$. Учитывая, что получена прямолинейная зависимость и что усталостное разрушение в значительной степени представляет собой вероятностный процесс, в дальнейшем исследовании используем уравнение прямолинейной корреляции (4.53) $y - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x})$, где x — численные значения логарифмов количества циклов нагружения, $\lg N$; y — частные значения относительной напряженности.

Далее составляем методику основных экспериментальных исследований, в соответствии с которой проверяем эксперименты. Экспериментальные данные занесены в табл. 4.11, с их помощью произвели вычисления ($n = 106$). Вычисляем $y = 0,7246$; $\bar{x} = 4,2693$; $\sigma_x = 0,1338$; $\sigma_y = 1,2390$. Согласно (4.53) $r = -0,937$. Уравнение регрессии $y = 1,1566 - 0,102x$, $\frac{\sigma}{R_{ст}} = 1,5566 - 0,1012 \lg N$, или $N = 11,5 \cdot 10^{-9,9}$. Таким образом, $K_1 = 11,5$; $K_2 = 9,9$. Полученная формула отражает наиболее вероятную связь между значениями N и $\frac{\sigma}{R_{ст}}$ для данных конкретных условий эксперимента.

Таблица 4.11

N_0 п/п	y	$y - \bar{y}$	$(y - \bar{y})^2$	x	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y}) \times$ $\times (x - \bar{x})$
1	0,91	0,1854	0,0343	2,1239	-2,1239	4,6049	-0,3970
2	0,91	0,1854	0,0343	2,5340	-2,5350	3,0151	-0,3212
3	0,91	0,1854	0,0343	2,2553	-2,2553	4,0582	-0,3727
105	0,58	-0,1446	0,0299	5,7982	+1,5289	2,3360	-0,2216
106	0,58	-0,1446	0,0209	6,000	+1,7302	2,9936	-0,2509
$\Sigma =$	76,81	—	1,8980	452,5988	—	162,7350	-16,4631

Многофакторная регрессия. На практике часто возникает потребность в установлении связи между y и многими параметрами x_1, \dots, x_n .

Многофакторные теоретические регрессии аппроксимируют полиномами первого (4.43) или второго порядка (4.47). Математические модели характеризуют стохастический процесс изучаемого явления. Уравнение регрессии определяет систематическую составляющую, а ошибки разброса — случайную.

Теоретическую модель множественной регрессии можно получить методами математического планирования (см. ниже), т. е. активным экспериментом, а также пассивным, когда точки факторного пространства выбираются в процессе эксперимента произвольно.

§ 9. Определение адекватности теоретических решений

В результате эксперимента получают статистический ряд обычно парных, однофакторных (x_i, y_i) или многофакторных (a_i, b_i, c_i, \dots) измерений. Статистические измерения подвергают обработке и анализу, подбирают эмпирические формулы и устанавливают их достоверность.

Перед подбором эмпирических формул необходимо еще раз убедиться в достоверности эксперимента. Кроме приведенных ранее методов оценки достоверности, необходимо окончательно проверить спланированный основной эксперимент на воспроизводимость результатов по критерию Кохрена (см. § 3 гл. 4). В процессе проведения эксперимента возникает потребность проверить соответствие экспериментальных данных теоретическим предпосылкам, т. е. проверить пригодность гипотезы исследования. Проверка теоретических данных на адекватность, т. е. пригодность (соответствие) теоретической кривой экспериментальным данным, необходима также во всех случаях на стадии анализа теоретико-экспериментальных исследований. Методы оценки адекватности основаны

Таблица 4.12

на использовании доверительных интервалов, позволяющих с заданной доверительной вероятностью определять искомые значения оцениваемого параметра. Суть такой проверки состоит в сопоставлении полученной или предполагаемой теоретической функции $y = f(x)$ с результатами измерений. В практике оценки адекватности применяют различные статистические критерии согласия.

Критерий Фишера. В результате выполненного опыта имеются экспериментальные данные. Заранее на основе гипотезы была получена теоретическая кривая или же эта кривая была подобрана (аппроксимирована) по данным опыта. Установление адекватности — это определение ошибки аппроксимации.

Для установления адекватности необходимо рассчитать экспериментальное (опытное) значение критерия Фишера — $K_{фэ}$ и сравнить его с теоретическим (табличным) — $K_{фт}$, принимаемым при требуемой доверительной вероятности P_d (обычно 0,95). При этом, если $K_{фэ} < K_{фт}$ — модель адекватна; $K_{фэ} \geq K_{фт}$ — модель неадекватна (4.54). Опытный критерий Фишера вычисляют по формуле

$$K_{фэ} = \frac{D_a}{D_{ср}}, \quad (4.55)$$

D_a — дисперсия адекватности; $D_{ср}$ — средняя дисперсия всего эксперимента;

$$D_a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{it} - \bar{y}_{iэ})^2}{n-d}; \quad (4.56)$$

$$D_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (y_{it} - y_{iэ})^2}{mn}, \quad (4.57)$$

где y_{it} — теоретическое значение функции для каждого измерения; $y_{iэ}$ — экспериментальное значение функции; $\bar{y}_{iэ}$ — среднее экспериментальное значение функции из m серий измерений; n — количество измерений в одном опыте (одной серии или количество опытов); d — число коэффициентов уравнения теоретической регрессии.

Значение $K_{фт}$ принимается по табл. 4.12 для доверительной вероятности 0,95 и числа степеней свободы; $q_1 = n - d$; $q_2 = n(m - 1)$. В уравнении (4.56) y_{it} вычисляют по теоретической регрессии для фактора x_i ; \bar{y}_i — как средние из m серий измерений, т. е. $\bar{y}_{iэ} = \frac{1}{m} (y_{1э} + y_{2э} + \dots + y_{mэ})$.

Пример. Получено каким-либо путем теоретическое выражение $y = 80x$ и для его подтверждения проведен эксперимент. В каждой из пяти серий (повторностей, $(m = 5)$) выполнено по семь измерений ($n = 7$). Результаты приведены в табл. 4.13. Требуется установить пригодность, т. е. адекватность теоретического выражения.

q_1	Значения $K_{фт}$ при $P_d = 0,95$ для различных q_2								
	1	2	3	4	5	6	12	24	36
1	16	19	21	22	23	23	24	24	25
2	18	19	19	19	19	19	19	19	19
3	10	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,7	2,4	2,1	1,9	1,7
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
∞	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

Таблица 4.13

№ опытов	x_i	Измеренные значения $y_{iэ}$ в серии					Средние значения $\bar{y}_{iэ} = \frac{\sum_{j=1}^m y_{ijэ}}{m}$	y_{it}	$y_{it} - \bar{y}_{iэ}$	$(y_{it} - \bar{y}_{iэ})^2$	$\sum_{i=1}^m (y_{it} - \bar{y}_{iэ})^2$
		$y_{1э}$	$y_{2э}$	$y_{3э}$	$y_{4э}$	$y_{5э}$					
1	0,2	12	17	15	14	16	14,8	16	1,2	1,44	4,4
2	0,3	23	21	24	25	23	23,2	24	0,8	0,64	2,4
3	0,4	30	34	31	35	35	33,0	32	1,0	1,00	3,8
4	0,5	38	43	40	39	42	40,4	40	0,4	0,16	3,6
5	0,6	52	47	48	49	40	47,2	48	0,8	0,64	16,4
6	0,7	59	58	55	54	53	55,8	56	0,2	0,04	5,4
7	0,8	62	66	62	61	63	62,8	64	1,8	1,44	4,4
Итого										5,32	40,4

По формуле (4.57) дисперсия адекватности $D_a = \frac{5,32}{7-1} = 0,89$.
 Значение $d = 1$, поскольку в теоретическом выражении один значащий член x . Дисперсия D_{cp} вычислялась вначале постро-

$$\text{чно для } m, \text{ т. е. для первой строки } D_1 = \frac{\sum (y_{i1} - y_{i2})^2}{m} = \\ = \frac{1}{5} [(12 - 16)^2 + (17 - 16)^2 + (15 - 16)^2 + (14 - 16)^2] = 4,4.$$

Для второй строки $D_2 = \frac{1}{5} [(23 - 24)^2 + (21 - 24)^2 + (24 - 24)^2 + (25 - 24)^2 + (23 - 24)^2] = 2,4$ и т. д.
 Тогда средняя дисперсия всего эксперимента равна

$$D_{cp} = \frac{\sum_1^n D_i}{n} = \frac{40,4}{7} = 5,77.$$

По формуле (4.55) $K_{фз} = 0,89/5,77 = 0,15$.

Теоретические значения критерия Фишера принимаем по табл. 4.13 при следующих степенях свободы: $q_1 = 7 - 1 = 6$ и $q_2 = 7(5 - 1) = 27$, $K_{фт} = 3,75$. Поскольку $K_{фз} = 0,15 < K_{фт} = 3,75$, то модель адекватна, т. е. полученная математическая модель с доверительной вероятностью 95 % хорошо описывает изучаемый процесс. Критерий Фишера применяется широко обычно для определения адекватности малых выборок. В больших выборках применяют критерии Пирсона, Романовского, Колмогорова. Эти методы рассматриваются ниже.

§ 10. Определение законов распределения и их адекватности экспериментальным данным

При подведении экспериментов очень часто результаты наблюдений обрабатываются в виде тех или иных законов распределения (см. § 5, гл. 3). В таких случаях возникают две основные задачи: определение вида вероятностного закона, которому подчиняется исследуемый процесс, т. е. аппроксимация экспериментальной информации каким-либо законом распределения, и проверка пригодности, т. е. адекватности этого закона экспериментальными данными.

Для установления математических вероятностных моделей вначале необходимо построить гистограмму случайного процесса (рис. 3.8), которая характеризует общий вид закона распределения. Далее проводят по гистограмме осредненную кривую, внешний вид которой позволяет судить о типе закона распределения.

Для проверки ее адекватности теоретической кривой необходимо применить какой-либо из критериев: Пирсона, Романовского и Колмогорова. Критерий Пирсона — наиболее широко применя-

мый, особенно при больших статистических измерениях. Гипотеза о законе распределения подтверждается, если соблюдается условие $P(\chi^2, q) > \alpha = 1 - \Phi(x)$ (4.58.). Здесь $\alpha = 1 - \Phi(x)$ — уровень значимости, обычно принимаемый равным 0,10; χ^2 — критерий согласия Пирсона; q — число степеней свободы, равное $q = m - S$ (4.59), где m — количество групп (серий, разрядов) большой выборки или число измерений в одной серии при анализе односерийного эксперимента; S — число используемых связей (констант). Значение χ^2 вычисляют по формуле

$$\chi^2 = \sum_1^m \frac{(y_{si} - y_{mi})^2}{y_{mi}}; \quad (4.60)$$

y_{mi} , y_{si} — количество измерений (частота) в каждой группе серий соответственно по данным эксперимента и по теоретической кривой.

Пусть имеем большую выборку N измерений. Разбиваем статистические измерения на m разрядов, в которых $x_1 - x_2$, $x_3 - x_4$, $x_5 - x_6$ и т. д. По данным измерений в каждом разделе оказалось y_3 измерений. Так, в диапазоне $x_1 - x_2$ имеется y_{s1} измерений (частота); в $x_3 - x_4 - y_{s2}$ измерений и т. д. Очевидно, $\sum_1^m y_{si} = N$.

Строят экспериментальную кривую частот по $y_{si} = f(x)$ или $y_{si}/N = f(x)$. Эту кривую можно аппроксимировать различной теоретической кривой — законом Пуассона, показательным, логарифмическим, нормальным и др. Для теоретической кривой устанавливаются соответствующие экспериментальным частоты y_{mi} . Затем производят вычисления критерия Пирсона χ^2 по формуле 4.60 и сравнивают его с табличными данными (4.14).

Таблица 4.14

χ^2	Значения критерия Пирсона $P(\chi^2, q)$ при числе степеней свободы q							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,317	0,606	0,801	0,909	0,962	0,985	0,994	0,998
2	0,157	0,367	0,572	0,735	0,849	0,919	0,959	0,981
3	0,083	0,223	0,391	0,557	0,700	0,806	0,885	0,934
4	0,045	0,135	0,261	0,406	0,549	0,767	0,779	0,854
5	0,025	0,083	0,171	0,287	0,415	0,543	0,660	0,757
6	0,014	0,049	0,111	0,199	0,306	0,423	0,539	0,647
7	0,008	0,030	0,071	0,135	0,220	0,320	0,428	0,536
8	0,004	0,018	0,046	0,091	0,156	0,238	0,332	0,433
9	0,002	0,011	0,029	0,061	0,109	0,173	0,252	0,342
10	0,001	0,006	0,018	0,040	0,075	0,124	0,188	0,265
11	0,000	0,004	0,011	0,026	0,051	0,088	0,138	0,201
12	—	0,002	0,007	0,017	0,034	0,062	0,100	0,151
13	—	0,001	0,004	0,011	0,023	0,043	0,072	0,111
14	—	0,000	0,002	0,007	0,014	0,029	0,036	0,059
15	—	—	0,001	0,004	0,010	0,020	0,036	0,042

Пример. Произведено 250 измерений некоторых величин, $N = 250$. Необходимо определить закон распределения. Для этого экспериментальные данные y_{zi} разбивают на семь групп. Результаты измерений наносят на сетку в прямоугольных координатах и устанавливают, что кривая близка к закону нормального распределения. Поэтому в качестве аппроксимирующей принимают кривую нормального распределения, по которой установлены соответственно теоретические частоты:

y_{zi}	1	23	50	82	58	28	2
y_{ti}	1	27	57	80	57	27	1

Согласно формуле (4.60) вычисляют критерий согласия

$$\chi^2 = \frac{(1-1)^2}{1} + \frac{(23-27)^2}{27} + \frac{(50-57)^2}{57} + \frac{(82-80)^2}{80} + \frac{(58-57)^2}{57} + \frac{(28-27)^2}{27} + \frac{(2-1)^2}{1} = 2,56.$$

По количеству разрядов $m = 7$, констант нормального закона $S = 2$, $q = 7 - 2 = 5$. По табл. 4.13 $P(2,56; 5) \chi^2_m = 0,774$. Адекватность удовлетворяется, поскольку $0,774 > 0,10$. Критерий Романовского

$$K_p = \frac{\chi^2 - q}{\sqrt{2q}}. \quad (4.61)$$

Здесь число степеней свободы q вычисляют с помощью (4.63). Адекватность удовлетворяется при $K_p < 3$. Для рассмотренного примера $K_p = \frac{2,56 - 5}{\sqrt{2 \cdot 5}} < 3$.

Таким образом, по критериям Пирсона и Романовского гипотеза о принадлежности экспериментальных данных кривой нормального распределения подтверждается. Критерий Колмогорова K_d применяется для оценки адекватности при большей статистической выборке N . Чтобы определить этот критерий, статистическую кривую частот преобразовывают в статистическую интегральную функцию. Находят наибольшую разность частот между экспериментальной статистической интегральной кривой и соответствующей теоретической интегральной кривой: $D_0 = \max(\sum y_{zi} - \sum y_{ti})$ (4.62). Затем вычисляют $\lambda = D_0 \sqrt{N}$ (4.63). По значению λ в специальных таблицах находят вероятность $P(\lambda)$. Адекватность удовлетворяется, если $P(\lambda) > 0,05$, т. е. экспериментальные данные подтверждают теоретическое распределение.

ГЛАВА 5

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

§ 1. Основные понятия планирования эксперимента

Основа традиционных методов экспериментального исследования — определение требуемых зависимостей при изменении одного фактора и постоянстве остальных (однофакторный эксперимент). Так, прочность бетона зависит от многих факторов, главными из которых являются активность цемента, водоцементное отношение и т. д. При таком методе устанавливается степень влияния каждого переменного фактора в отдельности на прочность бетона, исследуемое явление или объект.

Эти методы обладают рядом существенных недостатков. Основным из них является не всегда корректное допущение о возможности стабилизации всех переменных исследуемого объекта при последовательном выделении каждой из них в целях изучения объекта с достаточной степенью точности. Кроме того, традиционные методы исследования исключительно трудоемки.

В отличие от традиционных форм выполнения экспериментов в последнее время все чаще применяются методы математического планирования, позволяющие одновременно изучать влияние ряда факторов (многофакторный эксперимент) на исследуемый объект. Они основаны на математической теории эксперимента, которая определяет условия оптимального проведения исследования, в том числе и при неполном знании физической сущности явления. Для этого используют математические методы не только на стадии обработки результатов измерений, как было раньше, но также при подготовке и проведении опытов. Математические методы планирования эксперимента позволяют исследовать и оптимизировать сложные системы и процессы, обеспечивая высокую эффективность эксперимента и точность определения исследуемых факторов.

Видный ученый в области математической теории эксперимента В. В. Налимов считает, что планирование эксперимента — это оптимальное управление экспериментом при неполном знании механизма явлений. Эксперименты обычно ставятся небольшими сериями по заранее согласованному алгоритму, оптимальному в не-

котором строго сформулированном смысле. После каждой небольшой серии опытов производится обработка результатов наблюдений и принимается строго обоснованное решение о том, что делать дальше. Планирование эксперимента на основе его математической теории можно рассматривать как одно из направлений кибернетики. Во многих случаях, приступая к исследованию какого-либо объекта (процесса), мы не знаем его механизма. Поэтому можно только выделить определяющие условия протекания процесса и требования к его результатам. Тогда представляется целесообразным использовать кибернетический подход, где объект исследования может быть представлен в виде «черного ящика».

Научиться управлять объектом, информация об элементарных процессах внутри которого чрезвычайно мала, с использованием традиционных методов экспериментальных исследований очень трудно. Это можно сделать путем использования методов планирования эксперимента. При планировании эксперимента возможно решение различных вопросов, связанных с изучением кинетики и механизма явлений, исследованием зависимостей «состав-свойство», выявлением неоднородностей процесса и их влиянием на выходные факторы. Кроме того, планирование эксперимента может осуществляться в целях адаптации технологического процесса к изменяющимся оптимальным условиям его протекания и обеспечения таким образом высокой эффективности его осуществления и др. В зависимости от поставленных в исследованиях задач применяются различные виды планов.

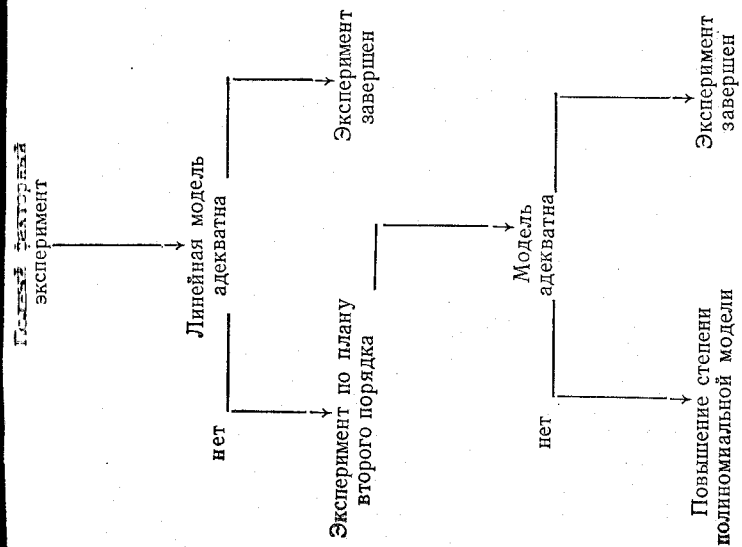
Теория математического эксперимента содержит ряд концепций, которые обеспечивают успешную реализацию задач исследования. К ним относятся концепции рандомизации, последовательного эксперимента, математического моделирования, оптимального использования факторного пространства и ряд других.

Принцип *рандомизации* заключается в том, что в план эксперимента вводят элемент случайности. Для этого план эксперимента составляют таким образом, чтобы те систематические факторы, которые трудно поддаются контролю, учитывать статистически и исключить в исследованиях как систематические ошибки.

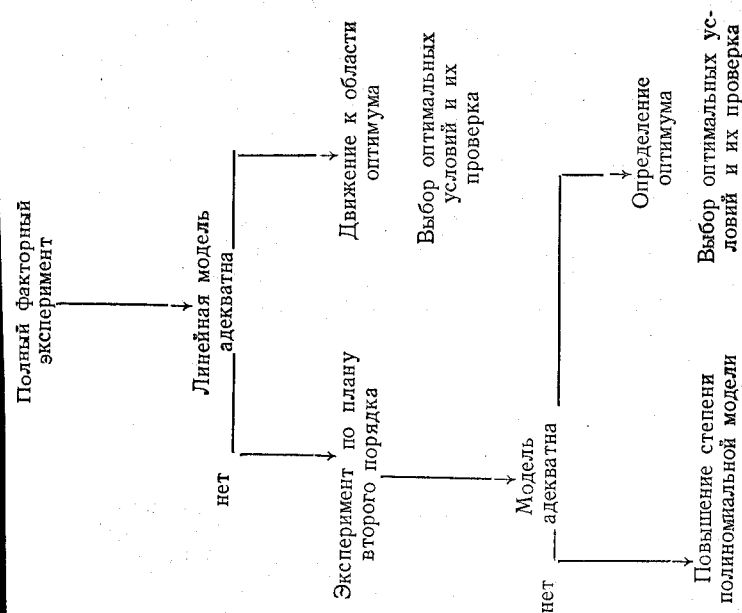
При *последовательном проведении* эксперимента его выполняют не одновременно, а поэтапно, т. е. результаты каждого этапа анализируют и принимают решение о целесообразности проведения дальнейших исследований (рис. 5.1).

В результате эксперимента получают уравнение регрессии, которое часто называют *моделью процесса*. Для конкретных случаев математическая модель создается исходя из целевой направленности процесса и задач исследования, с учетом требуемой точности решения и достоверности исходных данных.

С позиции кибернетики под *моделью* понимают не абсолютное точное описание явления (подобно закону), а приближенное выражение неизвестного закона, которое удовлетворительно характеризует явление в некоторой локальной области факторного пространства.



а



б

Рис. 5.1. Структурная схема эксперимента с целью:
 а — математического описания исследуемого процесса; б — оптимизации исследуемого процесса

ства. Для приближенного описания одного и того же явления можно предложить несколько моделей, оценка которых обычно 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.

Одна из существенных концепций в теории планирования эксперимента — *оптимальное использование факторного пространства*. Она заключается в том, что состояние объекта в каждом опыте определяется по результату одновременного оптимального варьирования n факторов в n -мерном пространстве. Это позволяет добиться значительного увеличения точности расчета коэффициентов полученной модели и уменьшить трудоемкость эксперимента.

Наиболее изучены, а потому и широко используются планы экстремального эксперимента, которые позволяют описать исследуемый процесс и выполнить его оптимизацию. Эти планы представляют собой систему опытов, содержащую возможные повторяющиеся комбинации выбранных факторов при заданных уровнях их варьирования. Данный метод позволяет одновременно изучать влияние многих факторов на исследуемый процесс и дает возможность получения полином k -й степени (функцию отклика) для математического описания исследуемого процесса в некоторой локальной области факторного пространства, лежащего в окрестности выбранной точки с координатами $(z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0n})$. Полученную функцию отклика можно использовать также для оптимизации процесса, т. е. определять параметры, при которых явление или процесс будет протекать наиболее эффективно.

Экстремальный эксперимент основан на положении о 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:

$$y = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_n z_n + \beta_{12} z_1 z_2 + \dots + \beta_{(n-1)n} z_{n-1} z_n + \beta_{11} z_1^2 + \beta_{22} z_2^2 + \dots + \beta_{nn} z_n^2, \quad (5)$$

где β_0 — значение функции отклика в начале координат $z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0n}$;

$$\beta_i = \frac{\partial y}{\partial z_i}; \quad \beta_{ij} = \frac{\partial^2 y}{\partial z_i \partial z_j}; \quad \beta_{ii} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 y}{\partial z_i^2}; \quad (5)$$

Ряд Тейлора аналогичен уравнению регрессии:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + a_{12} x_1 x_2 + \dots + a_{(n-1)n} x_{n-1} x_n + a_n x_1^2 + a_{22} x_2^2 + \dots + a_{nn} x_n^2. \quad (5)$$

Здесь a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} — коэффициенты регрессии; x_i — кодированная переменная, введенная в целях упрощения арифметических расчетов

и равная $x_i = \frac{z_i - z_{0i}}{\Delta z_i}$; $\Delta z_i = \frac{z_{i \max} - z_{i \min}}{2}$, $z_{0i} = \frac{z_{i \max} + z_{i \min}}{2}$.

Следовательно, x_i — относительное: максимальному значению $z_{i \max}$ соответствует $x_i = +1$, минимальному — $z_{i \min}$ — $x_i = -1$.

Коэффициенты регрессии в уравнении (5.3) вычисляются методами математической статистики и представляют собой приближенную оценку коэффициентов $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \dots$ в уравнении (5.1). Следовательно, уравнение (5.3) описывает исследуемый объект (процесс) только с определенной степенью точности.

Уравнение (5.3) широко используют для получения математической модели объектов исследования, хотя оно и не содержит необходимой информации о механизме явления и его физико-химических свойствах. Действительно, зная уравнения, аналогичные (5.3), нельзя восстановить исходную функцию, описывающую объект исследования. В то же время они исключительно полезны для решения экстремальных задач. В математической теории эксперимента разработаны оптимальные планы получения уравнения типа (5.3) и их использования для определения экстремумов.

Следует отметить, что определение коэффициентов регрессии трудоемко и громоздко, поэтому, за исключением простейших случаев, их вычисление и анализ уравнений типа (5.3) производят с помощью цифровой ЭВМ по специально составленной программе.

Планы оптимального эксперимента реализуются в такой последовательности: 1) оценка информации и определение n факторов, наиболее существенных для исследуемого процесса; 2) использование математической модели в виде линейной функции отклика; 3) анализ выбранной модели; 4) нахождение экстремума в области n -мерного факторного пространства путем использования полинома k -й степени; 5) если модель неадекватна, то в качестве модели выбирают полиномы более высокого порядка.

§ 2. Планирование эксперимента с целью описания исследуемого объекта

Началом планирования эксперимента является сбор, изучение и анализ имеющихся данных об объекте. В результате этого 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, что обеспечивает корректную постановку задачи.

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 факторами z_i и значением y необходимо однозначное соответствие; факторы z_i между собой взаимно независимы. В исследованиях (в целях упрощения вычислений)

удобно пользоваться относительными (кодированными) переменными x_i :

$$x_i = \frac{z_i - z_{0i}}{\Delta z_i}; \quad z_{0i} = \frac{z_{i \max} + z_{i \min}}{2}; \quad \Delta z_i = z_{i \max} - z_{0i} = z_{0i} - z_{i \min};$$

$$\frac{z_{i \max} - z_{i \min}}{2}; \quad (5.4)$$

$z_{i \max}$, $z_{i \min}$ — наибольшее и наименьшее значения (верхний и нижний уровень) факторов z_i ; z_{0i} — средний (нулевой) уровень

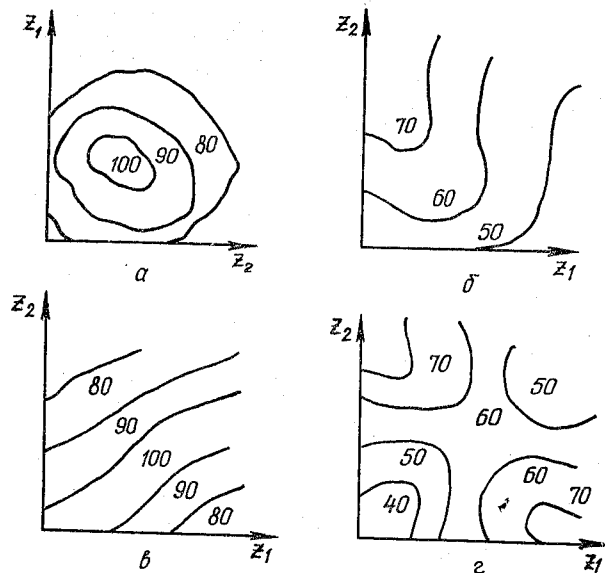


Рис. 5.2. Виды поверхностей откликов:
а — параболоида, б — стационарной возвышенности, в — хребет, г — седло

факторов z_i ; значениям $z_{i \max}$ и $z_{i \min}$ соответствует $x_{i \max} = 1$ и $x_{i \min} = -1$. Очевидно, что если при значениях $x_{i \max}$ и $x_{i \min}$ или кратным им ставятся эксперименты, то вычисления упрощаются. Значение фактора, которое фиксируется при проведении эксперимента, называется его уровнем.

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 сочетаниях 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. Наибольшее распространение получили планы экспериментов типа 2^n . С увеличением q резко возрастает количество опытов, поэтому если $q > 2$, планы ПФЭ редко используются.

В соответствии с идеей *последовательного поиска* ПФЭ проводится в несколько этапов. Для упрощения изложения ограничимся полиномами первой и второй степени. В дальнейшем проанализируем только полный двухфакторный эксперимент, составляемый с целью описать поверхность отклика второго порядка (рис. 5.2).

Допустим, что необходимо исследовать явление в зависимости от изменения двух факторов z_1 и z_2 методом полного двухфакторного эксперимента. Обычно в начале предполагают, что оно описы-

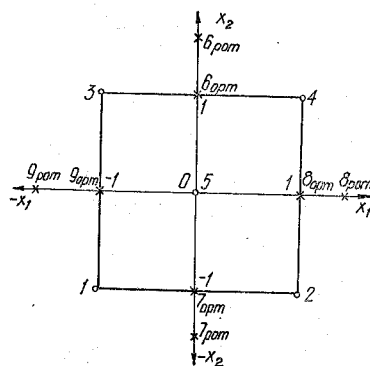


Рис. 5.3. Планы для функций $y = f(x_1, x_2)$

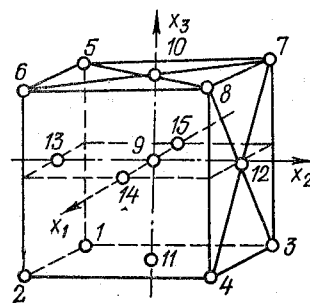


Рис. 5.4. Планы для функций $y = f(x_1, x_2, x_3)$

вается линейным полиномом, т. е. поверхность отклика представляет собой плоскость, характеризуемую полиномом $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$ (5.5).

Чтобы построить поверхности 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 (рис. 5.3) и матрицу (табл. 5.1) двухфакторного эксперимента, в соответствии с которыми и проводят исследование.

Как следует из матрицы, первый опыт проводят при минимальных значениях факторов z_1 и z_2 , четвертый — при максимальных значениях z_1 и z_2 , второй — при минимальном значении z_2 и максимальном z_1 , а третий — наоборот.

Таблица 5.1

Номер опыта	Факторы		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

Таблица 5.2

Номер опыта	Факторы			Функция отклика, y_i
	x_1	x_2	x_3	
1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	-1	y_4
5	-1	-1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	+1	y_7
8	+1	+1	+1	y_8

первого фактора чередуются от опыта к опыту, частота смены уровней варьирования каждого последующего фактора вдвое меньше, чем у предыдущего. У последнего фактора уровни изменяются всегда два раза.

Матрица планирования полного факторного эксперимента в этом случае обладает следующими свойствами:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 0; \quad \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 = m; \quad \sum_{j=1}^m x_{iu}x_{ju} = 0. \quad (5.6)$$

Здесь m — число опытов полного факторного эксперимента; j — номер опыта; i, u — номер факторов.

Свойство, выраженное уравнениями (5.6), называется ортогональностью, а матрица — ортогональной (прямоугольной). Это свойство обеспечивает относительную простоту вычисления коэффициентов регрессии, которые определяют по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j; \quad a_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ji} y_j; \quad a_{iu} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ji} x_{ju} y_j. \quad (5.7)$$

Формулы (5.7) применимы только для вычисления коэффициентов ортогонального 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 $|a| \geq D_a t$ (5.8), где t — критерий Стьюдента (см. табл. 4.2); D_a — дисперсия, при определении коэффициента регрессии $D_a = D_{\bar{y}}/\sqrt{m}$, $D_{\bar{y}}$ — дисперсия среднего значения фактора.

Полученные таким образом уравнения линейной регрессии проверяют по условию адекватности (например, по критерию Фишера). Адекватность линейного полинома можно определить и путем вы-

числения коэффициентов регрессии $a_{12}, \dots, a_{(n-1)n}$, которые при адекватности линейного полинома равны нулю.

В случае линейного полинома для нахождения коэффициентов регрессии, используя метод дробного факторного эксперимента (ДФЭ), можно уменьшить количество опытов, которые представляют собой часть матрицы полного факторного эксперимента (например, 1/2, 1/4 часть и т. д.). Так, чтобы найти коэффициенты регрессии уравнения $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ (5.9), необходимо провести восемь опытов согласно матрице планирования полного факторного эксперимента. Однако их можно найти и при уменьшении количества опытов до четырех, реализовать половину матрицы, поскольку план трехфакторного эксперимента представляется в форме куба, параметры которого полностью определены, если зафиксирована диагональная плоскость и вершины куба, лежащие на ней (рис. 5.4).

В этом случае основу матрицы составляет матрица двухфакторного эксперимента, варьирование третьего фактора соответствует произведению x_1x_2 (табл. 5.3). Это преобразование допустимо, если коэффициент регрессии a_{12} незначим или равен нулю.

Такое планирование эксперимента, когда некоторые факторы приравнивают к произведению нескольких факторов, называется планированием со смешиванием. Его обозначают 2^{n-p} , где n — число факторов; p — число факторов, приравниваемых к произведениям. Например, описанное выше планирование (табл. 5.3) обозначают 2^{3-1} .

Использование метода ДФЭ или дробных реплик дает возможность в несколько раз уменьшить число опытов при исследовании линейных моделей. В табл. 5.4 приведена матрица планирования 2^{7-4} , позволяющая при восьми опытах определить коэффициенты регрессии линейного полинома: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7$ (5.10). Здесь принято $x_4 = x_1x_2$; $x_5 = x_1x_3$; $x_6 = x_2x_3$; $x_7 = x_1x_2x_3$. Такие равенства называют генерирующими соотношениями, их выбор произволен, однако повторение не допускается. Широко используют планы $2^{3-1}, 2^{5-2}, 2^{6-3}$,

Таблица 5.3

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1x_2$	y_j
1	+1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4

Таблица 5.4

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Такие равенства называют генерирующими соотношениями, их выбор произволен, однако повторение не допускается. Широко используют планы $2^{3-1}, 2^{5-2}, 2^{6-3}$,

2^{7-3} и т. д., позволяющие уменьшить количество опытов в два и более раз.

Если же экспериментальные данные не согласуются с линейной моделью, то исследуемый процесс стремятся описать поверхностью второго порядка. Использование полинома второго порядка для описания объекта исследования на двух уровнях варьирования факторов x_i недостаточно. При использовании ПФЭ типа 3^n резко возрастает количество опытов, план становится трудоемким, формулы для вычисления коэффициентов регрессии — громоздкими.

Используя концепцию факторного пространства, можно дополнить двухуровневый план ПФЭ с определенными (звездными) точками (рис. 5.3). Тогда полное количество опытов можно выразить в виде $m = 2^n + 2n + N_0$ (5.11), где 2^n — количество опытов ПФЭ при $q = 2$; $2n$ — количество звездных точек; N_0 — нулевые точки.

Такие планы называются центральными, композиционными (ЦКП). Различают ортогональные (почти ортогональные) и ротативные ЦКП. При ортогональных ЦКП количество опытов определяют по формуле $m = 2^n + 2n + 1$ (5.12). При этом значение звездного плеча α зависит от количества факторов n . Если $n = 2$, то $\alpha = 1,0$; при $n = 3$, $\alpha = 1,215$; в случае $n = 4$ $\alpha = 1,414$ и т. д.

Большим преимуществом этих планов является то, что их можно получать из планов типа 2^n . Для этого к реализованному плану линейного полинома добавляют опыты в промежуточных «звездных» точках и в центре плана. Полученную при этом «композицию» используют для математического описания процесса в виде многочлена второй степени: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2$ (5.13). С учетом изложенного матрица ортогонального ЦКП для двух факторов представлена в виде табл. 5.5.

Таблица 5.5

Система опытов	Номер опыта	x_1	x_2	x_1x_2	y_i
Полный факторный эксперимент линейной модели	1	-1	-1	+1	y_1
	2	+1	-1	-1	y_2
	3	-1	+1	-1	y_3
	4	+1	+1	+1	y_4
Опыт в центре плана	5	0	0	0	y_5
Опыты в звездных точках	6	0	+1	0	y_6
	7	0	-1	0	y_7
	8	+1	0	0	y_8
	9	-1	0	0	y_9

В принятой матрице «0» показывает, что значения z_i приняты в начале координат (рис. 5.3). Коэффициенты регрессии в этом случае вычисляются с помощью формул:

$$a_0 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_j = \frac{a_{11}}{m} \sum_{j=1}^m x_{1j}^2 - \dots - \frac{a_{uu}}{m} \sum_{j=1}^m x_{ju}^2, \quad (5.14)$$

$$a_i = - \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2} \quad (i \neq 0), \quad (5.15)$$

$$a_{iu} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij} x_{uj} y_j}{\sum_{j=1}^m (x_{ij} x_{uj})^2} \quad (i \neq u), \quad (5.16)$$

$$a_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^m \left(x_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 \right) y_j}{\sum_{j=1}^m \left(x_{ij}^2 - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 \right)^2}, \quad (5.17)$$

где j — номер опыта; i, n — номера факторов. Для расчета оценки дисперсий при определении коэффициентов регрессии используют следующие выражения:

$$D_{a_0} = \frac{D_y^2}{m} + \frac{m D_{a_{ii}}^2}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}^2, \quad (5.18)$$

$$D_{a_j} = \frac{D_y^2}{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2} \quad (i \neq 0), \quad (5.19)$$

$$D_{a_{iu}} = \frac{D_y^2}{\sum_{j=1}^m (x_{ij} x_{iu})^2} \quad (i \neq 0), \quad (5.20)$$

$$D_{a_{ii}} = \frac{D_y^2}{\sum_{j=1}^m \left(x_{ij}^2 - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 \right)^2}. \quad (5.21)$$

Коэффициенты a_0, a_i, a_{iu} значимы, если выполняется условие (5.8). Адекватность полученного уравнения регрессии проверяется с помощью критерия Фишера. Для двух- и трехфакторного экспе-

$$\begin{aligned} \times 350) &= \frac{1553}{9} = 172; \quad a_1 = \frac{1}{6} (410 + 116 - 88 - 306 + 101 - 350) = \frac{761}{6} \\ &= -127; \quad a_2 = \frac{1}{6} (-410 - 116 + 88 + 306 - 161 - 187) = \frac{158}{6} = -26; \quad a_{11} \\ &= \frac{1}{6} (88 + 116 + 306 + 410 - 2 \cdot 175 + 2 \cdot 161 - 2 \cdot 187 + 101 + 350) = 325/6 \\ &= 54; \quad a_{22} = 1/6 (88 + 116 - 306 + 410 - 2 \cdot 175 - 161 + 187 - 2 \cdot 101 - 2 \\ &\times 350) = 16/6 = 2,8; \quad a_{12} = 1/4 (410 - 116 - 306 + 88) = 19. \end{aligned}$$

Коэффициент a_{22} незначим, им можно пренебречь. Следовательно, имеем полином $y_1 = 172 - 127x_1 - 26x_2 + 54x_1^2 + 19x_1x_2$.

7. По формуле (4.60) вычислим оценку дисперсии адекватности $D = 1/9 - 6(11^2 + 10^2 + 2^2 + 4^2 + 3^2 + 12^2 + 11^2 + 3^2) = 528/3 = 176$. Согласно данным эксперимента $D_{cp} = 256$ критерии Фишера $K_\phi = 256/176 = 1,44 < K_{\phi m}$. Таким образом, полученный полином адекватно описывает искомого зависимост. Этот полином можно представить в натуральных значениях факторов $\frac{B}{Ц}$ и $\frac{\Pi}{Ц}$.

$$\begin{aligned} R_0 &= 172 - 127 \left(\frac{B}{Ц} - 0,5 \right) - 26 \left(\frac{\Pi}{Ц} - 2,5 \right) + 54 \frac{\left(\frac{B}{Ц} - 0,5 \right)^2}{0,1} + \\ &+ 19 \frac{\left(\frac{B}{Ц} - 0,5 \right)^2}{0,1} \cdot 19 \frac{\left(\frac{B}{Ц} - 0,5 \right)}{0,1} \left(\frac{\Pi}{Ц} - 2,5 \right) = 2479 - 7145 \frac{B}{Ц} - 121 \frac{\Pi}{Ц} + \\ &+ 5400 \left(\frac{B}{Ц} \right)^2 + 190 \frac{B}{Ц} \cdot \frac{\Pi}{Ц}. \end{aligned}$$

Более точными планами по сравнению с ортогональными являются ротатбельные планы, что достигается благодаря увеличению количества опытов в центре плана и специальному выбору звездного плеча α (табл. 5.11). Однако ротатбельное планирование

Таблица 5.11

Количество факторов	n	2	3	4	5
Звездное плечо	α	1,414	1,680	2,00	2,378
Общее количество опытов	m	13	20	31	52
Число опытов в центре плана	N_0	5	6	7	10

только более трудоемкое по сравнению с ортогональным, но и вычисление коэффициентов регрессии производится по относительно громоздким формулам. Частое применение ортогональных и ротатбельных планов объясняется тем, что они позволяли относительно просто определять коэффициенты регрессии и дисперсии. Выполнение эксперимента на трех и более уровнях в целях повышения его точности и его обработка также представляли значительные трудности, особенно при расчетах, выполняемых вручную. В связи с развитием вычислительной техники появилась возможность считать основным критерием оптимальности неортогональность плана, что позволяет относительно просто выполнять вычисления. В. В. Налимов указывает, что эффективность

оценок плана определяется не только оптимальным способом обработки результатов экспериментов, но и оптимальным расположением точек плана в факторном пространстве, что обеспечивает его высокую точность.

Одним из важнейших в современной теории эксперимента является критерий D-оптимальности, который требует, чтобы объем n -мерного эллипсоида рассеивания оценок материалов был минимальным. Очевидно, в этом случае и дисперсия переменного состояния объекта исследования будет также минимальной, т. е. качество эксперимента будет высоким. Планы, удовлетворяющие этому критерию, называются D-оптимальными. Они позволяют проводить эксперименты, в которых факторы варьируются на нескольких уровнях — двух, трех, четырех, пяти и т. д. В этом случае эффективно используется факторное пространство (рис. 5.5, табл. 5.12). При таком расположении точек в факторном пространстве можно достаточно точно описать исследуемый объект.

Таблица 5.12

№ опыта	Кодированные переменные	
	x_1	x_2
1	-2	0
2	-1	+1
3	-1	-1
4	0	+2
5	0	0
6	0	-2
7	+1	+1
8	+1	-1
9	+2	0

Количество опытов не превышает необходимого для ортогонального ЦКП (формула (5.11)).

В ряде случаев целесообразно, чтобы уровни факторов изменялись неодинаково, например возможен план $5^1 \cdot 3^2 \cdot 2^3$. Это означает, что один фактор варьируется на пяти уровнях, два фактора — на трех, три — на двух. Это несимметричный план. Если все факторы имеют одинаковое число уровней, такой план называется симметричным.

Разработаны также A-оптимальные планы (они имеют минимальную длину диагонали прямоугольника, описанного вокруг n -первого эллипсоида рассеивания параметров) и E-оптимальные планы (достигается минимум максимальной оси эллипсоида рассеивания). Реализация планов эксперимента ограничивается требованиями независимости переменных факторов. Поэтому в ряде случаев, особенно при реализации наиболее универсальных несимметричных планов, на первое место в качестве критерия оптимизации выдвигается коэффициент парной корреляции между коэффициентами, который не должен превышать 0,5 (по Л. П. Рузинову).

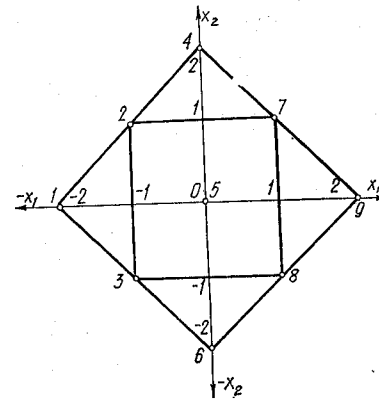


Рис. 5.5. D-оптимальный план для функций $f(x_1, x_2)$

Изданы специальные каталоги планов эксперимента (например, каталог, выпущенный Московским государственным университетом), в которых проводится сравнительная оценка планов и даются рекомендации по их выбору применительно к конкретным условиям эксперимента.

§ 3. Оптимизация технологических процессов с использованием планирования экспериментов

Важное место в теории планирования эксперимента занимают вопросы оптимизации исследуемых процессов свойств многокомпонентных систем или других объектов. Их эффективность наибольшая только в оптимальных условиях, характеризующихся экстремальными значениями y_i — переменными состояниями объекта при определенных значениях параметров x_i . Отметим также, что качество процесса обычно характеризуется несколькими функциями отклика. Как правило, нельзя найти такое сочетание значений влияющих факторов, при котором одновременно достигается экстремум всех функций отклика. Например, максимальная производительность экскаватора и минимальная стоимость копан грунта достигаются при различных режимах работы экскаватора. Поэтому в большинстве случаев критерием оптимальности выбирают только одну из переменных состояний — функцию отклика, характеризующую процесс, а остальные принимают приемлемыми для данного случая.

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 ротатбельные ЦКП, Д — оптимальные и др.).

Покажем, как можно использовать результаты полного факторного эксперимента для оптимизации процесса методом крутого восхождения или наискорейшего спуска. Допустим, что в некоторой окрестности точки y_i с координатами z_1 и 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 производную $a_1\Delta z_1$, 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

$$v = \frac{\Delta z_{01}}{a_1 \Delta z_1} \quad (5.2)$$

Затем вычисляют шаги движения к оптимуму для всех остальных факторов, в данном случае $\Delta z_{02} = va_2\Delta z_2$ (5.25).

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. Если же определяют минимум функции y , то новые значения факторов находят из предыдущих путем вычитания Δz_{0i} , выполняя наискорейший спуск.

Движение к оптимуму прекращают, если достигнут оптимум функции критерия оптимальности y (в пределах ограничений, наложенных на внешние факторы и функции отклика). Затем в области экстремума функции определяют ее новое выражение в виде полинома.

Пример. Необходимо оптимизировать кинетику химического процесса, в котором выход реакции y_1 (%) зависит от температуры реакционной смеси ($^{\circ}\text{C}$) и концентрации реагента (%). В результате полного факторного эксперимента получено адекватное уравнение регрессии $y_1 = 45,0 + 1,95x_1 - 1,35x_2$.

Основные характеристики плана эксперимента приведены в табл. 4.25. Ограничения на влияющие факторы имеют вид $30^{\circ} \leq z_1 \leq 120^{\circ}$; $10\% \leq z_2 \leq 70\%$. Будем оптимизировать выход продукции методом крутого восхождения. В качестве базового фактора примем z_1 , шаг движения на крутом восхождении $\Delta z_{01} = 4^{\circ}$. Тогда

$$v = \frac{z_{01}}{a_1 \Delta z_1} = \frac{4}{1,95 \cdot 5} = 0,41; \quad \Delta z_{02} = va_2 \Delta z_2 = 0,41 (-1,35) \cdot 1 = -0,55^{\circ}.$$

Принимаем шаг по концентрации $\Delta z_{02} = 0,5^{\circ}$. Результаты опытов, выполненных методом крутого восхождения, приведены в табл. 5.13.

Таблица 5.13

Характер и номер опыта	z_1	z_2	x_1	x_2	y_3	y_p
Центр плана	50	25	0	0	—	—
Интервал варьирования	5	1	1	12	—	—
Шаг движения	4	-0,5	0,8	0,5	—	—
Полный факторный эксперимент						
1	45	24	-1	-1	45,0	44,5
2	55	24	+1	-1	48,0	48,1
3	45	26	-1	+1	42,0	41,7
4	55	26	+1	+1	45,6	45,6
5	50	25	0	0	44,5	45,0
Крутое восхождение						
6	54	24,5	0,8	0,5	46,0	45,9
7	58	24,0	1,6	-1,0	47,2	47,0
8	62	23,5	2,4	-1,5	48,1	47,6
9	66	23,0	3,2	-2,0	50,0	48,5
10	70	22,5	4,0	-2,5	47,5	49,4
11	74	22,0	4,8	-3,0	46,5	50,3

Как видно из табл. 5.13, в опыте 9 достигнут максимальный выход продукта реакции. Далее для окрестности точки $z_1 = 66^\circ$, $z_2 = 23\%$ определяют новый линейный полином регрессии, который более точно характеризует поверхность отклика в окрестностях оптимума.

Наряду с описанным методом часто используют для оптимизации процессов методы Гауса—Зейделя, методы симплексов и др. По методу Гауса—Зейделя оптимум исследуемого процесса определяют поочередным варьированием каждого фактора. При этом достигают оптимума по одному фактору, затем при его фиксированном значении находят оптимум по другим переменным.

Симплексом называют правильную фигуру, имеющую $n + 1$ вершину, где n — число факторов, влияющих на процесс. Если $n = 2$, то имеет место правильный треугольник. В симплекс-методе можно отбросить одну вершину и построить новый симплекс, используя новую вершину, построенную симметрично отброшенной. Если последовательно отбрасывать вершину с самым плохим значением выходной переменной, то центр симплекса будет перемещаться к оптимуму. Более эффективны и менее трудоемки планы второго порядка (ортогональные и ротатабельные ЦКП), Д-оптимальные и другие планы для определения оптимальных условий процесса. Так, в технологии бетонов при оптимизации составов целесообразно использовать Д-оптимальные квазиортогональные планы на пяти целочисленных уровнях с использованием модели второго порядка.

Для определения коэффициентов этой модели используется программа «Полином», которая также предусматривает вычисление отклонений опытных значений выхода от расчетных во всех точках плана. При вычислении коэффициентов моделей на печать выводятся только значимые их величины, а незначимые отбрасываются с последующим пересчетом оставшихся. Адекватность полученных моделей, как и принято в математической теории эксперимента, проводится по критерию Фишера.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию комплексных химических составов, состоящих из водорастворимого полимера (ВРП-1) и скруберной пасты синтетических моющих средств (СПСМС). При выполнении эксперимента использованы планы на пяти уровнях (табл. 5.12). При этом установлено, что коэффициент парной корреляции между коэффициентами $\leq 0,3$.

Варьируемые факторы (в процентах от массы цемента) для ВРП-1 + СПСМС и их значения на каждом уровне приняты следующие: ВРП-1 (x_1); 0 (−2); 0,0125 (−1); 0,025 (0); 0,0375 (+1); 0,05 (+2); СПСМС (x_2); 0 (−2); 0,0025 (−1); 0,025 (0); 0,0375 (+1); 0,05 (+2).

В качестве выходных факторов были приняты: воздухоовление (W , %), снижение водопотребности (B , %); прочность бетона при сжатии после пропаривания ($R_{пн}$, МПа); по режиму (2 + 3 + 4 + 2) $t_{из}^0 = 85^\circ\text{C}$, через 28 суток (R_{28} , МПа); 90 суток (R_{90} , МПа), морозостойкость ($M_{рз}$, циклы) и количество циклов до моментов усталостного разрушения ($n \cdot 10^3$). Результаты моделирования для комплексной добавки ВРП-1 + СПСМС приведены в табл. 5.14. Полученные математические модели удовлетворяют критерию Фишера и являются адекватными ($\alpha = 0,05$). На рис. 5.6 представлены изолинии прочности с комплексной добавкой после пропаривания ($R_{пн}^0$). Математическая модель представляет собой гиперболоид, причем максимальная

прочность ($R_{пн}^0$)_{max} достигается при ВРП-1 = 0,0375 % и СПСМС = 0,0465 %. Более сильное влияние на прочность бетона оказывает добавка ВРП-1, и только при ВРП-1 > 0,0375 % (т. е. $x_1 > 1$) наблюдается их совместное воздействие, причем во всей области факторного пространства прочность $R_{пн}^0 > R_{пн}^0$ ($R_{пн}^0 = 25,0$ МПа). Исследования по определению R_{28}^0 , R_{90}^0 приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Наименование выходного значения	a_0	a_1	a_2	a_{11}	a_{22}	a_{12}
W , %	4,632	0,249	1,044	−0,092	—	—
B_1 , %	14,209	1,933	0,994	−0,801	−0,243	−0,127
$R_{пн}$, МПа	30,270	1,790	−0,100	−0,592	0,322	−0,152
R_{28} , МПа	40,622	1,319	−0,489	−0,090	0,156	−0,240
R_{90} , МПа	44,071	0,930	−0,036	−0,047	0,240	−0,148
$M_{рз}$, циклы	331,797	25,054	18,303	−11,900	−11,428	−0,924
$n \cdot 10^3$, циклы	78,578	9,332	4,487	−4,564	−6,050	−1,002

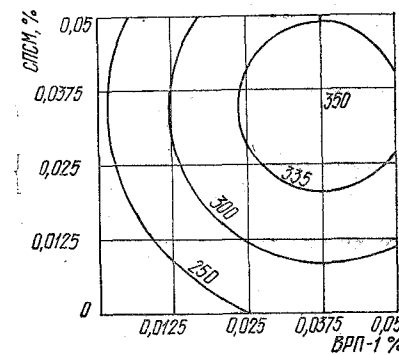
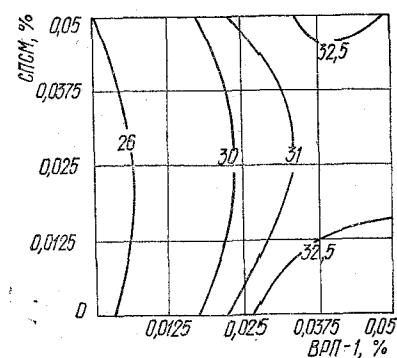


Рис. 5.6. Изолинии поверхности отклика для прочности бетона с добавкой после пропаривания

Рис. 5.7. Изолинии для морозостойкости $M_{рз}$ бетона с добавкой

Математическая модель для морозостойкости представляет собой параболоид с центром в точке $x_1 = +1$ и $x_2 = -1$. В результате исследований установлено, что с увеличением концентрации обеих добавок в пределах 0—0,0375 % морозостойкость повышается, причем максимальное значение $M_{рз, max} = 350$ циклов достигается при ВРП-1 = 0,0375 % и СПСМС = 0,0375 % (рис. 5.7).

Анализ математической модели для количества циклов до момента усталостного разрушения ($n \cdot 10^3$) показывает, что она представляет собой параболоид со смещенным центром, причем максимальное значение достигается при ВРП-1 = 0,03 и СПСМС = 0,0370 %. Изложенное свидетельствует о том, что если в качестве выходных значений используется прочность бетона

в различном возрасте, его морозостойкость и количество циклов до момента усталостного разрушения, то при оптимизации целесообразно рекомендовать максимальный выход одной величины при приемлемых значениях других, так как оптимизировать одновременно все выходы затруднительно. Можно рекомендовать следующие количества добавок от массы цемента: ВРП-1 = 0,03 %, СПСМС = 0,0375 %.

Чтобы получить геометрическую интерпретацию поверхности отклика второго порядка в области оптимума, необходимо привести каноническое преобразование его уравнения, которое заключается в том, что исходное уравнение $y = b_0 + \sum_i b_i x_i +$

$$+ \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2$$
 преобразуется к виду $y - y_5 = \sum_{i=1}^n B_{ii} X_i^2$, где

y_5 — значение выходной переменной в центре поверхности отклика; X_i — канонические переменные; B_{ii} — коэффициенты канонического уравнения. Переход к новому уравнению осуществляется переносом начала координат в центр поверхности отклика и поворотом осей на определенный угол. Перенос начала координат устраняет линейные члены и свободный член в уравнении, а поворот осей исключает взаимодействие факторов. Эти преобразования целесообразно производить с помощью цифровой ЭВМ.

Геометрическую интерпретацию уравнений второго порядка с двумя факторами возможно производить по критерию, который можно получить в процессе канонического преобразования $\delta = 4a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}^2$ (5.26), где a_{11}, a_{22}, a_{12} — коэффициенты уравнения регрессии второго порядка с двумя факторами.

В случае $\delta > 0$ функция описывает эллиптический параболлоид, если $a_{11} > 0$, то имеется минимум, если $a_{11} < 0$ — максимум.

Когда $\delta < 0$, приведенный выше полином описывает поверхность типа «седло». При $a_{11} = a_{22} - a_{12} = 0$ имеет место плоскость.

Допустим, необходимо исследовать полином, описывающий зависимость прочности бетона от $\frac{B}{C}$ и $\frac{II}{C}$; $y = 172 - 127x_1 - 26x_2 + 54x_1^2 + 19x_1x_2$. В данном случае полином регрессии описывает поверхность типа «седло», так как $\delta < 0$.

Определим характерную точку седлования, в которой по одной переменной наблюдается максимум, по другой — минимум. Для этого продифференцируем указанное уравнение по переменным x_1 и x_2 :

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = -127 + 108x_1 + 19x_2; \quad \frac{\partial y}{\partial x_2} = -26 + 19x_1 = 0.$$

Решая эту систему уравнений, получаем $x_1 = \frac{26}{19} = 1,37$; $x_2 = -\frac{21}{19} = -1,1$.

Таким образом, характерная точка седловины находится за пределами варьирования факторов. Чтобы установить ее положение,

необходимо поставить дополнительные опыты так, чтобы данная точка попала в пределы варьирования влияющих факторов. В рассмотренных пределах исследуемая поверхность отклика представляет собой поверхность, на которой функция y возрастает с убыванием x_1 и x_2 .

Выше были рассмотрены основные и наиболее простые принципы и методы экстремального планирования эксперимента. В настоящее время быстро развивается математическая теория эксперимента, чему способствует возможность широкого использования ЭВМ. Желая изучить математическую теорию и методы экстремального эксперимента следует обратиться к специальной литературе.

ГЛАВА 6

АНАЛИЗ И ОФОРМЛЕНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Анализ теоретико-экспериментальных исследований и формулирование выводов и предложений

Основой совместного анализа теоретических и экспериментальных исследований является сопоставление выдвинутой рабочей гипотезы с опытными данными наблюдений.

Теоретические и экспериментальные данные сравнивают методом сопоставления соответствующих графиков. Критериями сопоставления могут быть минимальные, средние и максимальные отклонения экспериментальных результатов от данных, установленных расчетом на основе теоретических зависимостей. Возможно также вычисление среднеквадратического отклонения и дисперсии. Однако наиболее достоверными следует считать критерии адекватности соответствия теоретических зависимостей экспериментальным.

В результате теоретико-экспериментального анализа могут возникнуть три случая.

1. Установлено полное или достаточно хорошее совпадение рабочей гипотезы, теоретических предпосылок с результатами опыта.

При этом дополнительно группируют полученный материал исследований таким образом, чтобы из него вытекали основные положения разработанной ранее рабочей гипотезы, в результате чего последняя превращается в доказанное теоретическое положение, в теорию.

2. Экспериментальные данные лишь частично подтверждают положение рабочей гипотезы и в той или иной ее части противоречат ей. В этом случае рабочую гипотезу изменяют и перерабатывают так, чтобы она наиболее полно соответствовала результатам эксперимента. Чаще всего производят дополнительные корректировочные эксперименты с целью подтвердить изменения рабочей гипотезы, после чего она также превращается в теорию.

3. Рабочая гипотеза не подтверждается экспериментом. Тогда ее критически анализируют и полностью пересматривают. Затем проводят новые экспериментальные исследования с учетом новой рабочей гипотезы. Отрицательные результаты научной работы, как правило, не являются бросовыми, они во многих случаях помогают выработать правильные представления об объектах, явлениях процессах.

После выполненного анализа принимают окончательное решение, которое формулируют как заключение, выводы или предложения. Эта часть работы требует высокой квалификации, поскольку необходимо кратко, четко, научно выделить то новое и существенное, что является результатом исследования, дать ему исчерпывающую оценку и определить пути дальнейших исследований. Обычно по одной теме не рекомендуется составлять много выводов (не более 5—10). Если же помимо основных выводов, отвечающих поставленной цели исследования, можно сделать еще и другие, то их формулируют отдельно, чтобы не затемнить конкретного ответа на основную задачу темы.

Все выводы целесообразно разделить на две группы: научные и производственные. В научных выводах необходимо показать, какой вклад внесен в науку в результате выполненных исследований (новые предложения, принципиальное различие существующих, опровержение некоторых известных положений и др.). В заключении нужно разработать план внедрения законченных НИР в производство и рассчитать ожидаемый экономический эффект. При выполнении научно-исследовательской работы заботятся о защите государственного приоритета (первенства в решении определенной научной или технической задачи) на изобретение или открытие.

§ 2. Составление отчетов о научно-исследовательской работе

Все материалы, полученные в процессе исследований, разрабатывают, систематизируют и оформляют в виде научного отчета. К нему предъявляют такие основные требования: четкость построения и логическая последовательность изложения

материала, краткость и точность формулировок, конкретность изложения результатов работы, убедительность аргументации и доказательность выводов и рекомендаций.

При составлении научных отчетов следует руководствоваться требованиями ГОСТ 19600—74. Научный отчет содержит титульный лист, список исполнителей, реферат, содержание (оглавление), основную часть отчета, список литературы и приложения. В необходимых случаях в отчет включают перечень сокращений, символов, специальных терминов и их определений. Основная часть отчета включает: введение; разделы (главы), отражающие методику, содержание и результаты выполненной работы; заключение (выводы и предложения).

Введение кратко характеризует современное состояние исследуемого вопроса, а также цель, новизну и актуальность исследования, необходимость его проведения. В разделах (главах) излагают подробно и последовательно содержание выполненной научно-исследовательской работы, описывают результаты исследования, в том числе и отрицательные. Эта часть отчета содержит: краткое изложение всех предыдущих работ разных авторов по вопросам исследования, их анализ и критику; теоретическое исследование, разработку рабочей гипотезы, обоснование методологии, методику экспериментальных исследований, изложение экспериментальных результатов, их точность и анализ, сопоставление теоретических и экспериментальных данных. Эти разделы завершаются трактовкой полученных результатов и описанием их возможного применения.

Заключение (выводы и предложения) содержит оценку результатов работы. В этом разделе намечают пути и цели дальнейшей работы или мотивируют нецелесообразность ее продолжения. В заключении представляют технико-экономическую эффективность выполненного исследования. Если этого сделать нельзя, то отмечают народнохозяйственную, научную ценность результатов работы. В отчетах по техническим наукам отмечается также целесообразность проведения опытно-конструкторской работы или экспериментального проектирования.

В приложение включают вспомогательный материал: промежуточные математические выкладки и расчеты; таблицы вспомогательных цифровых данных; протоколы и акты испытаний; описание аппаратуры и приборов, использованных в исследовании; инструкции и методики, разработанные в результате исследования; иллюстрации вспомогательного материала и др.

Отчет представляют в виде тома (нескольких томов), отпечатанного на машинке через полтора или два межстрочных интервала. Текст отчета разделяют на главы, параграфы, пункты. Их заголовки, номера перечисляют в оглавлении с указанием номера страниц, на которых они помещены. Иллюстрации (фотографии, схемы, чертежи) именуют рисунками, нумеруют (например, рис. 1.2 — первая глава, второй рисунок), сопровождают подрисунковой

подписью. Цифровой материал рекомендуется помещать в таблицы, которые имеют заголовки и нумеруются (аналогично нумерации рисунков).

Формулы вписывают аккуратно, черной тушью или чернилами, их нумеруют, значение принятых символов и коэффициентов приводят под формулой.

В списке литературы располагают в порядке появления ссылок в тексте отчета использованные источники (книги, статьи, отчеты о научно-исследовательской работе, стандарты, изобретения).

Специальной формой научного отчета является диссертация, которая содержит сведения о самостоятельно выполненной автором научной работе. Ее представляют на соискание ученой степени кандидата или доктора наук и защищают публично на заседании Совета, имеющего право принимать к защите диссертации по данной специальности. Диссертация должна содержать новые научные данные, полученные современными научными методами и имеющие теоретическое и практическое значение.

Одной из начальных форм составления научных отчетов и научной работы в целом являются рефераты, с помощью которых молодой исследователь (студент, аспирант, младший научный сотрудник) учится самостоятельно анализировать научные факты, систематизировать, классифицировать и обобщать их, высказывать критические замечания по существу научных публикаций.

При составлении реферата обычно придерживаются такого плана: введение, в котором характеризуют теоретическое и практическое значение темы; основная часть реферата, где излагают сущность реферируемых данных и критических замечаний на них; заключение; в нем даются оценка и выводы автора реферата о проанализированной информации. Содержание научных отчетов рецензируют и докладывают в научных коллективах. Научный работник должен всегда стремиться к авторитетной критике своих работ, что обеспечивает их высокое качество.

Рецензия (отзыв о научной работе) — это работа, в которой критически оценивают основные положения и результаты рецензируемого научного исследования. Особое внимание обращают на актуальность его теоретических положений, целесообразность и оригинальность принятых методов исследования, новизну и достоверность полученных результатов, их практическую полезность. При составлении рецензии обычно придерживаются такой последовательности: обоснование необходимости (актуальность) темы исследования; оценка идейного и научного содержания (основная часть рецензии), языка, стиля; последовательность изложения результатов исследования; оценка иллюстративного материала, объема исследований и рукописи изложения (рекомендации о сокращении или дополнении); общие выводы; итоговая оценка исследования.

Критика рецензента должна быть принципиальной, научно обоснованной, взыскательной, но вместе с тем и чуткой, доброжелательной, способствующей улучшению исследования.

Доклад или сообщение содержат краткое изложение основных научных положений автора, их практическое значение, выводы и предложения. Для научного доклада или сообщения отводят ограниченное время (10—20 мин), поэтому основные положения, их аргументация должны быть краткими и четкими. Необходимо выделять основную идею доклада, не нужно детализировать отдельные его положения. Доклад (сообщение) не рекомендуется читать перед аудиторией, его используют только для справок, чтения цитат. Эмоциональность, убежденность докладчика, его умение полемизировать обеспечивают контакт с аудиторией, внимание слушателей. Главным в научном докладе является содержание и научная аргументация.

Выразительность и доходчивость речи при изложении доклада в большой мере зависят от темпа, громкости и интонации. Спокойная, неторопливая манера изложения всегда импонирует слушателям. Докладчику необходимо следить за правильностью литературного произношения, употреблять слова в соответствии с их смыслом. Отвечать на вопросы следует кратко, по существу, проявлять скромность в оценке своих научных результатов, выдержанность и тактичность даже в случае резких выступлений оппонентов. Самокритичность и уважительное отношение к деловой товарищеской критике — важное условие устранения недостатков в исследовании.

В ряде случаев по докладу составляют тезисы, в которых кратко (1—2 страницы) излагают главную идею, основу доклада и необходимую аргументацию. Научный работник должен уметь выступать с кратким и четким докладом, вести научную дискуссию, убедительно аргументировать свои научные положения. Это умение вырабатывается систематической настойчивой работой над рефератами, докладами и выступлениями перед научными коллективами.

§ 3. Подготовка научных материалов к опубликованию в печати

Как правило, публикуют работы, содержащие новые научные результаты и конкретные предложения, имеющие важное теоретическое и практическое значение. Это издания, которые содержат теоретическую разработку проблем или научное исследование вопроса, или результаты исследований в области науки. К научным печатным работам относятся монографии, брошюры, статьи, к учебным изданиям — учебники и учебные пособия.

Монография — научное произведение, в котором изложен итог всестороннего исследования определенной темы или проблемы, выполненный одним или несколькими авторами.

В статье излагаются результаты, полученные по конкретному вопросу, имеющему определенное научное и практическое значение. Статью публикуют в научных журналах или сборниках. Ее объем не должен превышать 10—12 машинописных страниц, графический или другой иллюстративный материал допускается в минимальном количестве, т. е. не более 2—3 рисунков.

Учебник — учебное издание, которое содержит систематизированное изложение определенной учебной дисциплины в соответствии с учебной программой и утверждено официальной инстанцией в качестве учебника.

Учебное пособие — учебное издание, частично заменяющее или дополняющее учебник и утвержденное официальной инстанцией в качестве учебного пособия.

Подготовку материалов исследования к печати необходимо проводить в такой последовательности. Составляют план-проспект и систематизируют материал исследования, при этом строго придерживаются положения о том, что второстепенные сведения или уже опубликованные ранее не следует помещать в подготавливаемое издание. Затем располагают подобранный материал по главам и параграфам. Излагают материал в научном стиле, для которого характерны ясность изложения, точность словоупотребления, лаконизм, строгое соблюдение научной терминологии, позволяющей в возможно краткой и экономной форме давать четкие определения и характеристики научных фактов, понятий, процессов и явлений. Последовательное изложение принятой теоретической позиции, логичность, глубокая взаимосвязь теоретических положений, выразительность речи — характерные черты научного стиля.

Все цитаты приводят по первоисточникам с указанием подлинных авторов цитат и источников. Цитаты классиков марксизма-ленинизма должны быть проверены по последнему изданию их трудов; не допускается цитирование трудов К. Маркса, Ф. Энгельса, В. И. Ленина по публикациям других авторов.

Материалы печатают на пишущей машинке с крупным и четким очком литер, через черную ленту. Поля на странице должны быть слева и снизу — 25 мм, сверху — 20 мм, справа — 10 мм. Пишут текст на одной стороне листа бумаги формата А4 (210 × 297 мм) через два интервала, что обеспечивает возможность последующего редактирования и дополнения.

После того, как рукопись составлена, уточняют ее содержание, одновременно осуществляя тщательное редактирование. На этом этапе сокращают второстепенный или добавляют необходимый материал, определяют место в рукописи таблиц и рисунков. При литературном редактировании работают над улучшением научного стиля произведения, перерабатывают отдельные части, формулировки фраз в целях достижения четкого изложения, проверяют орфографию и пунктуацию, устраняют архаизмы, речевые штампы. Избегают частого повторения одних и тех же слов, заменяя их синонимами.

Осуществляя техническое редактирование, определяют в рукописи абзацы, указывают, какие слова и предложения необходимо выделить специальным шрифтом, проверяют правильность написания терминов, символов, знаков, шифров, особенно в математических, химических и других формулах. Одновременно с этим определяют размеры иллюстраций и таблиц, правильность их оформления. После этого на машинке окончательно перепечатают рукопись. В машинописном тексте отмечают на полях место расположения рисунков и таблиц. Условные знаки, замеченные опечатки, формулы, фамилии иностранных авторов, которые нельзя печатать на машинке, аккуратно и разборчиво вписывают от руки черными чернилами или тушью.

При вписывании формул необходимо ясно указать, какие из символов будут набраны прописными буквами, какие строчными. Это относится к буквам одинакового начертания (*S, s, P, p* и т. д.). Их помечают особо: прописные — двумя черточками снизу, строчные — двумя черточками сверху. Специальными знаками выделяют показатели степени, индексы; буквы греческого алфавита обводят красными чернилами. Все символы в формулах поясняют текстом, расположенным непосредственно под формулой. Не допускается обозначение разных величин одинаковыми буквами.

Иллюстрации должны быть ясными, четкими. Чертежи (рисунки) выполняют черной тушью на белой бумаге или кальке. Они должны удовлетворять требованиям государственных стандартов (ГОСТ 2.401—68, ГОСТ 2.418—68). Фотографии и светокпии готовят достаточно контрастными, чтобы обеспечить качественное изготовление типографских клише. Подписи должны четко читаться при заданном уменьшении. К иллюстрациям составляют опись подписочных текстов, которые прилагают к машинописному тексту научной работы.

Таблицы создают большие удобства при чтении текста. Помещая их в текст, автор должен четко уяснить себе, как она будет выглядеть в напечатанной книге. Не рекомендуется составлять таблицы с большим количеством граф, так как это затрудняет размещение их в тексте.

Статья направляется в редакционную коллегию научного журнала или научно-тематического сборника, а монография — в научное специализированное издательство. Все материалы, рекомендуемые к печати, представляют в двух экземплярах.

ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

§ 1. Общие сведения

При выполнении НИР, особенно в области естественных и технических наук, в ряде случаев необходимо оформлять *открытия* и *изобретения*. Это связано с защитой государственного приоритета (первенства в решении определенной научной или технической задачи). Необязательно, чтобы в результате НИР оформлялась заявка на изобретение, и очень редко научное исследование заканчивается открытием. Изобретательская работа может быть организована самостоятельно. В этом случае изобретатели, не выполняющие НИР, глубоко и всесторонне изучают научную литературу по соответствующей отрасли науки и техники.

Открытием признается установление неизвестных ранее объективно существующих закономерностей, свойств и явлений материального мира. Авторы открытия получают специальный диплом после оформления соответствующих документов и решения Комитета по делам открытий и изобретений СССР. Авторство открытий, так же как и изобретений, охраняется законом. Авторами открытия могут быть отдельные лица или организации.

Изобретением считается новое, обладающее существенным отличием техническое решение задачи в любой области народного хозяйства, в том числе в области социально-культурного строительства и обороны страны, и дающее положительный эффект. Это обязательные свойства изобретения.

Решение задачи должно быть техническим. Организационное решение в качестве изобретения не признается. Не признаются изобретениями предложения, противоречащие законам природы, например идеи о вечном двигателе, а также содержащие только постановку вопроса, а не дающие конкретного технического решения. Объектом изобретения может быть новое устройство, новое вещество, новый способ получения изделия, вещества и применение ранее известных устройств, способов, веществ по новому назначению. Изобретательские задачи условно, по сложности их решения, делят на пять уровней (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Уровни	Стадии творческого процесса					
	Выбор задачи	Выбор поисковой концепции	Сбор информации	Поиск идей решения	Развитие идеи в конструкцию	Внедрение
1	Использована готовая задача	Использована готовая поисковая концепция	Использованы имеющиеся сведения	Использовано готовое решение	Использована готовая конструкция	Внедрена готовая конструкция
2	Выбрана одна из нескольких задач	Выбрана одна поисковая концепция из нескольких	Собраны сведения из нескольких источников	Выбрано одно решение из нескольких	Выбрана одна из нескольких конструкций	Внедрена модификация готовой конструкции
3	Изменена исходная задача	Поисковая концепция изменена применительно к условиям задачи	Собранная информация изменена применительно к условиям задачи	Изменено известное решение	Изменена исходная конструкция	Внедрена новая конструкция
4	Найдена новая задача	Найдена новая поисковая концепция	Получены новые данные, относящиеся к задаче	Найдено новое решение	Создана новая конструкция	Конструкция применена по новому
5	Найдена новая проблема	Найден новый метод	Получены новые данные, относящиеся к проблеме	Найден новый принцип	Созданы новые конструктивные принципы	Изменена вся система, в которую вошла новая конструкция

Наиболее легкими, а следовательно, и распространенными являются изобретения первого и второго уровней; их количество превышает 75 % от общего количества изобретений. Изобретения третьего уровня составляют менее 20 %, второго — менее 4%, а пятого уровня, наиболее сложного — менее 0,5 % от общего количества изобретений.

Важное место в научно-техническом творчестве занимают *рационализаторские предложения* — технические решения, являющиеся новыми и полезными для данного предприятия, организации, учреждения, которому они представлены. Они предусматривают совершенствование конструкций, изделий, технологии производства и применяемой техники, а также состава материалов.

Основное требование к рациональному предложению — наличие технического решения. Степень новизны предложения характерна только для данного предприятия, учреждения. Предложение не является

рационализаторским, если использование данного технического решения предусмотрено нормативными документами, приказами или распоряжениями на предприятии или вышестоящих организаций.

§ 2. Изобретательство как творческий процесс

Современный творческий инженер должен уметь активно проводить изобретательскую и рационализаторскую работу, для которой характерно творчество — получение новых оригинальных результатов.

Заметный вклад в развитие творческого мышления внес Сократ, пытавшийся пробудить скрытые творческие способности людей в процессе диалога, основными признаками которого являлись свободный обмен мнениями, применение аналогии, выявление противоречий и т. д. Методы познания и творчества развивались и позднее. Однако эти разработки имели в основном теоретическое значение и практически не применялись в творческой работе, в том числе и для решения изобретательских задач, поскольку «случайное» изобретательство, метод «проб и ошибок» удовлетворял в то время темпы научно-технического прогресса.

Современная научно-техническая революция вошла в противоречие со старым, малопродуктивным способом мышления и поиска новых решений. В связи с этим в последнее время получила заметное развитие *эвристика* — учение о методах творчества, что способствует созданию специальных методов активизации творческой работы. Цель этих методов — интенсификация процесса генерирования новых идей и повышение количества оригинальных идей в общем их потоке. Обычно эти методы направлены на преодоление психологической инерции, затрудняющей появление новых идей. Психологическая инерция связана с различными факторами, например, боязнь вторгнуться в чужую область, опасение выдвинуть идею, которая может показаться смешной, незнание элементарных приемов генерирования оригинальных идей и др.

Наиболее известен метод *мозгового штурма*, суть которого сводится к следующему. Для устранения психологических препятствий процесс генерирования идей и их критический анализ разделены во времени, причем осуществляются разными людьми. Данное явление объясняется тем, что одни люди больше склонны к генерированию идей, другие — к их критическому анализу. Поэтому задачу решают последовательно две группы людей по 4—12 человек в каждой.

Первая группа только выдвигает (генерирует) идеи в течение 20—40 мин. Здесь главное правило — запрещена критика. В эту группу включают людей, склонных к фантазированию, абстрагированию. Можно высказывать любые идеи, в том числе и заведомо нереальные, фантастические, шутливые, которые играют роль своеобразного катализатора, стимулируя появление новых, хороших

идей. Важно, чтобы участники штурма подхватывали и развивали выдвинутые идеи. Идеи высказывают без доказательств и записывают в протокол или на магнитофонную ленту, устанавливают регламент на каждую идею, обычно до двух минут.

Другая группа людей по окончании «штурма» (работы первой группы) выносит суждение о ценности выдвинутых идей. Это группа экспертов, в нее включают людей с аналитическим, критическим складом ума. Экспертиза проводится внимательно, продумываются все идеи, даже те, которые считаются несерьезными и нереальными. Процессом решения задачи управляет руководитель штурма, который четко соблюдает правила штурма, выполняя свои обязанности без критики, приказаний.

Метод «мозгового штурма» обеспечивает получение хороших результатов при решении не очень сложных изобретательских задач. Были предложены различные модификации штурма (индивидуальный, парный, массовый, «конференция идей», «кибернетическая сессия» и т. д.). Однако и эти методы эффективны только при решении несложных задач. Существуют и другие методы активизации поиска. Эффективным при решении изобретательских задач конструкторского плана является *метод морфологического анализа*, сущность которого состоит в следующем.

В совершенствуемой технической системе выделяют несколько характерных для нее структурных, морфологических признаков (т. е. признаков строения системы). По каждому выделенному морфологическому признаку составляют список различных конкретных вариантов технического выражения использования этих признаков. Перебирая всевозможные сочетания вариантов выделенных морфологических признаков, можно выявить новые решения задачи, которые при простом переборе могли быть упущены.

Морфологический анализ ведется в такой последовательности: точно формулируют задачу; составляют список всех характеристик, морфологических признаков объекта (способа или устройства); по каждой характеристике перечисляют возможные варианты; анализируют возникающие при этом сочетания; отбирают лучшие сочетания.

Пример: Предложить новую эффективную конструкцию снегохода. Морфологические признаки: А — двигатель, Б — движитель, В — опора кабины, Г — управление, Д — обеспечение заднего хода и т. д. Варианты А₁ — двигатель внутреннего сгорания, А₂ — газовая турбина, А₃ — электрический ... и т. д., Б₁ — воздушный винт, Б₂ — гусеницы, Б₃ — лыжи и вибролыжи, Б₄ — снегомет ... и т. д.

В таком виде составляется перечень вариантов по всем характеристикам. Полученная таблица изучается, а наиболее интересные варианты сочетаний выписываются, например: А₂ — Б₄ — В₇ — Г₃ — ... Морфологический анализ является ярким примером системного подхода в изобретательстве.

По методу *фокальных объектов* признаки нескольких случайно выбранных объектов переносят на совершенствуемый объект,

в результате чего получают необычные сочетания, позволяющие преодолевать психологическую инерцию. Так, если случайным объектом взят «тигр», а совершенствуемым (фокальным) — «карандаш», то получаются сочетания типа «полосатый карандаш», «клыкастый карандаш». Рассматривая эти сочетания и развивая их, иногда удается прийти к оригинальным идеям.

Получил распространение *метод контрольных вопросов*. Его цель — с помощью наводящих вопросов подвести к решению изобретательской задачи. Перечень (списки) таких вопросов предлагали многие авторы. Типичные вопросы: а если сделать наоборот? А если заменить одну задачу другой? А если изменить форму объекта? А если взять другой материал? и др.

Одним из наиболее сильных методов активации поиска является *синектика* (в переводе с греческого означает «совмещение разных элементов»). В основу синектики положен мозговой штурм, который ведет профессиональная группа людей, накопившая определенный опыт решения задач. При синектическом штурме допустимы элементы критики, предусмотрено обязательное использование четырех специальных приемов, основанных на аналогии: прямой (как решаются задачи, похожие на данную?); личной — отождествление с техническим объектом (решающий задачу вливается в образ совершенствуемого объекта, пытается прочувствовать таким образом задачу); символической — некоторая абстрактная аналогия, при которой требуется в парадоксальной форме кратко (в двух-трех словах) сформулировать фразу, отражающую суть задачи. В этом случае удается совершить переход от обсуждаемой проблемы в другую сферу человеческой деятельности, что увеличивает возможности решения проблемы; фантастической — в задачу вводятся какие-нибудь фантастические средства или фантастические персонажи, выполняющие то, что требуется по условиям задачи (как изменится ваша проблема, если перестанет действовать сила тяжести; как эту задачу решили бы сказочные герои? и т. п.). Такая аналогия способствует генерации свежих, оригинальных идей, активизирует творческое мышление.

При использовании метода синектики формируют постоянные группы в составе 5—7 человек. Руководитель совместно с экспертом научно направляет решение задачи.

Главное достоинство этих методов активизации идей — простота и доступность. Вместе с тем, все рассмотренные методы основаны на старой тактике перебора вариантов, т. е. на методе «проб и ошибок» и пригодны только для решения относительно легких изобретательских задач 1—3-го уровней.

Решение задачи 1-го уровня требует перебора нескольких вариантов, это доступно каждому инженеру. На 2-м уровне число вариантов измеряется десятками, а для 3-го уровня необходимо перебрать сотни вариантов. Чтобы решить задачу 4-го уровня, нужно сделать десятки тысяч проб и ошибок, а при решении задач 5-го уровня их число возрастает до сотен тысяч и миллионов. Так,

Эдисону пришлось поставить около 5000 опытов, чтобы изобрести щелочной аккумулятор. Наряду с этим мысленных опытов он осуществил в несколько раз больше. Это уже не под силу инженеру, необходимы другие методы активизации поиска оригинальных решений изобретательских задач.

Задачи высших уровней отличаются от задач низших уровней и другим важным свойством. Решения задач 1-го уровня находятся обычно в пределах одной узкой специальности, задачи 2-го уровня и средства их решения — в одной области техники. При этом нужны знания только по относительно узкой специальности.

Решение задач 3—5-го уровней часто приходится искать в ряде других областей техники, т. е. принципиально новые решения находят «в стороне», в других областях физики и химии. Поэтому способы (приемы) решения изобретательских задач высших уровней должны отличаться от приемов решения задач 1—2-го уровня. Одним из основных приемов является алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ).

§ 3. Алгоритм решения изобретательских задач

АРИЗ — это программа последовательных, планомерно направленных действий на решение изобретательских задач.

Для решения изобретательской задачи необходимо преодолеть техническое противоречие, состоящее в том, что если улучшить известными способами одну часть, один параметр технической системы, то недопустимо ухудшится другая ее часть, другой параметр. Каждое техническое противоречие обусловлено конкретными физическими причинами, физическим противоречием (к одной и той же части системы предъявляются взаимопротивоположные требования). Рассмотрим для примера такую задачу.

При полировании оптических стекол необходимо под полировальник (он сделан из смолы) подавать охлаждающую жидкость. Пробовали делать в полировальнике сквозные отверстия для подачи, но полировальник работал хуже. Как быть? Техническое противоречие здесь очевидно: охлаждающая способность «дырчатого» полировальника вступает в конфликт с его способностью полировать стекло. Следовательно, поверхность полировальника должна быть твердой, чтобы сдирать частицы стекла, и «пустой», чтобы пропускать охлаждающую жидкость — в данном случае это физическое противоречие.

В физических противоречиях столкновение конфликтующих требований предельно обострено. Поэтому они кажутся абсурдными, заведомо неразрешимыми. Как сделать, чтобы поверхность полировальника была сплошной «дыркой» и в то же время сплошным твердым телом? Но именно в этом, в доведении противоречия до крайности и проявляется эвристическая сила физического противоречия. Анализ задачи показал, что данное противоречие можно

решить путем использования переходных состояний вещества, при которых на время возникает что-то вроде существования противоположных свойств. Если, например, полировальник сделать из льда с замороженными в него частицами абразива, лед при полировании будет плавиться, обеспечивая требуемое сочетание свойств: полированная поверхность остается твердой и в то же время сквозь нее везде проходит холодная вода.

Опыт решения изобретательских задач показал, что их противоречия, как правило, решаются с помощью 40 типовых приемов, которые сформулированы советским изобретателем Г. С. Альтшулером. Выше использовался прием 36.

Основные приемы устранения противоречий.

1. Дробление: разделить объект на независимые части; выполнить объект разборным; увеличить степень дробления.
2. Вынесение: отделить от объекта «мешающую» часть или свойство; выделить единственно нужную часть или нужное свойство.
3. Местное качество: перейти от однородной структуры объекта или внешней среды к неоднородной; разные части должны иметь разные функции, каждая часть объекта должна находиться в условиях, наиболее благоприятных работе.
4. Асимметрия: перейти от симметричной формы объекта к асимметричной.
5. Объединение: соединить однородные или предназначенные для смежных операций объекты; объединить во времени однородные или смежные операции.
6. Универсальность: объект выполняет несколько разных операций-функций, благодаря чему отпадает необходимость в других.
7. Матрешка: один объект размещен внутри другого, который, в свою очередь, находится внутри третьего; один объект проходит сквозь полость в другом.
8. Антивес: компенсировать вес объекта соединением с другим, обладающим подъемной силой; взаимодействием со средой.
9. Предварительное напряжение: заранее придать объекту изменения, противоположные недопустимым рабочим изменениям.
10. Предварительное исполнение: заранее выполнить требуемое изменение объекта, заранее расставить объекты так, чтобы они могли вступить в действие без затрат времени на их доставку и с наиболее удобного места.
11. Заранее подложенная подушка: компенсировать относительно невысокую надежность объекта заранее подготовленными средствами.
12. Эквипотенциальность: изменить условия работы так, чтобы не приходилось поднимать или опускать объект.
13. Наоборот: вместо действия, диктуемого условиями задачи, осуществить обратное действие; сделать движущуюся часть объекта или внешней среды неподвижной, а неподвижную — движущейся; перевернуть объект «вверх ногами».
14. Сфероидальность: перейти от прямолинейных частей к криволинейным, от плоских — к сферическим, от частей в виде куба или параллелепипеда — к шаровым конструкциям; использование роликов, шариков, спиралей.
15. Динамичность: характеристики объекта или ВС должны меняться так, чтобы быть оптимальными на каждом этапе работы; разделить объект на части, способные перемещаться относительно друг друга.
16. Частичное или избыточное решение: если трудно получить 100 % требуемого эффекта, надо получить «чуть меньше» или «чуть больше»; задача может существенно упроститься.

17. Переход в другое измерение: трудности, связанные с движением или размещением объекта по линии, устраняются, если объект приобретает возможность перемещаться на плоскости; задачи, связанные с движением или размещением в плоскости, устраняются при переходе к трехмерному пространству; многэтажная компоновка вместо одноэтажной; использование обратной стороны данной площади; использование оптических потоков, падающих на соседнюю площадь или обратную сторону имеющейся.

18. Использование механических колебаний: привести объект в колебательное движение; если колебание совершается, увеличить частоту; вместо механических применить пьезовибраторы; использовать ультразвуковые колебания в сочетании с электромагнитными полями.

19. Периодическое действие: перейти от непрерывного действия к периодическому, импульсному; если действие уже осуществляется периодически, изменить периодичность.

20. Непрерывность полезного действия: вести работу непрерывно — все части объекта постоянно работают с полной нагрузкой; устранить холостые и промежуточные ходы и перейти от возвратно-поступательного движения к вращательному.

21. Проскок: преодолевать вредные или опасные стадии процесса на большой скорости.

22. Обратный вред в пользу: использовать вредные факторы для получения положительного эффекта; усилить вредный фактор до такой степени, чтобы он перестал быть вредным.

23. Обратная связь: если она есть, изменить ее, ввести обратную связь.

24. Посредник: использовать промежуточный объект-посредник.

25. Самообслуживание: объект должен сам себя обслуживать, выполняя вспомогательные и ремонтные операции; использовать отходы энергии, вещества.

26. Копирование: вместо сложного объекта использовать его упрощенные копии; заменить объект оптической копией-изображением, использовать изменение масштаба; если применяются видимые оптические копии, перейти к инфракрасным или ультрафиолетовым.

27. Дешевая недолговечность взамен дорогой долговечности: заменить дорогой объект набором дешевых, поступивших некоторыми качествами.

28. Замена механической схемы: заменить электрической, оптической, акустической, тепловой или «запаховой» схемой.

29. Использование пневмо- и гидроконструкций: вместо твердых частей объекта использовать надувные, гидронаполненные, воздушную подушку, гидростатические и гидрореактивные конструкции.

30. Использование гибких оболочек и тонких пленок: изолировать объект от внешней среды.

31. Применение пористых материалов: выполнить объект пористым, использовать пористые части; заполнить поры каким-то веществом.

32. Изменение окраски: изменить окраску объекта или ВС, прозрачность, применить красящие добавки или меченые атомы.

33. Однородность: взаимодействующие объекты сделать из одного материала или из материалов, близких по свойствам.

34. Отброс и регенерация частей: выполнявшая свое назначение часть отбрасывается, растворяется, испаряется, видоизменяется.

35. Изменение физико-химических параметров: изменить агрегатное состояние объекта: изменить концентрацию или консистенцию, изменить степень гибкости, изменить температуру, объем.

36. Применение фазовых переходов: использовать явления при фазовых переходах — изменение объема, выделение или поглощение тепла и пр.

37. Применение термического расширения: использовать расширением или сжатием, применить несколько материалов с разными коэффициентами термического расширения.

38. Применение сильных окислителей: обогатить воздух кислородом, применить озон, воздействовать ионизирующими излучениями.

39. Увеличение степени инертности: заменить обычную среду нейтральной, ввести в объект нейтральные части или добавки, применить вакуум.
40. Применение композиционных материалов: перейти от однородных материалов к композиционным.

Приведенный список приемов преодоления противоречий — важный инструмент в руках изобретателя. Но надо уметь правильно выявлять противоречия, а также знать, когда и какой прием использовать, нужно располагать критериями для оценки полученных результатов. А для этого необходимо хорошо знать физику, химию, законы развития технических систем и т. п.

Исходя из этих законов можно построить программу решения изобретательских задач, алгоритм, без перебора многочисленных вариантов по методу «проб и ошибок». С этой целью необходимо найти техническое, а затем физическое противоречие. Для их преодоления используют специальный фонд изобретательских приемов, составленный на основе анализа большого количества изобретений, а также таблиц применения физических эффектов, фонд технических решений — конкретных примеров, иллюстрирующих применение физических эффектов и явлений.

Наряду с этим, необходимо управлять психологическими факторами, средствами активации воображения и преодоления психологической инерции. Эти положения и учитываются методикой АРИЗ, согласно которой решение изобретательских задач начинается с выяснения и анализа ситуации. В этой ситуации нас что-то не удовлетворяет. Для примера рассмотрим такую ситуацию.

При производстве преднапряженного железобетона для растяжения арматуры используют гидравлические домкраты, но они сложны и ненадежны. Был предложен электротермический способ растяжения арматуры, однако он пригоден лишь для обычной стали. В случае использования арматуры из высокосортовой стали оказалось, что при ее нагревании до температуры выше 700 °С, обеспечивающей необходимое удлинение арматуры, теряются ее высокие механические свойства. Как устранить этот недостаток? Это задача минимальная, требуется изменить только один недостаток, в принципе сохранив всю технологию. Для решения этой задачи строится ее модель, которая предельно упрощенно, но вместе с тем точно отражает суть задачи — техническое противоречие и элементы этого противоречия.

Модель можно сформулировать так: *даны тепловое поле и стальная проволока. Если нагревать проволоку до 700 °С, она получит необходимое удлинение, но утратит прочность.*

В модели устранены все лишние элементы системы, устранена специальная терминология. Оставлены только те элементы, которые необходимы и достаточны, чтобы точно сформулировать техническое противоречие. В этом случае уменьшаются психологические барьеры, возрастает оригинальность в постановке задачи.

Далее формулируют идеальный конечный результат (ИКР), т. е. определяют наиболее сильный вариант решения задачи и от

него отступают как можно меньше. Для нашей задачи это звучит так: *тепловое поле обеспечивает требуемое удлинение проволоки и не портит ее.* Это сильное идеальное решение, оно отсекает решения низших уровней. Дальнейший отсев вариантов происходит при формулировании физического противоречия: *тепловое поле должно нагревать проволоку так, чтобы она удлинялась, и не должно нагревать проволоку, чтобы она не портилась.* Для преодоления этого противоречия логично предположить раздвоение вещества проволоки (см. первый прием, с. 178), т. е. можно взять две проволоки. Пусть тепловое поле нагревает одну и не нагревает другую, причем удлинение первой проволоки будет передано второй. Таким образом, возникает идея об электротермическом домкрате, далее следует техническое решение. Анализ этого решения показал, что оно является сильным, относится к 3—4 уровню решения изобретательских задач и может быть использовано при решении других задач. Здесь не потребовалось перехода множества вариантов, однако необходимы определенные знания и навыки мышления.

Из рассмотренного примера следует, что АРИЗ включает следующие основные этапы решения изобретательских задач:

изучение ситуации, формулирование и анализ изобретательской задачи; построение модели задачи, определение конфликтующих элементов (пар) и формулирование технического противоречия; анализ модели задачи, формулирование ИКР и физического противоречия; устранение противоречий, использование для этой цели таблиц основных приемов устранения противоречий и применения физических эффектов и явлений. Формулирование способа и схемы решения задачи; предварительная оценка полученного решения, его анализ и развитие.

Описанный метод поиска технических решений значительно повышает производительность творческого труда изобретателей, однако темпы НТР уже требуют поиска новых приемов. Разработан обобщенный алгоритм поиска новых технических решений, являющийся наиболее полным и подробным собранием поисковых процедур, применимых как для ЭВМ, так и для индивидуального использования.

§ 4. Оформление изобретения

Изобретение необходимо правильно оформить согласно «Указаниям по составлению заявки на изобретение» (ЭЗ—1—74). Правильно оформленные материалы заявок на изобретения подаются во Всесоюзный научно-исследовательский институт государственной патентной экспертизы (ВНИИГПЭ), где их проверяют на наличие в них новизны, существенных отличий, полезности (положительного эффекта).

Предлагаемое техническое решение отличается *новизной* в том случае, если до даты приоритета заявки его сущность не была раскрыта в СССР или за рубежом для неопределенного круга лиц настолько, что стало возможным его осуществление. Авторские сви-

детельства и патенты, выданные в СССР и других странах, советские и иностранные издания, депонированные рукописи, сведения об открытом применении изобретений, экспонаты, помещенные на выставках, диссертации, авторефераты и другие сведения о технических решениях могут раскрывать сущность, новизну предлагаемого изобретения.

Технические задачи признаются обладающими *существенными отличиями*, если по сравнению с решениями, известными в науке и технике на дату приоритета заявки, они характеризуются новой совокупностью признаков, дающих положительный эффект. В связи с этим предложение может быть признано изобретением, если оно неочевидно для специалистов. Например, изменение числа спиц в колесе, замена металлического корпуса на пластмассовый в целях уменьшения его массы не могут быть признаны изобретениями, так как эти отличия несущественны, они очевидны.

Положительный эффект — это та польза, которую принесет применение данного изобретения (рост производительности труда, увеличение выпуска продукции, улучшение ее качества, экономия материалов, энергии и т. д.). Он должен быть стабильным, обеспечивать недопустимость бесполезных, противоречащих основным законам природы, вредных изобретений.

Техническое решение, которое обладает новизной, существенными отличиями и дает положительный эффект, называется охраноспособным. *Охраноспособность* — есть свойство предложения, без которого оно не может быть признано изобретением на основании действующего закона, т. е. патенты и авторские свидетельства выдаются только на охраноспособные технические решения.

Обычно при оценке новизны решения его сравнивают с конкретным известным изобретением. Большинство изобретений — это усовершенствованные известные прототипы. Только небольшую часть составляют так называемые пионерские изобретения, которые не имеют прототипов. Это *основные изобретения*. Стальные — *дополнительные*, они совершенствуют основные в целом или их части, связаны с ними технически и юридически.

Первый этап юридического оформления изобретения — составление заявки на него, включающей: заявление о выдаче авторского свидетельства или патента; описание изобретения с его формулой, чертежи, схемы и другие материалы, иллюстрирующие предполагаемое изобретение; акт испытаний, если предложение относится к веществу; справку о творческом участии каждого из соавторов в создании изобретения. Наряду с этим, в заявку от организации включают: заключение о новизне, существенных отличиях и положительном эффекте; справку об исследовании заявляемого объекта изобретения по патентной и научно-технической литературе, аннотацию, приоритетную справку о приеме и рассмотрении заявки на изобретение.

В заявлении указывается название изобретения, фамилия, имя, отчество соавторов, их адрес: место работы, а также утверждение,

что лица, на имя которых испрашивается авторское свидетельство, действительно являются его соавторами, и что после принятия заявки к рассмотрению никакие другие лица не будут включаться в состав соавторов. Если изобретение создано в порядке служебного задания, то в заявке указывается и наименование организации, предприятия. В этом случае заявку подписывает руководитель этой организации и все авторы изобретения. В СССР большинство изобретений (более 75 %) являются служебными, это гарантирует своевременную и надежную защиту интересов автора и государства. Такие заявки оформляются более квалифицированно, специальными службами этой организации, вследствие чего их экспертиза во ВНИИГПЭ проводится быстрее.

Основной и важнейшей частью заявки является *описание изобретения*, в котором раскрывается его техническая сущность и изложено точное и ясное представление о новизне, существенных отличиях и положительном эффекте заявленного технического решения. Описание изобретения включает название изобретения; класс по международной классификации МКИ; область техники, к которой относится изобретение; характеристика аналогов изобретения; характеристика и критика прототипа; цель изобретения, его сущность, отличительные признаки; примеры конкретного выполнения, его технико-экономическая и другая эффективность; графические материалы к изобретению. Описание заканчивается формулой изобретения, его наиболее важной частью.

Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я — это краткое словесное изложение признаков изобретения, определяющее его сущность и объем. Она должна кратко и четко выражать его техническую сущность, определять границы изобретения, служить средством *ограничения* объекта изобретения от других, давать информацию специалистам о прогрессе, достигнутом изобретением, не допускать произвольного истолкования изобретения и четко определять границы прав его авторов. Формула изобретения состоит из двух частей. Первая часть — вводная, *ограничительная часть*, включает признаки, общие для прототипа и объекта изобретения; вторая — *отличительная*, включает положительный эффект и признаки, которые отличают объект изобретения от прототипа. Эти две части формулы разделены словами «отличающийся тем, что...».

В ограничительной части формулы изобретения можно указывать признаки данного изобретения, присущие признакам только одного прототипа. Не допускается включение в ограничительную часть формулы изобретения совокупности признаков, взятых из нескольких прототипов. В отличительной части формулы приводится цель изобретения, например — увеличение к. п. д. установки, увеличение выхода вещества, обеспечение надежности крепления и т. д.

Непосредственно после указания цели следуют отличительные признаки изобретения, обеспечивающие указанную в формуле цель. При составлении формулы изобретения можно применять

только установившиеся технические термины, например, «высокоактановое топливо», «легкий бетон», «малопарафинированная нефть» и др., широко принятые в научной литературе и дающие правильное представление о характеризуемом ими объекте. Формулу изобретения излагают, как правило, одним предложением. Такое изложение должно охарактеризовать сущность изобретения, описываемую одним или несколькими признаками. Минимальное число признаков обеспечивает автору более широкую охрану его прав.

В качестве примера рассмотрим описание изобретения авторского свидетельства 60497.

Фамилии авторов — Грушко И. М., Михайлов А. Ф., Белова Л. А.

Заявитель — Харьковский автомобильно-дорожный институт им. Комсомола Украины.

Наименование изобретения — Способ приготовления строительных смесей.

Область техники, к которой относится изобретение — Изобретение относится к технологии строительных материалов, а именно — к способам приготовления строительных смесей, преимущественно бетонных.

Характеристика аналогов — Известны способы приготовления строительных смесей на омагниченной воде, причем в воду предварительно вводят соли жесткости из группы CaCO_3 , MgCO_3 ¹, что стабилизирует эффект от воздействия магнитного поля.

Однако в результате добавки солей в воду затворения на поверхности готовых изделий появляются высолы, а также снижается прочность бетона.

Характеристика и критика прототипов — Прототипом изобретения является способ приготовления строительных смесей путем затворения сухих компонентов смеси водой, предварительно прошедшей магнитную обработку². Магнитную обработку проводят для повышения прочности получаемых изделий, однако нестабильность получаемых эффектов сдерживает широкое применение этого способа.

Цель изобретения — Целью изобретения является повышение пластичности смеси и стабилизация увеличения прочности бетона.

Сущность изобретения — Для этого воду затворения перед омагничиванием подвергают деаэрации.

При деаэрации за счет удаления растворенной в воде двуокиси углерода реакция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2\uparrow$ смещается вправо, что способствует процессу зарождения центров кристаллизации на основе CaCO_3 при использовании естественного солевого состава воды.

Пример конкретного выполнения — Готовят три растворные смеси на одинаковых исходных компонентах: портландцемент марки «400», мелкозернистый песок с модулем крупности 1,5, водопроводная вода. Воду для первой смеси подвергают деаэрации в вакуумной камере при давлении 20 мм рт. ст., а затем омагничивают при напряженности в рабочем зазоре магнита 1000 Э, после чего затворяют ею сухие компоненты. В контрольных примерах воду подвергают только магнитной обработке при тех же параметрах магнитного поля или совсем не обрабатывают.

¹ А. с. 404803 (СССР). Способ приготовления строительных смесей / И. М. Грушко, А. Ф. Михайлов, Л. А. Белова. — Оpubл. в Б. И., 1971, № 5.

² Михановский Д. С., Леус Э. Л. Применение магнитной обработки воды в производстве бетона. — Вopr. теории и практики магнитной обработки воды и водных систем, 1971, с. 214—217.

Положительный эффект — Сравнение свойств полученных тремя способами смесей показывает, что магнитная обработка воды способствует снижению предельного напряжения сдвига смеси на 27 %. При этом эффект увеличения пластичности смеси, затворенной деаэрированной водой, прошедшей магнитную обработку, сохраняется в течение длительного времени. Применение деаэрированной воды, обработанной в магнитном поле позволяет получить цементно-бетонные смеси такой же пластичности, как и контрольные, при пониженном водоцементном отношении.

Прочность цементно-бетонных образцов, изготовленных на омагниченной воде, возрастает на 30 %. Приращение прочности на 60—65 % имеют образцы в раннем возрасте, приготовленные на омагниченной воде с предварительной ее деаэрацией. Эффект увеличения прочности наблюдается как в ранние, так и в более поздние сроки твердения бетона. Распадобочная прочность бетона, прошедшего тепло-влажностную обработку, увеличивается по сравнению с образцами, приготовленными на обычной воде, в 1,6—1,7 раза, а через 28 суток прирост прочности образцов, приготовленных согласно изобретению, составляет 25—30 %, причем эффект повышения прочности стабильный.

Формула изобретения — Способ приготовления строительных смесей, преимущественно бетонных, путем затворения сухих компонентов смеси омагниченной водой, отличающийся тем, что, в целях повышения пластичности смеси и стабилизации увеличения прочности бетона воду затворения перед омагничиванием подвергают деаэрации.

В приведенной формуле изобретения, состоящей из одного предложения, можно выделить наименование, ограничительную часть — цель изобретения и его отличительную часть после слова «отличающийся». Эта формула изобретения — на способ, в ней излагается перечень и последовательность операций, режимы их проведения и т. п. отражаются при помощи глаголов действительного залога изъявительного наклонения. Формулы изобретения на устройство, вещество и новое применение составляются таким образом, хотя и имеются некоторые непринципиальные особенности. Общее правило составления формулы изобретения: *если объект изобретения содержит признаки А, Б, С, Д, Е, а прототип — признаки А, Б, С, то формула будет иметь вид: название, включающее А, Б, С, отличающееся тем, что с целью (указывается цель), введены Д и Е.*

В случае необходимости, особенно при оформлении заявки на устройство, материалы содержат иллюстрирующие дополнения, чертежи, схемы, рисунки, фотографии и др. Если в разработке изобретения участвовало несколько человек, то составляется по принятой форме справка о творческом участии каждого из соавторов в создании изобретения. В справке указывают конкретно, какое творческое участие принял данный соавтор в создании конкретного признака данного изобретения, разработал теоретическое обоснование, подтвердил опытами, предложил использование конкретного материала и т. д.

Заявки на выдачу авторского свидетельства подаются во ВНИИГПЭ, где они проходят экспертизу в две стадии. Предварительная экспертиза проводится в 15-дневный срок со дня поступления заявки. Она включает в себя установление даты приоритета изобретения и соблюдение требований, предъявляемых к заявке.

По принятой к рассмотрению заявке заявителю выдается справка, значение которой состоит в том, что она удостоверяет принятие заявки, удостоверяет дату приоритета изобретения.

Государственная научно-техническая экспертиза изобретений проводится в срок не более шести месяцев со дня поступления заявки. При этом у заявителя могут быть запрошены дополнительные материалы, заявитель может дополнять и исправлять заявку. По результатам рассмотрения заявки экспертиза принимает решение о выдаче охранного документа либо об отказе в его выдаче. В решении о выдаче приводится уточненная формула изобретения, в решении об отказе — мотивы отказа. На основании решения о выдаче авторского свидетельства Госкомизобретений выдает охранный документ — грамоту авторского свидетельства, укомплектованную описанием с формулой, подписанную председателем Госкомизобретений и скрепленную печатью.

Авторское свидетельство удостоверяет признание предложения изобретением, его приоритет, авторство и исключительное право государства на изобретение. Если владельцем данного технического решения является государство, его могут использовать любые советские предприятия, учреждения и организации без ограничения.

По желанию авторов на изобретение может быть выдан и патент — документ, удостоверяющий признание предложения изобретением, его приоритет и исключительное право патентообладателя на его использование, т. е. изобретение можно использовать только с разрешения авторов. В капиталистических странах выдаются только патенты. В СССР патенты выдаются, в основном, в том случае, если предполагается продажа изобретения за рубежом. Авторские свидетельства и патенты могут также выдаваться на промышленные образцы, товарные знаки.

Промышленным образцом признается новое и пригодное к осуществлению промышленным способом решение внешнего вида изделия, в котором достигается согласованность технических и эстетических требований.

Товарные знаки (знаки обслуживания) — это зарегистрированные в установленном порядке обозначения, служащие для отличия товаров (услуг) одних предприятий от однородных товаров (услуг) других. Промышленные образцы и товарные знаки обычно разрабатываются дизайнерами; художниками, архитекторами или другими лицами, владеющими навыками художественного и технического творчества.

Заявка на выдачу диплома об открытии включает документы заявления; описание предполагаемого открытия; материалы, иллюстрирующие его; документы, подтверждающие приоритет открытия. В описании предполагаемого открытия должны быть приведены теоретические и экспериментальные доказательства достоверности выявленных закономерностей, свойств, явлений материального мира, а также формула, четко выражающая сущность

заявленного открытия. Его приоритет выявляется по дате, когда впервые было сформулировано положение, заявленное в качестве открытия, либо по дате опубликования указанного положения в печати.

Рационализаторские предложения оформляются согласно «Временным указаниям о порядке оформления, подачи и рассмотрения заявки на рационализаторское предложение», утвержденным Государственным комитетом по делам изобретений и открытий СССР от 19 августа 1976 г. Рационализаторское предложение подается в ту организацию, к деятельности которой оно относится, в форме заявления, на бланке специального образца, с кратким описанием сущности. В необходимых случаях к заявлению прикладываются иллюстрирующие материалы и расчеты. Если предложение признано рационализаторским, его автору выдается удостоверение установленного образца.

§ 5. Права авторов открытий, изобретений и рацпредложений

Правовые нормы, касающиеся изобретений и рацпредложений, постоянно совершенствовались, отражая происшедшие социально-экономические изменения в нашей стране.

В настоящее время действует «Положение об открытиях, изобретениях и рационализаторских предложениях», утвержденное Советом Министров СССР 21 августа 1973 г.

Для обеспечения правовой охраны наших изобретений за рубежом Советский Союз 1 июля 1965 г. присоединился к Парижской конвенции, основная цель которой состоит в обеспечении защиты прав изобретателей на территории всех государств-членов конвенции. Положение конвенции предусматривает принцип национального режима, конвенционный приоритет, независимость патентов, право преждепользования и охрану изобретений на выставках.

Принцип национального режима означает, что каждая страна охраняет права иностранцев-изобретателей на таких же условиях, как и права граждан своей страны.

Сущность конвенционного приоритета заключается в том, что заявитель, подав заявку на изобретение в одной из стран-участниц конвенции, приобретает право годичного приоритета во всех других странах. Таким образом, подавая заявку в несколько стран-участниц конвенции, в течение 12 месяцев заявитель гарантирует приоритет себе в этих странах и соответственно аналогичные заявки граждан этих стран отклоняются.

Положение о независимости патентов состоит в том, что каждый патент, полученный в стране-участнице конвенции, совершенно независим от патентов, полученных на то же изобретение в других странах.

Сущность права преждепользования заключается в том, что лицо, фактически использующее изобретение до того, как оно было

заявлено другим лицом, может использовать изобретение и после получения заявителем патента.

Выставочный приоритет означает, что если техническое новшество, показанное на выставке, будет в последующем⁶ заявлено как изобретение, то датой заявки будет считаться день помещения изобретения на выставке, и с этого дня определяется его приоритет.

Социалистическое законодательство в области изобретательства предоставляет изобретателям и рационализаторам широкие личные преимущественные и имущественные права.

Автором изобретения или рацпредложения признается только то лицо, творческим трудом которого они созданы. Для признания соавторства необходимы два элемента: совместный и творческий труд. В отдельных случаях допускается возникновение соавторства на изобретение при отсутствии совместного труда, если даты приоритета заявок совпадают.

Творческий труд — непременное условие в создании изобретения и рацпредложения, поэтому нужно учитывать, какой творческий труд-вклад внесен каждым из соавторов в разработку признаков, включенных в формулу изобретения. Это излагается в справке о творческом участии. Недопустимо отступать от этого правила и включать в число соавторов всех лиц, участвовавших в качестве технических исполнителей, а также лиц должностного положения. Они имеют право на получение премии за содействие в использовании изобретения или рацпредложения. Состав авторов устанавливается самими авторами. Соавторам право авторства на изобретение или рацпредложение принадлежит совместно. Порядок использования прав, принадлежащих соавторам совместно, определяется их соглашением.

Право авторства на изобретение или рацпредложение — бессрочное право. Оно не отчуждаемо и не может переходить по наследству. Право авторства — абсолютное, следовательно, все другие лица обязаны воздерживаться от действий, которые могли бы его нарушить. Изобретение охраняется полностью в пределах СССР, рацпредложение — в пределах предприятия.

Признание авторства или соавторства на открытия, изобретения или рацпредложения предопределяет и другие немущественные права авторов, право приоритета, право на имя, специальное название открытия, изобретения; на ознакомление с материалами, на основании которых вынесено решение по заявке; на запись в трудовой книжке; на творческие командировки; на внеконкурсный прием в учебные заведения; на представление их к защите диссертаций. Авторские свидетельства и патенты приравниваются к опубликованным печатным работам.

Лучшим изобретателям и рационализаторам, внесшим крупный вклад в технический прогресс и совершенствование производства, также за многолетнюю изобретательскую и рационализаторскую работу в любой отрасли народного хозяйства может быть присвоено почетное звание «Заслуженный изобретатель республики», «За-

служенный рационализатор республики», а также выдается нагрудный знак «Изобретатель СССР».

Основным имущественным правом изобретателей и рационализаторов является право на авторское вознаграждение, которое может быть поощрительным (от 20 до 50 рублей каждому) за сам факт изобретения после выдачи на него авторского свидетельства, а также вознаграждением за использование изобретения и рацпредложения, которое определяется в зависимости от значения полученного экономического эффекта.

Авторское вознаграждение — это оплата творческого труда авторов открытий, изобретений и рационализаторских предложений. Автор имеет право на него независимо от зарплаты и премий. Размер авторского вознаграждения зависит не столько от количества фактического затраченного автором труда на создание открытия, изобретения и рацпредложения, сколько от важности решенной задачи, от конечных результатов, получаемых от их реализации в народном хозяйстве.

За открытие вознаграждение выплачивается независимо от использования открытия в народном хозяйстве, поскольку учитывается значение данного открытия, его вклад в науку. За изобретения и рацпредложения вознаграждение выплачивается в том случае, если они использованы в народном хозяйстве. Вознаграждение за изобретение, создающее экономию в процессе его использования, выплачивается автору в течение пяти лет по 2 % от экономического эффекта, максимальная сумма вознаграждения не должна превышать 5000 руб. за открытие и рацпредложение и 20000 руб. — за изобретение.

ГЛАВА 8

ВНЕДРЕНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Внедрение законченных научно-исследовательских работ в производство

Внедрение законченных научных исследований в производство является завершающим этапом НИР. Внедрение — это передача производству научной продукции (отчеты,

инструкции, временные указания, технические условия, технический проект и т. д.) в удобной для реализации форме, обеспечивающей технико-экономический эффект. Научно-исследовательская работа превращается в продукт только с момента ее потребления производством.

Заказчиками на выполнение НИР могут быть технические управления министерств, строительные тресты и управления, производственные предприятия строительной индустрии, КБ и т. д. Подрядчик — научно-исследовательская организация, выполняющая НИР в соответствии с подрядным двусторонним договором, обязан сформулировать предложение для внедрения. Последнее в зависимости от условий договора должно содержать технические условия, техническое задание, проектную документацию, временную инструкцию, указания и т. д. Процесс внедрения состоит из двух этапов: первого — опытно-производственного внедрения; второго — серийного внедрения (внедрение новой науки и техники).

Как бы тщательно ни проводились НИР в научно-исследовательских организациях, все же они не могут всесторонне учесть различные, часто случайные факторы, действующие в условиях производства. Поэтому научная разработка на первом этапе внедрения требует опытной проверки в производственных условиях.

Так, новые конструкции мостов, зданий, сооружений должны быть предварительно изготовлены и испытаны на полигонах или заводах-изготовителях. Новые материалы, кроме тщательных лабораторных испытаний в производственных условиях, применяют для изготовления конструкций на опытных участках. Технологические процессы подлежат опытной проверке на производственных предприятиях. При этом в ряде случаев требуется переоборудование традиционных технологических линий с добавлением нового оборудования. Если в результате выполнения НИР предлагается новая машина, механизм или какое-либо оборудование, то необходимо изготовить опытный образец.

Опытные образцы конструкций, материалов, машин тщательно изучают в производственных условиях при различных многократных воздействиях механических нагрузок и природных факторов. Продолжительность таких испытаний устанавливают специальными расчетами.

На основе результатов опытной производственной проверки анализируют технико-экономическую эффективность опытных образцов. Особое внимание уделяют эксплуатационным показателям качества образцов, надежности, долговечности, себестоимости, эксплуатационным затратам, технологичности изготовления и эксплуатации, возможности серийного производства, необходимости переоборудования производственных предприятий.

Результаты испытаний оформляют в виде пояснительной записки, к которой прилагают различные акты с оценкой конструктивных, технологических, эксплуатационных, экономических, эргономических, санитарно-гигиенических, противопожарных, организаци-

онных и других особенностей испытываемых образцов. Акты подписывают представители заказчика и подрядчика.

Иногда в испытании опытных образцов основным критерием является их долговечность с учетом соблюдения высокого качества. Так, при разработке новых конструкций одежды автомобильных дорог важнейший критерий — это срок службы, исчисляемый 10—30 годами. В то же время продолжительность испытания опытно-производственных образцов весьма ограничена.

В таких случаях необходимо применять методы натурального моделирования условий службы конструкций, ускоряющие время (см. гл. 3); покрытия дорог испытывают на полигонах круглосуточным движением расчетных по осевой нагрузке и скорости автомобилей; новые материалы проверяют на стойкость многократными статистическими и динамическими циклическими нагрузками, замораживанием и оттаиванием образцов, действием агрессивных веществ и т. д.

Первый этап внедрения требует больших финансовых затрат, значительной трудоемкости в изготовлении опытных образцов, связан с продолжительными (0,5—2 года) производственными испытаниями, часто требующими доделок и переделок. На этом этапе необходимо участие авторов в исследованиях опытных образцов и разработке рекомендаций по их совершенствованию и т. д. Если на первом этапе испытывают образец машины, имеющий народнохозяйственное значение, его совместно с технической документацией передают специальной комиссии на государственные испытания.

Прикладные теоретические исследования и ОКР считаются завершенными, если в соответствии с договором по ним разработаны временные рекомендации, указания, инструкции, предложения и другие руководящие материалы.

Завершением и внедрением опытно-конструкторских работ считается опытно-промышленное внедрение предприятием новой технологии; изготовление опытного образца прибора или оборудования, передача установленной договором партии новых материалов или документации заводам-изготовителям. Предложения о законченных НИР рассматривают на научно-технических советах, а в случае особо ценных предложений — на коллегиях министерств, и направляют на производство для обязательного применения. После опытно-производственного испытания новые материалы, конструкции, технологию внедряют в серийное производство как элементы новой техники. На этом (втором) этапе научно-исследовательские организации не принимают участия во внедрении. Они могут по просьбе внедряющих организаций давать консультации или оказывать научно-техническую помощь.

Большое количество НИР выполняют по заданию строительных трестов, управлений и других подразделений. Такие краткосрочные НИР (обычно продолжительностью один год) направлены на разрешение актуальных для данной организации научно-производственных вопросов (совершенствование конструкций с учетом

максимального использования местных материалов и средств механизации, разработка новой технологии строительства, организация работ методом сетевого планирования и т. д.). В этих случаях законченные НИР внедряют собственным способом, т. е. строительной организацией. Научно-исследовательская организация представляет заказчику конкретную, пригодную для внедрения техническую документацию (инструкции, указания, рабочие чертежи и т. д.), которую рассматривают на технических советах организации, и после утверждения ее главным инженером направляют для внедрения на производство.

Объемы таких внедрений определяет заказчик. Они могут быть незначительными в первый год, если требуется их производственная проверка, или большими, если научное предложение разработано с максимальным учетом местных условий, тщательными лабораторными и полевыми испытаниями, моделированием во времени условий эксплуатации.

§ 2. Эффективность научных исследований и ее критерии

Внедрение результатов НИР обеспечивает экономическую эффективность в народном хозяйстве. Наука стала одним из видов общественного производства. Под экономической эффективностью научных исследований в целом понимают снижение затрат овеществленного и живого труда на производство продукции в той отрасли, где внедряют законченные НИР и ОКР.

Эффективность научных исследований может быть различной: экономическая эффективность (рост национального дохода, повышение производительности труда, качества продукции, снижение затрат на научные исследования); укрепление обороноспособности страны; социально-экономическая эффективность (ликвидация тяжелого труда, улучшение санитарно-гигиенических условий труда, очистка окружающей среды и т. д.); престиж отечественной науки.

Итог внедрения научных исследований в производство — рост производительности труда, снижение себестоимости изделий, повышение их качества, долговечность, надежность. Результаты научных исследований влияют на все стороны развития социалистического общества. В связи с такой ролью науки расходы на нее непрерывно возрастают. Темпы затрат на науку превышают темпы капиталовложений в несколько раз. Это не случайно. Наука является наиболее эффективной сферой капиталовложений. В мировой практике принято считать, что прибыль от капиталовложений в нее составляет 100—200 % и намного выше прибыли любых отраслей. По данным зарубежных экономистов, на 1 доллар затрат на науку прибыль в год составляет от 4 до 7 долларов и больше.

В нашей стране эффективность науки также высокая. На 1 р., затраченный на НИР и ОКР, прибыль составляет 3—8 р.

Наука с каждым годом обходится обществу все дороже. На нее

расходуют огромные суммы. Поэтому в экономике науки возникает и вторая проблема — систематическое снижение непосредственных затрат на исследования при возрастающем эффекте от их внедрения. В связи с этим 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 НИР; улучшением психологического климата в научном коллективе и т. д.

Для оценки эффективности исследований применяют различные критерии, характеризующие степень их результативности.

Фундаментальные исследования начинают отдавать капиталовложения лишь спустя значительный период после начала разработки. Результаты их обычно широко применяют в различных отраслях, иногда в тех, где их совсем не ожидали. Подчас нелегко планировать ожидаемые результаты таких исследований.

Фундаментальные теоретические исследования трудно оценить количественными критериями эффективности. Обычно можно установить только качественные критерии: возможность широкого применения результатов исследований в различных отраслях народного хозяйства страны; новизна явлений, дающая большой толчок для принципиального развития наиболее актуальных исследований; существенный вклад в обороноспособность страны; приоритет отечественной науки; отрасль, где могут быть начаты прикладные исследования; широкое международное признание работ; фундаментальные монографии по теме и цитируемость их учеными различных стран.

Проще оценить эффективность прикладных исследований и разработок. В этом случае применяют различные количественные критерии.

Об эффективности любых исследований можно судить лишь после их завершения и внедрения, т. е. тогда, когда они начинают давать отдачу для народного хозяйства. Большое значение приобретает фактор времени. Поэтому продолжительность разработки прикладных тем по возможности должна быть короче. Лучшим является такой вариант, когда продолжительность их разработки не превышает 3-х лет. Для большинства прикладных исследований вероятность получения эффекта в народном хозяйстве в ближайшее время достигает 80 %.

Эффективность исследования коллектива (отдела, кафедры, лаборатории, НИИ, КБ, вуза) и одного научного работника оценивают по-разному.

Эффективность работы научного работника оценивают различными критериями: публикационным, экономическим, новизной разработок, цитируемостью работ и др.

Публикационным критерием характеризуют общую деятельность — суммарное количество монографий, учебников, учебных пособий. Этот критерий не всегда объективно отражает эффективность научного работника. Бывают случаи, когда при меньшем количестве печатных работ отдача значительно больше, чем от большего количества мелких печатных работ. Экономическую оценку работы отдельного научного работника применяют редко. Чаще в качестве экономического критерия используют показатель производительности труда научного работника или выработку в тысячах рублей сметной стоимости НИР. Критерий новизны НИР — это количество авторских свидетельств и патентов. Критерий цитируемости работ ученого представляет собой число ссылок на его печатные работы. Это второстепенный критерий.

Эффективность работы научно-исследовательской группы или организации оценивают несколькими критериями: производительностью труда, количеством внедренных тем, экономической эффективностью от внедрения НИР и ОКР, общим экономическим эффектом, количеством полученных авторских свидетельств и патентов, количеством проданных лицензий или валютной выручкой. Критерий производительности труда определяют по формуле $K_n = C_0/P$, где C_0 — общая сметная стоимость НИР и ОКР, тыс. р.; P — среднесписочное число работников основного и подсобного персонала отдела, кафедры, лаборатории или НИИ.

Обычно K_n рассчитывают за год, поскольку установить сметные расходы НИР за месяц или квартал можно только ориентировочно. Среднегодовая выработка НИИ и ОКР на одного работника колеблется от 5 до 15 тыс. р.

Критерий внедрения K_v законченных тем устанавливают в конце календарного года суммированием законченных работ m_v . Внедрение темы оценивают степенью завершения тематического плана.

Критерий экономической эффективности вычисляют так: $K_e = \frac{\Delta}{Z}$. Здесь Δ , Z — экономический эффект от внедрения темы и затраты на ее выполнение и внедрение, тыс. р.

Экономический эффект от внедрения является основным показателем эффективности научных исследований. Он зависит от многих факторов — затрат на внедрение, объема внедрения, сроков освоения новой техники и т. д. Эффект от внедрения рассчитывают за весь период, начиная со времени разработки темы до получения отдачи. Обычно продолжительность такого периода прикладных исследований составляет несколько лет. Однако в конце его можно получить полный народнохозяйственный эффект.

Уровень новизны прикладных исследований и разработок коллектива характеризуют критерием K_n , т. е. числом завершенных работ, по которым получены авторские свидетельства и патенты.

§ 3. Расчет экономической эффективности научных исследований

Расчет экономической эффективности НИР и ОКР имеет свои особенности. Наиболее четко эти работы разделяются на три этапа: выбор темы, выполнение НИР или ОКР, внедрение в производство. Поэтому расчет необходимо производить поэтапно. Результаты научных исследований, особенно на первых двух этапах, четко установить не представляется возможным. В связи с этим расчеты экономической эффективности иногда имеют прогнозно-вероятностный характер. Научные исследования разрабатывают и внедряют в течение ряда лет (2—5 и более). Значит, при расчете экономической эффективности необходимо учитывать фактор времени.

В соответствии с тремя этапами НИР различают три вида эффективности: предварительную, ожидаемую и фактическую. Предварительная экономическая эффективность устанавливается при разработке ТЭО научного исследования и включении темы в план работ. Рассчитывают ее по ориентировочным укрупненным показателям с учетом прогнозируемого объема внедрения результатов исследований в группу предприятий данной отрасли.

Ожидаемую экономическую эффективность вычисляют в процессе выполнения НИР, ее условно относят (прогнозируют) к определенному периоду (году) внедрения продукции в производство. Ожидаемая экономия — более точный экономический критерий по сравнению с предварительной экономией, хотя в некоторых случаях она является также ориентировочным показателем, поскольку объем внедрения можно определить только ориентировочно. Ожидаемую эффективность вычисляют не только на один год, но и на более длительный период (интегральный результат). Ориентировочно такой период составляет до десяти лет от начала внедрения для новых материалов и до пяти лет для конструкций, приборов, технологических процессов.

Фактическая экономическая эффективность определяется после внедрения научных разработок в производство, но не ранее, чем через год. Расчет ее производят по фактическим затратам на научные исследования и внедрение с учетом конкретных стоимостных показателей данной отрасли (предприятий), где внедрены научные разработки. Фактическая экономия почти всегда несколько ниже ожидаемой: ожидаемую определяют НИИ ориентировочно (иногда с завышением), фактическую — предприятия, на которых осуществляется внедрение. Наиболее достоверным критерием экономической эффективности научных исследований является фактическая экономия от внедрения.

В основе расчета экономической эффективности НИР или ОКР лежит формула приведенных затрат: $Z_{пр} = C + E_n K$ (8.1), где C — себестоимость; K — капитальные вложения; E_n — отраслевой нормативный коэффициент экономической эффективности.

Ожидаемую или фактическую экономическую эффективность \mathcal{E} вычисляют по разности приведенных затрат старого (базовый вариант) $Z_{\text{пр2}}$ и нового обоснованного предложения (новый вариант НИР) $Z_{\text{пр1}}$ на единицу продукции: $\mathcal{E} = Z_{\text{пр2}} - Z_{\text{пр1}}$ (8.2). $Z_{\text{пр2}}$ для эксплуатируемого процесса, конструкции, технологии и т. д. является в рассматриваемый период постоянной, базовой, а $Z_{\text{пр1}}$ в зависимости от эффективности исследований переменна, т. е. многовариантна. Поэтому, определяя экономическую эффективность, необходимо принимать такой вариант научных разработок, при котором отдача в отрасли будет максимальной. Если в процессе НИР или ПКР требуются дополнительные капиталовложения, то вычисляют фактический срок их окупаемости:

$$T_{\text{ф}} = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1}. \quad (8.3)$$

Здесь K_1, K_2 — удельные капиталовложения (на единицу продукции в год) по новому и старому вариантам; C_1, C_2 — себестоимость единицы продукции по новому и старому вариантам.

Чтобы оценить эффективность затрат, $T_{\text{ф}}$ сравнивают с нормативным $T_{\text{н}}$ для данной отрасли:

$$T_{\text{н}} = \frac{1}{E_{\text{н}}}. \quad (8.4)$$

Если $T_{\text{ф}} \leq T_{\text{н}}$, то капиталовложения в НИР и ОКР эффективны.

Как отмечалось ранее, при расчете экономической эффективности необходимо учитывать фактор времени в связи с изменением производительности труда. В процессе НИР и их внедрения возникает потребность в капитальных затратах в различное время. Эти затраты необходимо приводить к сопоставимому виду путем введения размерного множителя.

Приведем затраты к будущему периоду: $K_{\text{т}} = K_{\text{н}}(1 + E_{\text{н}})^T$, (8.5) где $K_{\text{т}}$ — эквивалентные затраты через T лет; $K_{\text{н}}$ — затраты в настоящее время (текущие).

Если срок приведения небольшой ($T < 5$ лет), то можно пользоваться более простой формулой:

$$K_{\text{т}} = \sum_{i=1}^m K_i [1 + E_{\text{н}}(T - i)]. \quad (8.6)$$

Здесь T — продолжительность периода; K_i — затраты на i -й год периода T .

Приведем затраты к настоящему периоду:

$$K_{\text{н}} = \frac{K_{\text{т}}}{(1 + E_{\text{н}})^T}. \quad (8.7)$$

В формулах (8.4)—(8.7) $E_{\text{н}} = 0,08$.

Пример. Пусть по первому варианту на выполнение НИР и их внедрение на пятилетку отпущено 1 млн. р. По второму варианту на первые четыре года выделено 0,7 млн. р. и на внедрение (пятый год) — 0,4 млн. Чтобы правильно оценить варианты, нужно сравнить разновременные капиталовложе-

ния, т. е. 0,4 млн. р., и привести к сопоставимому виду. Без такого приведения первый вариант — 1 млн. р. выгоднее второго — 1,1 млн. р.

В действительности для второго варианта, применяя формулу (8.7), имеем $K_{\text{н}} = 0,7 + \frac{0,4}{(1 + 0,08)^4} = 0,89$ млн. р.

Таким образом, если принять второй вариант, то на разработке и внедрении темы достигается эффективность более 100 тыс. р. вследствие того, что в течение четырех лет 0,4 млн. р. не «заморожены», а использованы в отрасли.

При расчете ожидаемой экономической эффективности возможны различные случаи: определение ожидаемого эффекта от внедрения по сравнению с плановым; расчет эффективности в целях сравнения разработок с лучшими отечественными или зарубежными образцами; установление эффективности по сравнению с существующим образцом на данном производстве. В каждом случае для сравнения принимаются два варианта — новый и старый.

После выполнения НИР создается экономический потенциал, который реализуется по мере внедрения результатов исследований в производство. Экономический эффект зависит от объема и длительности внедрения, от затрат на улучшение качества продукции и др. Иногда возникает необходимость в строительстве или реконструкции дополнительных объектов с капиталовложениями.

Если экономический эффект достигается в результате изменения затрат на производство продукции при прежнем ее качестве (растет производительность труда вследствие внедрения нового технологического процесса), то эффект на расчетный год T вычисляют по следующим формулам.

Если требуются дополнительные капиталовложения:

$$\mathcal{E}_m = [(C_1 - C_2) + E_{\text{н}}(K_1 - K_2)] Q. \quad (8.8)$$

Если в процессе внедрения НИР изменяются не только затраты на производство продукции, но и ее качество, то экономический эффект рассчитывают следующим образом:

а) при создании новых или улучшении качества существующих материалов

$$\mathcal{E} = [(C_1 - C_2) + (C_1 + E_{\text{н}}K_1) - (C_2 + E_{\text{н}}K_2)] Q. \quad (8.9)$$

Если капиталовложения при реализации НИР не требуются:

$$\mathcal{E} = [(C_1 - C_2) + (C_2 - C_1)] Q, \quad (8.10)$$

где C_1, C_2 — себестоимость единицы продукции по старому и новому варианту; K_1, K_2 — удельные капиталовложения по новому и старому варианту; Q — годовой объем продукции на T -й год; C_1, C_2 — цена старой и новой техники.

Формулу (8.14) можно представить в другом виде:

$$\mathcal{E} = [(C_1' + E_{\text{н}}K_1) - (C_2 + E_{\text{н}}K_2) + (C_1 + E_{\text{н}}K_1) - (C_2 + E_{\text{н}}K_2)] Q. \quad (8.11)$$

Здесь C_1, C_2 — себестоимость производства старых и новых материалов; K_1, K_2 — удельные капиталовложения, необходимые для производства старых и новых материалов;

б) при создании новых образцов приборов, оборудования, машин:

$$\Delta = C_2 + (C_2 + E_n B_2) - C_1 - (C_1 + E_n B_1), \quad (8.12)$$

где C_1, C_2 — цена по старому и новому варианту; C_1, C_2 — себестоимость единицы продукции по старому и новому варианту; B_1, B_2 — коэффициенты увеличения объема производства по старому и новому варианту.

В процессе расчета экономической эффективности НИР необходимо учитывать так называемые предпроизводственные расходы. К ним относят расходы на научные исследования, оборудование, изготовление и испытание новых образцов, опытно-промышленное производство результатов НИР.

Сравнивая варианты предпроизводственных затрат, их приводят к сопоставимым значениям на первый год внедрения по формулам (8.5)—(8.7). В табл. 8.1 приведен пример расчета предпроизводственных затрат.

Таблица 8.1

Виды затрат	Затраты по годам, тыс. р.				
	1981	1982	1983	1984	1985
Научно-исследовательские работы	15	10	—	—	25
Лабораторные эксперименты	—	5	5	—	10
Опытное строительство	—	5	10	—	15
Полевые испытания	—	—	10	10	20
Подготовка к внедрению	—	—	—	15	15
Итого	15	20	25	25	85
Приведение к первому году (1985) внедрения	19,8	24,8	29,0	27,0	100,6

Затраты 1981 г., приведенные к 1985 г., равны $K_4 = 15[1 + 0,08(5 - 1)] = 19,8$ тыс. р. Затраты 1982 г., приведенные к 1985 г., $K_3 = 20[1 + 0,08(5 - 2)] = 24,8$ тыс. р. Аналогично вычислены сопоставимые затраты для других лет.

Если в результате внедрения научных разработок ускоряется ввод в действие дорог, мостов, зданий и др., а также если сокращаются сроки капитальных ремонтов, то экономическую эффективность определяют по формуле $\Delta = E_n K (T_n - T_\phi)$ (8.11), где K — значение основных производственных фондов, досрочно введенных в действие; T_n — нормативные сроки строительства различных объектов в городах, установленные Госпланом и Госстроем СССР или нормативные сроки капитальных ремонтов; T_ϕ — фактические сроки ввода объектов в действие.

ГЛАВА 9

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

§ 1. Планирование и прогнозирование научных исследований

Планирование научных исследований предполагает определение основных условий выполнения научно-исследовательских работ: цель, задачи, объем, затраты, сроки выполнения, исполнители, ожидаемые результаты исследования и др. В нашей стране планирование науки имеет общегосударственный характер, поскольку немислимо без органической связи планов развития производства, науки и техники обеспечить выполнение целей, предусмотренных Государственными планами социального и экономического развития народного хозяйства страны.

В соответствии со сложившейся практикой планирования научно-исследовательских работ составляют перспективные (пятилетние) и годовые планы. Установлены основные формы планирования научно-исследовательских работ и использования достижений науки и техники в народном хозяйстве.

1. Государственный пятилетний план по решению основных научно-технических проблем, имеющих важное народнохозяйственное значение. Этот план утверждается Советом Министров СССР и является составной частью Государственного пятилетнего плана социального и экономического развития народного хозяйства.

2. Координационные планы по решению основных научно-технических проблем, включенных в пятилетний план, предусматривают выполнение комплекса работ начиная с научных исследований и кончая использованием результатов их в народном хозяйстве, увязку работ между исполнителями. Эти планы разрабатывают министерства и ведомства, утверждает Государственный Комитет по науке и технике СССР.

3. Государственный годовой план использования в народном хозяйстве новых важнейших видов продукции, технологических и автоматических систем управления, имеющих общегосударственное значение. Этот план утверждает Совет Министров СССР. Он

является составной частью Государственного годового плана социального и экономического развития народного хозяйства СССР.

4. Отраслевые и государственные республиканские пятилетние и годовые планы научно-исследовательских работ по использованию науки и техники в народном хозяйстве, утверждаемые отраслевыми министерствами и ведомствами СССР и правительствами союзных республик.

5. Пятилетние планы научных исследований в области естественных и общественных наук, разрабатываемые и утверждаемые Академией наук СССР.

6. Пятилетние и годовые планы научно-исследовательских проектно-конструкторских и технологических работ по использованию достижений науки и техники в производстве, утверждаемые министерствами и ведомствами по каждой подчиненной организации. В эти планы включают задания на выполнение научных исследований, входящие в народно-хозяйственные и координационные планы и др., а также инициативные и поисковые научно-исследовательские работы на основе предложений отделов, секторов, лабораторий, кафедр и обсуждения их на ученых советах. Тематика инициативных и поисковых работ направлена, как правило, на решение комплексных проблем и разработку сложившихся в научном коллективе научных направлений. Эти научно-исследовательские работы также тесно связаны с планами развития народного хозяйства.

В нашей стране большое внимание уделяется разработке и реализации комплексных научно-технических целевых программ, включающих весь комплекс работ, через который проходит новое изделие; от разработки идеи, фундаментальных и поисковых исследований до серийного внедрения его в народное хозяйство. Эти программы объединяют в крупные научные коллективы представителей различных областей знания, обеспечивают координацию и проведение исследований от фундаментальных и поисковых работ до внедрения полученных результатов, укрепляют связь науки с производством. Они опираются на точные расчеты, нацеливаются на четкое сформулированный конечный результат, полное решение заданной проблемы. В них четко определяются этапы, очередность выполнения работ, личная ответственность исполнителей и система управления программой. В целевой программе четко формулируются цель и проблемы, которые будут решены в результате выполнения запланированных работ, выделяется ее структура (разделы и темы, этапы выполнения работ), в соответствии с которой конкретно указываются исполнители, сроки выполнения научных работ, результаты, которые будут получены, сроки их внедрения, а также финансирующие организации и экономический эффект от внедрения. По целевой программе назначается головная организация, которая согласовывает содержание и очередность работ со всеми участниками, утверждает программу в вышестоящих инстанциях, координирует и контролирует работу отдельных участников.

Руководство наиболее крупными программами осуществляется координационными советами, во главе которых стоит ответственный руководитель, наделенный соответствующими полномочиями.

Наиболее крупной программой в нашей стране является Продовольственная программа, принятая майским (1982 г.) Пленумом ЦК КПСС. Разработаны и реализуются общесоюзная и республиканские комплексные программы научно-технического прогресса до 2000 г. Более 160 целевых научно-технических программ разработаны и будут реализованы в одиннадцатой пятилетке. В Украинской ССР разработано и реализуется шесть крупных целевых научно-технических программ (Агропромкомплекс, Сахар, Труд, Энергия, Материалоемкость, Охрана среды), выполнение которых контролируют Координационные советы во главе с Заместителем Председателя Совета Министров УССР. Наряду с этим, реализуются межотраслевые, региональные и другие программы.

Опыт показывает, что программно-целевой метод планирования, организации и управления научной деятельностью позволяет существенно сократить сроки создания и освоения новой техники, повысить эффективность использования научного потенциала страны, усилить взаимосвязь науки с производством, повысить эффективность воздействия партийных и государственных органов на ускорение научно-технического прогресса в стране.

Формирование пятилетних планов в научных учреждениях проходит примерно в такой последовательности: предварительно советы учреждений обсуждают основные научные направления пятилетнего плана с учетом указаний вышестоящих организаций и информационных материалов. Затем обсуждают работы, намеченные к исполнению в подразделениях учреждений, в процессе чего уточняют тематику, определяют основные этапы работ, рассчитывают их трудоемкость, назначают сроки выполнения тем. Далее составляют проект сводного плана и обсуждают на совете учреждения и согласовывают (утверждают) разработанный план в вышестоящей организации.

Годовые планы научных исследований составляют в соответствии с утвержденным перспективным планом. Они содержат темы, переходящие из плана предыдущего года; новые работы, подлежащие выполнению по указанию вышестоящих организаций; новые инициативные работы, одобренные вышестоящей организацией. Перед включением темы в годовой план составляют техническое задание, согласовывают с заказчиком (наименование и содержание работы в целом по теме и по этапам, ожидаемые результаты, порядок приемки работы и перечень документации) и разрабатывают технико-экономическое обоснование, включающее цели, задачи и методику выполнения исследования, определение патентной способности, выбор материалов оборудования, расчет экономической эффективности.

Работы, включенные в план на основании правительственных постановлений, составляют группу важнейших, они получают первоочередное финансирование и материально-техническое обеспечение. Отмеченные формы планирования исследований — это исходные

документы для определения финансовых затрат, штатов, материально-технического обеспечения научно-технических работ, что обусловило тесную связь форм и методов планирования научных исследований с формами и методами их финансирования.

Размеры затрат на науку определяются размерами национального дохода. В настоящее время доля этих затрат в нашей стране составляет около 6 % в составе национального дохода, в 1981 г. на финансирование НИР в стране было выделено 22,6 млрд. р. Общие затраты на науку в целом определяются не только национальным доходом, но и задачами, которые стоят перед наукой в настоящий период.

Сейчас наблюдается тенденция к повышению удельного веса затрат на решение фундаментальных проблем естественных и общественных наук, основных научно-технических проблем. Финансирование научных исследований в СССР осуществляется за счет ассигнований из государственного бюджета и собственных средств предприятий и организаций. Затраты на науку за счет государственного бюджета расходуются на работы, которые обычно предусмотрены Государственным планом развития народного хозяйства или планами академических институтов. Такие исследования требуют длительного времени, их результаты могут быть использованы не одним каким-либо предприятием, а целой отраслью, и не сразу, а спустя определенное время.

Средства, выделяемые на науку предприятиями, концентрируются в министерствах, ведомствах и централизованно используются при решении актуальных для данной отрасли научно-технических вопросов. Предприятия также имеют право направлять часть средств, полученных путем экономии от снижения себестоимости продукции против плановых показателей, на научные исследования относительно низкой стоимости. Результаты этих работ могут быть использованы в ближайшее время, в том числе и в период их выполнения.

Отделы (кафедры) составляют годовые планы работ: план НИР и ОКР; внедрения законченных НИР и ОКР; подготовки работ для опубликования; подготовки докторских и кандидатских диссертаций. После утверждения этих планов и обеспечения финансирования (затраты на зарплату, материалы, приборы, оборудование и др.) их доводят в форме планов-заданий к исполнителям, которые определяют трудоемкость каждой темы, составляют планы-программы, оперативно-календарные планы и калькуляцию темы.

Составление планов и все расчеты производят до начала планируемого года. В соответствии с рабочей программой научный руководитель темы выдает задания исполнителям на разработку отдельных вопросов. Исполнители пишут личные календарные планы, в которых предусматривают время на выполнение всех этапов научного исследования. В отдельных случаях составляют квартальные, месячные и другие планы работ. Научный руководитель темы утверждает эти планы и контролирует их выполнение.

Планирование научной работы позволяет обеспечить ритмичность, целеустремленность и эффективность выполнения научной работы и избежать неоправданных затрат времени и средств.

Прогнозирование научных исследований имеет целью определить вероятностную оценку путей их развития и достижение результатов в будущем, а также требуемых для их реализации ресурсов и организационных мер.

Ускорение темпов научно-технического прогресса выдвигает задачу широко осмысливать долгосрочное прогнозирование разви-

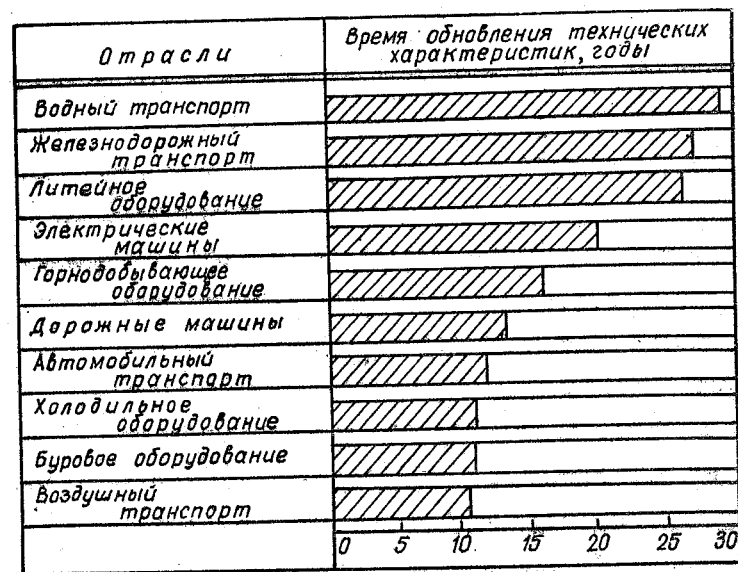


Рис. 9.1. Время обновления технических характеристик различных видов промышленной продукции

тия науки и техники. Это обусловлено коренными изменениями в концепциях науки и техники. Если раньше такие изменения происходили один раз в 100 и более лет, то в настоящее время они происходят в несколько раз чаще, а в отдельных случаях — через каждые 10—15 лет (рис. 9.1). В этой ситуации необходимы научные прогнозы-предвидения, чтобы правильно принять направления исследований и разработок.

Обществу все дороже обходятся случаи, когда в какой-то отрасли вовремя не проведены исследования, что не позволило реализовать решение, наилучшим образом обеспечивающее достижение цели. Научно-технические прогнозы, опережая разработку экономических прогнозов, помогают правильно ответить на важные вопросы, возникающие при разработке перспективных планов развития народного хозяйства. Однако научно-технические, как

и другие прогнозы, имеют вероятностный характер. Это обусловлено невозможностью при их разработке учесть все факторы, влияющие на развитие научно-технического прогресса.

В настоящее время составляют прогнозы, рассчитанные на 10—20 лет вперед. Выбор такого периода объясняется тем, что их длительность совпадает с продолжительностью цикла «исследование — производство», т. е. за это время научная идея пройдет через все этапы НИР и ОКР и воплотится в новые образцы, выпускаемые серийно предприятиями. За этот период удваивается количество выполненных научных работ. Оканчивается срок действия патентов, удваивается количество технических средств производства, на передовую линию прогресса выходит новое поколение специалистов. Указанные прогнозы исходят обычно из вполне определенных в настоящее время возможностей научно-технического прогресса.

Наряду с этим составляют прогнозы, рассчитанные на 40—50 лет и более. За это время в науке удваивается количество концепций, теорий и трактовок, происходит полная смена поколений. Эти прогнозы дают в основном качественные показатели и базируются на широкой системе научных представлений, а не на сложившихся концепциях в конкретной отрасли знаний. Многочисленные методы прогнозирования науки и техники сведены в три основные: экстраполяции, экспертных оценок, моделирования. Методы экстраполяции основаны на представлении о будущем, базируются на прямом и непосредственном продолжении действующих в настоящий период закономерностей. Обычно экстраполируют статистически складывающиеся тенденции изменения тех или иных количественных характеристик (рост научных кадров, научно-технической информации, затраты на науку и т. п.).

Принципиальное значение при использовании экстраполяционных методов имеет выбор предела экстраполяции. Практика показывает, что за 10—15 лет большую часть научно-технических данных можно экстраполировать с точностью $\pm 15\%$.

Методы экспертных оценок связаны со сбором и систематизацией различного рода экспертных оценок. Экспертом может быть ведущий ученый специалист в конкретной области науки, выработавший гипотетическое представление о ее развитии.

Обычно используют мнение многих экспертов (метод комиссии). Оценки экспертов переводят в количественную форму (баллы), что позволяет полученную информацию обработать методами статистики. Эффективность метода зависит от подбора комиссии и уровня организации ее работы. Однако методам экспертных оценок присущи недостатки: не все эксперты равноценны, их мнения субъективны, на оценки и суждения экспертов влияют авторитет, заслуги коллег, ранее высказавших свое суждение, инерционность в публичном отказе от своего мнения и т. п.

Методы моделирования научно-технического прогнозирования только разрабатываются, однако их перспективность очевидна. Среди

этих методов 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.

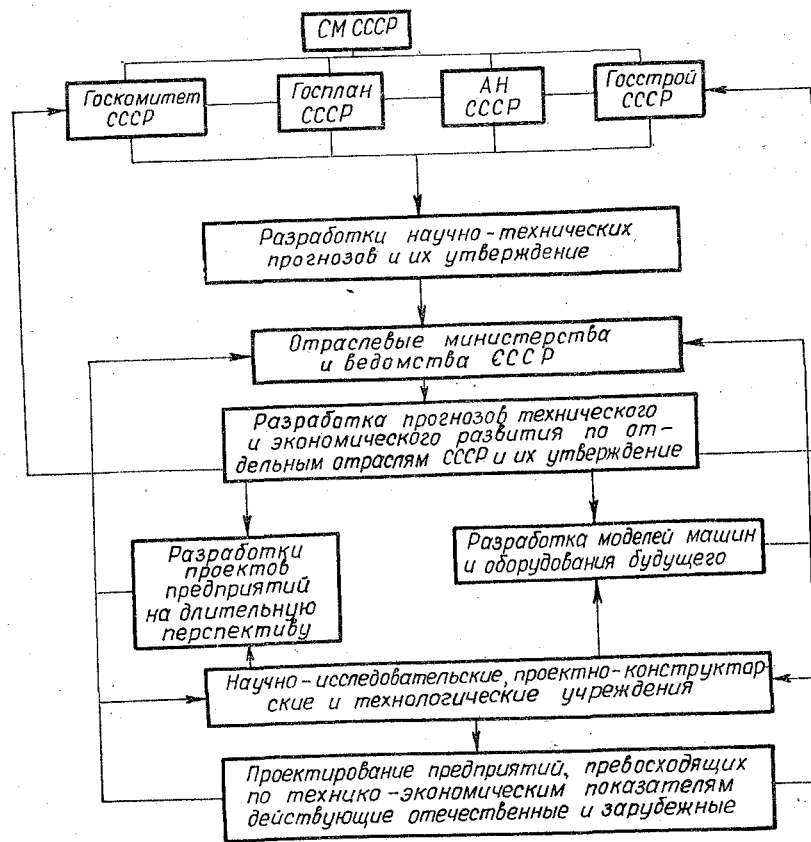


Рис. 9.2. Структурная схема разработки прогнозов в стране

Все большее значение приобретает разработка математических моделей для прогнозирования научно-технического прогресса. В простейшем случае используют законы статистических распределений. Например, длительность работы массовых технических средств хорошо аппроксимируется законом нормального распределения.

Каждый из методов прогнозирования имеет свои достоинства, ограничения и недостатки. Однако комплекс современных методов научного прогнозирования представляет собой надежный инстру-

мент научно обоснованного предвидения, что позволяет правильно определить политику в области развития науки и техники.

Несмотря на то что методика составления прогнозов научно-технического прогресса еще далека от совершенства, современный уровень знаний и накопленный опыт позволяют уже в настоящее время решать полезные для практики вопросы прогнозирования научно-технических исследований и разработок. Поэтому составлению перспективных (пятилетних) народнохозяйственных планов предшествует разработка научно-технических прогнозов. Это определено Постановлениями ЦК КПСС и Совета Министров СССР, в соответствии с которыми в стране организована систематическая работа по составлению научно-технических прогнозов развития всего народного хозяйства и отдельных его отраслей на длительный период времени (15 и более лет).

Определен порядок составления прогнозов (рис. 9.2). Государственный комитет по науке и технике совместно с Госпланом ССР, Академией наук СССР и Госстроем СССР на основе предложений отраслевых министерств разрабатывает и утверждает научно-технический прогноз всего народного хозяйства, в котором формулируются основные проблемы развития науки и техники, предложения по использованию их достижений, определяется уровень технического развития отраслей народного хозяйства и важнейшие научные исследования, а также технические разработки, необходимые для создания научно-технического задела. Отраслевые министерства, учитывая предложения научных учреждений и указания вышестоящих организаций, детально разрабатывают научно-технический прогноз развития отрасли. В соответствии с этим научно-исследовательские, проектно-конструкторские и технологические учреждения, вузы планируют свои НИР и ОКР.

§ 2. Организация научной работы

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 научных исследований на разных уровнях: труда научного работника, работы подразделений научного учреждения, деятельности объединений научных учреждений в системе академий, министерств и других ведомств, а также в системе Совета Министров СССР.

Научные основы творческой работы окончательно еще не разработаны. Однако уже сейчас можно говорить об основных принципах, способствующих повышению эффективности научной деятельности. Важное место в совокупности этих принципов занимает научная организация научного труда (НОНТ), основные положения которой предусматривают: высокую организованность труда науч-

ного работника, строгое соблюдение режима и гигиены умственного труда; плановость научной работы, критику и самокритику; контролирование и точное фиксирование результатов работы, обеспечение резерва в научной работе, использование средств для механизации и автоматизации вспомогательных операций, систему методов и упражнений по совершенствованию памяти научного работника, коллективность в научной работе.

Труд научного работника должен быть высоко организованным. Научный работник обязан строго придерживаться определенных правил, режима и порядка работы, правильно организовывать рабочее время, место, строго соблюдать необходимую последовательность процессов и приемов труда, единство в методике, технике, терминологии, стиле и оформлении, вести учет выполненной научной работы. Важно уметь оградить себя в процессе исследований от второстепенных идей и замыслов, нельзя ослаблять внимание к научной проблеме.

Одновременно с этим следует строго соблюдать гигиену умственного труда, режим питания. Благоустроенные условия труда создают хорошее рабочее настроение и играют большую роль в повышении работоспособности человека. Однако молодые ученые должны уметь преодолевать трудности, работать в любых, иногда неблагоприятных условиях (например, в экспедициях). Наблюдения показали, что умственная работоспособность у большинства людей максимальна в первой половине дня, затем она падает, а в вечерние часы, примерно в период с 18.00 до 21.00, возрастает.

Начальный период рабочего дня целесообразно использовать для выполнения наиболее трудоемких теоретических работ, анализа и обобщения экспериментальных данных. После полудня рекомендуется выполнять экспериментальные работы, в вечернее время лучше читать литературу, в ночное время работать нежелательно. Необходимо добиваться ритмичности в творческой работе не только в течение дня, но и в течение недели, месяца, года. Известно, что эффективность научной работы значительно уменьшают длительные перерывы, что обусловлено трудностью преодоления инерции начала работы.

Для научных работников рекомендуется активный отдых (регулярная смена умственной работы дозированной физической деятельностью и обобщения праздного отдыха). Систематическое занятие физкультурой и спортом длительно сохраняет творческую работоспособность ученого вследствие улучшения обмена веществ, регуляции дыхания и кровообращения, повышения сопротивляемости организма. Необходимо проводить короткие физические упражнения утром, в полдень и вечером (перед сном).

Важное место в системе НОНТ занимает планирование работы научного работника, в процессе которого устанавливают логическую очередность выполнения задания на НИР, определяя при этом главное и сосредоточивая внимание на нем при выполнении исследований на каждом его этапе. Получив в начале года техническое

задание на НИР, научный работник составляет план — определяет содержание вопросов, сроки выполнения, участников работы на каждом этапе. Установить четкие границы между этапами трудно. Например, рабочую гипотезу ученый разрабатывает, как правило, с первых дней исследования. Однако необходимо придерживаться установленной последовательности научной работы.

Нужно иметь графики работы на месяц, неделю, день, настойчиво добиваться их выполнения. Планы научных работников должны быть строго увязаны с планами работ научных коллективов. Ход исследования необходимо четко контролировать и фиксировать на всех его этапах, в том числе и содержание изученного материала, индивидуальных бесед и консультаций, замечаний товарищей, собственных мыслей. Важнейшее значение имеет точность записи наблюдений, измерений. Результаты исследований целесообразно вести в специальных журналах, а другие записи — на отдельных карточках, в дневниках, тетрадах.

Ученый должен всегда иметь резерв во времени, материалах, ассигнованиях, а также в тематике, чтобы застраховать себя от отрицательных последствий риска, который имеет место в научной работе. Отдельные трудности, противоречия и даже ошибки должны быть вовремя преодолены даже в том случае, если необходимо переработать часть исследования. Здесь скромность ученого должна совмещаться с оперативностью, отчетливостью и упорством.

Научный работник должен систематически совершенствовать свою память — запоминать, сохранять и воспроизводить прошлый опыт. Хорошая память — это не только проявление нормальных психических способностей, но и в значительной мере результат постоянного ее воспитания и совершенствования.

Эффективность работы ученого может быть значительно повышена при использовании средств механизации вспомогательных операций научного работника, которые могут быть объединены в такие группы: вычислительная техника (настольные клавишные электронные машины, ЭВМ и др. — см. § 3, гл. 9); средства для копирования и размножения материалов (пишущие машинки, светокопировальные устройства); средства для механизации операций накопления научной информации (киноаппараты, фотоаппараты) и демонстрации информационных материалов и чтения микрофильмов (диапроекторы, эпидиоскопы, специальные приборы для чтения микрофильмов, камеры лабораторного телевидения); аппараты для записи и воспроизводства звука (магнитофоны, диктофоны, усилители звуков и другая аппаратура).

Принципами НОТ должны владеть все научные работники и особенно важно, чтобы их усвоили молодые, начинающие исследователи, в том числе аспиранты и студенты. Уже в начале научной деятельности необходимо выработать рациональный режим труда. Очень важно работать ритмично, без рывков, последовательно, этап за этапом, правильно чередовать периоды работы и отдыха.

Научное творчество становится все более коллективным, что

обусловлено, с одной стороны, концентрацией ученых в научных учреждениях, а с другой — расширением совместных научных поисков, взаимопомощи и контактов. В связи с этим ученый должен уметь пользоваться преимуществами коллективного труда в крупной исследовательской организации, воспитывать у себя чувство товарищества, умение учитывать мнение и опыт своих коллег. 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, проведение работ с наибольшим эффектом, создание единой системы планирования, организацию и контроль выполненных работ.

В настоящее время наиболее распространена четырехзвенная структура научного учреждения: группа, лаборатория, отдел, учреждение (или группа, кафедра, факультет, институт). Практика показывает, что оптимальный состав группы — 3—10 научных работников (меньшее количество характерно для фундаментальных исследований, большее — для разработок). Наряду с этим в группу может входить от 5 до 10 человек вспомогательного персонала (большее количество — в группу, выполняющую разработки). Состав лабораторий колеблется от 20 до 60 человек.

Принято считать, что оптимальное количество преподавателей на кафедре — 10—12. С учетом учебно-вспомогательных лиц, научных работников состав кафедры может достигать 30—50 сотрудников. Коллективы первичных научных подразделений в таком составе организуют свою работу наиболее эффективно.

Однако не только количество научных сотрудников определяет результаты научной работы. Важное значение имеет подбор их по квалификации и специальности. Рекомендуются, чтобы в лабораториях и на кафедрах работали люди разного возраста, опыта, пола. Так, целесообразно, чтобы на кафедре было 1—2 профессора, 5—6 доцентов, 4—5 ассистентов, 10—12 инженеров, половина работников моложе 30 лет и чтобы на инженерных кафедрах женщины составляли 25—35 %.

В таком коллективе возможно обеспечить четкое распределение обязанностей в соответствии с квалификацией и наклонностями сотрудников. Нельзя допускать, чтобы высококвалифицированные работники (доктора, кандидаты наук) выполняли техническую работу лаборантов. В научном коллективе должна быть создана благоприятная для творческой работы обстановка. Важно, чтобы перед коллективом стояли увлекательные, смелые и перспективные задачи, которые были бы достаточно трудными, но с другой стороны и не вызывали бы разочарование.

Способствуют упрочению коллектива, повышению эффективности работы его собственные традиции. Нужно, чтобы эти традиции приумножались, развивались. Одновременно с этим желательно использовать полезные сведения, полученные со стороны.

Члены коллектива должны сознавать опасность односторонней ограниченности, самоуспокоенности, стараться расширить область своих интересов.

Важную роль играет руководитель, обычно назначаемый из числа наиболее квалифицированных и авторитетных научных работников. Он формирует научную тематику, над которой работают подчиненные ему сотрудники, организует ее выполнение и несет персональную ответственность за результаты научно-исследовательской деятельности руководимого им научного коллектива. Руководитель должен совмещать свой профессиональный, служебный и личный авторитет. Не пренебрегая собственной научной карьерой, он обязан заботиться о четкой и эффективной работе коллектива. Оставляя за собой общий контроль, руководителю коллектива целесообразно передавать отдельные функции подчиненным. Свой авторитет руководитель должен использовать не для подавления мнений подчиненных, а наоборот — для их индивидуального развития, создания творческой обстановки, развития здоровой дисциплины.

Руководитель коллектива обязан последовательно проводить меры по сплочению коллектива вокруг общих целей, развитию товарищеских связей, ускоряющих решение творческой задачи.

Первичные научные коллективы объединены в отделы (НИИ) или факультеты (вузы). Структура научных учреждений включает подразделения, работающие по заказам (тематические подразделения — лаборатории, кафедры), и специализированные подразделения, работающие по технологическому признаку (функциональные подразделения — отделы: информационный, финансовый и материально-технического снабжения, библиотека и др.). Такую структуру называют смешанной, она является наиболее гибкой в управлении.

В отдел (факультет) входит 3—6 лабораторий (кафедр). Структура института обычно включает 3—6 отделов (факультетов). В настоящее время в институте работает обычно 500—1000 и более сотрудников. Научные учреждения организованы по принципу единоначалия, т. е. директор (ректор) осуществляет все права, предоставленные научной организации, руководит научной деятельностью, определяет тематику и направление научных исследований, пользуется определенными полномочиями в вопросах планирования, финансирования, материально-технического снабжения кадров. Считается целесообразным, чтобы во главе научного учреждения был крупный ученый (профессор, доктор наук). В последнее время в связи с усложнением организации научной деятельности все чаще выделяют тип ученого-организатора науки наряду с ученым-теоретиком и ученым-экспериментатором.

В научном учреждении образуют Совет, который является совещательным органом при дирекции (ректорате). В состав совета входят руководители института, отделов, лабораторий, факультетов, кафедр, ведущие ученые и представители общественных органи-

заций. Совет рассматривает научные и технические проблемы, планы института, работу отделов (факультетов), лабораторий (кафедр) и др. Важную роль в деятельности научного учреждения играют общественные организации, в первую очередь партийная организация, имеющая право контролировать деятельность администрации.

§ 3. Использование ЭВМ в научном исследовании

Средства вычислительной техники широко применяются во всех областях науки. Их правильное применение существенно влияет на эффективность исследования, заметно изменяет организационные формы научной работы. Основная трудность, с которой сталкивается молодой специалист — это незнание возможностей ЭВМ и тех задач, которые можно решать с ее помощью.

ЭВМ делятся на две большие группы: аналоговые — электронные модели и цифровые ЭВМ. В настоящее время создаются аналогово-цифровые машины, которые объединяют положительные качества аналоговых и электронных ВМ. Аналоговые ВМ широко применяются в научных исследованиях. Их основное достоинство — быстрота и наглядность решения. Результат немедленно просматривают на экране осциллографа. Легко изучить влияние отдельных факторов на протекание процесса. Недостаток аналоговых ВМ — их малая точность (до нескольких процентов), отсутствие хранимой в памяти программы, а также необходимость сборки, разборки и настройки блок-схемы для каждой новой решаемой задачи.

Основное применение аналоговых машин — интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений, решение которых в аналитическом виде не может быть получено. Наряду с этим, с их помощью решают алгебраические уравнения, задачи оптимизации и минимизации, задачи статистического моделирования, определяют корни трансцендентных уравнений.

Этапы решения задачи на аналоговых ВМ следующие: математическая формализация условия задачи (составление системы уравнений и определение краевых, начальных условий), составление блок-схемы; расчет масштабных коэффициентов; сборка и настройка блок-схемы; пробное решение и отладка программы, решение задачи и регистрация результатов.

В СССР выпускается много универсальных аналоговых ВМ (МН-7, МН-14 — ламповые, МН-10М, МН-17М, «Электрон»). Некоторые из них, например МН-17М, способны решать систему дифференциальных уравнений, имеющих порядок более 50 с точностью до 2%. Узкоспециализированная аналоговая ВМ «Оптимум-2» создана для решения задач линейного программирования, «Экстрема-1» — для задач оптимизации, «Альфа» — для расчета рамных конструкций и т.д.

Более широкими универсальными возможностями по сравнению с аналоговыми ВМ обладают цифровые ЭВМ. Их возмож-

ности позволяют играть в шахматы, писать стихи, музыку, управлять производством, решать сложные научные задачи (планирование и обработка экспериментов, статистическое моделирование, решение уравнений, доказательство теорем и др.).

Важное преимущество цифровых ЭВМ — наличие специальных средств управления, позволяющих выполнять действия над числами в определенной последовательности (программы), заданной один раз перед решением задачи. Пока задача не будет решена, вмешательство оператора не требуется. Наряду с этим, важнейшими достоинствами цифровых ЭВМ является их точность, универсальность.

Цифровые ЭВМ позволяют производить вычисления с любой точностью и достаточно быстро. Эти машины эффективно решают разнообразные задачи, в том числе и в диалоговом режиме; в последнем случае машина превращается в мощный придаток человеческого мозга. Основной недостаток — ограниченная производительность, что не всегда удовлетворяет требованиям научно-технического прогресса. Машина «Мир-2» имеет среднюю производительность 12 000; «Наири-3» — 10 000, ЕС-1022 — 80 000 операций в секунду. *Этого не всегда достаточно.* В настоящее время созданы машины (БЭСМ-6), производительность которых — 1 млн операций в секунду.

Решение задач на цифровых ЭВМ состоит из таких основных этапов: математическая формулировка задачи; разработка алгоритма (выбор метода решения), составление программы для конкретной цифровой ЭВМ, подготовка программы и цифровых данных к вводу в машину; работа на цифровой ЭВМ — отладка программы и решение задачи.

Важно правильно выбрать цифровую ЭВМ для выполнения научных работ. Нерационально использовать большие машины для решения несложных задач, на них следует решать большие по объему задачи. Знакомство с цифровыми ЭВМ и их возможностями следует начинать с малых машин типа «Мир», «Наири». Из средних и больших машин наиболее перспективны модели серии ЕС и программно совместимые с ними модели АСВТ (агрегатные системы вычислительной техники).

С момента появления в 1946 г. первой цифровой машины цифровые ЭВМ прошли в своем развитии сложный путь. Сменилось три их поколения. На смену им приходит четвертое — микроЭВМ, которые по своим характеристикам (стоимость, энергопотребность, быстродействие, надежность) значительно превосходят своих предшественников. МикроЭВМ структурно повторяет своих предшественников, но в отличие от них она целиком выполняется по интегральной технологии на миниатюрном полупроводниковом кристалле, который легко встраивается в автомобиль, светофор, станок с числовым программным управлением, робот, электронные весы, кассовой аппарат, в сложный научный прибор и многие другие устройства, возможности которых могут быть существенно расширены благодаря применению такого «электронного мозга». Особен-

ность цифровых ЭВМ состоит в том, что решение поставленной задачи происходит преобразованием исходных цифровых кодов в цифровые коды результата путем автоматического выполнения последовательных операций по наперед заданному алгоритму.

Исторически сложилось так, что в начале цифровые ЭВМ применялись только для решения математических, физических и экономических задач. Процесс подготовки данных был длительным. Сами данные наносились путем перфорации на специальные носители, а затем медленно вводились в цифровую ЭВМ, имеющую относительно большое быстродействие. Научно-технический прогресс предъявил требования повышения производительности и к устройствам ввода—вывода, измерителям, преобразователям информации. Быстродействие и точность их стали отвечать быстродействию и точности цифровой ЭВМ. Это позволило использовать цифровые ЭВМ не только для автоматизации интеллектуальной деятельности человека в различных областях его деятельности, но и для автоматизации научных исследований.

Автоматизация научных исследований — важный фактор повышения производительности труда ученых, а также уровня самих исследований. Под автоматизацией научных исследований понимается создание и использование автоматизированных научных приборов и систем автоматизации экспериментов, применение методов и средств кибернетики (главным образом цифровых и аналоговых ЭВМ) для моделирования творческого процесса организации научных коллективов, планирования научных исследований. Это обуславливает автоматическое управление процессом эксперимента и его контроль без непосредственного участия человека.

Эксперимент является неотъемлемой составной частью научных исследований и его автоматизации уделяется особое внимание как в нашей стране, так и за рубежом. Происходит замена механических средств автоматизации экспериментов почти во всех областях научных исследований средствами электроники. Важность этой проблемы объясняется тем, что в процессе развития знаний о природе становятся необходимыми исследования все более сложных объектов и явлений, порою уникальных по стоимости, времени существования и др. Например, время жизни элементарных частиц составляет миллионные доли секунды, их исследование традиционными методами невозможно, традиционное проведение экспериментов не позволяет получить о них достаточного количества информации, достичь требуемой точности результата за заданное время или даже выполнить исследование в целом. К тому же это приводит к усложнению аппаратуры для научных исследований, увеличению объема и сложности математической обработки результатов эксперимента.

Методология автоматизации научных исследований отражает основные диалектические ступени познания. На нижней ступени находятся наблюдения, эксперименты, накопление фактов, т. е. получение информации. Вторая ступень — абстрактное описание изучаемого предмета, обобщение, т. е. построение модели. Третья

ступень состоит во всестороннем исследовании модели и формулировании выводов и теоретических положений. Автоматизировать научные исследования возможно на первых двух ступенях познания.

Исследователь на основе полученных данных выполняет творческую работу — формулирует выводы, теоретические положения, законы, строит теории и т. д.

Типовые функции, выполняемые в процессе автоматизации исследований, состоят в следующем: сбор информации и преобразование ее к виду, удобному для автоматического ввода в ЭВМ с помощью автоматических датчиков (чувствительных элементов, аналого-цифровых преобразователей, измерительных приборов); предварительная обработка информации (фильтрация, устранение избыточности, статистическая обработка, линеаризация и т. п.); основная обработка, которая полностью определяется целями и задачами исследований.

На этом этапе учитываются результаты предыдущих этапов исследований, серии экспериментов, при необходимости производится дополнительная обработка и интерпретация полученных результатов в виде некоторой модели.

В настоящее время определились основные направления материального обеспечения в области автоматизации научно-технического эксперимента, которые следует рассматривать как составную часть комплексной проблемы автоматизации научных исследований. К ним относятся: создание автономных комплексов автоматизации экспериментов, в состав которых входят экспериментальные установки, измерительная аппаратура и средства обработки информации (ЭВМ); создание систем автоматизации экспериментов на базе средних ЭВМ, в которых центральный процессор (вычислитель) обслуживает десятки экспериментальных установок; создание систем, использующих ЭВМ большой мощности, для автоматизации уникальных научных исследований, создание унифицированных информационно-измерительных средств, обеспечивающих связь ЭВМ с объектами автоматизации и внутрисистемные информационные связи между отдельными ЭВМ. Такие комплексы создаются в крупных НИИ, выполняют большие объемы многоплановых научно-исследовательских, в том числе и экспериментальных работ.

Характерной особенностью автоматизации научных исследований является то обстоятельство, что системы, осуществляющие задачи автоматизации и ЭВМ, функционируют, находясь в непосредственном и непрерывном информационном контакте с объектом эксперимента, его источниками и приемниками информации. В этом процессе принимают участие три основных звена: объект экспериментальных исследований, система автоматизации научно-технического эксперимента и исследователь (экспериментатор).

Система автоматизации по функциональной структуре является сложной и содержит в своем составе следующие подсистемы и элементы: подсистему связи с экспериментом, с экспериментатором, элементы регистрации и хранения экспериментальных данных, подсистему

экспресс-обработки экспериментальных данных на мини-ЭВМ, подсистему хранения и накопления данных, элементы документирования результатов, подсистему связи с другими системами, в том числе с системами и ЭВМ более высокого уровня.

Подсистема связи с экспериментом обеспечивает поступление в систему информации о состоянии объекта исследования и вырабатывает необходимые управляющие воздействия, которые переводят объект в новое состояние в соответствии с планом эксперимента. Подсистема связи с исследователем предоставляет ему возможность принимать активное участие в процессе управления экспериментом. Подсистема экспресс-обработки выполняет оперативную обработку полученной информации в целях представления сведений о ходе процесса исследований. Подсистема хранения и накопления данных собирает основные сведения, необходимые для реализации алгоритмов обработки информации и является по сути «банком данных». Элементы регистрации, хранения и документирования результатов осуществляют хранение, вывод и представление в требуемой форме результатов обработки экспериментальных данных.

Необходимым условием автоматизации научно-технического эксперимента, как уже отмечалось, является наличие ЭВМ с развитым математическим обеспечением. В состав последнего входят набор программ обработки данных, планирования и управления экспериментом, сервисные программы, обеспечивающие удобство связи исследователя с системой автоматизации. Последние играют особую значительную роль, так как позволяют экспериментатору быть активным звеном в системе автоматизации и предоставляют ему возможность не только наблюдать за течением эксперимента, но и вмешиваться в его ход, т. е. управлять экспериментом.

В состав комплекса аппаратуры технического обеспечения входят, помимо ЭВМ и информационно-измерительных устройств, также средства визуального представления экспериментальных данных и документирования результатов их обработки (дисплей, графопостроители, цифropечатающие устройства, устройства индикации и др.). Анализ задач экспериментальных исследований показывает, что при автоматизации научно-технических экспериментов, проводимых в условиях лабораторий, целесообразно применять малые цифровые ЭВМ с определенным набором внешних устройств. Целесообразность их использования определяется следующими факторами.

1. Экономичностью. Для малых ЭВМ характерны небольшая стоимость и относительно небольшие затраты на их эксплуатацию.
2. Функциональной специализацией. Малые ЭВМ целесообразнее всего применять для решения сравнительно простых, часто повторяющихся задач. Использование больших ЭВМ для этих целей экономически невыгодно.
3. Простотой внесения изменений. В системах с малыми ЭВМ выполняются сравнительно просто необходимые изменения как в структуре системы, так и в отдельных ЭВМ.

4. Устойчивостью к внешним воздействиям. Малые ЭВМ создаются с учетом возможности работы в условиях широкого диапазона температур внешней среды, нерегулируемой влажности, высокого уровня вибраций и т. д., т. е. для работы в лабораториях и производственных помещениях. Большие ЭВМ предназначены для работы в более благоприятных условиях, в специальных помещениях с определенными внешними воздействиями.

5. Удобством эксплуатации и использования средств программирования.

С помощью малых ЭВМ организуется нижний уровень в иерархических системах автоматизации научно-технического эксперимента. Верхние уровни в таких системах строятся на основе средних или больших ЭВМ. Такая иерархия дает возможность одновременно обслуживать большое количество экспериментов, включая вопросы автоматизации всех стадий и разновидностей научных исследований.

Для выполнения научных исследований, в том числе их автоматизации, перспективно использовать аналогово-цифровые комплексы (АЦК), состоящие из двух и более аналоговых и цифровых ЭВМ, которые объединены общей системой управления и передачи информации. Дополняя друг друга, обмениваясь информацией, аналоговые и цифровые ЭВМ позволяют увеличить точность аналогового моделирования в несколько десятков раз и одновременно во столько же раз повысить скорость численного решения путем повышения скорости ввода информации.

Успешное применение ЭВМ в научных исследованиях, в том числе и эффективность их автоматизации зависит от взаимопонимания и взаимодействия научного работника, с одной стороны, и программиста и оператора, обслуживающих ЭВМ, — с другой. Исследователь обязан хорошо знать возможности ЭВМ, а программист и оператор — цель, значимость и суть научного исследования. В этом случае обеспечивается наибольший эффект использования ЭВМ в научной работе.

§ 4. Управление научными исследованиями

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 экономическими отношениями, уровнем развития экономики страны.

С одной стороны, государство централизованно финансирует из бюджета научные исследования, устанавливает фонд зарплаты,

заработную плату научным сотрудникам, а с другой — поощряет исследования на основе хозяйственных договоров между научными и производственными организациями. В последнем случае научные работники заинтересованы в расширении связей с производством, проведении прикладных исследований для производства, внедрении результатов НИР в практику. Хоздоговорная тематика выгодна и предприятиям, так как она создает условия для выполнения необходимых научных исследований квалифицированными научными работниками.

Важным этапом в развитии экономических методов научных исследований является перевод отраслевых НИИ, КБ на новую систему планирования и экономического стимулирования.

Организационные методы управления существуют в форме организационного и распорядительного воздействия.

Методы организационного воздействия определяют относительно устойчивые отношения и связи научного учреждения, например его структуру, нормативные документы, которые изменяются через продолжительные промежутки времени. Поэтому организационное воздействие имеет периодический характер, т. е. его используют, когда возникает необходимость в перестройке устойчивых условий научного труда, обусловленных резко изменяющимися документами.

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. Распорядительное воздействие опирается на всякого рода административные акты, установленные методами организационного воздействия.

Социально-психологические методы учитывают специфику творческого интеллектуального труда в сфере науки. Эти методы приобретают особое значение в условиях коллективизации и индустриализации научного труда исследователей, что ставит перед управлением наукой ряд новых задач. Разрешить их можно только путем социальных, воспитательных, психологических и морально-этических мер воздействия на научных работников.

Эффективность научного творчества в значительной степени зависит от подбора научных работников, от воздействия на их психику со стороны руководителей, коллег-членов коллектива. Социально-психологические методы включают, с одной стороны, подбор сотрудников для совместной деятельности, а с другой — воздействие на психику работников через определенные формы поощрения, стимулирования в целях достижения наилучших результатов научных исследований.

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 научной организации научного труда; организация финансовой деятельности и зарплаты сотрудников; материально-техническое обеспечение научных исследований, охрана социалистической собственности; обеспечение учета и отчетности деятельности научного коллектива (учреждения); техническое и организационно-хозяйственное обслуживание выполнения НИР; охрана труда, улучшение бытовых условий и отдыха работников.

Процесс управления научными исследованиями многогранен, но он имеет свои специфические закономерности, систему, которую можно назвать технологией управления. Она включает следующие операции: определение цели управления и сбор информации, ее переработка; принятие решения; организация выполнения принятого решения; учет и контроль за выполнением решения. Процесс управления научными исследованиями протекает непрерывно. Ежедневно в научном коллективе возникает потребность в принятии решений по многим вопросам. Коллектив получает и готовит информацию, проводит организацию выполнения и контроль за исполнением ранее принятых решений.

Принятие решения — наиболее важный акт управления. Этим занимается руководитель научного коллектива. Круг вопросов, по которым принимают решения руководители разных коллективов (руководитель группы, заведующий кафедрой или лабораторией, директор или ректор научного учреждения), различен.

Ответственный исполнитель темы НИР (руководитель группы), непосредственно участвуя в проведении научного исследования, осуществляет оперативное управление, контроль за выполнением темы НИР, внедрением полученных результатов в производство. Он добивается, чтобы все этапы научного исследования выполнялись строго в установленный срок, своевременно составляет план-программу темы научного исследования, руководит проработкой научно-технической информации, обеспечивает материалы, оборудование, приборы, необходимые для выполнения темы.

Этот руководитель непосредственно на рабочем месте руководит техническим персоналом (лаборантами, техниками), научными сотрудниками, в первую очередь молодыми работниками, особое внимание уделяет охране труда. Он следит за тем, чтобы все члены его группы были равномерно и в полной мере загружены работой. Ответственный исполнитель следит за дисциплиной в его группе, отношениями между работниками.

Заведующий кафедрой (лабораторией) отвечает за выполнение планирования научной работы, оперативное управление и контроль за выполнением НИР, внедрение результатов НИР в производство, совершенствование НОИТ, осуществляет воспитание и руководит повышением квалификации научных кадров. Он вносит предложение руководству научного учреждения по вопросам подбора и расстановки научных кадров, развитию кафедры (лаборатории), материально-технического обеспечения выполняемых под

его руководством НИР. Заведующий кафедрой (лабораторией) координирует научно-исследовательскую работу между ответственными исполнителями темы.

Этот руководитель обязан решать перспективные проблемы, например, формирование научной проблемы и соответственно научной тематики на пятилетие, развитие коллектива, материально-техническое обеспечение и др. Он также руководит публикацией результатов исследования в печати, оформлением авторских заявок на изобретения и т. д. Руководитель научного учреждения принимает решения по всем функциям управления научными исследованиями. Он уделяет много внимания координации выполнения исследований подразделениями института, организации службы информации, финансового и материально-технического обеспечения, технического и организационно-хозяйственного обслуживания, а также выполнению НИР, охране труда, улучшению бытовых условий и отдыха работников.

Руководитель учреждения принимает решение о подборе и расстановке кадров. Важнейшее место в работе руководителя занимают решения по перспективным проблемам развития и деятельности учреждения, определения функции каждого подразделения, четкого разграничения прав и обязанностей каждого работника в соответствии с уставом научных учреждений. Принимая те или иные решения, руководитель учитывает мнение партийной и общественных организаций. Свои решения он оформляет в форме приказов.

Неотъемлемым элементом управления исследованиями на уровне научного учреждения является организация делопроизводства — работы с документами, которая включает прием документов, регистрацию их, направление на исполнение, исполнение документов, контроль за исполнением и отправку документов из научного учреждения. В настоящее время организуются механизированные и автоматизированные способы обработки документов, для чего все шире используют технические средства, ЭВМ и автоматические системы управления (АСУ).

Специфические особенности имеет управление научными исследованиями на уровне академий наук, министерств и других государственных ведомств, где принимают решения в основном по большому кругу вопросов, которые являются общими для ряда научных учреждений. Большой удельный вес занимают решения по проблемам перспективы развития науки и научных отраслей. На этом уровне управление наукой рассматривается как процесс формирования и осуществления определенной научной политики. Здесь разрабатывают стратегическую доктрину научной политики в нашей стране, принимают важные решения по одной из основных задач развития современной науки — превращению ее в непосредственную производственную и социальную силу социалистического общества.

Структура науки в СССР (рис. 9.3) позволяет централизованно управлять научными исследованиями, подчинять научную деятель-

ность интересам развития народного хозяйства в стране. На уровне страны, республики, отраслей промышленности, академий наук создается автоматизированная система управления наукой.

Создание этой системы охватывает разработку науковедческих, экономико-математических и информационных методов подготовки решений по практическим задачам управления наукой и научными

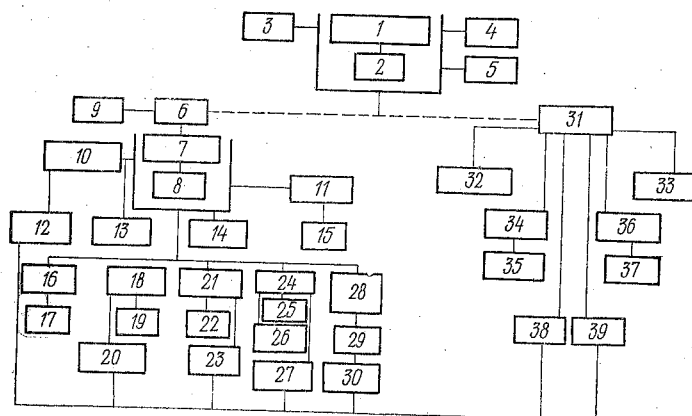


Рис. 9.3. Структурная схема организации науки в стране:

1 — ЦК КПСС; 2 — отдел науки и учебных заведений; 3 — Институт марксизма-ленинизма; 4 — Академия общественных наук; 5 — Высшая партийная школа; 6 — Верховный Совет СССР; 7 — Совет Министров СССР; 8 — Государственный комитет по науке и технике; 9 — Постоянные комиссии палат по науке и культуре; 10 — Академия наук СССР; 11 — Госплан СССР; 12 — Академии наук союзных республик, научно-исследовательские институты, Академии наук СССР; 13 — Институты информации; 14 — Комитет по делам открытий и изобретений; 15 — Научно-исследовательский экономический институт; 16 — Минвуз; 17 — вузы и НИИ; 18 — Министерство просвещения; 19 — вузы; 20 — Академия педагогических наук; 21 — Министерство здравоохранения; 22 — медицинские вузы; 23 — Академия медицинских наук; 24 — Министерство сельского хозяйства; 25 — отраслевые НИИ, опытные сельскохозяйственные станции; 26 — вузы; 27 — ВАСХНИЛ; 28 — отраслевые министерства; 29 — отраслевые НИИ, КБ и другие научные учреждения; 30 — НИИ при заводах, КБ, заводские лаборатории; 31 — органы научной общественности (при ВЦСПС, ЦК ВЛКСМ и других государственных организациях); 32 — научные общества, ученые советы, университеты, институты, лаборатории, кафедры, работающие на общественных началах; 33 — Всесоюзное общество изобретателей и рационализаторов; 34 — Всесоюзное общество «Знание»; 35 — региональные отделения общества; 36 — Всесоюзный совет научно-технических обществ; 37 — всесоюзные научно-технические общества и их региональные отделения; 38 — Высшая комсомольская школа (при ВЦСПС); 39 — Высшая комсомольская школа (ЦК ВЛКСМ)

исследованиями, упорядочения существующих структур научных учреждений, центров и документопотоков.

Накопленный опыт показывает высокую эффективность автоматизации процессов управления наукой, что позволяет оптимизировать научные исследования и получать максимальные результаты при минимальных затратах средств и времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алтишулер Г. С.* Творчество как точная наука. — М.: Сов. радио, 1979. — 175 с.
2. *Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г.* Математико-статистические методы экспертных оценок. — М.: Статистика, 1980. — 262 с.
3. *Блехман И. И., Мышкинс А. Д., Пановко Я. Г.* Прикладная математика: предмет, логика, особенности подхода. — К.: Наук. думка, 1976. — 270 с.
4. *Бондарь А. Г., Статюха Г. А.* Планирование эксперимента в химической технологии. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1976. — 182 с.
5. *Вознесенский В. А.* Статистические модели планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М.: Статистика, 1981. — 262 с.
6. *Глушков В. М.* Введение в АСУ. — К.: Техника, 1974. — 320 с.
7. *Грушко И. М., Лишанский Б. А.* Использование методов математического моделирования для оптимизации процессов, изучаемых физико-химической механикой дисперсных систем, 1980, вып. 12, с. 30—39.
8. *Добров Г. М.* Прогнозирование науки и техники. — М.: Наука, 1977. — 209 с.
9. *Дж. Тьюки.* Анализ результатов наблюдений. — М.: Мир, 1981. — 693 с.
10. *Закин Я. Х., Рашидов Н. Р.* Основы научного исследования. — Ташкент: Укитувчи, 1979. — 182 с.
11. *Золотарь И. А.* Экономико-математические методы в дорожном строительстве. — М.: Транспорт, 1974. — 274 с.
12. *Капица П. Л.* Эксперимент, теория, практика. — 2-е изд., испр. — М.: Наука, 1977. — 351 с.
13. *Киевский В. Г.* Экономическая эффективность научно-исследовательских работ в строительстве. — М.: Стройиздат, 1981. — 145 с.
14. *Кринецкий И. И.* Основы научных исследований. — К.: Вища школа, Головное изд-во, 1981. — 207 с.
15. *Налимов В. В., Голикова Т. И.* Логическое основание планирования эксперимента. — М.: Металлургия, 1981. — 151 с.
16. *Приходько П. Т.* Азбука исследовательского труда. — Новосибирск: Наука, 1979. — 95 с.
17. *Рачков П. А.* Науковедение. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. — 242 с.
18. *Рузинов Л. П., Слободчикова Р. И.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии. — М.: Химия, 1980. — 280 с.
19. *Сытник В. Ф.* Основы научных исследований. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1978. — 182 с.
20. *Тюрин Н. И.* Введение в метрологию. — М.: Изд-во стандартов, 1973. — 248 с.
21. *Чус А. В., Данченко В. И.* Основы технического творчества. — Днепропетровск.: Изд-во Днепропетр. металлург. ин-та, 1980. — 102 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

3

ВВЕДЕНИЕ

4

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАУКЕ, НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, КАДРАХ И УЧРЕЖДЕНИЯХ

- § 1. Определение и основные особенности науки 6
- § 2. Наука — как система знаний 9
- § 3. Научные исследования, их особенности и классификация 13
- § 4. Научные учреждения и кадры страны 19

Глава 2. ВЫБОР ТЕМЫ, ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- § 1. Методы обоснования тем научных исследований 27
- § 2. Составление технико-экономического обоснования на проведение научно-исследовательских работ 33
- § 3. Научно-техническая информация 34
- § 4. Информационный поиск 38
- § 5. Анализ информации и формулирования задач научного исследования 44

Глава 3. МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- § 1. Методология теоретических исследований 46
- § 2. Модели исследований 50
- § 3. Аналитические методы исследований 57
- § 4. Аналитические методы исследований с использованием экспериментов 65
- § 5. Вероятностно-статистические методы исследований 75
- § 6. Методы системного анализа 84

Глава 4. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- § 1. Методология эксперимента 93
- § 2. Разработка плана-программы эксперимента 95
- § 3. Статистические методы оценки измерений в экспериментальных исследованиях 98
- § 4. Средства измерений 113
- § 5. Проведение эксперимента 119
- § 6. Методы графического изображения результатов измерений 121

- § 7. Методы подбора эмпирических формул 126
- § 8. Регрессионный анализ 134
- § 9. Определение адекватности теоретических решений 139
- § 10. Определение законов распределения и их адекватности экспериментальным данным 142

Глава 5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

- § 1. Основные понятия планирования эксперимента 145
- § 2. Планирование эксперимента с целью описания исследуемого объекта 149
- § 3. Оптимизация технологических процессов с использованием планирования экспериментов 160

Глава 6. АНАЛИЗ И ОФОРМЛЕНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- § 1. Анализ теоретико-экспериментальных исследований и формулирование выводов и предложений 165
- § 2. Составление отчетов о научно-исследовательской работе 166
- § 3. Подготовка научных материалов к опубликованию в печати 169

Глава 7. ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

- § 1. Общие сведения 172
- § 2. Изобретательство как творческий процесс 174
- § 3. Алгоритм решения изобретательских задач 177
- § 4. Оформление изобретения 181
- § 5. Права авторов открытий, изобретений и рациональных предложений 187

Глава 8. ВНЕДРЕНИЕ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- § 1. Внедрение законченных научно-исследовательских работ в производство 188
- § 2. Эффективность научных исследований и ее критерии 189
- § 3. Расчет экономической эффективности научных исследований 188

Глава 9. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- § 1. Планирование и прогнозирование научных исследований 199
- § 2. Организация научной работы 207
- § 3. Использование ЭВМ в научном исследовании 219
- § 4. Управление научными исследованиями 217

ЛИТЕРАТУРА

222

Иван Макарович

Грушко

Владимир Михайлович

Сиденко

ОСНОВЫ

научных исследований

Редактор *А. П. Гужва*

Обложка художника *Н. В. Ивасюк*

Художественный редактор *В. Е. Петренко*

Технический редактор *Г. П. Александрова*

Корректоры *Н. А. Парфенова, Л. П. Пипенко*

Информ. бланк № 7191

Сдано в набор 26.05.83. Подп. в печать 29.08.83.
БЦ 12489. Формат 60×90/16. Бумага типогр. № 2. Лит.
гари. Выс. печ. 14 печ. л. 14,25 кр.-отт. 16 уч.-изд. л.
Тираж 7000 экз. Изд. № 1070. Зак. 3-194. Цена 55 к.

Издательство при Харьковском государственном уни-
верситете издательского объединения «Вища школа»,
310003, Харьков-3, ул. Университетская, 16

Книжная фабрика им. М. В. Фрунзе, 310057, Харь-
ков-57, Донец-Захаржевского, 6/8.