

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Автоматизация и математическое моделирование в НГК»

Курс лекций
по дисциплине
«Автоматизированные системы научных исследований»

Ростов–на–Дону

1. Статистическая обработка результатов измерений

Процесс измерения всегда представляет собой сравнение измеряемой величины с эталоном. **Эталоном** является некоторая другая величина (такой же размерности), принимаемая за единицу измерения. Сравнение редко осуществляется непосредственным наложением эталона на исследуемый объект, чаще используется какой-либо прибор.

Измерение физической величины не может быть выполнено абсолютно точно. Любое измерение дает приближенный результат, иначе говоря, содержит погрешность измерения.

Погрешностью измерения называется разность между истинным значением измеряемой величины X и результатом измерения x_i .

$$\Delta x = X - x_i. \quad (1)$$

Абсолютная точность — понятие идеальное, а в реальных технических изделиях на их функционирование влияет слишком большое число всевозможных факторов, и интерес, как правило, представляет не точное значение, а диапазон изменения значения измеряемой величины.

Таким образом, технические науки довольствуются приближенными результатами измерения. Но при этом **необходимо знать величину погрешности результата измерения**. Выражение (1) нельзя использовать для расчета погрешности, т. к. сама измеряемая величина X нам неизвестна. Погрешность результата зависит от используемого измерительного прибора и условий проведения измерений.

Прежде чем приступить к изложению конкретных методик, следует разделить всевозможные измерения на **прямые** и **косвенные**. При прямых измерениях определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно с помощью измерительного прибора, который имеет шкалу, проградуированную в соответствующих единицах измерения. Значение физической величины считывается по шкале прибора. Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины находится на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

1.1. Прямые измерения

Погрешности прямых измерений целесообразно разделить на систематические, случайные и промахи.

Систематические погрешности, или поправки

Систематические погрешности вызываются факторами, действующими либо одинаковым образом при повторных измерениях, либо изменяющимися по определенному закону.

Систематические погрешности возникают из-за неправильного выбора метода измерения, неправильной установки прибора и т. п. Систематическими являются ошибки при округлении математических и физических констант (например, таких, как число π , гравитационная постоянная, элементарный заряд и т. п.). Как правило, источники систематических погрешностей тщательно анализируются, выявляются причины этих ошибок, затем, по возможности, они устраняются.

В других случаях систематические погрешности учитываются в виде поправок. Например, при измерении длины может быть расчи-

тана поправка на удлинение, вызванное изменением температуры. Можно вычислить поправку на выталкивающую силу воздуха при определении массы тела взвешиванием и т. п.

Отличительная черта систематических погрешностей – возможность их предварительного расчета или полного устранения совершенствованием экспериментальной методики.

Случайные погрешности прямых измерений

Проведем измерения какой-либо физической величины X несколько раз. Как уже указывалось ранее, мы получим, вообще говоря, несовпадающие результаты: $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, где n – число измерений. Различие между числами x_i может быть достаточно заметным, хотя измерения проводятся в одинаковых условиях, теми же средствами измерения, тем же самым методом и одним и тем же исследователем.

Из-за неизвестного характера погрешности измеряемая искомая величина остается, вообще говоря, неизвестной. Расчет случайных погрешностей основан на теории вероятностей и математической статистике. При этом отклонения при измерениях, вызванные неизвестными или трудноучитываемыми факторами, считают случайной величиной. Результат измерения при таком допущении так же будет являться случайной величиной.

Прежде всего в математической статистике доказывается, что при отсутствии систематических погрешностей (или после их устранения) наилучшим приближением измеряемой величины X является так называемое **среднее статистическое** результатов измерений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (2)$$

При любом конечном числе измерений n невозможно гарантировать, что вычисленное по формуле (2) значение \bar{x} в точности равно искомой величине X . Дело в том, что, хотя в каждой конкретной серии измерений мы получаем n определенных чисел x_i ($i = 1, \dots, n$), сами результаты измерений по своему смыслу являются случайными. В этом мы можем убедиться, повторив серию из n измерений. Мы получим уже другие числа x_i ($i = 1, \dots, n$). Среднее статистическое \bar{x} , вычисляемое по формуле (2), зависит от всех x_i . В этой ситуации и среднее статистическое \bar{x} также является *случайной величиной*. Однако из важных теорем математической статистики утверждает, что *при неограниченном увеличении числа измерений n среднее статистическое \bar{x} неограниченно приближается к искомой величине X* .

Дисперсией измеряемой величины X называется среднее значение квадратов отклонений отдельных его значений от среднего статистического; дисперсия определяется по формуле:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1} . \quad (3)$$

Данная величина характеризует разброс отдельных результатов измерений вокруг истинного значения. Неудобство использования этой величиной заключается в том, что она имеет размерность квадрата измеряемой величины и, следовательно, не может быть напрямую сопоставлена с ней.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) – корень квадратный из дисперсии.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_i^2} . \quad (4)$$

Дисперсия и СКО измеряемой величины, как правило, определяются точностью используемых приборов, соблюдением условий проведения эксперимента, опытом экспериментатора.

Как было указано выше, среднее статистическое измеряемой величины так же по своей природе является случайной величиной и, следовательно, ее разброс так же может характеризоваться дисперсией и СКО.

Математическая статистика доказывает, что ***среднее квадратическое отклонение*** значения среднего арифметического составляет:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x)^2}{n(n-1)}} . \quad (5)$$

Эту величину иногда называют **среднеквадратичным отклонением среднего значения**.

Сопоставив значения СКО для отдельного измерения и среднего статистического, получим

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} . \quad (6)$$

Указанная зависимость является математическим выражением ***закона увеличения точности с ростом количества измерений***.

$\sigma_{\bar{x}}$ является *средней мерой* отклонения среднего статистического \bar{x} от истинного значения X . Однако запись результата измерений в виде $X = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ будет некорректной. Дело в том, что повторяя серии

из n измерений и вычисляя каждый раз новые значения среднего статистического \bar{x} , мы будем получать числа, как попадающие внутрь интервала $\bar{x} - \sigma_x^-; \bar{x} + \sigma_x^-$, так и лежащие вне его. Более подробное исследование показывает, что выпадают из указанного интервала *около трети* полученных значений среднего статистического в проведенных сериях измерений. Это естественно, так как величина σ_x^- является оценкой *средней*, а не *максимальной* погрешности.

Величину σ_x^- часто называют среднеквадратичной погрешностью приближенного равенства $X \approx \bar{x}$.

Вообще говоря, теория допускает неограниченно большую величину максимальной погрешности. В то же время следует принять во внимание, что очень большие погрешности практически невероятны, т. е. не встречаются в измерениях.

Согласно математической статистике, для корректного представления результата измерений следует изначально задаться его **надежностью** или, иначе говоря, **доверительной вероятностью α** .

Корректное понятие о вероятности излагается в специальной литературе.

Величина доверительной вероятности α берется такой, чтобы дополнительная вероятность $(1-\alpha)$ была столь мала, что такое событие практически не происходило бы при однократном испытании. На практике величина доверительной вероятности выбирается близкой к единице, например: 0,9; 0,95; 0,99.

Случайные погрешности принято представлять в виде доверительного интервала, длина которого определяется величиной довери-

тельной вероятности. В качестве центра доверительного интервала для измеряемой величины X берется ее среднее статистическое \bar{x} . Границы этого доверительного интервала выражаются произведением среднеквадратичного отклонения и безразмерного коэффициента Стьюдента $t_{\alpha,n}$.

Величина коэффициента Стьюдента зависит от ранее выбранной доверительной вероятности α и целочисленного параметра n , называемого *числом степеней свободы*. При построении доверительного интервала для измеряемой величины X число степеней свободы берется на единицу меньше количества измерений n , проведенных в одинаковых условиях. Численные значения коэффициентов Стьюдента для нескольких различных доверительных вероятностей можно найти в Приложении 2.

Результат измерения физической величины X представляется в виде:

$$X = \bar{x} \pm \Delta X = \bar{x} \pm t_{\alpha,n-1} \sigma_x^- . \quad (7)$$

Смысл записи таков: *измеряемая величина X с вероятностью α находится внутри интервала $(\bar{x} - t_{\alpha,n-1} \sigma_x^-, \bar{x} + t_{\alpha,n-1} \sigma_x^-)$* . Иначе говоря, построенный интервал покрывает значение неизвестной величины X с вероятностью α .

Величину ΔX , представленную формулой (7), называют *абсолютной погрешностью измеряемой величины X* . Отметим, что абсолютная погрешность выражается в тех же единицах, что и сама измеряемая величина X .

При обработке результатов измерений кроме абсолютной погрешности в виде (7), используют относительную погрешность измеряемой величины. *Относительной погрешностью ε_X измеряемой величины X* называют отношение абсолютной погрешности ΔX к истинному значению X . Так как истинное значение X неизвестно, то в качестве наилучшей оценки относительной погрешности ε_X используется отношение ΔX к среднестатистическому значению \bar{x} .

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta X}{\bar{x}}. \quad (8)$$

Относительная погрешность всегда является безразмерной величиной. Относительную погрешность так же можно выразить в процентах, в этом случае формула (8) имеет вид:

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta X}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Учет приборной погрешности

При проведении экспериментов может наблюдаться ситуация, в которой все измеренные значения x_i совпадают между собой. В этом случае оценка случайной погрешности $\Delta X_{сл}$ согласно формуле (7) равна нулю. Однако было бы неверно считать, что получено точное значение измеряемой величины X .

Помимо случайной погрешности $\Delta X_{сл}$ на результат измерения влияет погрешность, вносимая прибором, так называемая *приборная погрешность*. Чем выше точность прибора, тем меньше будет приборная погрешность. По своей сути, величина приборной погрешности определяется разнообразными случайными процессами, происходящими внутри прибора. Величина же $\Delta X_{сл}$ в этом случае рассматривается как оценка погрешностей, вызываемых случайными процессами.

ми, протекающими вне измерительного прибора, а величина ΔX_{np} - процессами, протекающими внутри прибора. Приборную погрешность можно интерпретировать как оценку средней погрешности с высоким уровнем доверия (близким к единице), полученную по результатам большого числа измерений в ходе испытаний прибора. Отсюда следует, что случайная и приборная погрешности независимы.

В математической статистике выводится, что общую погрешность результата можно представить как квадратный корень из суммы квадратов отдельных погрешностей:

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta X_{cl})^2 + (\Delta X_{np})^2}, \quad (10)$$

где

$$\Delta X_{np} = t_{\alpha, \infty} \frac{\delta}{3}, \quad (11)$$

является приборной погрешностью, соответствующей выбранной доверительной вероятности α . Множитель $t_{\alpha, \infty}$ — коэффициент Стьюдента для заданной доверительной вероятности α и для бесконечного числа степеней свободы, т. е. для числа измерений $n \rightarrow \infty$ его значение можно так же взять в таблицах коэффициентов Стьюдента (приложение 2).

Следовательно, результат измерения величины X может быть представлен в виде:

$$X = \bar{x} \pm \sqrt{(t_{\alpha, n-1} \sigma_x^-)^2 + \left(t_{\alpha, \infty} \frac{\delta}{3}\right)^2}. \quad (12)$$

В практических задачах составные части полной погрешности ΔX_{cl} и ΔX_{np} могут отличаться друг от друга на порядок и более. В этих случаях для предварительных оценок можно пренебрегать меньшей

из них. При окончательных расчетах погрешности следует использовать общую формулу (12).

Для многих измерительных приборов приборная погрешность выражается классом точности. Класс точности K — это приборная погрешность, выраженная в процентах от максимально допустимых показаний прибора по выбранной шкале измерения, т. е.

$$K = \frac{\delta}{X_{\max}} \cdot 100\% , \quad (13)$$

где X_{\max} — максимально возможное значение измеряемой величины по выбранной шкале.

Из (13) получаем:

$$\delta = \frac{X_{\max}}{100\%} K . \quad (14)$$

Класс точности приводится или в паспорте прибора, или на самом приборе. Величину класса точности помещают обычно в кружок, например, $\textcircled{0,5}$ или $\textcircled{1,0}$. Существуют следующие классы точности электроизмерительных приборов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Первые четыре класса являются прецизионными (высокоточными), остальные — техническими. Полагается, что величина δ постоянна по всей той шкале прибора, для которой она вычислена. Для некоторых измерительных приборов в его паспорте или непосредственно на приборе указывают сразу приборную погрешность. Если же неизвестен класс точности прибора и нет других сведений о приборной погрешности, то δ считают равной цене наименьшего деления шкалы.

Анализ промахов

Отдельным типом погрешностей являются промахи (или грубые ошибки). Под промахами имеются в виду результаты с аномальными

числовыми значениями. Причиной промаха может быть, например, сбой аппаратуры. Если экспериментатор записывает показания прибора в протокол измерений, то он может поставить ложную цифру из-за усталости или невнимательности. Промех должен быть исключен из полученной серии результатов измерений.

Однако отбрасывать некоторый результат измерения как промах, руководствуясь только субъективным мнением, некорректно. Как было указано выше, случайные погрешности могут в принципе принимать весьма большие значения. Следовательно, необходима определенная математическая процедура, позволяющая отличить промах от результата с допустимой (хотя и большой по величине) случайной погрешностью.

При анализе промахов обычно принимают, что случайные погрешности имеют гауссово (нормальное) распределение вероятностей. При этом к результатам измерений применимо правило трех сигм.

Правило трех сигм (3σ) – не менее чем с 99,7 % достоверностью значения нормально распределенной случайной величины лежат в интервале $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$.

Доказательство справедливости нижеизложенной процедуры поиска промахов приводится в курсах теории вероятностей и математической статистики. Процедуру анализа аномальных результатов, основанную на этом правиле, проводят в несколько этапов:

1. Из совокупности измерений x_1, \dots, x_n временно исключаем «подозрительный» результат, который заметно отличается от всех остальных, например x_k .

2. Вычисляем среднее статистическое значение оставшихся результатов измерений x_i ($i \neq k$), используя формулу (2):

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n, i \neq k} x_i. \quad (15)$$

3. Вычисляем величину

$$\Delta x_1 = 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n, i \neq k} (x_i - \bar{x}_1)^2}{(n-2)}}. \quad (16)$$

Обращаем внимание, что в сумме под корнем отсутствует слагаемое с «подозрительным» результатом измерения x_k .

4. Проверяем условие

$$|\bar{x}_1 - x_k| \geq \Delta x_1. \quad (17)$$

В случае выполнения условия (17) «подозрительное» значение x_k считается промахом и исключается из совокупности результатов измерений.

При невыполнении условия (17) отклонение результата x_k от остальных значений x_i серии считается допустимым, и значение x_k не исключается из набора результатов.

Косвенные измерения

В современной науке не всегда возможно напрямую исследовать исследуемую величину. Пусть необходимо измерить численное значение некой физической величины Z , что невозможно выполнить прямыми методами. Теоретическая наука функционально связывает величину Z с несколькими другими физическими величинами A , B , C ..., значения которых уже известны или могут быть измерены непосредственно прямыми методами. Иначе говоря, исследуемая величина

Z представляется в виде однозначной зависимости от величин $A, B, C \dots$:

$$Z = f(A, B, C \dots) , \quad (18)$$

причем явный вид функции f известен экспериментатору.

В ходе эксперимента численные значения величин $A, B, C \dots$ многократно измеряются в идентичных условиях. Затем, согласно рассмотренной выше методике, для каждой из них вычисляются средние статистические $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C} \dots$ по формуле (2), а затем подставляются в функцию (18) вместо соответствующих величин $A, B, C \dots$.

Вычисленное значение

$$\bar{Z} = f(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C} \dots) \quad (19)$$

полагается искомым значением измеряемой величины Z . При этом, согласно математической статистике, достигается наилучшее приближение к истинному значению неизвестной Z .

После вычисления приближенного значения искомой величины Z необходимо провести оценку погрешности полученного приближения, разумеется, при выбранной доверительной вероятности α .

В курсе математической статистики доказывается, что если измерения $A, B, C \dots$ проводятся независимо, то абсолютная погрешность ΔZ величины Z , заданной при помощи функции (18), может быть представлена в следующем виде:

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)_{\substack{A=\bar{A} \\ B=\bar{B}}}^2 (\Delta A)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)_{\substack{A=\bar{A} \\ B=\bar{B}}}^2 (\Delta B)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\right)_{\substack{A=\bar{A} \\ B=\bar{B}}}^2 (\Delta C)^2 + \dots} . \quad (20)$$

В формуле (20) величины $\frac{\partial f}{\partial A}, \frac{\partial f}{\partial B}, \frac{\partial f}{\partial C} \dots$ представляют собой частные производные функции (18) по переменным $A, B, C \dots$ соответст-

венно. Выражения для производных получаются аналитическим дифференцированием заданной функции (18). Нижние индексы у производных $A = \bar{A}$, $B = \bar{B}$... означают, что численные значения производных рассчитываются после замены аргументов A, B, C ... на ранее полученные их средние статистические значения. Величины ΔA , ΔB , ΔC ... в формуле (20) – абсолютные погрешности величин A, B, C ... соответственно, каждая из которых рассчитывается по методике, изложенной выше с учетом случайной и приборной составляющих.

При расчете абсолютных погрешностей величин A, B, C ... необходимо заранее задать доверительную вероятность α . По условиям эксперимента количества измерений n_A, n_B, n_C ,... в идентичных условиях для разных величин A, B, C ... , вообще говоря, могут быть неодинаковыми.

При необходимости в ходе вычисления средних величин A, B, C ... и погрешностей $\Delta A, \Delta B, \Delta C$... проводится анализ и исключение промахов из серий проведенных измерений.

Абсолютная погрешность ΔZ , полученная по формуле (20), представляет собой полуширину доверительного интервала для искомой величины Z при установленной доверительной вероятности α . Окончательный результат для косвенно измеряемой величины Z можно записать в виде:

$$Z = \bar{Z} \pm \Delta Z, \quad (21)$$

где \bar{Z} дается выражением (19), а ΔZ вычисляется согласно (20). Доверительный интервал для величины Z имеет вид $(\bar{Z} - \Delta Z, \bar{Z} + \Delta Z)$.

Неравноточные измерения

Ранее, при рассмотрении методик обработки результатов измерений предполагалось, что измерения величины X выполняются в идентичных условиях, т. е. одним и тем же методом, одним и тем же экспериментатором, использующим одни и те же приборы. В этих случаях часто говорят, что все проведенные измерения выполнялись с одинаковой точностью, и поэтому называют их *равноточными*. Технический термин «равноточность» с точки зрения математической статистики означает, что распределения вероятностей всех результатов измерения x_i характеризуются одним и тем же среднеквадратичным отклонением.

Однако часто в технической науке возникает ситуация, когда условия эксперимента не позволяют провести все измерения в идентичных условиях.

Подобные измерения получили название *неравноточных*.

В подобных случаях все измерения можно разбить на группы, в каждой из которых результаты являются равноточными. Определенные условия эксперимента, при которых измерения являются равноточными, будем для краткости называть *методом*.

Пусть исследуемая величина X измерялась m различными методами.

Каждым методом было проведено n_k измерений, где $k = 1, 2, \dots, m$, и получено m групп результатов из n_k значений соответственно. Для каждой группы результатов можно вычислить средние статистические значения $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ и абсолютные погрешности $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$ при доверительной вероятности α по методике, изложенной выше.

Результаты измерений могут быть записаны в следующей форме:

$$\begin{array}{rclcl}
 k = 1 & x_1, x_2, \dots, x_{n_1} & \overline{x_1} & \Delta x_1 & \\
 k = 2 & x_{n_1+1}, x_{n_1+2}, \dots, x_{n_1+n_2} & \overline{x_2} & \Delta x_2 & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 k = m & \dots, x_n & \overline{x_m} & \Delta x_m &
 \end{array} , \quad (22)$$

где каждая строка относится к определенному методу.

Очевидно, что сумма всех чисел n_k ($k = 1, 2, \dots, m$) равна количеству всех проведенных измерений n .

Для получения окончательного результата и погрешности неверно было бы вычислять средние арифметические от величин $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_m}$ и $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$. Во-первых, при подобном усреднении в полученное приближенное значение искомой величины X одинаковый вклад дадут и более грубые, и более точные методы. Во-вторых, в оценку результирующей погрешности ΔX основной вклад дадут наиболее грубые методы, которые характеризуются большими значениями собственных погрешностей Δx_k .

Более корректным способом является использование так называемого *статистического веса*. Для каждого метода (т.е. для каждой строки результатов измерений вышеприведенной матрицы (22)) задается некоторый параметр w_k ($k=1, 2, \dots, m$).

Расчет общего среднего (окончательного результата) с помощью статистических весов w_k проводится по следующей формуле:

$$\overline{x} = \frac{\sum_{k=1}^m w_k \overline{x_k}}{\sum_{k=1}^m w_k} . \quad (23)$$

Обычно величина статистического веса w_k принимается обратно пропорциональной квадрату абсолютной погрешности данного метода:

$$w_k = \frac{1}{(\Delta x_k)^2}. \quad (24)$$

Сопоставление формул (23) и (24) позволяет выразить приближенное значение исследуемой величины X через результаты обработки отдельных групп измерений, т. е. через значения $\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_m}$ и $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$

$$\overline{x} = \frac{\sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{\Delta x_k} \right)^2 \overline{x_k}}{\sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{\Delta x_k} \right)^2}. \quad (25)$$

Вычисление квадрата общей абсолютной погрешности $(\Delta X)^2$ проводится по аналогичной формуле, которая после сокращения будет иметь вид:

$$\Delta X = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{\Delta x_k} \right)^2}}. \quad (26)$$

Чтобы построить для искомой величины X доверительный интервал, соответствующий выбранной доверительной вероятности α , необходимо вычислять все абсолютные погрешности Δx_k ($k = 1, 2 \dots m$) для одной и той же вероятности α . Тогда абсолютная погрешность ΔX , рассчитанная по формуле (26), будет являться полушириной доверительного интервала для величины X при заданной надежности α .

2. Планирование эксперимента, обработка его результатов, построение уравнений регрессии

Эксперимент — метод исследования, в основе которого лежит целенаправленное воздействие на объект в заданных контролируемых условиях, опосредованное рациональным (в идеале теоретическим) знанием. Эксперимент может быть активным и пассивным. Пассивный эксперимент проводят в условиях, когда исследователь не может контролировать параметры процесса. По сути, пассивный эксперимент является наблюдением. Основной, дающий наиболее полную и достоверную информацию вид эксперимента — активный, проводится в контролируемых и управляемых условиях.

Проведение эксперимента в большинстве случаев связано с материальными затратами, отсюда встает задача получения максимума информации об объекте исследования при минимуме материальных затрат. Решением этой задачи и занимается планирование эксперимента.

При исследовании объекта, как правило, не удастся выявить и контролировать все факторы, влияющие на исследуемые параметры объекта. Поэтому, исходя из предварительной информации об объекте, выявляют основные влияющие факторы, а воздействие остальных рассматривают как «белый шум», наложенный на истинные результаты эксперимента (так называемая рандомизация эксперимента).

Сущность планирования эксперимента заключается в выборе числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения с требуемой точностью и достоверностью и минимальной стоимостью поставленной задачи.

В результате проведения эксперимента, как правило, требуется получить математическую модель исследуемого объекта. На эмпирическом уровне исследований в качестве математических моделей обычно используют алгебраические полиномы (полиномиальные математические модели). Подобные модели называют так же *уравнениями регрессии*.

При планировании эксперимента исследуемый объект представляется «черным ящиком» (рис. 1), на который воздействуют факторы x_i , и на выходе из которого фиксируются исследуемые параметры y_i .



Рис. 1. Представление эксперимента в виде «черного ящика»

Каждый фактор x_i может принимать ряд значений, называемых *уровнями факторов*. Множество возможных уровней фактора x_i называется *областью его определения*. В общем случае эти области могут быть непрерывными и дискретными, ограниченными и неограниченными. При проведении активного эксперимента должна быть возможность либо изменения уровней факторов в соответствии с планом эксперимента, либо поддержания их на заданном уровне.

При выборе факторов необходимо обеспечить их совместимость и независимость. Совместимость означает возможность сочетания любой комбинации факторов, а независимость – отсутствие между факторами корреляционной связи.

При выборе исследуемых параметров следует обратить внимание на то, чтобы исследуемые параметры существовали при любом состоянии объекта, выражались количественно одним числом и отвечали требованиям статистической однородности, т. е. каждому набору уровней факторов x_i с точностью до погрешности эксперимента должно соответствовать определенное значение фактора y_i . Кроме того, желательно, чтобы исследуемые параметры были:

- универсальными, т. е. были характерными не только для исследуемого объекта;
- легко вычисляемыми;
- имели физический смысл.

Зависимость исследуемых параметров от уровней факторов называют *функцией отклика*, а ее геометрическое представление – *поверхностью отклика*. Пространство, в котором строят эту поверхность, – *факторным пространством*. Размерность факторного пространства равна числу факторов. Так, например, при двух факторах факторное пространство представляет собой факторную плоскость.

Свойства получаемой в результате эксперимента математической модели во многом определяются условиями проведения опытов. Множество точек факторного пространства, в которых проводится эксперимент, представляется с помощью плана эксперимента:

$$x = \begin{vmatrix} x_1(1) & x_2(1) & .. & x_n(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & .. & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1(N) & x_2(N) & .. & x_n(N) \end{vmatrix}, \quad (27)$$

где n – число факторов; N – число точек факторного пространства.

Точка

$$x^{(0)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j) \quad (28)$$

называется *центром плана*. Если центр плана совпадает с началом координат, то план называется *центральный*.

Математическая статистика доказывает, что наиболее адекватно описывают объект математические модели, полученные в результате эксперимента, план которого удовлетворял следующим критериям:

Критерий ортогональности – когда полученные оценки коэффициентов регрессии некоррелированы. Замена нулем любого коэффициента в ММ в этом случае не изменяет значений остальных коэффициентов.

Критерий ротатабельности – когда дисперсия выходной переменной зависит только от расстояния от центра плана.

Критерий А-оптимальности требует выбора такого плана, при котором дисперсионная матрица имеет минимальный след (минимальную сумму диагональных элементов).

Критерий D-оптимальности требует минимизации определителя дисперсионной матрицы.

Критерий G-оптимальности требует достижение наименьшей величины максимальной дисперсии зависимой переменной.

Полный факторный эксперимент

Наиболее простым в планировании и обработке результатов и в то же время удовлетворяющим вышеуказанным критериям является полный факторный эксперимент.

В полном факторном эксперименте исследуется один параметр и реализуются все возможные сочетания уровней факторов. Каждый фактор варьируется на двух уровнях – верхнем и нижнем. *Интервалом варьирования* называют половину разности между верхним и нижним уровнями фактора. При двух уровнях для каждого из n факторов общее число опытов составляет 2^n . Отсюда название полного факторного эксперимента – *эксперимент типа 2^n* .

Результатом полного факторного эксперимента выступает математическая модель исследуемого объекта в виде уравнения множественной регрессии

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n \sum_{l=k+1}^n a_{ikl} x_i x_k x_l, \quad (29)$$

где a_0 – свободный член; a_i , a_{ik} , a_{ikl} – коэффициенты уравнения множественной регрессии.

Так, например, при $n = 2$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2, \quad (30)$$

при $n = 3$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + a_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (31)$$

Коэффициенты a_0 , a_i , a_{ik} , a_{ikl} – называют *коэффициентами уравнения регрессии*.

В зависимости от объема априорной информации в математическую модель включают не все, а лишь некоторые взаимодействия первого порядка, иногда – взаимодействия второго порядка и очень редко – взаимодействия выше третьего порядка. Связано это в связи с тем, что учет всех взаимодействий приводит к громоздким расчетам.

Выбор основного уровня и интервалов варьирования факторов.

Наилучшим условиям, определенным из анализа априорной информации, соответствует комбинация (или несколько комбинаций) уровней факторов. Каждая комбинация является многомерной точкой в факторном пространстве. Ее можно рассматривать как исходную точку для построения плана эксперимента. Назовем ее основным (нулевым) уровнем. Построение плана эксперимента сводится к выбору экспериментальных точек, симметричных относительно нулевого уровня.

В разных случаях мы располагаем различными сведениями об области наилучших условий. Если имеются сведения о координатах одной наилучшей точки и нет информации о границах определения факторов, то остается рассматривать эту точку в качестве основного уровня. Аналогичное решение принимается, если границы известны и наилучшие условия лежат внутри области.

Положение усложняется, если эта точка лежит на границе (или весьма близко к границе) области. Тогда приходится основной уровень выбирать с некоторым сдвигом от наилучших условий.

Может случиться, что координаты наилучшей точки неизвестны, но есть сведения о некоторой подобласти, в которой процесс идет достаточно хорошо. Тогда основной уровень выбирается либо в центре, либо в случайной точке этой подобласти. Сведения о подобласти можно получить, анализируя изученные ранее подобные процессы, из теоретических соображений или из предыдущего эксперимента.

Наконец, возможен случай с несколькими эквивалентными точками, координаты которых различны. Когда отсутствуют дополни-

тельные данные (технологического, экономического характера и т. д.), выбор произволен. Конечно, если эксперимент недорог и требует немного времени, можно приступить к построению планов экспериментов вокруг нескольких точек.

Резюмируем наши рассуждения о принятии решений при выборе основного уровня в виде блок-схемы (рис. 2).

После того как нулевой уровень выбран, переходим к следующему шагу – выбору интервалов варьирования.

На выбор интервалов варьирования накладываются естественные ограничения сверху и снизу. Интервал варьирования не может быть меньше той ошибки, с которой экспериментатор фиксирует уровень фактора. Иначе верхний и нижний уровни окажутся неразличимыми. С другой стороны, интервал не может быть настолько большим, чтобы верхний или нижний уровни оказались за пределами области определения. Внутри этих ограничений обычно еще остается значительная неопределенность выбора, которая устраняется с помощью интуитивных решений. При решении задачи оптимизации стремятся выбрать для первой серии экспериментов такую подобласть, которая давала бы возможность для шагового движения к оптимуму. В задачах интерполяции интервал варьирования охватывает всю описываемую область. Выбор интервалов варьирования – задача трудная, так как она связана с неформализованным этапом планирования эксперимента. Решение ее производят на основе априорной информации. Это – сведения о точности, с которой экспериментатор фиксирует значения факторов, о кривизне поверхности отклика и о диапазоне изменения параметра оптимизации. Обычно эта информация является

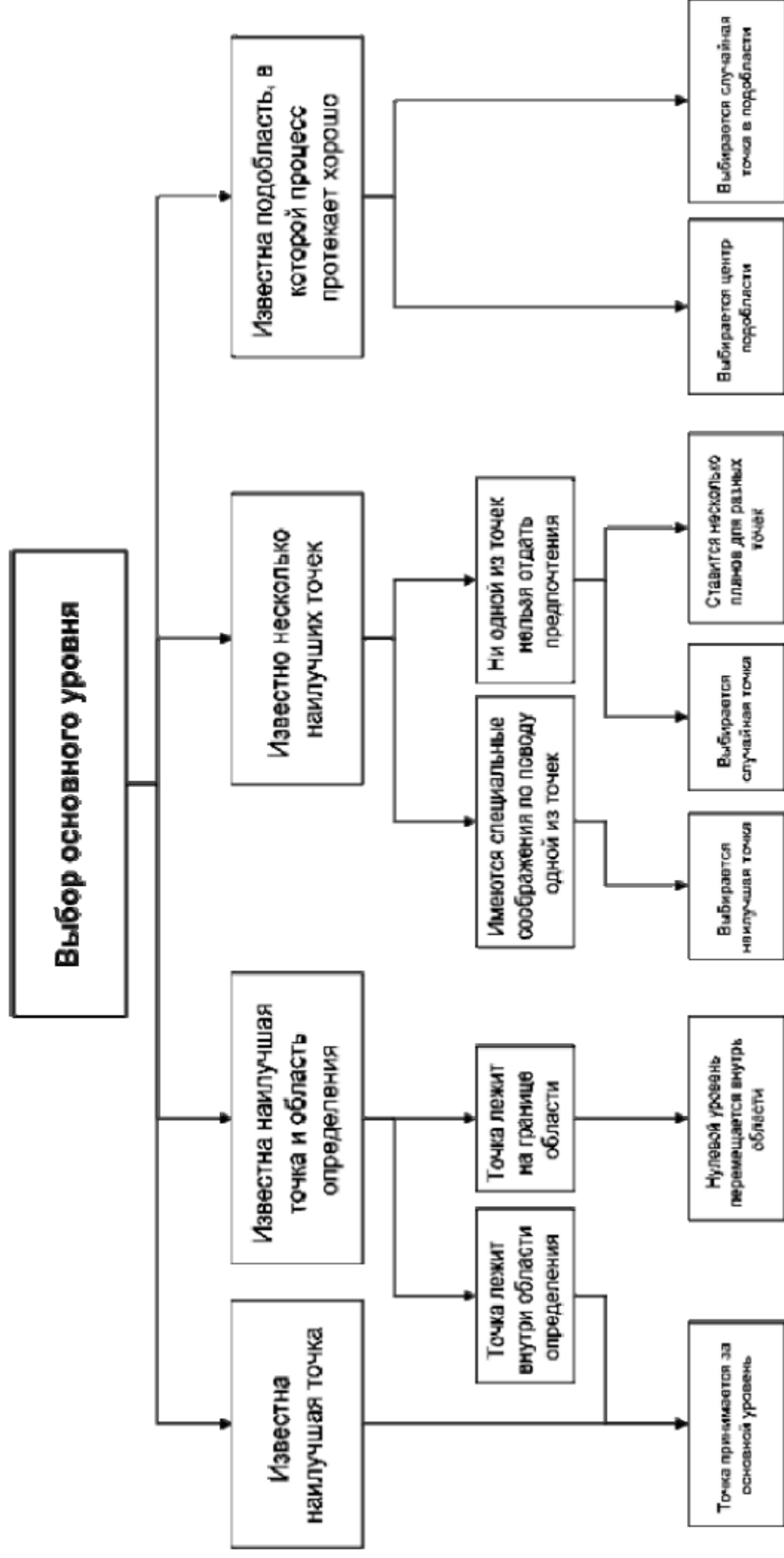


Рис. 2 Выбор основного уровня плана эксперимента

ориентировочной (в некоторых случаях она может оказаться просто ошибочной), но это единственная разумная основа, на которой можно начинать планировать эксперимент. В ходе эксперимента ее часто приходится корректировать.

Стандартизация масштаба факторов

Для удобства расчетов факторы масштабируют таким образом, чтобы значение верхнего уровня было равно +1, а нижнего –1. С этой целью делают преобразование начала координат факторов и переходят к нормированному (стандартному) масштабу:

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})}{I}, \quad (32)$$

где x_i – нормированное значение; \tilde{x}_i – натуральное значение; \tilde{x}_{i0} – основной уровень; I – интервал варьирования.

Интеграл варьирования I равен:

$$I = |\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}| \quad (33)$$

Составление матрицы планирования ПФЭ

План полного факторного эксперимента изображают в виде таблицы, столбцы которой отражают уровни факторов, а строки – номера опытов. Эти таблицы называют *матрицами планирования эксперимента*. Поскольку значения уровней факторов по модулю всегда равны единице, то обычно в МП записывают только знак уровня (т. е. «+» вместо «1» и «–» вместо «–1»).

Матрица планирования для двух факторов приведена ниже:

N	x_1	x_2	y
1	-	-	y_1
2	+	-	y_2
3	-	+	y_3
4	+	+	y_4

Если для двух факторов все возможные комбинации уровней легко найти прямым перебором, то с ростом числа факторов возникает необходимость в некотором приеме построения матриц. Рассмотрим прием, основанный на правиле чередования знаков. В первом столбце знаки меняются поочередно, во втором столбце они чередуются через два, в третьем – через 4, в четвертом – через 8 и т. д. по степеням двойки. Так, для трехфакторного эксперимента:

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

Влияние факторов на функцию отклика может зависеть от уровня другого фактора, или от сочетания уровней нескольких факторов. Если априорно неизвестно, что такой зависимости между факторами нет, то строят развернутую матрицу планирования, учитывающую не только факторы, но и их взаимодействия. При этом знаки в столбцах для взаимодействий получают перемножением знаков взаимодейст-

вующих факторов. Для удобства расчета свободного члена a_0 математической модели (29) в матрицу вводят фиктивный фактор x_0 .

Пример подобной матрицы приведен ниже:

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	y_4
5	+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8

Основные свойства матрицы планирования эксперимента:

а) *симметричность* относительно центра эксперимента

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0, \quad (34)$$

где i – номер фактора; j – номер опыта; N – число опытов;

б) *условие нормировки*

$$\sum_{j=1}^N |x_{ij}| = N; \quad (35)$$

в) *ортogonalность*

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{fj} = 0, \quad (36)$$

если $i \neq f$;

г) *рототабельность* — точки в матрице планирования подбираются так, что точность предсказания значений параметра оптимизации одинакова на равных расстояниях от центра эксперимента и не зависит от направления.

Свойство ортогональности позволяет упростить вычисления и получить независимые оценки коэффициентов регрессии. Это означает, в частности, что замена нулем любого коэффициента в уравнении (29) не изменит оценок остальных коэффициентов. Это свойство может быть полезным, когда точный вид модели не известен и требуется по экспериментальным данным отобрать факторы, существенно влияющие на исследуемый параметр. Если условие ортогональности не выполняется, после исключения каждого незначимого коэффициента необходимо пересчитывать оценки оставшихся коэффициентов и их дисперсии.

Матрица, удовлетворяющая условиям симметричности, нормировки, ортогональности и рототабельности, называется *оптимальной*. Матрица планирования полного факторного эксперимента является оптимальной для линейных математических моделей. Если же модель содержит взаимодействия, то свойство рототабельности не выполняется.

Порядок постановки эксперимента

Для оценки точности эксперимента для каждой i -й точки факторного пространства проводят K опытов. В результате получают значения $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iK}$ исследуемого параметра, для которых находят среднее значение \bar{y}_i . При этом опыты в одной точке проводят не подряд, а обходят все точки в первой серии опытов, затем во второй, и

так далее до K -й. Для уменьшения влияния внешней среды и неконтролируемых факторов внутри каждой серии точки факторного пространства обходят случайным образом – рандомизируют последовательность опытов. Для большей точности рандомизацию опытов можно провести с помощью генератора случайных чисел. Например, в случае постановки двух серий опытов для экспериментов 2^3 получим с учетом данных таблицы такие последовательности:

1 серия

1, 6, 5, 2, 7, 3, 8, 4;

2 серия

3, 1, 7, 2, 4, 6, 8, 5.

Таким образом, в первой серии опытов первым выполняется опыт в точке факторного пространства № 1, вторым – в точке № 6 и т. д. Во второй серии первым выполняется опыт в точке № 3, вторым – в точке № 1 и т. д.

Проверка воспроизводимости опытов (однородности дисперсий)

Обработка результатов включает предварительную обработку результатов экспериментов, вычисление коэффициентов регрессии, проведение ряда проверок: однородности дисперсии (воспроизводимости), адекватности модели и значимости коэффициентов.

Опыт считается воспроизводимым, если дисперсия $\sigma^2_{y_i}$ выходного параметра y_i однородна в каждой точке факторного пространства. Для проверки этого в каждой точке факторного пространства проводится оценка дисперсии $\sigma^2_{y_i}$ по формуле:

$$\sigma_{yi}^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (y_{it} - \bar{y}_i)^2. \quad (37)$$

Гипотезу однородности (равенства) дисперсий проверяют с помощью критерия Кохрена. Этот критерий пригоден для случаев, когда во всех точках имеется одинаковое число повторных опытов. Расчетное значение этого критерия определяют по формуле:

$$G_p = \frac{\max \sigma_{yj}^2}{\sum_{i=1}^N \sigma_{yj}^2}. \quad (38)$$

Критическое значение $G_{кр}$ критерия находят из таблицы распределения Кохрена (приложение 3) по числу степеней свободы числителя

$f_1 = K - 1$, знаменателя $f_2 = N$ и уровню значимости α . Если $G_p < G_{кр}$, гипотеза об однородности дисперсий принимается, в противном случае – отвергается. Во втором случае необходимо изменить условия проведения эксперимента (набор факторов, основной уровень факторов, интервал их варьирования, способы фиксирования или управления уровнями факторов, точность измерительных приборов и пр.).

Расчет оценок коэффициентов регрессионного уравнения

Расчет оценок коэффициентов уравнения регрессии производится по методу наименьших квадратов, при этом минимизируется сумма квадратов отклонений между экспериментальными значениями исследуемого параметра и значениями, вычисленными для тех же точек факторного пространства по уравнению регрессии. Благодаря предварительной стандартизации масштаба факторов и ортогональности

плана эксперимента, расчет оценок коэффициентов регрессии превращается в простую арифметическую процедуру

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i \overline{y_j}, \\ a_{ik} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i x_k \overline{y_j}, \\ a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \overline{y_j}. \end{aligned} \tag{40}$$

Эти расчеты оформляют в табличном виде, для расчета сумм, входящих в формулы надо алгебраически суммировать столбец $\overline{y_j}$, при этом для каждого элемента суммы знак берется из соответствующего столбца фактора (реального или фиктивного).

Проверка значимости коэффициентов регрессии

Не все члены математической модели (29) могут вносить существенный вклад в результат функции отклика. Значение некоторых слагаемых может быть на всей области определения факторов близко к нулю или не превышать пределы статистической погрешности. Такие слагаемые могут быть отброшены, что существенно упростит математическую модель. Проверка значимости коэффициентов регрессии означает проверку основной гипотезы об их значимом вкладе в получаемый результат.

Гипотезу о статистической значимости (отличии от нуля) коэффициентов регрессии проверяют по критерию Стьюдента. Расчетное значение t_p этого критерия определяют как частное от деления модуля коэффициента a_i на оценку его среднеквадратического отклонения σ_a :

$$t_p = \frac{|a_i|}{\sigma_a}. \quad (41)$$

В полном факторном эксперименте, благодаря одинаковой удаленности всех экспериментальных точек факторного пространства от центра эксперимента, оценки всех коэффициентов уравнения регрессии независимо от их величины вычисляются с одинаковой погрешностью (при выполнении условия воспроизводимости опытов):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_y}{N}, \quad (42)$$

где σ_y – оценка дисперсии воспроизводимости эксперимента,

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{yj}}{N}. \quad (43)$$

Критическое значение критерия $t_{кр}$ находят из таблицы распределения Стьюдента по числу степеней свободы $f=N(K-1)$ и уровню значимости α (см. приложение 2). Если $t_p > t_{кр}$, гипотеза о значимости коэффициента a_i принимается, в противном случае коэффициент считается незначимым и приравнивается нулю.

Незначимость коэффициента может быть обусловлена неверным выбором интервала варьирования фактора. Поэтому иногда бывает полезным расширить интервал варьирования и провести новый эксперимент.

Проверка адекватности полученной ММ

Адекватность математической модели – свойство правильно отражать реальные процессы, протекающие в исследуемом объекте.

Для проверки гипотезы об адекватности математической модели необходимо сравнить две дисперсии:

а) остаточную дисперсию, или дисперсию адекватности, зависящую от разности между значениями y_{ip} , рассчитанными по математической модели, и экспериментальными результатами y_{it} :

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{K(N-L)} \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^K (y_{ip} - y_{it})^2$$

или (44)

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{(N-L)} \sum_{j=1}^N (y_{ip} - \bar{y}_j)^2,$$

где L – число значимых коэффициентов исследуемого уравнения регрессии, не считая a_0 ;

б) дисперсию воспроизводимости, характеризующую погрешности единичных наблюдений:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{yj}^2.$$

Из формулы следует, что дисперсия погрешности единичных наблюдений может быть оценена лишь путем сравнения результатов нескольких параллельных опытов, проводимых в каждой экспериментальной точке.

Адекватность модели проверяется по F – критерию Фишера. Его расчетное значение находят как частное от деления оценки дисперсии адекватности на оценку дисперсии единичного наблюдения

$$F_p = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_y^2}. \quad (45)$$

Критическое значение $F_{кр}$ находят из таблицы распределения Фишера (приложение 4) по числу степеней свободы числителя

$f_1=K(N-L)$, знаменателя $f_2=N(K-1)$ и уровню значимости α . Если $F_p > F_{кр}$, гипотеза об адекватности отклоняется.

Как правило, вначале проверяют адекватность линейной математической модели. Если предположение об адекватности подтверждается, то в качестве окончательной выбирают линейную модель; если отклоняется – добавляют эффект взаимодействия с наибольшим коэффициентом и вновь проверяют гипотезу, и так до тех пор, пока существуют степени свободы. Возможно, требуется использовать модель более высокого порядка.

Если в результате модель все же оказалась неадекватной, это говорит о том, что тип математической модели выбран неудачно, и при данном шумовом уровне и классе точности измерительных приборов математическая модель должна быть уточнена. В частности, возможно в нее включены не все существенно влияющие факторы.

Переход к физическим переменным

Для записи математической модели в реальных физических величинах производят обратный переход от стандартизированного масштаба к натуральному. Это можно сделать с помощью соотношения

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})}{I} . \quad (46)$$

После чего проводят алгебраическое упрощение полученного уравнения регрессии и записывают окончательный вид модели.

3. Составление технического задания на изделия машиностроения и программные продукты

Первичным, основополагающим документом, которым руководствуются проектировщики, приступая к разработке нового изделия, является техническое задание. Оно определяет основные направления разработки: конструкции и принципы работы будущего изделия. Техническое задание, с одной стороны, отражает потребности общества в новых изделиях, с другой — технические и технико-экономические характеристики будущего изделия.

Техническое задание является начальным этапом работ и составляется на все разработки и виды работ, необходимые для создания нового изделия. Оно может предшествовать научно-исследовательским и опытно — конструкторским работам (НИОКР). Требования, включаемые в техническое задание, должны основываться на современных достижениях науки и техники, на выполненных научно-исследовательских и экспериментальных работах.

Техническое задание должно устанавливать следующие показатели разрабатываемого изделия: прогнозируемые показатели технического уровня и качества; основное назначение, характеристики рынка сбыта; технические и тактико-технические характеристики, уровень стандартизации и унификации; технико-экономические показатели; патентно-правовые показатели; специальные требования к изделию и др.

В технических заданиях оговариваются этапы разработки и сроки выполнения каждого этапа и разработки в целом.

Качество технического задания обеспечивается объемом и полнотой сбора материалов, необходимых для разработки. При разработ-

ке используются следующие материалы: научно-техническая информация; патентная информация; характеристика рынка сбыта; характеристика производства, на котором изделие будет изготавливаться (технологическая оснащенность, квалификация кадров, технологическая дисциплина, уровень организации труда и др.).

Техническое задание разрабатывается, как правило, организацией- разработчиком, но оно может быть разработано и заказчиком. Обязанность заказчика – предъявить разработчику исходные данные для разработки изделия.

Техническое задание оформляют в соответствии с общими требованиями к текстовым конструкторским документам на листах формата А4 , как правило, без рамки и основной надписи. Номера листов (страниц) проставляют в верхней части листа над текстом. К техническому заданию прилагаются схемы и эскизы наметок по конструкции будущего изделия, а для технологических разработок – технологические и технико-экономические показатели существующего производства. Техническое задание должно содержать максимум информации, облегчающей работу конструктора и сокращающей сроки разработки.

Организация разработки сложных изделий, требующих больших трудозатрат, нуждается в особом подходе. До разработки технического задания этих изделий проводится самостоятельный вид работ – разработка аванпроекта.

Аванпроект позволяет более глубоко предварительно проработать комплекс вопросов, определяющих необходимость и целесообразность создания нового изделия. Аванпроект разрабатывают обычно на продукцию машиностроения и приборостроения. Аванпроект

разрабатывается согласно методическим указаниям РД (руководящий документ) и служит исходной документацией для разработки технического задания. Разработка аванпроекта должна гарантировать возможность создания продукции, отвечающей по своим технико-экономическим показателям высшему мировому уровню на момент освоения ее в производстве.

Аванпроект должен обеспечивать:

формирование прогрессивных исходных требований к новому изделию, отвечающих высшему мировому уровню, и создание предпосылок для его рациональной разработки, производства и эксплуатации;

выявление необходимой потребности в данном изделии для внутреннего рынка и экспорта;

сокращение сроков и затрат на разработку и освоение новой продукции за счет тщательной предварительной проработки основных вопросов и снижения вероятности ошибок в процессе дальнейших работ.

В процессе разработки аванпроекта проводят патентные исследования технического уровня и тенденций развития техники, технико-экономические расчеты, конструкторские проработки, осуществляют прогнозирование основных работ по всему жизненному циклу изделия с использованием количественных методов оптимизации параметров. Разработанный аванпроект подвергают экспертизе технико-экономических показателей. Результаты экспертизы оформляют экспертным заключением по форме, установленной ГОСТ 15.011-82. На средства измерений проводят метрологическую экспертизу.

В комплект документов аванпроекта в общем случае включают: пояснительную записку, ведомость аванпроекта, схемы, таблицы и расчеты, чертеж общего вида, габаритный чертеж. Аванпроект перед утверждением рассматривает комиссия, состоящая из представителей разработчика и заказчика, с приглашением, при необходимости, специалистов других заинтересованных организаций. По результатам рассмотрения аванпроекта составляют протокол и при положительных результатах рассмотрения аванпроект рекомендуют к утверждению.

Общий порядок разработки и утверждения технического задания, приведен в табл. 1.

Разработка технического задания на программные продукты имеет свои особенности. Разработка осуществляется согласно ЕСПД (ГОСТ 19.201-78).

Техническое задание оформляется в соответствии с ГОСТ 19.201-78 на листах формата А4, как правило, без заполнения полей листа. Номера листов (страниц) проставляют в верхней части листа над текстом. Лист утверждения и титульный лист оформляют в соответствии с ГОСТ 19.104 – 78. Информационную часть (аннотацию и содержание), лист регистрации изменений допускается в документ не включать.

Для внесения изменений или дополнений в техническое задание на последующих стадиях разработки программы или программного изделия выпускают дополнение к нему. Согласование и утверждение

Порядок построения, изложения и оформления технического задания

Основные разделы	Примерный перечень рассматриваемых вопросов
1	2
Наименование и область применения (использования)	Наименование и условное обозначение продукции. Краткая характеристика области техники, в которой используют продукцию. Возможность использования для поставки на экспорт
Основание для разработки	Полное наименование документа, на основании которого разрабатывают продукцию; организация, утвердившая этот документ, и дата его утверждения. Наименование и условное обозначение темы разработки
Цель и назначение разработки	Эксплуатационные и функциональные назначения и перспективность продукции
Источники разработки	Перечень научно-исследовательских и других работ. Перечень экспериментальных образцов или макетов
Технические (тактико-технические) требования	Состав продукции и требования к конструктивному устройству. Показатели назначения. Требования к надежности. Требования к технологичности. Требования к уровню унификации и стандартизации. Требования безопасности. Эстетические и эргономические требования. Требования к патентной чистоте. Требования к составным частям продукции, сырью, исходным и эксплуатационным материалам. Условия эксплуатации. Дополнительные требования. Требования к маркировке и упаковке. Требования к транспортированию и хранению. Специальные требования
Экономические показатели	Ориентировочная экономическая эффективность и срок окупаемости затрат. Лимитная цена. Предполагаемая годовая потребность в продукции. Экономические преимущества разрабатываемой продукции по сравнению с аналогами

1	2
Стадии и этапы разработки	Стадии разработки, этапы работ и сроки их выполнения (сроки, указываемые в техническом задании, являются ориентировочными, основные сроки указываются в плане работ или в договоре); предприятие-изготовитель разрабатываемого изделия; перечень документов, представляемых на экспертизу, а также стадии, на которых она проводится, и место проведения
Порядок контроля и приемки	Перечень конструкторских документов, подлежащих согласованию и утверждению, и перечень организаций, с которыми следует согласовывать документы. Общие требования к приемке работ на стадиях разработки; число изготавливаемых опытных образцов продукции
Приложение к техническому заданию	<p>Перечень научно-исследовательских и других работ, обосновывающих необходимость проведения разработки. Чертежи, схемы, описания, обоснования, расчеты и другие документы, которые должны быть использованы при разработке.</p> <p>Перечень заинтересованных организаций, с которыми согласовывают конкретные технические решения в процессе разработки продукции. Перечень нового технологического оборудования, необходимого для выпуска новой продукции</p>

дополнения к техническому заданию проводят в том же порядке, который установлен для технического задания.

Техническое задание на программные продукты должно содержать следующие разделы:

- введение;
- основания для разработки;

- назначение разработки;
- требования к программе или программному изделию;
- требования к программной документации;
- технико-экономические показатели;
- стадии и этапы разработки;
- порядок контроля и приемки.

В техническое задание допускается включать приложения. В зависимости от особенностей программы или программного изделия допускается уточнять содержание разделов, вводить новые разделы или объединять отдельные из них.

Содержание разделов:

В разделе «Введение» указывают наименование, краткую характеристику области применения программы или программного изделия и объекта, в котором используют программу или программное изделие.

В разделе «Основания для разработки» должны быть указаны:

- документ (документы), на основании которых ведется разработка;
- организация, утвердившая этот документ, и дата его утверждения;
- наименование и (или) условное обозначение темы разработки.

В разделе «Назначение разработки» должно быть указано функциональное и эксплуатационное назначение программы или программного изделия.

Раздел «Требования к программе или программному изделию» должен содержать следующие подразделы:

- требования к функциональным характеристикам;
- требования к надежности;
- условия эксплуатации;
- требования к составу и параметрам технических средств;
- требования к информационной и программной совместимости;
- требования к маркировке и упаковке;
- требования к транспортированию и хранению;
- специальные требования.

В подразделе «Требования к функциональным характеристикам» должны быть указаны требования к составу выполняемых функций, организации входных и выходных данных, временным характеристикам и т. п.

В подразделе «Требования к надежности» должны быть указаны требования к обеспечению надежного функционирования (обеспечения устойчивого функционирования, контроль входной и выходной информации, время восстановления после отказа и т. п.).

В подразделе «Условия эксплуатации» должны быть указаны условия эксплуатации (температура окружающего воздуха, относительная влажность и т. п. для выбранных типов носителей данных), при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, а также вид обслуживания, необходимое количество и квалификация персонала.

В подразделе «Требования к составу и параметрам технических средств» указывают необходимый состав технических средств с указанием их основных технических характеристик.

В подразделе «Требования к информационной и программной совместимости» должны быть указаны требования к информационным структурам на входе и выходе и методам решения, исходным кодам, языкам программирования и программным средствам, используемым программой.

При необходимости должна обеспечиваться защита информации и программ.

В подразделе «Требования к маркировке и упаковке» в общем случае указывают требования к маркировке программного изделия, варианты и способы упаковки.

В подразделе «Требования к транспортированию и хранению» должны быть указаны для программного изделия условия транспортирования, места хранения, условия хранения, условия складирования, сроки хранения в различных условиях.

В разделе «Требования к программной документации» должен быть указан предварительный состав программной документации и, при необходимости, специальные требования к ней.

В разделе «Технико-экономические показатели» должны быть указаны: ориентировочная экономическая эффективность, предполагаемая годовая потребность, экономические преимущества разработки по сравнению с лучшими отечественными и зарубежными образцами или аналогами.

В разделе «Стадии и этапы разработки» устанавливают необходимые стадии разработки, этапы и содержание работ (перечень программных документов, которые должны быть разработаны, согласо-

ваны и утверждены), а также, как правило, сроки разработки и определяют исполнителей.

В разделе «Порядок контроля и приемки» должны быть указаны виды испытаний и общие требования к приемке работы.

В приложениях к техническому заданию, при необходимости, приводят:

- перечень научно-исследовательских и других работ, обосновывающих разработку;
- схемы алгоритмов, таблицы, описания, обоснования, расчеты и другие документы, которые могут быть использованы при разработке;
- другие источники разработки.

4. Выбор темы научного исследования

Тема научного исследования может относиться к научному направлению или к научной проблеме. Под научным направлением понимается наука, комплекс наук или научных проблем, в области которых ведутся исследования.

Научная проблема — это совокупность сложных теоретических и (или) практических задач. Проблема может быть отраслевой, межатраслевой, глобальной.

Тема научного исследования является составной частью проблемы. В результате исследований по теме получают ответы на круг вопросов, охватывающих часть проблемы.

Под научными вопросами обычно понимаются мелкие научные задачи, относящиеся к конкретной теме научного исследования.

Выбор направления, проблемы, темы научного исследования и постановка новых вопросов являются чрезвычайно ответственной задачей. Актуальные направления и комплексные проблемы исследования формулируются в директивных документах правительства нашей страны. Направление исследования часто предопределяется спецификой научного учреждения, отраслью науки, в которых работает исследователь. Поэтому выбор научного направления для каждого отдельного исследователя часто сводится к выбору отрасли науки, в которой он желает работать. Конкретизация же направления исследования является результатом изучения состояния производственных запросов, общественных потребностей и состояния исследований в том или ином направлении на данном отрезке времени. В процессе изучения состояния и результатов уже проведенных исследований могут сформулироваться идеи комплексного использования нескольких научных направлений для решения производственных задач. Выбранное направление исследований часто в дальнейшем становится стратегией научного работника или научного коллектива, иногда на длительный период.

При выборе проблемы и тем научного исследования (на основе анализа противоречий исследуемого направления) формулируется сама проблема и определяются в общих чертах ожидаемые результаты, затем разрабатывается структура проблемы, выделяются темы, вопросы, устанавливается их актуальность.

После обоснования проблемы и установления ее структуры определяются темы научного исследования, каждая из которых должна быть актуальной (важной, требующей скорейшего разрешения), иметь научную новизну, т. е. должна вносить вклад в науку, быть экономиче-

ски эффективной для народного хозяйства. Поэтому выбор темы должен базироваться на специальном технико-экономическом расчете. При разработке теоретических исследований требование экономичности иногда заменяется требованием значимости, определяющим престиж отечественной науки.

Важной характеристикой темы является возможность быстрого внедрения полученных результатов в производство. Особо важно обеспечить широкое внедрение результатов в масштабах, например, отрасли, а не только на предприятии заказчика. При задержке внедрения или при внедрении на одном предприятии эффективность таких результатов существенно снижается.

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.

При коллективной разработке научных исследований большую роль приобретают критика, дискуссии, обсуждение проблем и тем. В процессе дискуссии выявляются новые, еще не решенные актуальные задачи разной степени важности и объема.

Экономичность — важнейший критерий перспективности темы. Однако при оценке крупных тем этого критерия оказывается недостаточно и требуется более общая оценка, учитывающая и другие показатели. В этом случае часто используется экспертная оценка, которая выполняется специально подобранным составом высококвалифицированных экспертов (обычно от 7 до 15 человек). С их помощью и в зависи-

мости от специфики тематики, ее направления или комплексности устанавливаются оценочные показатели тем. Тема, получившая максимальную поддержку экспертов, считается наиболее перспективной.

5. Этапы проведения научно-исследовательских работ

Для успеха научного исследования его необходимо правильно организовать, спланировать и выполнять в определенной последовательности. Эти планы и последовательность действий зависят от вида, объекта и целей научного исследования. Так, если оно проводится на экономические или технические темы, то вначале разрабатывается основной предплановый документ – технико-экономическое обоснование, а затем осуществляются теоретические и экспериментальные исследования, составляется научно-технический отчет, и результаты работы внедряются в производство.

Применительно к работам на экономические темы можно наметить такие последовательные этапы их выполнения:

- подготовительный;
- проведение теоретических и эмпирических исследований;
- работа над рукописью и ее оформление;
- внедрение результатов научного исследования.

Представляется необходимым сначала дать общую характеристику каждому этапу научно-исследовательской работы, а затем более подробно рассмотреть те из них, которые имеют важное значение для выполнения научных исследований.

Первый этап (подготовительный) включает в себя: выбор темы; обоснование необходимости проведения исследования по ней; опреде-

ление гипотез, целей и задач исследования; разработку плана или программы научного исследования; подготовку средств исследования (инструментария).

Вначале формулируется тема научного исследования и обосновываются причины ее разработки. Путем предварительного ознакомления с литературой и материалами ранее проведенных исследований выясняется, в какой мере вопросы темы изучены и каковы полученные результаты. Особое внимание следует уделить вопросам, на которые ответов вообще нет либо они недостаточны. Особое внимание уделяется не решенным вопросам, обоснованию актуальности и значимости работы. Разрабатывается методика исследования. Подготавливаются средства НИР в виде анкет, вопросников, бланков интервью, программ наблюдения и др. Для проверки их годности могут проводиться пилотажные исследования.

Второй этап (исследовательский) состоит из систематического изучения литературы по теме, статистических сведений и архивных материалов, проведения теоретических и эмпирических исследований, обработки, обобщения и анализа полученных данных, объяснения новых научных фактов, аргументирования и формулирования положений, выводов и практических рекомендаций и предложений.

Третий этап включает в себя: определение композиции (построения, внутренней структуры) работы; уточнение заглавия, названий глав и параграфов; подготовку черновой рукописи и ее редактирование; оформление текста, в том числе списка использованной литературы и приложений.

Четвертый этап состоит из внедрения результатов исследования в практику и авторского сопровождения внедряемых разработок. Научные исследования не всегда завершаются этим этапом, но иногда научные работы (например, дипломные работы студентов) рекомендуются для внедрения в практическую деятельность и в учебный процесс.

6. Композиция научной работы

Не может быть жесткого стандарта по выбору композиции исследовательского труда. Каждый его автор волен избирать любой строй и порядок организации научных материалов, чтобы получить внешнее расположение их и внутреннюю логическую связь в таком виде, какой он считает лучшим и наиболее убедительным для раскрытия своего творческого замысла.

Однако сложилась устойчивая традиция формирования структуры научного произведения, основными элементами которой являются следующие:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Введение.
4. Главы основной части.
5. Заключение.
6. Список используемых источников.
7. Приложения.
8. Вспомогательные указатели.

Титульный лист – это первая страница научной работы.

После титульного листа помещается оглавление, в котором приводятся все заголовки работы (кроме подзаголовков) и указываются страницы, с которых они начинаются. Заголовки оглавления должны точно повторять заголовки в тексте. Нумерация рубрик делается по индексационной системе.

В введении к работе обосновываются актуальность выбранной темы, цель и содержание поставленных задач, формулируются объект и предмет исследования, указываются избранные методы исследования, объясняются теоретическая значимость и прикладная ценность полученных результатов, приводится характеристика источников по данной теме литературы.

Актуальность – обязательное требование к любой научной работе. Поэтому введение должно начинаться именно с обоснования актуальности выбранной темы. Объяснение актуальности должно быть многословным: достаточно 1–2 страниц машинописного текста.

В конце введения раскрывается структура работы.

В главах основной части научной работы подробно описывается методика и техника исследования и обобщаются результаты. В этих главах должно быть также показано умение сжато, логично и аргументированно излагать материал.

Научная работа заканчивается заключительной частью. Как и всякое заключение, оно носит форму синтеза накопленной части научной информации, т. е. последовательное, логически стройное изложение полученных итогов и их соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными исследователем.

После заключения принято помещать библиографический список использованной литературы. Если автор делает ссылку на какие-либо заимствованные факты или цитирует работы других авторов, то он должен указать в подстрочной ссылке, откуда взяты приведенные материалы. Не следует включать в библиографический список те работы, которые фактически не были использованы. Дополнительные материалы, загромождающие текст основной части работы, помещают в приложении.

Приложения бывают очень разнообразны. Это, например, могут быть копии подлинных документов, выдержки из отчетных материалов, производственные планы и протоколы, отдельные положения из инструкций и правил, ранее неопубликованные тексты, переписка и т. п. По форме они могут представлять собой текст, таблицы, графики, карты. Каждое приложение должно начинаться с нового листа с указанием в правом верхнем углу слова «Приложение» и иметь тематический заголовок.

7. Доклад и выступление

При подготовке и оформлении доклада по-настоящему начинаешь понимать поставленную задачу, состояние проблемы, научное и практическое значение полученных вами результатов. Доклад на научной конференции – это промежуточный финиш, ускоряющий и стимулирующий динамику развития профессионального мастерства студента. Текст доклада есть не что иное, как проект научной статьи. Однако подготовке доклада (статьи) предшествует составление плана. В такой план следует включить:

1. Постановку проблемы (задачи) и ее актуальность (научное и практическое значение).
2. Современное состояние проблемы (в той части, которая касается вашей конкретной темы) и место вашей конкретной темы в общей проблеме.
3. Цель работы.
4. Задачи, которые надо решить для достижения поставленной цели.
5. Исходные материалы, привлеченные для выполнения работы.
6. Методику исследований, использованную в работе.
7. Полученные результаты и их анализ.
8. Научное и практическое значение полученных результатов.

Задача докладчика на научной конференции или деловом совещании – доказать, обосновать.

В устном докладе содержание работы необходимо излагать по возможности короткими, четкими фразами. Мысли должны быть ясно выраженными, без усложнения излишними эпитетами, придаточными предложениями и деепричастными оборотами. Не считайте, что вас слушают сплошь одни корифеи. При изложении доклада не «по бумажке» необходимо логично, четко, не спеша излагать содержание, стараясь акцентировать внимание слушателей на наиболее важном и интересном. Если вы чувствуете неуверенность или обнаруживаете недостаток времени для устного изложения, лучше все-таки доклад читать «по бумажке».

Не превышайте установленного для доклада отрезка времени. Заранее проведите хронометраж своего выступления и при нехватке вре-

мени (его всегда не хватает) — отсеки все второстепенное. Хронометраж выступления удобно делать по магнитофонной записи. Дефекты собственного выступления особенно заметны, когда вы слышите его «со стороны». Желание дать максимум информации в ограниченное время приводит к спешке, выступление оказывается смазанным, недочетчивым, аудитория его плохо воспринимает, и в результате теряет интерес и к вам, и к вашей работе.

Сказанное выше относительно построения доклада полностью справедливо и для текста устного выступления.

Не затягивайте вступительную часть доклада, быстрее переходите к сути работы (берите «быка за рога»). Выводы должны быть краткими и четкими.

Заранее зная, что вы не успеете членораздельно описать все свои достижения, спровоцируйте аудиторию на вопросы. Для этого скажите мимоходом, что такие-то и такие-то «принципиально важные детали» вы вынуждены опустить из-за нехватки времени. Аудитория «заглотнет наживку», вы получите дополнительное время, а в возникшей после этого дискуссии сможете узнать много интересного, увидеть свою работу с новых, неожиданных для вас, точек зрения.

Иллюстрации к докладу (слайды для каруселей или для оверхед-проекторов) во время выступления служат вашим путеводителем. Они должны быть яркими, лаконичными и легко воспринимаемыми, количество надписей на них — минимальным. Не стремитесь поместить на экране как можно больше буквенной и цифровой информации. Оставьте только самое необходимое. Не пишите длинных подрисовочных подписей и определений, пользуйтесь общеизвестными сокращениями.

Помните, что картинка показывается на экране короткое время, и восприятие помещенной на ней информации должно быть быстрым. Демонстрируйте на картинках только самое существенное, не распыляйте внимание аудитории. Каждая иллюстрация должна преследовать свою цель. Текст и графики должны подкреплять друг друга. В выступлении вы можете использовать большее число иллюстраций, чем помещено в письменном докладе.

В дополнение к основным картинкам рекомендуется сделать следующие текстовые:

- а) названия вуза, факультета и кафедры, название доклада, перечень авторов и научных руководителей;
- б) заглавия основных разделов доклада;
- в) заключение (выводы) по докладу.

Это поможет вам сэкономить время представления доклада и сконцентрировать внимание аудитории на главном, основном.

Очень важна самооценка полученных результатов. Нет ничего дороже сделанного собственными руками.

Выступление должно завершаться выводами: «следовательно...», «таким образом...». Заключительная фраза выступления стандартна: «Я закончил, благодарю за внимание».

Во время выступления будьте сдержаны – не кричите в микрофон (а при отсутствии микрофона – не стесняйтесь говорить громко и весело), не размахивайте руками, не прыгайте, не утирайте пот носовым платком, не отворачивайтесь от аудитории, обращаясь к потолку или окнам. Смотрите в глаза слушателям. Каждый будет думать, что вы обращаетесь именно к нему, и будет очень польщен вашим вниманием.