

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Г.В. Дмитриенко, Д.В. Мухин**

# **МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Учебное пособие**

Ульяновск  
УлГТУ  
2021

УДК 001.891 (075.8)

ББК 72.4(2) я73

Д53

*Рецензенты:*

Кафедра естественнонаучных дисциплин ФГБОУ ВО Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, зав. кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент Громова Н.Ю.;

ст. научный сотрудник научно-образовательного центра «Кремний-углеродные нанотехнологии» научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы, кандидат физико-математических наук Сомов А.И.

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

**Дмитриенко, Герман Вячеславович**

Д 53 **Методология и методы научных исследований:** учебное пособие  
/ Г.В. Дмитриенко, Д.В.Мухин. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – 225 с.

ISBN 978-5-9795-2148-0

Учебное пособие написано в соответствии с рабочей программой дисциплины «Методология и методика научного исследования» для магистров высших учебных заведений по направлению подготовки 24.04.04 – Авиастроение. Изложенный материал соответствует теоретическому содержанию курса. Даны рекомендации по изучению основных и наиболее сложных вопросов курса.

Работа подготовлена на кафедре «Самолетостроение» ИАТУ УлГТУ.

**УДК 001.891 (075.8)**

**ББК 72.4(2) я73**

ISBN 978-5-9795-2148-0

© Дмитриенко Г.В., Мухин Д.В. 2021

© Оформление. УлГТУ, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>Глава 1. НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРАВИЛА ЕГО ПРОВЕДЕНИЯ</b> .....	7
1.1. Методология научного познания, основные термины и определения.....	7
1.2. Фундаментальные и прикладные исследования, НИР и НИОКР, этапы их выполнения .....	18
1.3. Индивидуальное и коллективное научные исследования....	22
1.4. Выбор направления, темы и целей научного исследования, объект и субъект исследования.....	23
1.5. Актуальность и научная новизна исследования.....	28
1.6. Составление плана исследования, работа с литературой....	30
1.7. Выбор методов исследования.....	31
1.8. Планирование экспериментальных исследований, их проведение и обработка результатов.....	35
1.9. Анализ и интерпретация полученных результатов, формулирование выводов по результатам исследования, оформление результатов работы .....	37
Вопросы для самоконтроля.....	40
<b>Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	41
2.1. Методы и особенности теоретических исследований.....	41
2.2. Моделирование, основные положения .....	49
2.3. Физическое моделирование.....	53
2.4. Математическое моделирование.....	98
Вопросы для самоконтроля.....	121
<b>Глава 3. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ</b> .....	123
3.1. Общие сведения об экспериментальных исследованиях.....	123
3.2. Методика и планирование эксперимента.....	132

3.3 Метрологическое обеспечение экспериментальных исследований.....	139
3.4 Полный факторный эксперимент.....	146
Вопросы для самоконтроля.....	170
<b>Глава 4. ОСОБЕННОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ И КОЛЛЕКТИВНОЙ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОГО КОЛЛЕКТИВА.....</b>	<b>172</b>
4.1 Особенности индивидуальной и коллективной научной деятельности.....	172
4.2 Структурная организация научного коллектива и методы управления научными исследованиями.....	176
4.3 Основные принципы организации деятельности научного коллектива.....	179
4.4 Методы сплочения научного коллектива.....	180
4.5 Психологические аспекты взаимоотношений руководителя и подчиненного.....	183
Вопросы для самоконтроля.....	190
<b>Глава 5. ОСНОВЫ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКОГО ТВОРЧЕСТВА.....</b>	<b>191</b>
5.1 Общие сведения.....	191
5.2 Объекты изобретения.....	191
5.3 Условия патентоспособности изобретения.....	198
5.4 Условия патентоспособности полезной модели.....	201
5.5 Условия патентоспособности промышленного образца.....	202
5.6 Патентный поиск.....	203
Вопросы для самоконтроля.....	213
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>214</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ТАБЛИЦА t-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.....</b>	<b>215</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ТАБЛИЦА G-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.....</b>	<b>216</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3 ТАБЛИЦА F-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.....</b>	<b>217</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>219</b>
<b>ГЛОССАРИЙ.....</b>	<b>221</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>224</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Наука проникла во все сферы жизни социума. В соответствии с этим специалист в любой сфере деятельности должен быть знаком с основными принципами ее организации – представлениями о науке как системе знаний, как деятельности по производству знаний, как социальном институте и как непосредственной производительной силе общества.

Целью дисциплины «Методология и методы научных исследований» является формирование у магистрантов навыков и умений в области методологии научного познания. Данный курс помогает детально ознакомиться с научной методологией, дает необходимые знания по организации, проведению и представлению результатов индивидуальных и коллективных научных исследований в процессе последующего обучения в магистратуре, написания магистерской диссертации и последующей научной и профессиональной деятельности.

Данное учебное пособие составлено в соответствии с требованиями подготовки специалистов по направлению подготовки 24.04.04 – «Авиастроение» согласно ФГОС ВО и содержит теоретический курс дисциплины.

Изучение материала дисциплины позволит:

- самостоятельно отобрать и проанализировать необходимую информацию по теме будущего научного исследования;
- сформулировать актуальность, научную новизну, цели и задачи научного исследования;
- выбрать рациональные методы теоретических и экспериментальных исследований;
- сформулировать выводы по результатам научных исследований;

– оформить заявку на изобретение или полезную модель по результатам исследований;

– научиться результативно работать в научном коллективе, наиболее эффективно использовать возможности коллективных научных исследований.

Все части учебного пособия взаимосвязаны между собой, чтобы показать целостную картину изучаемой дисциплины.

Рамки данного учебного пособия, естественно, не могут полностью охватить такую огромную область человеческой деятельности, как научные исследования. Для более глубокого ознакомления с теми или иными аспектами этой отрасли знаний авторы рекомендуют литературу, представленную в списке использованных источников.

# Глава 1 НАУЧНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРАВИЛА ЕГО ПРОВЕДЕНИЯ

## *1.1 Методология научного познания, основные термины и определения*

Научное знание всегда характеризуется последовательностью и систематичностью. Именно этим и отличаются точные науки, в которых большинство утверждений логически выводится из немногих исходных посылок. В эмпирических науках (опирающихся на такие опытные методы исследования, как наблюдение, эксперимент и измерение) сравнительно редко встречаются отдельные, изолированные обобщения или гипотезы.

Фундамент науки строится на систематизации и организации знания, он основывается на формировании новых понятий, законов и теорий. Именно с их помощью удастся не только объяснить уже известные факты и явления, но и предсказать новые, неизвестные ранее факты и явления.

Любое научное исследование представляет собой решение ряда следующих друг за другом проблем. С одной стороны, в проблеме констатируется недостаточность достигнутого к данному моменту уровня знания, невозможность объяснить на основе этого знания явления действительности, потребность в новом знании. С другой стороны, проблема опирается на это, хоть и ограниченное, знание. Таким образом, проблема есть форма развития знания, форма перехода от старого знания к новому. Она возникает тогда, когда старое знание уже обнаруживает свою недостаточность, а новое еще не приняло развитой формы. *Проблема* – это знание о незнании.

Проблема определенным образом связана с вопросом, но не тождественна ему, так как не всякий вопрос является проблемой: специфической чертой проблемы является то, что для ее решения

необходимо выйти за рамки старого знания. Для того чтобы ответить на вопрос, нередко достаточно и старого знания.

Исходным пунктом возникновения проблемы является *проблемная ситуация* [1], т. е. противоречие между знанием о потребностях в каких-то практических или теоретических действиях и незнанием путей, способов осуществления этих действий. Исходной основой проблемной ситуации является практика, так как именно она приводит к возникновению все новых вопросов и проблем. В науке такая ситуация часто возникает в результате открытия новых фактов, которые не могут быть объяснены существующими теориями.

Создавшаяся проблемная ситуация сопровождалась переоценкой многими учеными существующих научных ценностей, пересмотром своих мировоззренческих установок. Некоторые ученые стали истолковывать новые открытия в идеалистическом духе. При этом могут возникать и мнимые проблемы, которые затем снимает научный прогресс.

Многие проблемы в науке, например в математике, возникают под воздействием не только новых задач, поставленных развитием естествознания и техники, но и внутренней логикой развития науки. Правильная постановка и ясная формулировка проблемы есть одновременно и начало ее решения, и чем больше продвинулся исследователь по пути конкретизации проблемы, тем больше он продвинулся и по пути ее решения. Чтобы правильно сформулировать проблему, необходимо не только видеть проблемную ситуацию, но и указать возможные способы и средства ее решения. Здесь многое зависит от таланта ученого, его опыта и знаний.

Наиболее важные проблемы выдвигаются выдающимися учеными той или иной отрасли науки, хорошо знающими ее положение и трудности, обладающими широким взглядом на свою область исследований и видящими перспективы ее развития. Из всех



проблем, стоящих перед наукой, отбираются те, которые призваны играть первостепенную роль в развитии науки. Именно выбор проблем в значительной степени определяет стратегию исследования вообще и направление научного поиска в особенности.

В конечном счете, выбор проблем, как и исследований, проводимых в науке, детерминируется потребностями общественной практики. Затем следует этап разработки и решения научных проблем. Основная идея проблемного замысла подкрепляется фактическими данными, устанавливаются связи этой идеи с существующими теоретическими представлениями. При этом возможно расчленение основной проблемы на более простые части – подпроблемы. При анализе проблемы выявляются все факторы, которые могут оказаться существенными для ее решения. Это позволяет ясно сформулировать и четко поставить саму проблему. При этом может оказаться, что она неразрешима существующими методами и средствами и необходимо привлекать новые идеи и способы решения проблемы. Для решения проблемы выдвигается и обосновывается некоторая *гипотеза*, призванная объяснить новые факты, которые противоречили господствующим положениям [1,2]. Гипотеза может дать правильный ответ на поставленную проблему, но она может оказаться и явно несостоятельной. Это выясняется в ходе проверки гипотезы.

Гипотеза [2] является формой осмысления фактического материала, формой перехода от фактов к законам. Под гипотезой понимают какое-либо предположение, догадку, предсказание, имеющее определенное основание. Гипотеза пытается дать объяснение фактов, в силу чего ее содержание значительно богаче тех данных, на которые она опирается. В логическом отношении необходимость различных догадок заключается в том, что ни одна из форм умозаключения не может обеспечить непосредственный

переход от незнания к достоверным выводам, минуя выводы проблематические. Необходимость создания гипотез в науке вызвана тем, что законы не видны в отдельных фактах, сущность не совпадает с явлением. Прежде чем сложится теория, возникают различные идеи, догадки, предположения – это периоды выдвижения и становления гипотезы.

*Научная гипотеза* – это обоснованное предположение о существенной, закономерной связи явлений. Основаны эти предположения или на аналогии, или на индуктивном обобщении. Но всегда выдвижение гипотезы – творческий акт, включающий интуицию ученого. Научная гипотеза в случае своего подтверждения образует *теорию*. Различие между теорией и научной гипотезой состоит в степени обоснованности и развитости, а не в составе входящих в них утверждений.

Классификация гипотез проводится по различным основаниям. В зависимости от этого выделяют описательные и объяснительные, частные и фундаментальные, рабочие и теоретические гипотезы [3]. *Описательные гипотезы* представляют собой прямое обобщение опытных данных. В случае подтверждения они приводят к открытию эмпирических законов. *Объяснительные гипотезы* – это предположение о внутренних причинах, механизме действия тех или иных явлениях. *Частные гипотезы* характеризуют отдельные явления, *фундаментальные* – охватывают большой круг явлений, имеют универсальный характер, и выводы их приложены к большинству объектов данной науки. *Рабочая гипотеза* выдвигается как первоначальное предположение для систематизации научных фактов, организации и направления научного исследования. Она обычно не имеет достаточно полного обоснования и выполняет прагматическую, инструментальную роль. Достаточно полно

обоснованные, развитые гипотезы, использующие идеальные объекты, относятся к *теоретическим гипотезам*.

При формулировании рабочей гипотезы необходимо тщательно изучить отечественные и зарубежные литературные источники, а также производственные отчеты о проведенных аналогичных исследованиях. Вся полученная информация должна быть проанализирована с целью выяснения, что уже достигнуто и разработано, какие еще остались недоработки, неясности и противоречия. В результате выявляются методические ошибки и просчеты предшествующих исследователей и намеченные ими перспективы улучшения и совершенствования существующей теории.

Рабочая гипотеза выдвигается при условии обобщения всех имеющихся материалов, относящихся к объекту исследования, его физической сущности. На начальной стадии разработки рабочей гипотезы рекомендуется составить наиболее полный перечень влияющих факторов, их граничных значений и степени влияния на исследуемый объект. Именно на основании этого делается предположительное объяснение всего процесса развития явления.

Затем в принятой рабочей гипотезе следует выделить решающие и важные причинно-следственные связи и взаимодействия, наметить ожидаемые направления и ход развития исследуемого объекта.

Для решения научной проблемы может быть выдвинуто несколько гипотез. Для отбора из нескольких гипотез тех, которые имеют научный характер, предъявляется ряд формальных требований, которые называются *условиями состоятельности гипотезы*. Это не означает, что такие гипотезы непременно окажутся истинными или даже очень вероятными. Но это позволяет отсеять заведомо неприемлемые, крайне маловероятные гипотезы.

Условия состоятельности гипотез требуют [2,4]:  
- согласия с фактическим материалом, для объяснения которого и

была выдвинута гипотеза. Последняя также не должна противоречить известным законам и теориям. Сопоставление гипотезы с фактами составляет ее эмпирическое обоснование. Теоретическое обоснование связано с учетом всего предшествующего знания, которое имеет отношение к гипотезе. Это требование может быть сформулировано как требование преемственной связи гипотезы с предшествующим знанием;

- принципиальной проверяемости гипотезы. Поскольку любая гипотеза соотносится с непосредственно не наблюдаемым внутренним механизмом, проверить ее можно путем вывода следствий, доступных опытной проверке. Если же совокупность следствий научной гипотезы оказывается непроверяемой, то такая гипотеза не имеет права на существование. При этом следует различать фактическую и принципиальную непроверяемость. Первая обусловлена недостаточными техническими возможностями эксперимента и практики и со временем может быть устранена. Принципиальная непроверяемость означает, что следствия гипотезы недоступны опытной проверке в силу специфики внутреннего механизма гипотезы;

- максимальной общности, приложимость к возможно более широкому кругу явлений, относящихся к данной гипотезе. Научные гипотезы, выдвинутые для объяснения одной группы явлений, объясняют и ряд смежных явлений;

- принципиальной простоты гипотезы, состоящей в ее способности, исходя из сравнительно немногих оснований без произвольных допущений, объяснить наивозможно широкий круг явлений. Требование простоты оснований гипотезы не сводится к тому, что проще понять с точки зрения здравого смысла. Оно направлено против произвольных допущений, исключений.

На условия состоятельности гипотезы, а также на ее характер и продолжительность «жизни» оказывает влияние специфика науки.

*Логическое строение гипотезы* представляет особую форму мышления, состоящую из системы понятий, суждений и умозаключений. Формулировки в изложении гипотезы должны быть ясными, краткими и содержать строгие, общепринятые в данной отрасли науки понятия и термины. Основу гипотезы составляют достоверные суждения, основанные на фактическом материале и установленных закономерностях. Кроме того, она включает в себя и проблематические суждения, истинность которых не доказана. Они не являются произвольными и обычно основаны на аналогии с известными уже положениями. Предположительность этих суждений является отражением определенного уровня знаний о процессах, когда последние изучены достаточно для того, чтобы судить об их связях или причинах, но недостаточно, чтобы достоверно объяснить их. Проблематические суждения составляют основную идею гипотезы, ее принцип, объединяющий в систему все остальные понятия, суждения и умозаключения. Этот принцип в ходе развития может дополняться, уточняться, но в целом сохраняется и в случае подтверждения гипотезы составляет основу теории, вырастающей из гипотезы. При опровержении гипотезы система разрушается в главном, хотя отдельные ее понятия и суждения могут быть использованы новыми гипотезами.

Если главные факторы и связи исследуемой научной проблемы не вызывают сомнения, то развитие рассматриваемого явления или процесса удобнее представить в виде математических моделей, выраженных системой взаимосвязанных математических формул. Выбор типа и структуры этих формул осуществляется на основе уже имеющихся в данной отрасли науки сведений об изучаемом явлении путем логически предпосылок и анализа влияния на него главных

факторов. При таком выборе используются уже известные соотношения. Такие соотношения могут быть выявлены при исследовании других проблем в данной либо смежной отраслях науки, которые имеют похожие или одинаковые математические модели. Иногда такой выбор делается эвристическим путем на основании интуиции исследователя.

Необходимо учитывать, что одно и то же явление или процесс можно описать с помощью различных математических моделей.

Математическая модель рабочей гипотезы должна быть достаточно простой и допускать возможность изменения структуры формул, характера включенных в нее параметров (переменных величин) и граничных условий в соответствии с результатами опыта. Иногда математическую модель полезно дополнять таблицами, графиками и схемами с пояснениями.

Математическая модель рабочей гипотезы зачастую представляется системой линейных дифференциальных уравнений [1,3].

*Проверка гипотезы* заключается в стремлении к одному результату – достоверности [4,5]. Причем проверяется совокупность выводов, следствий гипотезы. Поскольку научные гипотезы представляют собой системы высказываний, то, как правило, для доказательства истинности гипотезы необходимо соответствие возможно большего количества ее следствий научным фактам. Отдельные новые факты не могут превратить гипотезу в теорию, они могут лишь увеличить степень вероятности ее истинности. Это связано с тем обстоятельством, что они могут соответствовать и выводам из других гипотез. Отдельные факты могут доказать истинность только частных гипотез, созданных именно для их объяснения.

Характерна асимметричность значения фактов, подтверждающих гипотезу или опровергающих ее. Множество положительных результатов недостаточно для полного

подтверждения гипотезы, один же отрицательный результат достаточен для ее опровержения, если он установлен достоверно и надежно. В то же время неподтверждение следствий недостаточно для опровержения гипотезы, для этого необходимо именно опровержение ее следствий. Основываясь на асимметричности значения фактов, большое значение для подтверждения гипотезы имеет открытие новых, неизвестных ранее фактов, которые были предсказаны на основе данной гипотезы. В этом случае не только увеличивается вероятность гипотезы, но и может быть достигнуто достоверное значение. Происходит это тогда, когда новые факты и закономерности могут быть объяснены только на основе этой, а не какой-либо другой гипотезы.

Проверка гипотез зависит от степени их абстрактности. Если эмпирические гипотезы проверяются путем сопоставления с опытом возможно большего числа выводов, то теоретические гипотезы не проверяются непосредственно, ибо оперируют идеальными объектами. Проверка их требует использования правил эмпирической интерпретации, для них большое значение имеют внеэмпирические требования: непротиворечивость, простота, согласованность с законами.

Принятие гипотезы, включение ее в систему научного знания происходит сложным путем. Гипотеза, впервые объясняющая те или иные процессы, устанавливающая их связи, не встречает тех препятствий в отношении ее принятия, которые встречает новая гипотеза, представляющая альтернативу существующей. Если следствия гипотезы подтверждаются, она может переходить в новую форму научного знания – теорию.

*Научная теория* – форма достоверного знания о некоторой области действительности, представляющая собой систему взаимосвязанных утверждений и доказательств и содержащая методы

объяснения и предсказания явлений в этой области. Построение теории опирается на результаты, полученные на эмпирическом уровне исследования и применения более общих, в том числе философских идей. Сначала создаются частные теории и модели, затем развитая теория.

Научные теории являются весьма разнообразными как по предмету исследования, так и по глубине раскрытия сущности изучаемых объектов. По предмету исследования выделяют физические, биологические, социальные и другие теории. По различию в структуре и содержанию различают содержательные теории опытных наук, их часто называют эмпирическими; гипотетико-дедуктивные теории естествознания; аксиоматические теории математики и математического естествознания; формализованные теории математики и логики. Строгие теоретические системы строятся с помощью гипотетико-дедуктивного или аксиоматического метода. Ученый выдвигает гипотезу или постулат, из которого дедуктивно выводятся различного рода следствия, сопоставляемые с эмпирическими данными. В теории все данные науки, законы упорядочиваются, приводятся в стройную систему, объединенную общей идеей. К вновь создаваемой теории предъявляется ряд *требований*:

- адекватность описываемому объекту, что позволяет заменить в определенных пределах экспериментальные исследования теоретическими положениями;
- полнота описания некоторой стороны действительности;
- объяснение взаимосвязи между различными компонентами в рамках самой теории;
- внутренняя непротиворечивость теории и соответствие ее опытным данным.



Научная теория развивается под воздействием внутренних и внешних факторов. Внешние – это противоречия теории и опыта, практики. Внутренние факторы представляют собой обнаруженные в составе теории противоречия, нерешенные задачи. Те и другие приводят к развитию теории, которое может идти в трех основных формах:

- интенсификационная, когда происходит углубление наших знаний без изменения области применения теории;

- экстенсификационная, когда происходит расширение области применения теории без существенного изменения ее содержания. Примером может служить распространение теории электромагнетизма на области оптических явлений;

- экстенсификационно-интенсификационная (комбинированная) форма развития теории.

Функции научной теории многообразны. Выделяются описательная, объяснительная, предсказательная и синтезирующая функции.

Теория всегда дает описание некоторой области знания. Так, теория элементарных частиц описывает строение некоторой области микромира, теория относительности характеризует движение объектов с большими скоростями. Теория дает специальный язык, на котором можно точно и глубоко говорить о соответствующей предметной области. Описательная функция теории помогает установлению экспериментальных законов.

Теория не только описывает те или иные объекты действительности, но и объясняет их генезис, состав, структуру, функции.

Внешнюю направленность теория получает в предсказательной функции. Благодаря ней теория становится практически полезной.

Синтезирующая функция теории заключается в упорядочении огромной массы эмпирического материала. Синтезируя эмпирический материал, теория конденсирует содержащуюся в нем информацию, выявляя некоторое внутреннее единство. Это позволяет теории объяснить широкий круг явлений, исходя из немногих основополагающих положений. Создание фундаментальных теорий в одной науке оказывает огромное воздействие на смежные отрасли знания, на общий стиль научного мышления в данную эпоху.

## ***1.2 Фундаментальные и прикладные исследования, НИР и НИОКР, этапы их выполнения***

Научные исследования по характеру связей с производством и степени важности для народного хозяйства, целевому назначению, источникам финансирования и длительности выполнения классифицируются на следующие основные виды: фундаментальные, прикладные и разработки [3].

*Фундаментальные научные исследования* направлены на открытие и изучение новых явлений и законов природы, создание новых принципов и методов исследования с целью расширения научного знания общества и установления их практической пригодности. Такие исследования ведутся на границе известного и неизвестного, обладают наибольшей степенью неопределенности.

*Прикладные научные исследования* направлены на поиск способов использования законов природы, создание новых и совершенствование существующих средств и способов человеческой деятельности. Они базируются на знаниях, полученных при проведении фундаментальных исследований. Прикладные исследования делятся на поисковые, научно-исследовательские и опытно-конструкторские.

При проведении *поисковых исследований* устанавливаются факторы, влияющие на объект, отыскиваются пути создания новой техники и технологий. В результате *научно-исследовательских работ* создаются новые технологии, опытные установки, приборы, образцы техники. При выполнении *опытно-конструкторских работ* осуществляется подбор конструктивных характеристик, составляющих логическую основу создаваемой машины, прибора, конструкции.

При проведении фундаментальных и прикладных исследований происходит накопление новой научно-технической информации и преобразование ее в форму, пригодную для освоения в промышленности и строительстве, т. е. приводит к разработке.

*Разработка* направлена на создание новой и совершенствование существующей техники, материалов, конструкций и технологий. Ее конечная цель – подготовка результатов прикладных исследований к внедрению.

Научные исследования по степени важности подразделяются:

- на важнейшие работы, выполняемые по специальным постановлениям государственных органов;
  - на работы, выполняемые по планам отраслевых министерств и ведомств;
  - на работы, выполняемые по инициативе и планам научно-исследовательских организаций.
- В зависимости от источников финансирования научные работы подразделяются:
- на госбюджетные, финансируемые из средств государственного бюджета;
  - на хоздоговорные, финансируемые организациями-заказчиками на основе хозяйственных договоров;
  - на нефинансируемые, выполняемые по договорам о сотрудничестве и по личной инициативе.

Развитие научного знания в научных организациях и научных коллективах происходит в форме выполнения *научно-исследовательских работ* (НИР) [4].

Процесс выполнения научно-исследовательской работы включает в себя шесть этапов [2,4].

1. *Формулирование темы*. На этом этапе предполагается общее знакомство с научной темой или проблемой, по которой предстоит выполнить работу, и предварительное ознакомление с литературой, после чего формулируется тема исследования. Затем составляется план, разрабатывается техническое задание и определяется ожидаемый экономический эффект.

2. *Формулирование цели и задач исследований*. Этот этап включает подбор литературы и составление библиографических списков, проведение патентных исследований по теме НИР, составление аннотации источников и анализ обработанной информации. В заключении ставится цель и задача исследования.

3. *Теоретические исследования*. При выполнении этого этапа предполагается изучение физической сущности явления, формирование гипотез, выбор и обоснование физической модели. Затем производится математизация и анализ модели и полученных решений.

4. *Экспериментальные исследования*. После разработки цели и задачи экспериментального исследования производится планирование эксперимента, разрабатываются методики его проведения и выбор средств измерения. Заканчиваются экспериментальные исследования проведением серии экспериментов и обработкой полученных результатов.

5. *Анализ и оформление научных исследований*. На этом этапе производится сопоставление результатов экспериментов с теоретическими данными и анализ расхождений. Затем уточняются теоретические модели и проводятся дополнительные эксперименты, на основе которых становится возможным превращение гипотез в

теорию. Научные работы на данном этапе завершаются формулированием научных выводов и составлением научно-технического отчета.

*6. Внедрение результатов исследования в производство, определение экономического эффекта.* Каждое теоретическое исследование требует больших затрат умственного труда, поэтому здесь могут быть и неудачи. Экспериментальная часть является наиболее трудоемкой и материалоемкой, особенно когда возникает необходимость в повторных исследованиях.

В случае если выполнение НИР имеет конечной целью создание технического образца, то научные исследования обычно тесно связаны с опытно-конструкторскими работами (ОКР), представляющими собой совокупность определенных мероприятий, нацеленных на создание технологических и конструкторских документов, изготовление опытного образца, проведение испытаний и принятие решения о запуске серийного производства. Комплекс из взаимосвязанных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ сокращенно называют НИОКР.

Процесс выполнения НИОКР отличается от этапов научно-исследовательской работы. *Этапы НИОКР* предполагают [4,6]:

- 1 формулирование темы, цели, задач исследования;
- 2 изучение литературы, проведение поисковых, теоретических и экспериментальных исследований, разработка технического предложения (аванпроекта);
- 3 разработка технического задания на опытно-конструкторские (технологические) работы;
- 4 разработка эскизного проекта;
- 5 разработка технического проекта;
- 6 разработка рабочей конструкторской документации на изготовление опытного образца;

- 7 изготовление опытного образца;
- 8 проведение испытаний опытного образца;
- 9 отработка документации;
- 10 утверждение рабочей конструкторской документации для организации промышленного (серийного) производства изделий.

### ***1.3 Индивидуальное и коллективное научные исследования***

*Индивидуальные исследования* подразумевают большую свободу исследователя и большой объем самостоятельной работы, а это, в свою очередь, требует самодисциплины и стойкости к разочарованиям. При ведении индивидуальной исследовательской работы вы получаете большую свободу в выборе оптимального режима работы. Все люди сильно различаются по своей трудоспособности в утренние или вечерние часы, и эти индивидуальные различия в режиме дня следует учитывать. Однако в этом таится серьезная угроза, так как порой очень трудно заставить себя приступить к накопившейся работе и очень легко найти оправдание для себя, что «именно сегодня можно поработать поменьше или можно дать себе дополнительный выходной, а вот завтра я уже точно все наверстаю».

Нередко это приводит к тому, что объем накопившейся невыполненной работы становится настолько большим, что начинает оказывать сильное психологическое давление и может окончательно деморализовать начинающего исследователя.

*В коллективных исследованиях* вы должны будете увязывать свой план работы с остальными участниками коллектива, но в то же время распределение обязанностей позволит вам сосредоточиться на более детальном изучении вашего сектора исследования.

Серьезным преимуществом коллективных исследований является возможность обсуждать ваши идеи с другими. Прямой

контакт с другими исследователями может являться наиболее плодотворным внешним стимулом к творческому мышлению. Кроме того, рассказывая другим людям о своих идеях или возникших трудностях, вам для объяснения предмета придется сводить его к самым простым, но и самым существенным аспектам, а это, в свою очередь, приведет к тому, что вы сами сможете переосмыслить и лучше понять все основные положения и найти решение возникших проблем. Важную роль в конечном успехе может сыграть беспристрастное аналитическое обсуждение внутри коллектива, которое помогает выявлять и исправлять ошибки, однако критика всегда должна оставаться объективной.

#### ***1.4 Выбор направления, темы и целей научного исследования, объект и субъект исследования***

В научно-исследовательской работе различают научное направление, проблемы и темы [2].

*Научное направление* – это сфера исследований научного коллектива, посвященных решению крупных фундаментальных теоретически-экспериментальных задач в определенной отрасли науки. Структурными единицами направления являются комплексные проблемы, темы и вопросы.

*Проблема* – это сложная научная задача. Она охватывает значительную область исследования и должна иметь перспективное значение. Проблема состоит из ряда тем.

*Тема* – это научная задача, охватывающая определенную область научного исследования. Она базируется на многочисленных исследовательских вопросах, под которыми понимают более мелкие научные задачи. При разработке темы либо вопроса выдвигается конкретная задача в исследовании: разработать конструкцию, новый материал, новую, более совершенную технологию и т. д. Решение

проблемы ставит более общую задачу. Например, решить комплекс научных задач, сделать открытие.

Выбор проблемы, направления, темы НИР и постановка научных задач – очень важная часть работы. Как правило, самые актуальные направления научных исследований формулируются в государственных директивных документах и в документах отраслевых министерств, ведомств. Приступая к постановке научно-технической проблемы в какой-либо определенной области знаний или отрасли народного хозяйства, необходимо провести глубокий анализ задач, обусловленных потребностями общества и социальными запросами. Основные народнохозяйственные проблемы представляются в виде различных целевых и комплексных программ общегосударственного или регионального значения.

Вначале при определении проблемы и темы научного исследования на основе противоречий исследуемого направления формулируется сама проблема, и определяются в общих чертах ожидаемые результаты, а затем разрабатывается ее структура, выделяются вопросы, устанавливается их актуальность, и определяются основные исполнители.

На этапе планирования из-за недостаточной информированности научных работников иногда выбираются ложные или мнимые проблемы. Это приводит к напрасным затратам средств и труда ученых. В уже сложившихся научных коллективах, имеющих определенные научные традиции и разрабатывающих комплексные проблемы, методика выбора тем существенно упрощается. При коллективном планировании научных исследований большую роль приобретают дискуссии, обсуждение проблем и тем, их критика.

Чтобы проанализировать научную и техническую информацию в рассматриваемой области знаний, нужно провести краткий литературный обзор по данной проблеме. Это необходимо, чтобы



вскрыть проблемную ситуацию и выявить наличие противоречий между социальной потребностью и необходимостью решения выдвигаемых задач, а также показать их научную актуальность и методологическую ценность в познании причинных и функциональных связей между явлениями и процессами объекта исследования.

Такой анализ позволяет сформулировать рабочую гипотезу, наметить методы решения проблемы, выделить задачи и основные этапы исследования. Таким образом, этот этап должен завершаться формулированием цели, определением объекта исследования, оценкой научной новизны и практической ценности результатов решения научно-технической проблемы, возможности и эффективности их внедрения в практику.

В каждом научном исследовании выделяется объект и предмет исследования.

*Объект исследования* – это технический объект, физическое явление или процесс, которые избраны для изучения, содержат проблемную ситуацию и служат источником необходимой для исследователя информации.

Однако объект исследования рекомендуется формулировать не безгранично широко, а так, чтобы можно было проследить определенный круг, который должен включать в себя предмет в качестве важнейшего элемента, который характеризуется в непосредственной взаимосвязи с другими составными частями данного объекта и может быть однозначно понят лишь при сопоставлении с другими сторонами объекта.

*Предмет исследования* более конкретен и включает только те связи и отношения, которые подлежат непосредственному изучению в данной работе.

Предметом научного исследования могут выступать: особенности функционирования выбранного технического объекта,

особенности протекания конкретных физических процессов в техническом объекте, способы моделирования или совершенствования выбранного технического объекта, физического процесса или явления и т. п.

Из этого следует, что объектом выступает то, что исследуется, а предметом – то, что в этом объекте получает научное объяснение. Именно предмет исследования определяет тему исследования. Например: Объект исследования – магистральный самолет, предмет исследования – численные модели аэродинамических процессов, протекающих в воздушной среде.

Исходя из объекта и предмета, можно приступить к определению цели и задач исследования.

Цель исследования определяется научной актуальностью или практической значимостью проблемы. Формулировка цели исследования содержит не только краткое описание самого процесса, но и предполагаемый результат исследования.

Цель формулируется кратко и предельно точно, в смысловом отношении выражая то основное, что намеревается сделать исследователь, к какому конечному результату он стремится.

Целью научных исследований может быть повышение эффективности функционирования объекта исследований или способов его совершенствования, способных привести к положительному экономическому эффекту в рамках всего народного хозяйства.

Цель конкретизируется и развивается в задачах исследования.

Задач ставится несколько, и каждая из них четкой формулировкой раскрывает ту сторону темы, которая подвергается изучению. Определяя задачи, необходимо учитывать их взаимную связь [2,4,6]. Иногда невозможно решить одну задачу, не решив

предварительно другую. Каждая поставленная задача должна иметь решение, отраженное в одном или нескольких выводах.

Первая задача, связана с выявлением, уточнением, углублением, методологическим обоснованием сущности, структуры изучаемого объекта.

Вторая связана с анализом реального состояния предмета исследования.

Третья задача связана с развитие предмета исследования, т. е. выявлением путей и средств повышения эффективности совершенствования исследуемого явления или процесса.

Четвертая – с опытно-экспериментальной проверкой эффективности предлагаемых преобразований.

Задачи следует формулировать четко и лаконично. Как правило, каждая задача формулируется в виде поручения: «*Изучить...*», «*Разработать...*», «*Выявить...*», «*Установить...*», «*Обосновать...*», «*Определить...*», «*Проверить...*», «*Доказать ...*» и т. п.

Определив тему и задачи, уточнив объект и предмет исследования, можно дать первый вариант формулировки названия работы.

Название работы рекомендуется формулировать по возможности кратко, точно в соответствии с ее содержанием. Необходимо помнить, что в названии должен быть отражен предмет исследования. Не следует допускать в названии работы неопределенных формулировок, например: «*Анализ некоторых вопросов ...*», а также штампованных формулировок типа: «*К вопросу о...*», «*К изучению...*», «*Материалы к...*».

Практически невозможно сформулировать окончательно название на начальном этапе работы. В ходе исследования могут возникнуть новые, более удачные названия.

### ***1.5 Актуальность и научная новизна исследования***

Научная работа должна быть актуальна как в научном, так и в прикладном аспектах.

Одним из основных критериев при экспертизе является *актуальность темы* научного исследования. Актуальность означает, что поставленные задачи требуют скорейшего решения для практики или соответствующей отрасли науки.

Кроме этого, актуальность темы научной работы указывает на актуальность объекта и предмета исследования. Прежде всего, актуализация темы предполагает ее увязку с важными научными и прикладными задачами. Необходимо коротко обозначить задачи, которые стоят перед теорией и практикой научной дисциплины в аспекте выбранной темы исследования и конкретных условий.

Актуальность в научном аспекте обосновывается следующими факторами:

- задачи фундаментальных исследований требуют разработки данной темы для объяснения новых фактов;
- возможны и остро необходимы в современных условиях уточнение развития и разрешение проблемы научного исследования;
- теоретические положения научного исследования позволяют устранить существующие разногласия в понимании процесса или явления;
- гипотезы и закономерности, выдвинутые в научной работе, позволяют обобщить известные ранее и полученные исследователем эмпирические данные.

В прикладном аспекте актуальность определяется следующими факторами:

- задачи прикладных исследований требуют разработки вопросов по данной теме;
- существует необходимость решения задач научного исследования для нужд общества и производства;

– научная работа по данной теме существенно повышает качество разработок творческих научных коллективов в определенной отрасли знаний;

– новые знания, полученные в результате научного исследования, способствуют повышению квалификации кадров или могут войти в учебные программы обучения студентов.

Одним из главных требований к теме научной работы является *ее научная новизна* [1,3,4]. Работа должна содержать решение научной задачи или новые разработки, которые расширяют существующие границы знания в данной отрасли науки.

Новизна научной работы может быть связана как со старыми идеями, что выражается в их углублении, дополнительной аргументации, показе возможного использования в новых условиях, в других областях знания и на практике, так и с новыми идеями, выдвигаемыми лично исследователем.

Для выявления элементов научной новизны необходимо наличие следующих условий:

- тщательное изучение литературы по предмету исследования с анализом его исторического развития. Весьма распространенная ошибка исследователей заключается в том, что за новое выдается уже известное, но не оказавшееся в их поле зрения;

- рассмотрение всех существующих точек зрения. Критический анализ и сопоставление их в свете задач научного исследования часто приводит к новым или компромиссным решениям;

- вовлечение в научный оборот нового фактического и цифрового материала, например, в результате проведения удачного эксперимента, а это уже заявка на оригинальность;

- детализация уже известного процесса или явления.

В научной работе могут быть приведены следующие элементы новизны: новая сущность задачи, т. е. такая задача, поставлена впервые; новая постановка известных проблем или задач; новый

метод решения; новое применение известного метода или решения; новые результаты и следствия [2,3,4].

Рассмотрев варианты получения результатов, можно выявить следующую закономерность: чем обширнее предметная область, тем сложнее получать для нее общие научные результаты [1, 3].

### ***1.6 Составление плана исследования, работа с литературой***

*План исследования* представляет собой намеченную программу действий, которая включает все этапы работы с определением календарных сроков их выполнения. План необходим для того, чтобы правильно организовать работу и придать ей более целеустремленный характер. Кроме того, он дисциплинирует, заставляет работать в определенном ритме.

В процессе работы первоначальный план можно детализировать, пополнять и даже изменять.

*Работа с литературой* может называться этапом работы лишь условно, поскольку реально работа с литературой начинается в процессе выбора темы и продолжается до конца исследования. Эффективность работы с литературными источниками зависит от знания определенных правил их поиска, соответствующей методики изучения и конспектирования. Под «литературным источником» понимается документ, содержащий какую-либо информацию (монография, статья, тезисы, учебник и т. п.). *Для начинающего исследователя очень важно выработать навык ведения каталога использованных литературных источников на бумажных или электронных носителях, так как при отсутствии такового на этапе оформления работы (составления отчета по НИР, написания научных статей) повторный поиск использованных источников для составления списка литературы может занять значительное время.*

### ***1.7 Выбор методов исследования***

Научный метод является инструментом для решения главной задачи науки – открытия объективных законов действительности. Конкретно каждый метод представляет собой совокупность логичных рассуждений, определенных преобразований и тому подобных действий, приемов или операций, при помощи которых осуществляется познание окружающей нас действительности.

*Метод исследования* – специальная процедура, состоящая из взаимосвязанных последовательных действий, приводящих к достижению поставленной цели либо приближающих к ней. *Метод* – это система предписаний, рекомендаций, предостережений, образцов и т. п., указывающих, как сделать что-то. Метод регламентирует некоторую сферу деятельности и является совокупностью предписаний. Вместе с тем метод обобщает и систематизирует опыт действий в этой сфере.

В зависимости от видов научных исследований и области научных знаний методы научных исследований могут быть условно объединены в группы [2,4,5].

#### *А. По цели:*

*Первичные методы* используются для сбора информации и получения релевантных научных фактов: наблюдений, экспериментов, опросов и др. Релевантность научного факта означает, что он имеет непосредственное отношение к изучаемому явлению или процессу. Первичные методы исследования лежат в основе использования всех других методов науки.

*Вторичные методы* применяются для интерпретации и обработки, количественного и качественного анализа полученных данных, их систематизации, шкалирования и т. п.

*Верификационные методы* предназначены для проверки полученных результатов, истинности выдвинутых гипотез и выводов.

Они также сводятся к так называемому анализу на устойчивость - количественному и качественному анализу данных на основе измерения соотношения между исходными величинами, переменными и функциями.

*Б. По способу реализации.* К логико-аналитическим методам относятся методы анализа и синтеза, индукции и дедукции, взаимно дополняющие друг друга.

*Методы визуализации* – методы, дающие синтезированное представление об объекте исследования и служащие для графического представления научных данных и зависимостей между ними.

*В. По функциям познания.* Методы систематизации представляют собой методы приведения разрозненных научных фактов или данных в определенную систему на основе какого-либо признака (принципа) систематизации.

*Методы объяснения* – методы, позволяющие сделать научные факты или научную теорию ясной и более понятной.

*Методы предсказания* – методы, позволяющие предвидеть то, что произойдет в будущем. К таким методам могут быть отнесены метод трендирования, метод Дельфи, метод социально-экономического прогнозирования Форсайт, сценарные методы и им подобные.

*Г. По точности предсказаний.* Детерминированные методы позволяют проводить исследование в условиях определенности, когда ученый располагает практически полной и достоверной информацией по исследуемой проблеме. Научное знание, получаемое в ходе исследования, только одно, и вероятность наступления результата близка к единице.

*Стохастические методы* исследования применяются в условиях неопределенности, а их научный результат носит вероятностный характер. Вероятность того или иного научного



результата можно определить математическими методами на основе, например, статистического анализа. Вероятность, рассчитанная на основе имеющихся научных фактов и позволяющая получить статистически достоверный результат, называется объективной. В условиях отсутствия достаточной информации для получения объективной оценки исследователь на основе опыта может полагать, какое событие произойдет с наибольшей вероятностью. В этом случае оценка вероятности научного результата является субъективной.

*Д. Правомерность классификации методов по областям исследования* обусловлена тем, что в естественных и технических науках, медицине, социологии, истории, кибернетике и других науках используются разные наборы методов. Вместе с тем в каждой из них могут быть общие методы познания, являющиеся для всех наук классическими.

*Е. По уровню познания* методы подразделяются на три группы: методы теоретического исследования; методы эмпирического исследования; и методы, которые используются как на теоретическом, так и практическом уровне исследования.

*Теоретические* методы могут быть представлены следующими дихотомиями: анализ и синтез; индукция и дедукция; аналогия и моделирование; идеализация и абстрагирование; конкретизация и аксиоматизация; объяснение и формализация.

*Эмпирические методы:* наблюдение; сравнение и измерение; эксперимент; опрос и экспертные оценки, метод проб и ошибок. Более подробно сущность и содержание теоретических и эмпирических методов исследования будут раскрыты в следующих главах учебного пособия.

Все рассмотренные методы исследования являются важными на тех или иных этапах исследования либо при проведении исследования в различных научных областях, большинство из них

используется либо в единстве, либо в тесной взаимосвязи, что позволяет получить более обоснованные и достоверные научные результаты.

Исследователь должен уметь выбрать наиболее эффективный метод (или группу методов), наиболее полно отвечающий характеру проводящегося исследования, особенностям изучаемой системы, объекта, явления, а также имеющимся материально-техническим ресурсам, знаниям и опыту ученого.

Основным ориентиром для выбора методов исследования могут служить его задачи. Именно задачи, поставленные перед работой, определяют способы их разрешения, а стало быть, и выбор соответствующих методов исследования. При этом важно подбирать такие методы, которые были бы адекватны своеобразию изучаемых явлений.

В практике проведения исследований наибольшее распространение получили следующие методы [4,5]:

- анализ научно-методической литературы;
- наблюдение;
- методы моделирования;
- методы математической обработки результатов;
- эксперимент.

Перечисленные группы методов тесно связаны между собой. Они не могут применяться изолированно. Например, для проведения наблюдения или эксперимента необходимо предварительно получить информацию о том, что уже есть в данной предметной области, т. е. воспользоваться методами анализа научно-методической литературы. Полученный в процессе исследования фактический материал не будет достоверен без методов математической обработки.

Сущность эксперимента состоит в сочетании нескольких перечисленных методов. Любой эксперимент включает в себя один

или несколько методов сбора текущей информации, а также метод математической обработки. Предшествует им использование методов получения ретроспективной информации (анализ литературных и документальных источников). Все это служит основанием считать эксперимент комплексным методом научного познания.

Наблюдение обязательно включает в себя один или несколько методов сбора текущей информации и иногда метод математической обработки.

Применение основных методов в научных исследованиях позволяет использовать в каждом конкретном случае разнообразные приемы, способы и методики регистрации, сбора и анализа информации: от обычного визуального анализа и оценки до применения современных технических устройств и приборов с использованием современных компьютеров и информационных технологий.

### ***1.8 Планирование экспериментальных исследований, их проведение и обработка результатов***

Организация эксперимента связана с планированием его проведения, которое определяет последовательность всех этапов работы, а также с подготовкой всех условий, обеспечивающих полноценное исследование. Сюда входят подготовка соответствующей обстановки, приборов, средств, планирование наблюдения, выбор объекта, выбор или создание экспериментальной установки, оценка всех особенностей экспериментальной базы и т. д.

Для успешного проведения эксперимента необходимы определенные условия: наличие лаборатории, испытательного стенда, измерительных приборов. Во всех случаях для проведения эксперимента должно быть получено разрешение руководителя организации, в которой предполагается проведение эксперимента.

На этапе проведения экспериментальных исследований с помощью выбранных методов исследования собирают необходимые эмпирические данные для проверки выдвинутой гипотезы.

Исследование проводится на основе общей программы эксперимента. Разработка программы исследований должна осуществляться в соответствии с положениями теории планирования эксперимента.

В программе указывают содержание и последовательность всех действий (что, где, когда и как будет проводиться, наблюдаться, проверяться, сопоставляться и измеряться; какой будет установлен порядок измерения показателей, их регистрации; какие при этом будут применяться техника, инструментарий и другие средства; кто будет выполнять работу и какую).

Результаты каждого экспериментального исследования важно обрабатывать по возможности тотчас же по его окончании, пока память экспериментатора может подсказать те детали, которые почему-либо не зафиксированы, но представляют интерес для понимания существа дела. При обработке собранных данных может оказаться, что их или недостаточно, или они противоречивы и поэтому не дают оснований для окончательных выводов. В таком случае исследование необходимо продолжить, внося в него требуемые дополнения.

В большинстве случаев обработку целесообразно начать с составления таблиц (сводных таблиц) полученных данных.

И для ручной, и для компьютерной обработки в исходную сводную таблицу чаще всего заносят начальные данные. Преимущественной формой математико-статистической обработки должна быть компьютерная.

Для определения способов математико-статистической обработки, прежде всего, необходимо оценить характер

распределения по всем используемым параметрам. Математико-статистическая обработка результатов исследований позволяет выявить корреляцию между величинами, что позволяет использовать для дальнейшей обработки результатов методы регрессионного анализа. Можно также использовать более сложные формы обработки информации на основе методов сплайновой аппроксимации, нейронных сетей и т. п.

При обработке результатов экспериментов необходимо использовать современные математические пакеты, в частности, электронные таблицы Excel, математические пакеты MatLab, SciLab, MathCad и т. п.

### ***1.9 Анализ и интерпретация полученных результатов, формулирование выводов по результатам исследования, оформление результатов работы***

Следующим этапом научного исследования является анализ и интерпретация полученных результатов [2,3].

Анализ собранных данных в соответствии с целями и задачами исследования – это важный и сложный этап работы, на котором осуществляется осмысление материала, выработка новой информации, формирование предложений по практическому их применению и документированию результатов исследования.

В процессе анализа собранная научная информация, факты, первичные результаты подвергаются глубокому изучению, сопоставлению, сравнению, для чего применяются специальные методы логического мышления.

Теоретическая интерпретация (трактовка, толкование) полученных результатов – самый ответственный шаг в деятельности исследователя. Для этого он должен иметь хорошую теоретическую подготовку по соответствующей дисциплине.

Установить смысл, значение собранной информации – фактов, цифр, документов – в этом и состоит задача интерпретации. Без этой информация не может служить основой для принятия решений, практических действий. Любой отдельный факт – лишь фрагмент общей картины, а осмысленные решения, как правило, могут приниматься на основании картины в целом. Именно на этапе интерпретации ранее собранные фрагменты должны сложиться воедино. Для этого необходимо правильно соотнести собранные сведения и, возможно, понять, какой еще информации не хватает.

Содержанием интерпретации может быть, в частности, обобщение информации – установление закономерностей на основе собранных фактов, выявление причинно-следственных связей между явлениями.

Эта стадия научной работы наиболее трудно поддается формализации. Именно здесь требуется наибольшее напряжение творческой энергии, привлечение знаний и опыта, накопленных в ходе предшествующей работы. И именно на этой стадии часто допускаются существенные ошибки, которые могут свести на нет все усилия исследователя.

В большинстве случаев в ходе интерпретации требуется сопоставлять разнородную информацию, например, научную, технологическую, социальную информацию, относящуюся к исследуемой проблеме, нормативные документы и материалы отчетности учреждений.

Процесс интерпретации, являясь центральным, узловым моментом информационно-аналитического этапа исследования, нередко заставляет возвращаться к этапам сбора и обработки информации, чтобы добавить недостающие фрагменты картины. Это возвращение может иметь форму короткого обращения к справочнику, но может потребовать и большой дополнительной работы.

Отметим, что полнота собранных научных данных является необходимым требованием для правильной их интерпретации. Упустив из виду какие-либо важные факты, можно прийти к ошибочным выводам даже в результате самой добросовестной интерпретации. Поэтому собранный массив сведений должен отражать все факты, существенные для данной проблемы.

Полный анализ и интерпретация полученных результатов позволяют сформулировать итоговые выводы и практические рекомендации по изучаемой проблеме.

Выводы – это утверждения, выражающие в краткой форме содержательные итоги исследования, они в тезисной форме отражают то новое, что получено самим автором. Частой ошибкой является то, что автор включает в выводы общепринятые в науке положения, уже не нуждающиеся в доказательствах.

Решение каждой из перечисленных во введении задач должно быть определенным образом отражено в выводах.

Завершающим этапом научного исследования является оформление результатов работы в виде отчета по НИР, статей, монографий и т. д. Основная задача данного этапа работы представить полученные результаты в общедоступной и понятной форме, позволяющей сравнивать их с результатами других исследователей и использовать в практической деятельности. Поэтому оформление работы должно соответствовать требованиям, предъявляемым к работам, направляемым в печать.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое гипотеза?
2. Классификация гипотез.
3. В чем заключаются условия состоятельности гипотез?
4. Что такое научная теория?
5. Перечислите виды научных исследований.
6. Перечислите основные этапы выполнения НИР.
7. Перечислите основные этапы выполнения НИОКР.
8. Чем обосновывается актуальность темы научно-исследовательской работы?
9. Что такое объект и предмет исследования?
10. Что такое научная новизна и ее элементы?
11. Какие существуют методы научных исследований?
12. Какие варианты получения новых научных результатов вам известны?



## Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Методы и особенности теоретических исследований

*Метод* – это способ достижения цели. К основным научным методам теоретического исследования относятся: формализация, аксиоматический метод, гипотетико-дедуктивный, индуктивный [1,2].

1. *Формализация* – отображение содержательного знания в знаковосимволическом виде. Она базируется на различении естественных и искусственных языков. Выражение мышления в естественном языке можно считать первым шагом формализации. Естественные языки как средство общения характеризуются многозначностью, многогранностью, гибкостью, неточностью, образностью и др. Это открытая, непрерывно изменяющаяся система, постоянно приобретающая новые смыслы и значения.

Главное в процессе формализации состоит в том, что над формулами искусственных языков можно производить операции, получать из них новые формулы и соотношения. Формализация – это обобщение форм различных по содержанию процессов, абстрагирование этих форм от их содержания. Она уточняет содержание путем выявления его формы и может осуществляться с разной степенью полноты.

2. *Аксиоматический метод* – один из способов дедуктивного построения научных теорий, при котором:

- формулируется система основных терминов науки (например, в геометрии Эвклида – это понятия точки, прямой, угла, плоскости и др.);

- из этих терминов образуется некоторое множество аксиом (постулатов) – положений, не требующих доказательств и являющихся исходными, из которых выводятся все другие утверждения данной теории по определенным правилам (например, в геометрии Эвклида: «через две точки можно провести только одну прямую»);

- формулируется система правил вывода, позволяющая преобразовывать исходные положения и переходить от одних положений к другим, а также вводить новые термины (понятия) в теорию;

- осуществляется преобразование постулатов по правилам, дающим возможность из ограниченного числа аксиом получать множество доказуемых положений – теорем. Таким образом, для вывода теорем из аксиом (и вообще одних формул из других) формулируются специальные правила вывода. Все понятия теории (обычно дедуктивные), кроме начальных, вводятся посредством определений, выражающих их через ранее введенные понятия. Следовательно, доказательство в аксиоматическом методе – это некоторая последовательность формул, каждая из которых либо есть аксиома, либо она получается из предыдущих формул по какому-либо правилу вывода.

Аксиоматический метод – только один из методов построения научного знания. Он имеет ограниченное применение, поскольку требует высокого уровня развития аксиоматизируемой содержательной теории.

3. *Гипотетико-дедуктивный метод.* Его сущность заключается в создании системы дедуктивно связанных между собой гипотез, из которых выводятся утверждения об эмпирических фактах.

Этот метод основан тем самым на выведении (дедукции) заключений из гипотез и других посылок, истинное значение которых неизвестно. Поэтому заключения носят вероятностный характер. Такой характер заключения связан еще и с тем, что в формировании гипотезы участвует и догадка, и интуиция, и воображение, и индуктивное обобщение, а также опыт, квалификация и талант исследователя. Все эти факторы почти не поддаются строго логическому анализу.

Исходные понятия: гипотеза (предположение) – положение, выдвигаемое в начале предварительного условного объяснения явления или группы явлений; предположение о существовании некоторого явления. Истинность такого допущения неопределенна, оно проблематично.

Дедукция (выведение):

- 1) в самом общем смысле – это переход в процессе познания от общего к частному (единичному), выведение последнего из первого;
- 2) в специальном смысле – процесс логического вывода, т. е. перехода по определенным правилам логики от некоторых данных предположений (посылок) к их следствиям (заключениям).

Разновидностью гипотетико-дедуктивного метода можно считать математическую гипотезу, где в качестве гипотез выступают некоторые уравнения, представляющие модификацию ранее известных и проверенных соотношений. Изменяя эти соотношения, составляют новое уравнение, выражающее гипотезу, которая относится к неисследованным явлениям. Гипотетико-дедуктивный метод является не столько методом открытия, сколько способом построения и обоснования научного знания, поскольку он показывает, каким именно путем можно прийти к новой гипотезе. На ранних этапах развития науки этот метод особенно широко использовался Галилеем и Ньютоном.

4. *Индукция* (лат. *inductio* – наведение) – логический прием исследования, связанный с обобщением результатов наблюдений и экспериментов и движением мысли от единичного к общему. В индукции данные опыта «наводят» на общее, индуцируют его. Поскольку опыт всегда бесконечен и неполон, то индуктивные выводы всегда имеют проблематичный (вероятностный) характер.

Индуктивные обобщения обычно рассматривают как опытные истины или эмпирические законы.

Выделяют следующие виды индуктивных обобщений:

- Индукция популярная, когда регулярно повторяющиеся свойства, наблюдаемые у некоторых представителей изучаемого множества (класса) и фиксируемые в посылках индуктивного умозаключения, переносятся на всех представителей изучаемого множества (класса), включая и неисследованные его части.

- Индукция неполная, в которой делается вывод о том, что всем представителям изучаемого множества принадлежит свойство  $P$  на том основании, что  $P$  принадлежит некоторым представителям этого множества. Например, «некоторые металлы имеют свойство электропроводности», значит, «все металлы электропроводны».

- Индукция полная, в которой делается заключение о том, что всем представителям изучаемого множества принадлежит свойство  $P$  на основании полученной при опытном исследовании информации о том, что каждому представителю изучаемого множества принадлежит свойство  $P$ .

Рассматривая полную индукцию, необходимо иметь в виду следующее:

- Индукция не дает нового знания и не выходит за пределы того, что содержится в ее посылках. Тем не менее, общее заключение, полученное на основе исследования частных случаев, суммирует содержащуюся в них информацию и позволяет обобщить, систематизировать ее.

- Однако хотя заключение полной индукции часто имеет достоверный характер, и здесь иногда допускаются ошибки. Последние связаны главным образом с пропуском какого-либо частного случая (иногда сознательно, преднамеренно, чтобы

«доказать» свою правоту), вследствие чего заключение не исчерпывает все случаи и тем самым является необоснованным.

- Индукция научная – кроме формального обоснования, полученного индуктивным путем обобщения, в ней дается дополнительное содержательное обоснование его истинности, в т. ч. с помощью дедукции (теории, законы). Научная индукция дает достоверное заключение, поскольку здесь акцент делается на необходимые, закономерные и причинные связи.

- Индукция математическая – используется как специфическое математическое доказательство с органическим сочетанием индукции с дедукцией, предположения с доказательством.

Индуктивные методы установления причинных связей индукции - каноны (правила индуктивного исследования Бэкона-Милля):

- метод единственного сходства, если наблюдаемые случаи какого-либо явления имеют общим лишь одно обстоятельство, то, очевидно (вероятно), оно и есть причина данного явления;

- метод единственного различия: если случаи, при которых явление наступает или не наступает, различаются только в одном предшествующем обстоятельстве, а все другие обстоятельства тождественны, то это одно обстоятельство и есть причина данного явления;

- объединенный метод сходства и различия образуется как подтверждение результата, полученного с помощью метода единственного сходства путем применения к нему метода единственного различия, это комбинация первых двух методов;

- метод сопутствующих изменений: если изменение одного обстоятельства всегда вызывает изменение другого, то первое обстоятельство есть причина второго. При этом остальные предшествующие явления остаются неизменными.

При проведении любого теоретического исследования преследуются несколько целей:

- обобщение результатов всех предшествующих исследований и нахождение общих закономерностей путем обработки и интерпретации этих результатов и опытных данных;

- изучение объекта, недоступного непосредственному исследованию;

- распространение результатов предшествующих исследований на ряд подобных объектов без повторения всего объема исследований;

- повышение надежности объекта экспериментального исследования.

Теоретические исследования начинаются с разработки рабочей гипотезы и моделирования объекта исследования и завершаются формированием теории. Теория проходит в своем развитии путь от количественного измерения параметров объекта и качественного объяснения происходящих процессов до их формализации в виде методик, правил или математических уравнений.

В основе создания любой модели лежат допущения, принимающиеся с целью отсева незначительных факторов, которыми можно пренебречь без существенного искажения условий задачи. При этом исследователь должен четко представлять соответствие принятой модели реальному объекту, поскольку необоснованное принятие допущений может привести к грубейшим ошибкам при проведении исследований. Но учет большого числа факторов, действующих на объект, может привести к сложным аналитическим зависимостям, которые не поддаются анализу [3].

*Теоретические исследования* включают в себя несколько характерных этапов:

- анализ физической сущности процессов и явлений;

- формулирование гипотезы исследования;
- построение физической модели;
- математическое исследование;
- анализ и обобщение теоретических исследований;
- формулирование выводов.

Процесс теоретических исследований сопровождается непрерывными постановкой и решением разнообразных задач, связанных с выявлением противоречий в принятых теоретических моделях.

Любая задача содержит *исходные условия*, определенные информационной системой, и *требования*, то есть цель, к которой нужно стремиться при ее решении. Исходные условия и требования задачи постоянно находятся в противоречии, и в процессе ее решения их приходится неоднократно сопоставлять и уточнять до тех пор, пока не будет получено решение задачи.

*Теоретическое знание* – это сформулированные общие для какой-либо предметной научной области закономерности, позволяющие объяснить ранее открытые факты и эмпирические закономерности, а также предсказать и предвидеть будущие события и факты.

Теоретическое знание трансформирует результаты, полученные на стадии эмпирического познания, в более глубокие обобщения, вскрывая сущности явлений, закономерности возникновения, развития и изменения изучаемого объекта.

Существуют различия между эмпирическим и теоретическим знанием. Например, газовые законы Бойля-Мариотта, Шарля и Гей-Люссака – это эмпирические законы, а обобщение этих газовых законов на основе молекулярно-кинетической теории, модели идеального газа, уравнение Клапейрона-Менделеева – это теоретическое знание.

Теоретическое исследование начинается с поиска. Выясняется, какая концепция, теория или предметная область могут объединить и собрать воедино все наработанные эмпирические результаты или их большую часть. Нередко бывает, что часть результатов не ложится в единое русло и их приходится отбрасывать. Но подчас оказывается, что чего-то из необходимых эмпирических результатов недостает, и эмпирическую часть исследования следует продолжить.

Когда предметная область определена исследователем, начинается процесс построения логической структуры теории, концепции и т. п.

Процесс построения логической структуры состоит из двух этапов. Первый этап – *этап индукции* – восхождение от конкретного к абстрактному. Исследователь должен определить центральное системообразующее звено своей теории: концепцию, систему аксиом или аксиоматических требований, или единый методологический подход и т. д.

Причем исследователю в процессе обобщения эмпирических результатов приходится, с одной стороны, постоянно обращаться к своей предметной области в аспекте требований полноты теории (образовавшиеся «пустоты» в предметной области). В дальнейшем их надо заполнять, в том числе путем дополнительной опытно-экспериментальной работы либо заимствования результатов у других авторов (естественно, со ссылками).

С другой стороны, постоянно соотносить получаемые обобщения и предметную область с совокупностью получаемых теоретических результатов в аспекте требования полноты, а также непротиворечивости строящейся концепции, теории.

Исследователь на этапе индукции детально инвентаризирует все имеющиеся у него результаты, все, что может представлять интерес. И начинает группировать их по определенным основаниям



классификаций в первичные обобщения, затем в обобщения второго порядка и так далее. Происходит индуктивный процесс – абстрагирование – восхождение от конкретного к абстрактному, пока все результаты не сведутся в авторскую концепцию – короткую (5-7 строк), но емкую формулировку, отражающую в самом общем сжатом виде всю суть теоретической работы и совокупность результатов.

Следующий этап – *время дедуктивного процесса*, то есть конкретизации – восхождения от абстрактного к конкретному.

На этом этапе формулировка концепции развивается в совокупности факторов, условий, принципов, моделей, механизмов, теорем и т. д. Принципы также могут развиваться в классы моделей, типы задач и т. д. Так выстраивается логическая структура научной теоретической работы.

Только правильно и обоснованно выбранная методика гарантирует надежность полученных при выполнении исследований результатов. Методика должна предусматривать теоретические и экспериментальные исследования.

## ***2.2 Моделирование, основные положения***

При проведении теоретических и прикладных исследований одним из наиболее распространенных методов исследования является моделирование.

Под термином «моделирование» понимают построение (создание) и изучение моделей исследуемых объектов и систем. Сама модель представляет собой абстрактное упрощенное представление исследуемого объекта в какой-либо форме (например, в математической, физической, символической, графической или дескриптивной), предназначенное для изучения определенных свойств этого объекта и позволяющее получить ответы на изучаемые вопросы.

Моделирование всегда предполагает принятие тех или иных допущений различной степени важности. При этом должны удовлетворяться следующие требования к моделям:

- адекватность, то есть соответствие модели исходной реальной системе и учет, прежде всего, наиболее важных качеств, связей и характеристик. Оценить адекватность выбранной модели особенно, например, на начальной стадии проектирования, когда вид создаваемой системы еще неизвестен, очень сложно. В такой ситуации часто полагаются на опыт предшествующих разработок или применяют определенные методы, например, метод последовательных приближений;

- точность, то есть степень совпадения полученных в процессе моделирования результатов с заранее установленными, желаемыми. Здесь важной задачей является оценка требуемой точности результатов и имеющейся точности исходных данных, согласование их как между собой, так и с точностью используемой модели;

- универсальность, то есть применимость модели к анализу ряда однотипных систем в одном или нескольких режимах функционирования. Это позволяет расширить область применимости модели для решения большего круга задач;

- целесообразная экономичность, то есть точность получаемых результатов и общность решения задачи должны увязываться с затратами на моделирование. И удачный выбор модели, как показывает практика,— результат компромисса между отпущенными ресурсами и особенностями используемой модели;

Выбор модели и обеспечение точности моделирования считается одной из самых важных задач моделирования.

По способу отображения действительности различают три основных вида моделей — эвристические, натурные (физические) и математические.

Эвристические модели, как правило, представляют собой образы, рисуемые в воображении человека. Их описание ведется словами естественного языка (например, вербальная информационная модель) и обычно неоднозначно и субъективно. Эти модели неформализуемы, то есть не описываются формально-логическими и математическими выражениями, хотя и рождаются на основе представления реальных процессов и явлений.

Эвристическое моделирование – основное средство вырваться за рамки обыденного и устоявшегося. Но способность к такому моделированию зависит, прежде всего, от богатства фантазии человека, его опыта и эрудиции. Эвристические модели используют на начальных этапах проектирования или других видов деятельности, когда сведения о разрабатываемой системе еще скудны. На последующих этапах проектирования эти модели заменяют на более конкретные и точные.

Отличительной чертой натуральных (физических) моделей является их подобие реальным системам (они материальны), а отличие состоит в размерах, числе и материале элементов и т. п.

Ими являются реальные изделия, образцы, экспериментальные и натурные модели, когда между параметрами системы и модели одинаковой физической природы существует однозначное соответствие. Выбор размеров таких моделей ведется с соблюдением теории подобия [8,9].

Физическое моделирование – основа наших знаний и средство проверки наших гипотез и результатов расчетов. Физическая модель позволяет охватить явление или процесс во всем их многообразии, наиболее адекватна и точна, но достаточно дорога, трудоемка и менее универсальна. В том или ином виде с физическими моделями работают на всех этапах проектирования.

Математические модели – формализуемые, то есть представляют собой совокупность взаимосвязанных математических и формально-логических выражений, как правило, отображающих реальные процессы и явления (физические, психические, социальные и т. д.). По форме представления бывают:

- аналитические модели. Их решения ищутся в замкнутом виде, в виде функциональных зависимостей. Удобны при анализе сущности описываемого явления или процесса и использовании в других математических моделях, но отыскание их решений бывает весьма затруднено;

- численные модели. Их решения – дискретный ряд чисел (таблицы). Модели универсальны, удобны для решения сложных задач, но не наглядны и трудоемки при анализе и установлении взаимосвязей между параметрами. В настоящее время такие модели реализуют в виде программных комплексов – пакетов программ для расчета на компьютере. Программные комплексы бывают прикладные, привязанные к предметной области и конкретному объекту, явлению, процессу, и общие, реализующие универсальные математические соотношения (например, расчет системы алгебраических уравнений);

- модель в теории алгебраических систем как совокупность некоторого множества и заданных на его элементах свойств и отношений;

- эталонная модель.

Построение математических моделей возможно следующими способами:

- аналитическим путем, то есть выводом из физических законов, математических аксиом или теорем;

– экспериментальным путем, то есть посредством обработки результатов эксперимента и подбора аппроксимирующих (приближенно совпадающих) зависимостей.

Математические модели более универсальны и дешевы, позволяют поставить «чистый» эксперимент (то есть в пределах точности модели исследовать влияние какого-то отдельного параметра при постоянстве других), прогнозировать развитие явления или процесса, отыскать способы управления ими. Математические модели – основа построения компьютерных моделей и применения вычислительной техники.

Результаты математического моделирования нуждаются в обязательном сопоставлении с данными физического моделирования – с целью проверки получаемых данных и для уточнения самой модели. С другой стороны, любая формула – это разновидность модели и, следовательно, не является абсолютной истиной, а всего лишь этап на пути ее познания.

### ***2.3 Физическое моделирование***

Физическое моделирование – обязательный этап при создании сложных технических систем. Прежде чем изготовить крупное и дорогостоящее сооружение, например мост, самолет, подводную лодку или систему теплозащиты космических аппаратов, для получения их наилучших (оптимальных) характеристик в реальных условиях работы прибегают сначала к экспериментам на моделях. При этом в эксперименте на моделях измеряют, например, в аэродинамических трубах силы, действующие на самолет на различных этапах полета, в струях плазмотронов – тепловые потоки к телам, на прессах – нагрузки, разрушающие модели мостов, и т. п. Такие эксперименты на моделях будут содержательными и полезными для проектирования натуральных объектов, если они

проводятся с соблюдением определенных правил моделирования. В противном случае результаты экспериментов представляют собой набор малосодержательных фактов, бесполезных для проектирования новых натуральных объектов. Физическое моделирование в отличие от математического – это замена изучения интересующего нас явления, протекающего в природе, изучением аналогичного (подобного) явления на модели, как правило, меньшего или большего размера (или, другими словами, на модели со значениями определяющих параметров этого явления, удобно достижимыми в эксперименте) обычно в специальных лабораторных условиях. Основным смыслом моделирования заключается в том, чтобы по результатам опытов с моделями, которые удобно и с меньшими затратами средств и времени изготовить, можно было указать наилучшие характеристики натурального изделия (процесса), а иногда просто установить неизвестные ранее закономерности. Установление искомым закономерностей с помощью физического моделирования зачастую является единственно возможным способом экспериментального изучения и решения важных и нужных практических задач. Так обстоит дело при изучении природных явлений, где процессы бывают необычайно сложны и протекают в течение десятков, сотен или даже тысяч лет. В условиях модельных опытов подобное явление может продолжаться всего несколько часов или дней. С этим мы встречаемся при моделировании явлений просачивания нефти, разрабатываемой и откачиваемой через скважины, таяния и сползания ледников и др. Могут быть и обратные случаи, когда вместо исследования очень быстро протекающего в природе явления можно экспериментально изучать подобное ему явление, происходящее на модели гораздо медленнее. Моделирование с успехом применяется в разработке новых типов самолетов, космической техники, создании ядерного оружия, кораблестроении, автомобилестроении,

биомеханике, океанологии, метеорологии, астрофизике, науке о Земле и планетах и во многих других областях человеческой деятельности [10-14]. Физическое моделирование – ответственная научная задача, имеющая общее принципиальное и познавательное значение. Оно основывается на глубоком проникновении в явление (в процесс), в разработку экспериментальных и теоретических методов исследования для получения достоверных результатов и в итоге получения систематических правил и рекомендаций для решения конкретных практических задач.

При обсуждении физического моделирования часто встречается ошибочное суждение, что физическая модель – это просто уменьшенная копия исследуемого объекта. В ошибочности такого подхода легко убедиться, поставив следующий мысленный эксперимент. Представим стеклянную трубу диаметром 10 см, по которой течет смачивающая стекло жидкость, например вода, под действием силы тяжести. Теперь уменьшим трубу до диаметра 0,1 мм. При таком диаметре труба превращается в капилляр, по которому жидкость под действием силы тяжести течь не будет. Причина этого – действие сил поверхностного натяжения и вязкости, величина которых во втором случае намного превысит действие силы тяжести. Это явление называется капиллярный эффект. Как видим, простое геометрическое уменьшение размеров исследуемого объекта привело к тому, что протекающие в исходной системе и в модели процессы стали абсолютно различными и, следовательно, такая модель не может служить для исследования процессов, происходящих в исходном объекте.

Из поставленного мысленного эксперимента вытекают два вопроса. Во-первых, до какого предела можно уменьшать диаметр трубки, для того, чтобы протекающие в трубке-модели процессы были подобны процессам в трубке – исследуемом объекте и могли

использоваться для получения информации о нем? И во-вторых, каким образом результаты, полученные на модели, можно перенести на исследуемый объект, с учетом того, что в любом случае уменьшение диаметра приводит к увеличению действия капиллярных сил (рис. 1).



Рис. 1. Капиллярный эффект

Ответы на оба этих вопроса дает теория подобия. Она же дает метод, позволяющий пересчитывать результаты, измеряемые на модели, к соответствующим величинам на исследуемом объекте – *метод обобщенных переменных*.

Сущность данного метода заключается в переходе к обобщенным переменным, когда натуральные переменные (их число зачастую достаточно велико) объединяют в существенно меньшее число **безразмерных комплексов**, имеющих определенный физический смысл. В результате устанавливаются связи не между натуральными переменными, а между обобщающими комплексами. Расчетные соотношения в обобщенных переменных обладают следующими особенностями:



- выглядят менее громоздко (более компактно), нежели соотношения, использующие натуральные (размерные) переменные;
- оказываются полезными на тех стадиях исследования явления, процесса, пока задачу не удастся решить строгими аналитическими методами;
- позволяют представить в лаконичной форме строгие аналитические решения;
- позволяют вести расчеты и интерпретировать их результаты в любой системе единиц, поскольку численные значения безразмерных комплексов не зависят от выбранной системы единиц.

Возможность перехода к обобщенным переменным обусловлена тем, что влияние отдельных переменных (факторов) в рассматриваемом процессе проявляется *не порознь, а совместно*, поэтому и рассматривать их влияние на процесс надо *не раздельно, а в совокупности*. Использование обобщенных переменных, каждая из которых включает несколько натуральных, повышает общность описания процесса, поскольку одно значение обобщенной переменной может быть реализовано при многих сочетаниях численных значений входящих в него натуральных переменных. Отсюда следует, что полученные безразмерные комплексы могут характеризовать *не единичное* явление или процесс, а *группу сходных* явлений и процессов, для которых такие комплексы имеют *одинаковые численные значения* – это положение лежит в основе понятия о **физическом подобии**.

Существуют различные пути формирования безразмерных обобщенных комплексов. Наиболее обоснованный – на базе аналитических выражений, описывающих процесс (в том числе – в дифференциальной форме). Другой путь имеет феноменологическое происхождение – здесь исходят из общих представлений о факторах, влияющих на протекание процесса, и о его закономерностях.

При этом действуют на чисто интуитивной основе либо используют *теорию размерностей*, формируя перечень переменных также интуитивно. Естественно, в обоих последних случаях обоснованность получаемых безразмерных комплексов существенно ниже, чем установленных на основе моделей, представлений о механизме процесса, его теоретического описания. В ряде случаев новая обобщенная переменная может быть получена путем комбинации уже известных.

После формирования обобщенных переменных необходимо установить между ними количественные связи, позволяющие вести инженерные расчеты с целью определения искомых натуральных переменных, входящих в безразмерные комплексы.

### *2.3.1 Геометрическое и физическое подобие*

Как указано выше, математические описания, представленные в обобщенных переменных, охватывают группы сходных объектов, явлений, процессов – их называют **подобными**. Понятие геометрического подобия (фигур, тел) введено в средней школе. Но термин «подобие» в физическом моделировании имеет более широкое толкование.

Приведем определение физически подобных явлений и проиллюстрируем его на примере течения жидкостей.

*Два физических явления подобны, если в сходственных точках геометрически подобных систем одноименные характеристики различаются только постоянными коэффициентами (множителями подобия). Математические описания подобных систем идентичны.*

Различают следующие виды подобия:

- а) геометрическое;
- б) временное;
- в) физических величин;
- г) начальных и граничных условий.

Геометрическое подобие предполагает, что сходственные размеры образца и модели параллельны, а их отношение выражается постоянной величиной.

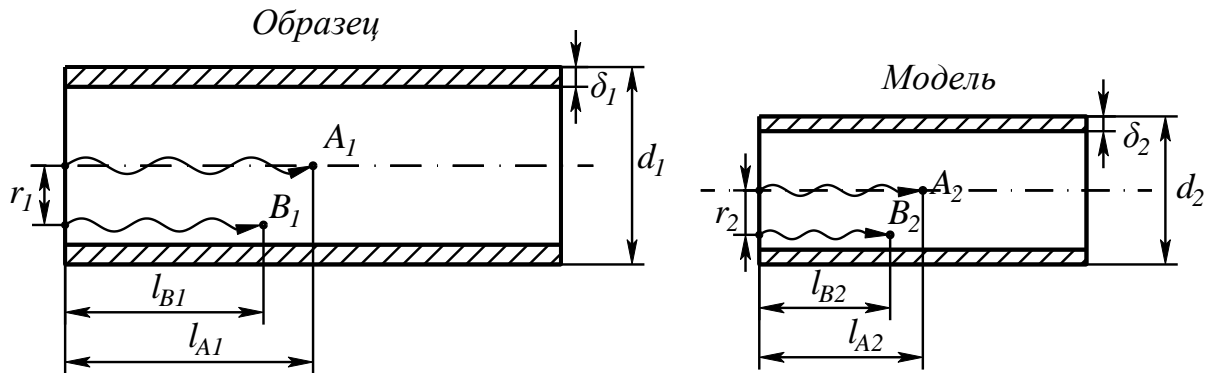


Рис. 2. Подобные течения: образец и модель

Пусть имеются, например, два геометрически подобных канала (рис. 2) – малого (его обычно называют «модель») и большого («образец») размеров; в этих каналах текут жидкости с разными свойствами (плотность, вязкость, теплоемкость и т. п.).

Если рассматриваемая система (объект, образец) находится в движении, то при наличии геометрического подобия все ее точки должны перемещаться по подобным траекториям сходственных точек подобной ей системы (модели), т. е. проходить геометрически подобные пути (точки  $A_1$  и  $A_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$ ). Геометрическое подобие соблюдается при равенстве всех сходственных размеров образца и модели:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{l_{A1}}{l_{A2}} = \frac{l_{B1}}{l_{B2}} = m_2 = \text{const} \quad (1)$$

Безразмерную величину  $m_2$  называют константой (множителем) геометрического подобия, или переходным множителем. Константа подобия характеризует отношение однородных сходственных величин в подобных системах (в данном случае – линейных размеров образца и модели) и позволяет перейти от размеров одной системы (модели) к другой (образцу).

*Временное подобие* предполагает, что сходственные точки или части геометрически подобных систем (образца и модели), двигаясь по геометрически подобным траекториям, проходят геометрически подобные пути в промежутки времени, отношение которых является постоянной величиной:

$$\frac{T_{A1}}{T_{A2}} = \frac{T_{B1}}{T_{B2}} = \frac{\tau_{A1}}{\tau_{A2}} = \frac{\tau_{B1}}{\tau_{B2}} = m_\tau = \text{const}, \quad (2)$$

где  $T_{A1}$ ,  $T_{A2}$  и  $T_{B1}$ ,  $T_{B2}$  – время прохождения сходственными частицами ( $A_1$  и  $A_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$ ) всего канала, соответственно образца и модели;  $\tau_{A1}$ ,  $\tau_{A2}$  и  $\tau_{B1}$ ,  $\tau_{B2}$  – время прохождения сходственными частицами подобных путей  $l_{A1}$  и  $l_{A2}$ ,  $l_{B1}$  и  $l_{B2}$ ;  $m_\tau$  – константа временного подобия.

В нестационарных процессах для соблюдения условия временного подобия их необходимо рассматривать интервалы между сходственными моментами времени, которые имеют общее начало отсчета. Например, в двух подобных волновых процессах изменения параметра  $\Pi$  (рис. 3) моменты времени будут сходственными, если

$$\frac{\tau_{\text{хар}}}{\tau'_{\text{хар}}} = \frac{\tau_1}{\tau'_1} = m_\tau = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\tau_{\text{хар}}$  и  $\tau'_{\text{хар}}$  – характерное время изменения параметра  $\Pi$  в процессах в образце и модели;  $\tau_1$ , и  $\tau'_1$  – время измерения параметра  $\Pi$  в этих процессах.

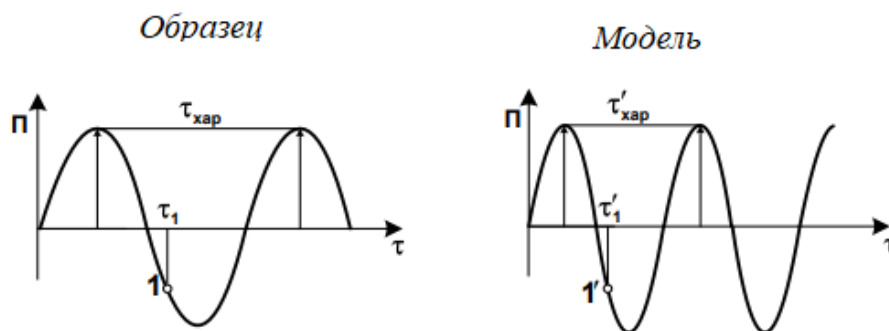


Рис. 3. Подобные волновые процессы

*Подобие физических величин* предполагает, что в рассматриваемых подобных системах (натуры и модели) отношение значений физических величин двух любых сходственных точек или частиц, подобно размещенных в пространстве и времени, есть величина постоянная.

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = m_\rho; \quad \frac{\mu_1}{\mu_2} = m_\mu; \quad \frac{p_1}{p_2} = m_p; \quad \frac{w_1}{w_2} = m_w \text{ и т. д.}, \quad (4)$$

причем  $m_i$  – множители подобия, разные для разных характеристик, но одинаковые в пределах одной характеристики для *каждой* пары сходственных точек. Иначе говоря, значения, скажем, вязкостей  $\mu_1$  и  $\mu_2$  или скоростей  $w_1$  и  $w_2$  могут быть разными в сходственных точках модели и образца, но численные значения отношений  $\mu_1/\mu_2$  или  $w_1/w_2$  для всех пар сходственных точек ( $A_1$  и  $A_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$  и др.) в модели и образце – одни и те же:  $m_\mu$ ,  $m_w$  и т. д. (разумеется, в общем случае  $m_\mu \neq m_w \neq \dots$ ). При переходе от одной пары сходственных точек к другой значения  $m_\mu$ ,  $m_w$ , ... не изменяются.

В этом смысле каждый множитель подобия выступает в качестве масштабной характеристики соответствующей физической величины.

Подобие начальных и граничных условий предполагает, что начальное состояние и состояние на границах систем (объекта и модели) подобны, т. е. отношения основных параметров в начале и на границах систем постоянны. Это справедливо лишь в тех случаях, когда для начальных и граничных условий систем выдерживаются геометрическое, временное и физическое подобия.

### 2.3.2 Суть теории подобия. Критерии подобия

Суть теории подобия заключается в следующем. Из размерных физических параметров, характеризующих исследуемый процесс, образуют безразмерные комплексы – *критерии подобия*. Число

критериев подобия в соответствии с так называемой  $\pi$ -теоремой, которую мы рассмотрим более подробно чуть ниже, должно быть равно разности числа физических параметров  $n$  и числа первичных размерностей  $k$  (кг, м, с, К и др.), входящих в эти параметры:  $\pi = n - k$ .

По результатам эксперимента в определенных условиях при изменении какого-либо из физических параметров вычисляют значения безразмерных комплексов и находят зависимость определяемого критерия подобия, в который входит искомая физическая величина от других (определяющих) критериев подобия. Эта зависимость называется *критериальным уравнением*. Устанавливаются также пределы изменения определяющих критериев подобия, при которых справедливо полученное критериальное уравнение. *Используя это уравнение, можно вычислить значение искомой величины без постановки эксперимента во множестве других, но подобных процессах, отличающихся численными значениями физических параметров.*

Основная идея теории подобия состоит в том, что из обширного класса однородных с физической точки зрения процессов, описываемых одной и той же системой дифференциальных уравнений, выбирают более узкую группу таких процессов, в пределах которой возможно распространение результатов единичных экспериментов. Процессы этой группы называются *подобными между собой*. Обычно для выделения из класса процессов какого-либо конкретного основная система дифференциальных уравнений дополняется условиями однозначности, в которые входят сведения о геометрических признаках интересующего нас объекта, о физических параметрах вещества, участвующего в процессах, о процессах, предшествующих рассматриваемому, и о процессах, происходящих на границах объекта. Критерии подобия образуют как из основных уравнений, описывающих весь класс процессов, так и из уравнений,

характеризующих условия однозначности. Равенство всех других безразмерных комплексов является следствием подобия, т. е. равенства критериев, вытекающих из условий однозначности, – определяющих критериев подобия.

*При постановке экспериментов методом физического моделирования необходимо добиваться равенства в модели и образце именно определяющих критериев подобия.* В качестве величин, изменяющихся при эксперименте, следует брать величины, входящие в определяющие критерии подобия, а обработку опытных данных вести в функции от этих критериев. Рассмотренные положения отражаются в основных теоремах теории подобия:

**Первая теорема (Ньютона – Бертрана).**

*В подобных процессах критерии подобия численно равны.*

**Вторая теорема (Федермана – Букингема).**

*Если физическое явление описывается системой дифференциальных уравнений, то всегда существует возможность представления их в виде уравнений в критериях подобия, образованных из размерных физических параметров, входящих в дифференциальные уравнения и условия однозначности.*

**Третья теорема (Кирпичева – Гухмана).**

*Подобны те процессы, условия однозначности которых подобны, и критерии подобия, составленные из условий однозначности, численно равны.*

Теория подобия лежит в основе организации, проведения эксперимента и обработки его результатов. В соответствии с первой теоремой при проведении эксперимента необходимо измерять параметры, входящие в критерии подобия. Из второй теоремы следует, что результаты экспериментов необходимо обрабатывать в критериях подобия с определением критериального уравнения и пределов его применения. По третьей теореме полученные

критериальные уравнения, полученные на основе экспериментов, проведенных на модели, можно распространять на процессы, в которых подобны условия однозначности и определяющие критерии подобия численно равны (в том числе на исследуемый объект).

### 2.3.3 Масштабные преобразования

Рассмотрим методику получения критериев подобия из дифференциальных уравнений на примере процесса теплопередачи от потока жидкости к стенке канала, по которой она протекает. Процесс описывается следующими уравнениями:

- уравнение неразрывности (сплошности), характеризующее закон сохранения массы жидкости в потоке [18]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости в точке;  $\tau$  – время;  $w_x, w_y, w_z$  – проекции скорости движения потока жидкости в точке.

В данном уравнении первое слагаемое характеризует накопление массы в окрестности точки (за счет увеличения плотности жидкости), второе, третье и четвертые слагаемые – поток приносимой потоком жидкости массы по направлениям координатных осей;

- уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости, выражающие равновесие сил, действующих в потоке:

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = P_x - \frac{dw_x}{d\tau} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} = P_y - \frac{dw_y}{d\tau} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = P_z - \frac{dw_z}{d\tau} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right); \end{cases} \quad (6)$$



где  $p$  – давление в точке;  $P_x, P_y, P_z$  – составляющие интенсивности внешних массовых сил, действующих в окрестности точки, по направлению координатных осей;  $\nu$  – кинематическая вязкость.

В данных уравнениях левая часть характеризует силы давления. В правой части первое слагаемое характеризует действие внешних массовых сил (сил тяжести, центробежных сил и т. д.); второе слагаемое характеризует силы инерции; третье слагаемое характеризует силы вязкого трения;

- уравнения Фурье-Кирхгофа, характеризующее перенос теплоты в движущейся жидкости

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c \cdot \rho}, \quad (7)$$

где  $t$  – температура в точке;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – теплоемкость жидкости;  $q_v$  – удельное теплообразование (например за счет протекания химической реакции).

В данном уравнении первое слагаемое в левой части характеризует накопление (уменьшение) теплоты в точке за счет повышения (понижения) температуры; второе, третье и четвертое слагаемые в левой части характеризуют подвод (отвод) теплоты за счет конвекции (перемешивания жидкости); первое слагаемое в правой части характеризует подвод (отвод) за счет теплопроводности теплоты; второе слагаемое в правой части характеризует теплоту, возникающую непосредственно в точке.

Условия на границе системы (в местах соприкосновения жидкости со стенками канала) характеризуются равенством нулю скорости течения жидкости в точках касания и существованием вблизи границы так называемого пограничного слоя, в котором движение жидкости происходит параллельными слоями (ламинарное

течение), а передача теплоты в пределах пограничного слоя возможна только путем теплопроводности. Как показывает практика теоретических и экспериментальных исследований, в большинстве случаев без потерь точности можно предположить, что изменение температуры от величины, равной температуре стенки, до величины, характерной для потока жидкости, происходит только в приграничном слое толщиной  $\delta_T$  (рис. 4), а в остальной толще потока температура остается постоянной.

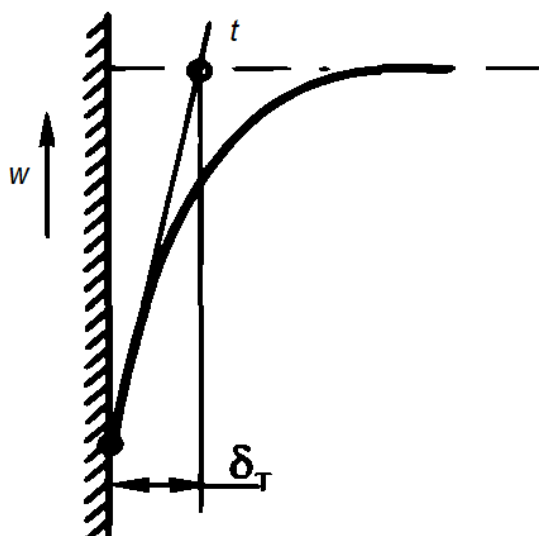


Рис. 4. Приграничный слой

Приграничный слой представляет собой основное сопротивление процессу теплопереноса от стенки канала к потоку жидкости. Интенсивность  $q$  этого теплопереноса равна

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta_T}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\delta_T$  – толщина приграничного слоя;  $\Delta t$  – разница температур между стенкой и потоком.

Так как толщина приграничного слоя является модельной величиной и ее непосредственное значение практической ценности не имеет, то отношение

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta_T} \quad (9)$$

трактуются как особая удельная характеристика – коэффициент теплоотдачи.

Более подробно о получении рассмотренных уравнений и их решении можно ознакомиться в [18]. Нас же больше интересует получение критериев подобия на их основе.

Рассмотрим путь формирования критериев подобия с помощью масштабных множителей. Такой способ их получения называется *масштабными преобразованиями*.

Продемонстрируем поначалу получение одной из обобщенных переменных на весьма простом примере уравнений неразрывности (5).

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0.$$

Запишем эти уравнения для двух подобных течений, отмечая их принадлежность к образцу либо модели индексами 1 и 2:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \tau_1} + \frac{\partial(\rho_1 w_1)}{\partial x_1} + \dots = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial \tau_2} + \frac{\partial(\rho_2 w_2)}{\partial x_2} + \dots = 0; \quad (11)$$

остальные слагаемые в левой части здесь опущены, поскольку по своей структуре они совпадают со вторыми слагаемыми.

Применим к первому уравнению масштабные преобразования, подставляя

$$\rho_1 = m_\rho \cdot \rho_2, \quad \tau_1 = m_\tau \cdot \tau_2, \quad w_1 = m_w \cdot w_2, \quad x_1 = m_l \cdot x_2,$$

причем множитель подобия для координат обозначен  $m_l$  – он *общий* для всех координат (в том числе  $y_1$  и  $y_2$ ,  $z_1$  и  $z_2$ ) и линейных размеров  $l_{1,2}$ .

Подставим теперь в уравнение образца значения всех других параметров процесса в *образце*, выражая их через соответствующие **множители подобия** и параметры процесса в *модели*. Тогда, имея в виду, что постоянные множители могут быть вынесены за знаки производных, получим новую запись для *образца*:

$$\frac{m_\rho}{m_\tau} \cdot \frac{\partial \rho_2}{\partial \tau_2} + \frac{m_\rho \cdot m_w}{m_l} \cdot \frac{\partial (\rho_2 w_2)}{\partial x_2} + \dots = 0; \quad (12)$$

Обращаем внимание на то, что данное уравнение *описывает систему 1 (образец)*, но с множителями подобия и в *символах системы 2 (модели)*.

Согласно определению физического подобия, уравнения (11) и (12) для систем 1 и 2 должны быть идентичны. Это возможно, если комплексы, содержащие множители подобия,  $\frac{m_\rho}{m_\tau}$  и  $\frac{m_\rho \cdot m_w}{m_l}$  *сокращаются*, а возможность сокращения этих комплексов означает их равенство:

$$\frac{m_\rho}{m_\tau} = \frac{m_\rho \cdot m_w}{m_l}.$$

Разумеется, в данном примере множитель  $m_\rho$  можно сократить:

$$\frac{1}{m_\tau} = \frac{m_w}{m_l}.$$

Подставим в данное выражение значения множителей подобия –  $m_\tau = \tau_1/\tau_2$ ,  $m_w = w_1/w_2$ ,  $m_l = l_1/l_2$ :

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{w_1 \cdot l_2}{w_2 \cdot l_1}.$$

Собирая величины с одинаковыми индексами (т. е. относящиеся к каждой из систем) в разные части равенства, находим

$$\frac{w_1 \cdot \tau_1}{l_1} = \frac{w_2 \cdot \tau_2}{l_2} = \frac{w \cdot \tau}{l} = \text{idem},$$

причем последний комплекс не снабжен индексом, что означает справедливость рассматриваемого равенства (одинаковые численные значения полученного комплекса  $w\tau/l$ ) *для всех подобных течений*. Этот комплекс, как и другие обобщенные переменные, *безразмерен*.

Совпадение численного значения безразмерного комплекса (в рассмотренном примере –  $w\tau/l$ ), или в других ситуациях – нескольких комплексов, является *необходимым и достаточным условием подобия* группы систем, объектов, течений, процессов. Комплекс  $w\tau/l$  называют **критерием гомохронности** и обозначают символом  $No$ . Чаще обобщенным безразмерным комплексам присваивают фамилии крупных ученых, обозначая комплексы первыми двумя буквами фамилий этих ученых.

Физический смысл комплекса  $No = w\tau/l$  ясен из предпосылок анализа: сравнивались (см. вывод уравнения неразрывности) два конкурирующих эффекта – вынужденный перенос массы жидкости (под действием перепада давления, разности уровней и т. п.) и ее накопление в выделенном объеме (за счет изменения плотности). Специально подчеркнем, что численное значение безразмерного комплекса (здесь  $No$ ; однако замечание относится к любой обобщенной переменной) *не есть прямое отношение конкурирующих эффектов, факторов*. Это их *соотношение* (т. е. отношение в каком-то *масштабе*; говорят: «масштаб отношений»), поскольку все постоянные коэффициенты, выражающие связи количественно, в комплексах, как правило, опускаются. Можно лишь утверждать, что при увеличении комплекса возрастает влияние фактора, стоящего в числителе (для  $No$  – переноса массы за счет вынужденной конвекции), а при уменьшении комплекса – фактора, стоящего в знаменателе (для  $No$  – накопления массы во времени). В частности, для стационарных процессов, где отсутствует накопление массы в

рабочей зоне, критерий Но вырождается, его численное значение стремится к бесконечности.

Конкретизация значения обобщенной переменной, при которой тот или иной эффект (фактор) становится доминирующим, обусловлена постановкой конкретной задачи; иногда это значение устанавливается экспериментально.

Метод масштабных преобразований может быть реализован в *упрощенной* форме, что, конечно, приводит к тем же результатам. Будем вести *сопоставление* (его принято обозначать символом  $\circ-\bullet$ ) конкурирующих эффектов, не принимая во внимание операцию дифференцирования, поскольку масштабные множители безразличны к этой операции. Тогда сопоставление эффектов накопления массы и ее продольного конвективного переноса изобразится в форме

$$\frac{\rho}{\tau} \circ-\bullet \frac{\rho \cdot w}{l} .$$

Сокращая на  $\rho$  и собирая все величины в одной части равенства, сразу получим критерий гомохронности; для всех подобных течений он в сходственных точках имеет одинаковое значение:

$$\frac{w \cdot \tau}{l} \equiv \text{Но} = \text{idem} . \quad (13)$$

В целях экономии места и времени при последующем изложении темы, как правило, используется упрощенный метод масштабных преобразований.

В тех случаях, когда безразмерные комплексы, определяющие протекание процесса, *заданы* по условию задачи, их обычно называют **критериями подобия**. Комплексы, содержащие *текущие* значения переменной (часто — *искомые* значения), принято называть **безразмерными числами**. Заметим, что в зависимости от постановки задачи одна и та же обобщенная переменная может выступать в роли критерия или числа.

Нередко приходится иметь дело с безразмерными переменными, записанными в виде отношения *одноименных* величин, например  $x/l$ , где  $x$  – координата, а  $l$  – основной (характерный, определяющий) линейный размер, или  $v/a$ , где  $v$  – скорость потока, а  $a$  – местная скорость звука. Такие параметрические безразмерные переменные в силу их простоты в сравнении с комплексами называют **симплексами**. Заметим, что с помощью масштабных преобразований не всегда удастся в полной мере выявить симплексы, влияющие на процесс.

При установлении понятия физического подобия говорилось о соблюдении *геометрического* подобия. Для многих технических задач полное геометрическое подобие не является необходимым – достаточно *приближенного*. Здесь две главные причины. Первая обусловлена разумной точностью инженерных решений: в ряде задач отказ от строгого геометрического подобия не приводит к существенным погрешностям, точность остается практически приемлемой. В основе второй причины лежит достаточно очевидный (и экспериментально подтвержденный) факт *разного влияния* отдельных геометрических характеристик системы (рабочей зоны) на ход технологического процесса. Ясно, например, что толщина стенки трубопровода  $\delta_{cm}$  в подавляющем большинстве случаев не сказывается на характере течения в нем жидкости или газа, поэтому не требуется геометрического подобия типа  $\delta_{cm1}/l_1 = \delta_{cm2}/l_2$ . Менее очевиден пример, касающийся формирования поля скоростей потока, поступившего в канал. Это формирование происходит на начальных участках канала; на некотором расстоянии от входа в канал оно практически завершается, после чего поле скоростей сколько-нибудь заметно не изменяется. При этом на входном участке поле скоростей зависит как от продольной координаты в направлении потока (т. е. расстояния до входного сечения), так и от нормальной к этому направлению (диаметра, ширины или глубины канала и т. п.). Но за

пределами входного участка влияние продольной координаты вырождается, влияет лишь поперечный размер канала (диаметр и т. п.). Поэтому для каналов достаточно большой протяженности во многих задачах обобщенные переменные (безразмерные комплексы и симплексы) формируются на основе только характерного нормального (к направлению течения) размера: диаметра канала, толщины зазора и т. д. Установление определяющего размера – задача исследователя, инженера.

Ниже рассмотрено формирование обобщенных переменных на основе дифференциальных уравнений переноса импульса и теплоты, а также некоторых соотношений иного происхождения и вида. По ходу изложения темы в дальнейшем будут вводиться и использоваться и другие обобщенные переменные.

#### *Гидродинамическое подобие*

Для иллюстрации достаточно сложного случая (в сравнении с уравнением неразрывности) проведем по уже известной канве подробные масштабные преобразования уравнения Навье — Стокса для стационарного течения. Выберем одну из осей координат, например ось  $z$  (во избежание громоздкости записи индекс « $z$ » опустим); тогда имеем для *подобных* течений в модели и образце (индексы 1 и 2)

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial z_1} = P_1 - \left( w_1 \frac{\partial w_1}{\partial z_1} + \dots \right) + \nu_1 \left( \frac{\partial^2 w_1}{\partial z_1^2} + \dots \right), \quad (14)$$

$$\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial z_2} = P_2 - \left( w_2 \frac{\partial w_2}{\partial z_2} + \dots \right) + \nu_2 \left( \frac{\partial^2 w_2}{\partial z_2^2} + \dots \right), \quad (15)$$

причем выражения в скобках записаны в усеченном виде, поскольку структура опущенных слагаемых та же, что и оставленных (поэтому в аспекте множителей подобия и операций с ними потери информации здесь не будет).



Выразим характеристики системы 1 через множители подобия и характеристики системы 2:

$$\rho_1 = m_p \cdot \rho_2, p_1 = m_p \cdot p_2, P_1 = m_M \cdot P_2, z_1 = m_l \cdot z_2,$$

(индекс «м» означает, что множитель  $m_m$  одинаков для *всех* массовых сил);  $w_1 = m_w \cdot w_2, v_1 = m_v \cdot v_2$ .

Подставим полученные произведения в уравнение (14):

$$\frac{m_p}{m_p \cdot m_l} \cdot \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial z_2} = m_M \cdot P_2 - \frac{m_w^2}{m_l} \cdot \left( w_2 \frac{\partial w_2}{\partial z_2} + \dots \right) + \frac{m_v \cdot m_w}{m_l^2} \cdot v_2 \left( \frac{\partial^2 w_2}{\partial z_2^2} + \dots \right). \quad (16)$$

Заметим: вторая производная по смыслу математической операции есть частное от *повторенного дважды* деления дифференцируемой величины на аргумент (именно поэтому в знаменателе записывается «квадрат» аргумента); вот почему в последнем слагаемом выражения (16)  $m_w$  получается в первой степени, а  $m_l$  – в квадрате.

Математические описания (16) для системы 1 и (15) для системы 2 по условию подобия должны быть идентичны. Этому условию отвечает равенство комплексов, составленных из множителей подобия (тогда эти комплексы можно сократить):

$$\frac{m_p}{m_p \cdot m_l} = m_M = \frac{m_w^2}{m_l} = \frac{m_v \cdot m_w}{m_l^2}$$

<i>силы</i>	<i>массовые</i>	<i>силы</i>	<i>силы</i>
<i>давления</i>	<i>силы</i>	<i>инерции</i>	<i>вязкости</i>

Здесь под каждым из комплексов записаны силы (могут быть записаны потоки импульсов), за которые по смыслу слагаемых уравнения Навье-Стокса «отвечают» соответствующие комплексы.

Сравнивая попарно рассматриваемые эффекты (в принятой трактовке – силы), можно получить 6 равенств, из коих три являются *независимыми* и дают три «основные» обобщенные переменные (остальные 3 равенства приводят к производным обобщенным

переменным, которые могут быть также получены комбинацией трех основных). Выбор равенств в качестве основных обусловлен более всего историческими причинами (традицией); в настоящее время в качестве базы приняты силы инерции, выражаемые комплексом  $m_w^2/m_l$ .

### Сопоставление сил давления и инерции.

Здесь

$$\frac{m_p}{m_\rho \cdot m_l} \circ - \bullet \frac{m_w^2}{m_l}$$

После сокращения на  $m_l$ , и подстановки значения множителей  $m_p = p_1/p_2$ ,  $m_\rho = \rho_1/\rho_2$  и  $m_w = w_1/w_2$  имеем

$$\frac{p_1 \cdot \rho_2}{p_2 \cdot \rho_1} = \frac{w_1^2}{w_2^2},$$

откуда, разводя величины с одинаковыми индексами в разные части равенства,

$$\frac{p_1}{\rho_1 \cdot w_1^2} = \frac{p_2}{\rho_2 \cdot w_2^2} = \frac{p}{\rho \cdot w^2} \equiv Eu = \text{idem} - \text{критерий (число) Эйлера.}$$

Смысл  $Eu$  ясен из названия процедуры сопоставления: это **соотношение сил давления и инерции.**

В технических процессах нас чаще всего интересует не давление  $p$  в какой-либо точке или сечении аппарата (канала, трубы), а *перепад давлений*  $\Delta p$  между определенными точками или сечениями (при рассмотрении подобных течений – между сходственными сечениями). Поэтому используют несколько иное выражение  $Eu$ :

$$Eu \equiv \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}. \quad (17)$$

### Сопоставление массовых сил с силами инерции.

В этом случае

$$m_M \circ - \bullet \frac{m_w^2}{m_l}.$$

После подстановки значений  $m_M = P_1/P_2$  (при этом вдоль оси  $z$ , если она направлена вертикально, речь может идти о единичной массовой силе тяжести, численно равной ее ускорению  $g$ ),  $m_w$  и  $m_l$  имеем

$$\frac{g_1}{g_2} = \frac{w_1^2 \cdot l_2}{w_2^2 \cdot l_1},$$

откуда, повторяя проведенную выше операцию, получаем для всех подобных течений в сходственных точках

$$\frac{g_1 \cdot l_1}{w_1^2} = \frac{g_2 \cdot l_2}{w_2^2} = \frac{g \cdot l}{w^2} \equiv Fr = \text{idem} - \text{критерий (число) Фруда. (18)}$$

Смысл  $Fr$  ясен из названия процедуры сопоставления: это **соотношение массовых сил и инерции**. Заметим, что в разных учебниках и монографиях дается *разное* написание  $Fr$ :  $gl/w^2$ ,  $w^2/gl$ ,  $w/\sqrt{g \cdot l}$  и др.; поэтому каждый раз надо оговаривать, о каком написании  $Fr$  идет речь.

Разумеется, если рассматривается течение не в поле сил тяжести, а в каком-либо ином внешнем силовом поле, то во  $Fr$  вместо ускорения свободного падения  $g$  войдет характерное ускорение соответствующего поля (например, центробежного или др.).

### **Сопоставление сил инерции и вязкости.**

Соотносятся комплексы

$$\frac{m_w^2}{m_l} \circ - \bullet \frac{m_v \cdot m_w}{m_l^2}.$$

После сокращения на  $m_w/m_l$  и подстановки значений всех множителей подобия (включая  $m_v = v_1/v_2$ ) имеем

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{v_1 \cdot l_2}{v_2 \cdot l_1},$$

откуда, разводя величины с одинаковыми индексами в разные части равенства, получаем для всех подобных течений в сходственных точках

$$\frac{w_1 \cdot l_1}{\nu_1} = \frac{w_2 \cdot l_2}{\nu_2} = \frac{w \cdot l}{\nu} \equiv \text{Re} = \text{idem} \text{ — критерии (число) Рейнольдса.}$$

Смысл числа Re, крайне широко используемого при описании процессов переноса, ясен из названия процедуры сопоставления: это **соотношение сил инерции и сил вязкости**. Заранее нельзя с определенностью сказать, при каких именно численных значениях Re будут доминировать силы инерции либо силы вязкости. Это зависит от типа рассматриваемой системы и особенностей течения. Конкретные численные значения Re, отвечающие преобладанию тех или иных сил, зачастую можно установить только экспериментально. Априори можно лишь утверждать, что увеличение Re означает *относительное возрастание* сил инерции, уменьшение Re — возрастание сил вязкости (внутреннего трения).

Процесс течения жидкости может протекать в условиях, когда численное значение Re очень велико (можно считать, стремится к бесконечности) или очень мало (стремится к нулю). Это означает, что один из конкурирующих факторов (в гидравлике — одна из сил, для Re — сила инерции или сила вязкости) становится исчезающе мал в сравнении с другим. Тогда критерий перестает контролировать процесс; говорят, что он сам (здесь — Re) и его влияние *вырождаются*.

Часто критерий Рейнольдса записывают не через кинематическую  $\nu$ , а через динамическую  $\mu = \nu \rho$  вязкость. В этом случае

$$\frac{w \cdot l}{\nu} = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu} \equiv \text{Re} = \text{idem}. \quad (19)$$

Продемонстрируем, как можно получить Re, используя *упрощенные* масштабные преобразования. С этой целью применительно к стационарному течению сопоставим второе и третье слагаемые в

правой части уравнения (14), например, для оси  $z$ , опуская символы дифференцирования:

$$w \frac{w}{l} \circ - \bullet v \frac{w}{l^2} .$$

Произведя очевидные сокращения и собрав все величины в одну часть равенства, приходим к числу Рейнольдса:

$$\frac{w \cdot l}{\nu} \equiv \text{Re} = \text{idem} .$$

Равенство численных значений каждой из обобщенных переменных —  $\text{Eu}$ ,  $\text{Fr}$ ,  $\text{Re}$  — является *необходимым и достаточным признаком подобия* для широкой группы стационарных течений. Аналогичные равенства численных значений соответствующих обобщенных переменных служат признаками подобия в процессах переноса других субстанций. В качестве линейного размера в  $\text{Re}$ ,  $\text{Fr}$  был введен некий конечный характерный размер  $l$  (его конкретный смысл устанавливается при анализе конкретного процесса). В ряде задач рассматриваемая ситуация зависит от *координаты* точки, и тогда число Рейнольдса может быть представлено, например, в виде  $\text{Re}_x = wx/\nu$ . Такое написание критерия не всегда удобно, так как обобщенная переменная содержит сразу две натуральные переменные, контролирующие процесс:  $x$  и  $w$ . В этом случае иногда удобна замена  $\text{Re}_x$  на две обобщенные переменные:

$$\text{Re}_x = \frac{w \cdot x}{\nu} = \frac{w \cdot l}{\nu} \cdot \frac{x}{l} ,$$

т. е. на  $\text{Re} = wl/\nu$  и симплекс  $x/l$  — относительную координату.

Выше было указано, что сравнение других пар эффектов может привести к другим обобщенным переменным. Так, сопоставление сил тяжести и вязкости (или соответствующих им потоков импульса) дает

$$\left\{ \frac{\text{силы тяжести}}{\text{силы вязкости}} \right\} = \left\{ \frac{\text{силы тяжести}}{\text{силы инерции}} \right\} \cdot \left\{ \frac{\text{силы инерции}}{\text{силы вязкости}} \right\} = \text{Fr} \cdot \text{Re} = \frac{g \cdot l^2}{w \cdot \nu},$$

здесь фигурные скобки означают, что речь идет не об отношениях сил, а об их соотношениях (в некоем масштабе).

Можно получить и другие комбинации критериев (безразмерных чисел), также имеющие четкий физический смысл.

#### *Тепловое подобие*

Применим к уравнению Фурье—Кирхгофа (7) упрощенные масштабные преобразования.

**Сопоставление локальной накопленной теплоты с теплотой, перенесенной путем теплопроводности.** Сопоставим первые слагаемые в левой и правой частях уравнения:

$$\frac{t}{\tau} \circ - \bullet a \frac{t}{x^2}.$$

Сокращая на  $t$  и перенося все величины в одну часть равенства, переходим к безразмерному комплексу  $a\tau/x^2$ , содержащему две переменные  $\tau$  и  $x$ , а потому — не всегда удобному при анализе и решении технологических задач. Простые преобразования, аналогичные показанным выше для  $\text{Re}_x$ , приводят к двум обобщенным переменным, содержащим каждая по одному натуральному параметру ( $\tau$  или  $x$ ):

$$\frac{a \cdot \tau}{x^2} \cdot \frac{l^2}{l^2} = \frac{a \cdot \tau}{l^2} \cdot \frac{l^2}{x^2}.$$

Первый из полученных комплексов  $a\tau/l^2 = \text{Fo}$  носит название **критерия (числа) Фурье**, второй  $x/l$  является параметрическим критерием (относительной координатой). Число Фурье широко используется в задачах, где основными в переносе теплоты являются принятые для сопоставления локальное накопление и кондуктивный поток теплоты (в их соотношении и заключается физический смысл

То), в частности — в периодических процессах нагревания (охлаждения) твердых тел.

**Сопоставление конвективного (перенос с движущейся средой) и кондуктивного потоков теплоты.** Сравниваются второе и т. п. слагаемые в левой части уравнения Фурье и первое слагаемое в правой его части:

$$w \frac{t}{x} \circ - \bullet a \frac{t}{x^2} .$$

После преобразований, аналогичных выполненным ранее, приходим к не всегда удобному безразмерному комплексу  $w x / a$ ; умножая его на  $l / l$ , получаем уже известный симплекс  $x / l$  и обобщенный комплекс, называемый **числом (критерием) Пекле**:  $w l / a = Pe$ . Этот комплекс широко используется в задачах, где основу процесса составляют конвективный и кондуктивный тепловые потоки (в их соотношении и заключается физический смысл  $Pe$ ), в частности — во многих задачах непрерывного и периодического теплообмена с участием жидкостных и газовых потоков.

Сопоставление первого и второго слагаемых в левой части (7) приведет к уже знакомому нам критерию гомохронности. Можно, конечно, проследить результаты сопоставления и других пар слагаемых в уравнении переноса теплоты, получив критерии, характеризующие соотношения соответствующих тепловых потоков. Численные значения полученных критериев в сходственных точках систем для всех подобных процессов теплопереноса одинаковы.

#### *Подобие в переносе различных субстанций*

До сих пор подобие явлений анализировалось в пределах переноса *отдельной* субстанции — импульса или теплоты. Однако сходство уравнений переноса (а в его основе, конечно, — сходство в физических явлениях, в механизмах переноса разных субстанций)

позволяет сопоставлять сходные эффекты для различных субстанций – независимо от их природы. Особенно плодотворным оказалось сопоставление потоков субстанций, выражаемых слагаемыми с лапласианом. Эти слагаемые, изначально сформулированные на основе удельных потоков импульса, теплоты, вещества и градиентов соответствующих потенциалов, характеризуют в конечном итоге поля скоростей или температур.

Если отвлечься от природы субстанции, то сопоставление указанных потоков импульса и теплоты дает безразмерный комплекс  $Pr = \nu/a$  – **число (критерий) Прандтля**, характеризующий связь скоростного и температурного полей. Заметим, что  $Pr$  может быть получен также как отношение чисел  $Pe$  и  $Re$ , сформулированных при сопоставлении сходных пар слагаемых в уравнениях Навье-Стокса и Фурье-Кирхгофа:

$$\frac{Pe}{Re} = \frac{\frac{wl}{a}}{\frac{wl}{\nu}} = \frac{\nu}{a} = Pr. \quad (20)$$

#### *Обобщенные переменные на базе других уравнений и представлений*

Обобщенные переменные могут быть сформированы на основе различных модельных представлений и теоретических соотношений; обоснованность таких переменных определяется достоверностью предпосылок, на которые опираются эти представления и соотношения. Продемонстрируем упомянутые возможности на некоторых примерах.

При описании граничных условий процесса теплопереноса на основе понятия о пограничном слое было получено выражение (9), согласно которому  $\alpha = \lambda/\delta_T$ . Это выражение, за очень редким исключением, не является расчетным ввиду неопределенности толщины тепловой пограничной пленки  $\delta_T$ . Однако масштабные преобразования позволяют и здесь путем замены  $\delta_T$  на определяющий



линейный размер  $l$  сформировать безразмерный комплекс, имеющий вполне определенный физический смысл:

$$\alpha \circ - \bullet \frac{\lambda}{\delta_T} \rightarrow \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \equiv \text{Nu} \text{ — число Нуссельта,} \quad (21)$$

представляющее собой соотношение интенсивностей теплового потока *по одну сторону* поверхности теплообмена, выраженных в форме конвективного ( $\alpha$ ) и кондуктивного ( $\lambda$  и  $l$ ) эффектов.

Обобщенная переменная может быть сформирована на базе граничных условий. Покажем это на примере граничных условий III рода. Рассмотрим некий участок поверхности  $\Delta F$  на границе твердого тела (пусть горячего) и омывающей его холодной жидкости (рис. 5). Удельный поток теплоты из внутренних зон твердого тела к его границе согласно закону Фурье составляет

$$q = -\lambda_T \left| \frac{\partial t}{\partial x} \right|,$$

где  $x$  — направление нормали к площадке  $\Delta F$ .

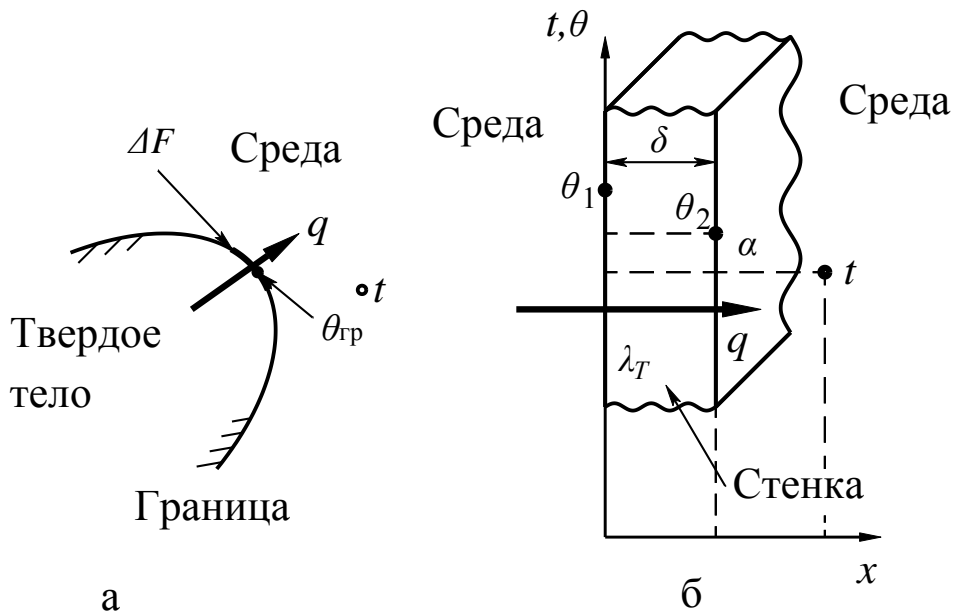


Рис. 5. К формированию критерия Био:  
 а — нестационарный режим (выпуклое тело),  
 б — стационарный режим (плоская стенка)

Поскольку на границе теплота накапливаться не может, то она целиком отводится конвекцией, причем удельный конвективный поток равен  $\alpha \cdot \Delta t$ , где  $\Delta t = \theta - t$  – разность температур поверхности тела и среды (движущая сила конвективной теплоотдачи). Для поверхности  $\Delta F$  полные потоки теплоты (изнутри тела на его границе и снаружи) запишутся в виде равенства

$$\lambda_T \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{gr} \cdot \Delta F = \alpha \cdot \Delta t \cdot \Delta F. \quad (22)$$

После сокращения на  $\Delta F$ , путем упрощенных масштабных преобразований

$$\lambda_T \cdot \frac{t}{l} \circ - \bullet \alpha \cdot t$$

получаем безразмерный комплекс  $\alpha \cdot l / \lambda_T = Bi$  – **критерий Био**.

Важно: поскольку речь идет о потоке теплоты *на границе* [индекс «гр» в выражении (22)], то в  $Bi$  входит не переменная координата  $x$ , а определяющий линейный размер  $l$ .

Несмотря на *внешнее* сходство, критерий  $Bi$  не является аналогом числа  $Nu$ . (Внимание: в знаменателе  $Nu$  стоит теплопроводность *среды*, омывающей твердое тело, в знаменателе  $Bi$  – теплопроводность *этого тела*.) Число Нуссельта возникло как результат разной формы записи потока теплоты от тела к сплошной среде (в терминах и символах конвекции и теплопроводности). Но это *один и тот же поток снаружи тела*; в этом смысле  $Nu$  – формален. Критерий Био сформирован на основе анализа тепловых потоков *по разные стороны от границы* тела и омывающей его среды. Поэтому  $Bi$  – физически обоснованный критерий, выражающий соотношение тепловых потоков снаружи и внутри тела.

При проведении расчетов критерий Био обычно является заданным и используется для обоснования подобия процессов, а критерий Нуссельта обычно является определяемым.

#### 2.3.4. Критериальные уравнения

Количественные связи обобщенных переменных устанавливаются путем теоретического анализа (это удается далеко не всегда) или с помощью специально поставленного эксперимента. Эти связи носят название **критериальных уравнений**, например типа  $Eu=f(Re, Fr, \dots)$  или  $Nu=f(Re, Pr, \dots)$ .

Полученные уравнения справедливы («работают») для подобных процессов (в гидравлике – течений, в теплообмене – процессов теплопереноса определенного типа и т. д.) *в найденных теоретически или проверенных экспериментально диапазонах изменения обобщенных переменных*. Поскольку здесь устанавливаются диапазоны в *обобщенных* переменных, то составляющие их натуральные переменные могут варьироваться более широко (кстати, и более узко), лишь бы обобщенные переменные в своем изменении не выходили за обусловленные границы. Важно понимать, что критериальные уравнения за пределами установленных диапазонов теряют надежность, точность, прогнозность в количественном смысле, а в ряде случаев – и в качественном.

Вид критериальных уравнений при теоретическом отыскании количественных связей вытекает из математического анализа. При эмпирическом подходе эти связи чаще всего представляют в виде степенных функций, например  $Nu = a \cdot Re^n \cdot Pr^m$ , причем параметры уравнения  $a$ ,  $n$ ,  $m$  определяются обработкой экспериментальных данных. Степенной вид критериальных формул в общем случае, конечно, не отражает какого-либо физического закона (природа совсем не отдает предпочтения степенным зависимостям). Просто степенные зависимости удобны, поскольку в логарифмических координатах они изображаются прямыми линиями (это, кстати, облегчает определение параметров уравнения); кроме того, такая

манера представления опытных данных в какой-то мере еще и дань традициям.

Надежность полученных критериальных уравнений определяется правильностью физических представлений и построенных на их основе моделей (если речь идет о теоретических зависимостях), обоснованностью выбора переменных и достаточной широтой эксперимента (если зависимости – эмпирические). Во всех случаях должны быть указаны **границы применимости** критериальных зависимостей.

#### Пример

Теплоотдача в трубах и каналах при турбулентном режиме осуществляется путем передачи тепла при интенсивном перемешивании слоев жидкости. Критериальное уравнение теплообмена для расчета средней теплоотдачи в трубах и каналах в этом случае имеет вид

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

Критерии подобия  $Re$  и  $Pr$  берутся при средней температуре жидкости. Число Прандтля с индексом «с»  $Pr_c$  берется при температуре стенки. Представленное критериальное уравнение применяется в диапазоне чисел  $Re$  от  $1 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^6$  и  $Pr$  от 0,6 до 2500.

#### 2.3.5 *Обобщенные переменные и пропускные способности.*

##### *Вырождение критериев подобия*

Обобщенные переменные (безразмерные числа, критерии подобия – комплексы и симплексы) представляют собой соотношения конкурирующих факторов, эффектов. В качестве таких факторов могут выступать потоки субстанции (или их коренные фрагменты), определяющие сущность протекающих процессов. В этом аспекте обобщенные переменные (по крайней мере многие из них) вполне могут трактоваться как *соотношения пропускных способностей* тех или иных *стадий процесса*.

При таком подходе яснее очерчиваются диапазоны условий, в которых та или иная стадия процесса становится доминирующей или, наоборот, ее влияние будет исчезающе малым (так что ее можно игнорировать при описании процесса) – выше такие ситуации мы связывали с вырождением критериев подобия.

Продемонстрируем высказанные положения некоторыми примерами.

Рассмотрим сначала перенос теплоты от горячей плоской стенки (см. рис. 5, б) к потоку омывающей ее (пусть справа) холодной среды. Будем рассматривать две последовательные стадии теплопереноса: через стенку (ее теплопроводность  $\lambda_T$ , толщина  $\delta$ ) и от стенки к среде (интенсивность теплообмена определяется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ ). Кондуктивный поток теплоты внутри тела через поверхность  $F$  составляет

$$Q = -\lambda_T \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right| F,$$

очевидно, что для плоской стенки

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\Delta \theta}{\delta},$$

где  $\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2$  – разность температур на левой и правой сторонах стенки. Пропускная способность *кондуктивной стадии* теплопередачи (согласно определению пропускных способностей) составляет

$$\frac{Q}{\Delta \theta} = \frac{\lambda_T}{\delta} F.$$

Тот же поток теплоты, отводимый к среде путем конвективной теплоотдачи, равен  $Q = \alpha \Delta t \cdot F$ , причем здесь  $\Delta t = \theta_2 - t$ . Тогда пропускная способность *конвективной стадии* теплопередачи составляет

$$\frac{Q}{\Delta t} = \alpha \cdot F.$$

Отношение пропускных способностей конвективной (снаружи стенки) и кондуктивной (внутри нее) стадий теплопередачи приводит к уже полученному ранее критерию Био:

$$\frac{\alpha \cdot F}{\frac{\lambda_T}{\delta} \cdot F} = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda_T} \equiv \text{Bi}.$$

При таком подходе к формированию критерия четко видны как его *физический смысл*, так и *условия вырождения*. Действительно, если теплопроводность стенки высока, да еще мала толщина ее  $\delta$ , а теплообмен со средой затруднен (низкие коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$ ), то пропускная способность кондуктивного потока много больше, нежели конвективного. В этих условиях интенсивность теплопередачи *всего определяет стадией конвекции*: сколько на этой стадии будет пропущено теплоты (от стенки к среде), столько вообще будет передано теплоты в ходе теплопередачи (т. е. на обеих стадиях вместе). А кондуктивный перенос теплоты в этом случае может протекать очень интенсивно, поэтому он совсем не сдерживает (*не лимитирует*) интенсивность теплопередачи. Можно считать, что здесь кондуктивная пропускная способность  $(\lambda_T/\delta) \cdot F \rightarrow \infty$  (характерный температурный напор  $\Delta\theta \rightarrow 0$ ); критерий Био  $\text{Bi} \rightarrow 0$ , т. е. его влияние на процесс теплопереноса вырождается. В обратной ситуации крайне интенсивен конвективный теплоперенос, т. е.  $\alpha \cdot F \rightarrow \infty$  (при этом  $\Delta t \rightarrow 0$ ), а вот теплоперенос в стенке будет малоинтенсивным – в силу низкой теплопроводности стенки  $\lambda_T$  и (или) большой ее толщины  $\delta$ .

Тогда теплопередача *контролируется* (еще говорят: *определяется, лимитируется*) *кондуктивной стадией*,  $\text{Bi} \rightarrow \infty$ , и его влияние на процесс также вырождается.

Вырождение критериев Био означает, что в обоих рассматриваемых случаях  $Bi$  не войдет в уравнения, описывающие эти крайние случаи теплопередачи. Однако *при сопоставимости пропускных способностей* конвективной и кондуктивной *стадий* пренебрегать интенсивностью какой-либо одной из них относительно другой нельзя – тогда критерий Био будет (прямо или в завуалированной форме) входить в расчетные соотношения теплопередачи.

Аналогичным образом, применительно, например, к трубе диаметром  $d$  и длиной  $l$ , могут быть сформированы критерии Пекле  $Pe$  – как соотношения пропускных способностей *продольного* переноса теплоты путем вынужденной конвекции

$$\frac{Q}{t'' - t'} = G \cdot c = \rho \cdot w \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c$$

и *нормального* к направлению движения среды кондуктивного теплового потока

$$\frac{\lambda}{d} F = \frac{\lambda}{d} \cdot \pi \cdot d \cdot l.$$

С точностью до постоянных множителей

$$\frac{G \cdot c}{\frac{\lambda}{d} F} = \frac{w \cdot d}{a} \cdot \frac{d}{l} = Pe \cdot \frac{d}{l}.$$

Специально подчеркнем, что сопоставление пропускных способностей *продольного* конвективного потока теплоты и *нормального* кондуктивного потока теплоты приводит к *произведению*  $Pe$  на симплекс  $d/l$ . Заметим: при строгом геометрическом подобии множитель  $d/l$  принял бы для подобных явлений постоянное значение; в критерии он просто не был бы включен. При сопоставлении пропускных способностей *продольных* конвективного и кондуктивного потоков множители  $d/l$  отсутствовали бы.

В той же манере формируется, например, число Нуссельта  $Nu$  – как соотношение пропускных способностей  $\alpha \cdot F$  и  $(\lambda/d) \cdot F$ , а также

ряд других обобщенных переменных. В частности, при сопоставлении пропускных способностей конвективных тепловых потоков – нормального к поверхности теплообмена  $\alpha \cdot F = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l$  и продольного вынужденного

$$G \cdot c = \rho \cdot w \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c$$

получается для теплообменной трубы диаметром  $d$  и длиной  $l$  безразмерное число

$$\frac{\alpha \cdot F}{G \cdot c} = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l}{\rho \cdot w \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c} = \frac{\alpha}{w \cdot \rho \cdot c} \cdot \frac{l}{d},$$

причем безразмерный комплекс  $\alpha/(w \cdot \rho \cdot c)$  используется при описании теплообменных процессов.

Из приведенных выше примеров видно, что сопоставление пропускных способностей стадий позволяет (помогает) выявить определяющий линейный размер, входящий в критерии подобия для конкретного анализируемого явления, процесса.

Сопоставление пропускных способностей нередко приводит к обобщенным переменным, не используемым (обычно или пока еще) в качестве безразмерных чисел и критериев подобия. Иногда выражение отношений пропускных способностей стадий указывает на необходимость корректировки общепринятого написания критериев подобия или объясняет появление поправок в критериальных и других соотношениях. В целом метод пропускных способностей расширяет возможности использования обобщенных переменных для решения технических задач. При этом в ряде случаев существенно яснее становятся физический смысл явлений и процессов, а также границы (диапазоны) целесообразности использования того или иного расчетного метода.



### 2.3.6. Анализ размерностей

В тех случаях, когда дифференциальные уравнения исследуемого процесса либо уравнения, описывающие граничные условия неизвестны, но выявлены все факторы, влияющие на протекающий процесс сформировать критерии подобия можно исходя из анализа размерностей

Пусть ищется какая-либо зависимость, определяющая искомую величину  $a$  как функция  $n$  определяющих параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, a_n) \quad (23)$$

Если эта зависимость выражает некоторую физическую закономерность, то она должна отражать тот бесспорный факт, что функция (23) не должна зависеть от произвола выбора единиц измерения. Для получения следствия из этого факта разобьем параметры  $a, a_1, a_2, \dots, a_n$  на две группы, как это сделано в (23). В первую группу ( $a_1, a_2, \dots, a_k; k \leq n$ ) включаются величины с независимыми размерностями (например, некоторая длина, скорость, плотность и т.д.); во вторую группу ( $a, a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n$ ) входят остальные параметры с размерностями, выражаемыми через размерности величин первой группы. Тогда размерности величин  $a, a_{k+1}, \dots, a_n$  будут выражаться в виде произведений степеней от размерностей параметров  $a_1, a_2, \dots, a_k$ :

$$\begin{aligned} [a] &= [a_1]^\alpha \cdot [a_2]^\beta \cdot \dots \cdot [a_k]^\gamma, \\ [a_{k+1}] &= [a_1]^{\alpha_{k+1}} \cdot [a_2]^{\beta_{k+1}} \cdot \dots \cdot [a_k]^{\gamma_{k+1}}, \\ &\vdots \\ [a_n] &= [a_1]^{\alpha_n} \cdot [a_2]^{\beta_n} \cdot \dots \cdot [a_k]^{\gamma_n}. \end{aligned} \quad (24)$$

Степени  $\alpha, \beta, \dots, \gamma$  получаются сравнением размерностей левых и правых частей в (24). При этом величины, как легко установить,

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{a}{a_1^\alpha \cdot \dots \cdot a_k^\gamma}, \dots, \Pi_{k+1} = \frac{a_{k+1}}{a_1^{\alpha_{k+1}} \cdot \dots \cdot a_k^{\gamma_{k+1}}}, \\ \Pi_{k+i} &= \frac{a_{k+i}}{a_1^{\alpha_{k+i}} \cdot \dots \cdot a_k^{\gamma_{k+i}}}, \dots, \Pi_n = \frac{a_n}{a_1^{\alpha_n} \cdot \dots \cdot a_k^{\gamma_n}} \end{aligned} \quad (25)$$

оказываются безразмерными (числители и знаменатели в них имеют одинаковые размерности), то есть их значения будут одними и теми же при любом выборе единиц измерения. Из независимости физической закономерности (23) от выбора единиц измерения вытекает, что соответствующее ей соотношение можно представить в виде зависимости только между безразмерными параметрами [7]

$$\Pi = \Phi(\Pi_{k+1}, \dots, \Pi_n), \quad (26)$$

а сама искомая зависимость принимает вид

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, a_n) = a_1^\alpha \cdot \dots \cdot a_k^\gamma \cdot \Phi(\Pi_{k+1}, \dots, \Pi_n), \quad (27)$$

то есть искомая функция на самом деле всегда может быть представлена через функцию меньшего числа безразмерных аргументов. Число аргументов в (26) меньше исходного числа  $n$  на столько, сколько среди величин  $a_1, a_2, \dots, a_n$  имеется величин с независимыми размерностями. Уменьшение числа аргументов упрощает исследование, иногда существенно. Приведение искомой закономерности к безразмерному виду (26) называется пи-теоремой ( $\pi$ -теорема). В связи с принятым ранее определением подобных явлений параметры  $\Pi_{k+1}, \dots, \Pi_n$  называются параметрами подобия, тогда зависимость (26) между критериями подобия будет являться критериальным уравнением и она будет единой для образца и модели.

### 2.3.7 Правило пересчета опытов с подобной модели на образец

Если условия подобия выполнены, то должны выполняться равенства *определяющих* процесс критериев подобия (25)

$$\Pi_{k+1}^{(o)} = \Pi_{k+1}^{(m)}, \dots, \Pi_n^{(o)} = \Pi_n^{(m)}. \quad (28)$$

Здесь верхние индексы (о) и (м) относятся соответственно к образцу и модели. Следовательно, с учетом (28) из (26) получаем равенство безразмерной *определяемой* величины для модели и образца

$$\Pi^{(o)} = \Pi^{(m)}. \quad (29)$$

Возвращаясь от равенства (29) обратно к размерным переменным  $a, a_1, \dots, a_k$ , с учетом первой формулы (25) получим простое правило пересчета результатов измерений с подобного модельного явления на натурное явление в виде

$$a^{(o)} = a^{(m)} \cdot \left( \frac{a_1^{(o)}}{a_1^{(m)}} \right)^\alpha \cdot \left( \frac{a_2^{(o)}}{a_2^{(m)}} \right)^\beta \cdot \dots \cdot \left( \frac{a_k^{(o)}}{a_k^{(m)}} \right)^\gamma. \quad (30)$$

Все, что стоит справа в (30) после  $a^{(m)}$ , часто называют *переходным масштабом*. Для  $k$  величин с независимыми размерностями  $a_1, a_2, \dots, a_k$  переходные масштабы могут быть произвольными, и их нужно задавать или определять условиями задачи, а при экспериментах – из опытов, имея в виду получение максимальной простоты и удобство моделирования. Переходные масштабы для всех же остальных размерных величин  $a_{k+1}, \dots, a_n$  для обеспечения подобия модели натуре получаются из условий (28) с использованием формул (25):

$$\begin{aligned} \Pi_{k+1}^{(m)} = \Pi_{k+1}^{(o)} : a_{k+1}^{(m)} &= a_{k+1}^{(o)} \cdot \left( \frac{a_1^{(m)}}{a_1^{(o)}} \right)^{\alpha_{k+1}} \cdot \left( \frac{a_2^{(m)}}{a_2^{(o)}} \right)^{\beta_{k+1}} \cdot \dots \cdot \left( \frac{a_k^{(m)}}{a_k^{(o)}} \right)^{\gamma_{k+1}}, \\ &\vdots \\ \Pi_n^{(m)} = \Pi_n^{(o)} : a_n^{(m)} &= a_n^{(o)} \cdot \left( \frac{a_1^{(m)}}{a_1^{(o)}} \right)^{\alpha_n} \cdot \left( \frac{a_2^{(m)}}{a_2^{(o)}} \right)^{\beta_n} \cdot \dots \cdot \left( \frac{a_k^{(m)}}{a_k^{(o)}} \right)^{\gamma_n}, \end{aligned} \quad (31)$$

### 2.3.8 Приближенное моделирование

На практике часто выполнение всех условий подобия одновременно бывает затруднено (они всегда выполняются, если модель совпадает с натурой, но тогда моделирование теряет всякий смысл), и тогда встает вопрос о величине погрешностей (масштабном эффекте), которые возникают при переносе на натуру результатов, полученных на модели. Здесь возникает проблема приближенного моделирования (иногда часть безразмерных параметров слабо влияет на результат, тогда выполнение некоторых критериев (28) можно игнорировать, иногда прибегают к частичному или локальному моделированию, условия для которого ослаблены по сравнению с условиями полного моделирования (28)). Рассмотрим на примерах.

*Пример 1. Задача об определении сопротивления тела, движущегося поступательно в безграничной вязкой жидкости с постоянной скоростью.*

Данная задача описывается уравнениями Навье-Стокса, рассмотренными ранее, и вытекающими из них критериями подобия. Однако для иллюстрации второго подхода рассмотрим данную задачу с точки зрения теории размерностей.

Рассмотрим движение тела с постоянной скоростью  $w$  в вязкой несжимаемой безграничной (занимающей очень большой по сравнению с телом объем) жидкости, свойства которой определяются плотностью  $\rho$  и коэффициентом вязкости  $\mu$ . Тело-модель должно быть геометрически подобно телу-образцу; направление скорости по отношению к соответствующим осям тела в модельном и натурном движениях должно быть одинаковым (условие кинематического подобия). Это приводит к равенству для модельного и натурального явлений соответствующих геометрических и кинематических параметров подобия. В качестве определяющего геометрического размера возьмем, например, диаметр его поперечного сечения  $d$  (миделя). Размерности определяющих параметров в классе LMT

(длина, масса, время)  $[w] = LT^{-1}$ ,  $[d] = L$ ,  $[\rho] = ML^{-3}$ ,  $[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$ , то есть  $n=4$ ,  $k=3$ . Следовательно, помимо геометрических и кинематических параметров подобия имеется только один динамический параметр подобия, равный

$$\Pi_1 = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu} \equiv \text{Re}.$$

Это уже знакомый нам по масштабным преобразованиям критерий или число Рейнольдса. Остальные критерии подобия, вытекающие из уравнений Навье-Стокса (критерии Эйлера и Фруда), мы не получили, так как в данном случае они являются вырожденными, ибо характеризуемые ими эффекты (определяемые массовыми силами и силами давления) не оказывают существенного влияния на рассматриваемый процесс. *Таким образом, при правильном выявлении всех влияющих на процесс параметров, метод формирования критериев подобия через анализ размерностей имеет достоинство, заключающееся в автоматическом исключении из дальнейшего рассмотрения выродившихся критериев подобия.*

Определим теперь силу сопротивления  $F$ , размерность которой  $[F] = [\rho w^2 S]$ ,  $S \sim d^2$  – площадь поперечного сечения тела. Тогда, согласно  $\pi$ -теореме, получаем

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot w^2 \cdot S \cdot \Phi(\text{Re}). \quad (32)$$

Функцию  $\Phi$  можно определить экспериментально или теоретически, решая, как правило, численно соответствующую гидродинамическую задачу об обтекании тела вязкой несжимаемой жидкостью. Нахождение функции одной переменной существенно легче, чем функции четырех переменных. На рис. 6 представлен коэффициент сопротивления  $\zeta \equiv F/(0,5\rho w^2 S) = \Phi(\text{Re})$ ;  $S = \pi d^2/4$  для шара с диаметром  $d$ . Данные многочисленных экспериментов, полученные в различных жидкостях и воздухе (рис. 6), с хорошей точностью ложатся на единую кривую. Как мы видим, эта кривая

имеет достаточно сложный вид: участки плавного изменения  $\Phi(Re)$  сменяются резким уменьшением или нарастанием, имеются участки, на которых  $\Phi(Re)$  почти не зависит от  $Re$ . Все это свидетельствует об изменении режимов течения при изменении числа Рейнольдса, в частности о переходе ламинарного режима обтекания к турбулентному (при  $Re \geq 10^5$ ), которое представляет собой единственный параметр, определяющий структуру потока в целом при обтекании сферы.

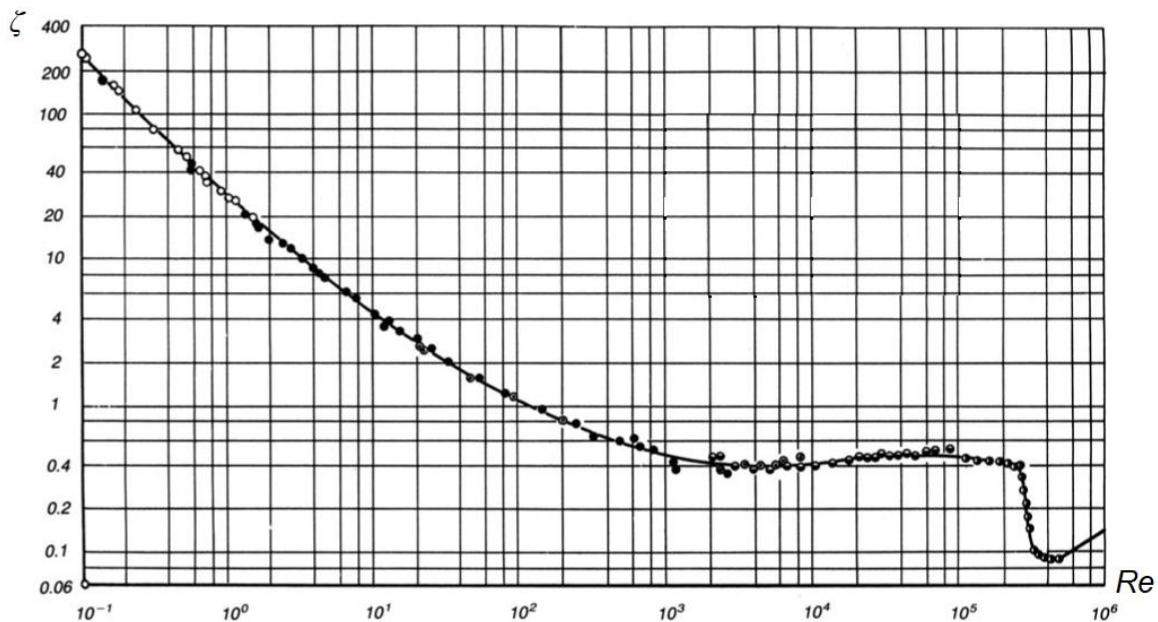


Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления  $\zeta$  шара при обтекании его потоком жидкости и газа. Различным видом маркеров обозначены результаты экспериментов, проведенных в различных средах

Если моделирование движения тела осуществляется в той же жидкости (газе), что и натурное движение, а следовательно, параметры  $\rho$  и  $\mu$  в образце и модели одинаковы, то условие динамического подобия сводится к равенству произведения  $w \cdot d$  в модели и натуре, так что скорость движения геометрически, кинематически и динамически подобной модели малых размеров ( $d^{(m)} \ll d^{(o)}$ ) должна быть больше скорости натуре ( $w^{(m)} \gg w^{(o)}$ ), но так, чтобы  $w^{(m)} \cdot d^{(m)} = w^{(o)} \cdot d^{(o)}$ . Если геометрическое и кинематическое условия всегда можно реализовать в эксперименте, то условие  $w \cdot d = \text{const}$ , как правило, трудно выполнить, особенно в тех случаях,

когда обтекаемое тело имеет большие размеры, как, например, подводная лодка или крыло самолета. Если модель меньше натуре, то для сохранения того же самого значения числа Рейнольдса в опыте с моделью необходимо либо увеличивать скорость набегающего потока, что практически обычно неосуществимо, либо соответственно увеличить плотность или уменьшить вязкость потока. На практике эти обстоятельства сильно затрудняют изучение аэродинамического сопротивления в эксперименте. Выполнение необходимого условия равенства числа Рейнольдса в опыте числу Рейнольдса в натуре привело к постройке гигантских аэродинамических труб, в которых можно производить продувки самолетов в натуре, а также труб закрытого типа, в которых циркулирует с большой скоростью сжатый, то есть более плотный, воздух. Специальные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что иногда для тел с хорошо обтекаемой формой, например для крыла, со срывом потока на задней кромке крыла число Рейнольдса заметно влияет только на безразмерный коэффициент лобового сопротивления и иногда очень слабо влияет на безразмерный коэффициент подъемной силы и некоторые другие величины. Следовательно, различие в значениях числа Рейнольдса для модели и натуре в некоторых вопросах несущественно. В этом случае приходим к возможности частичного моделирования. При больших скоростях обтекания, например воздухом ( $w > 200$  км/ч), появляется второй критерий подобия – число Маха  $w/a$  ( $a$  – скорость звука). В этом случае полное моделирование одновременно по числам Рейнольдса и Маха становится невозможным.

*Пример 2. Движение корабля.*

Вопросы моделирования имеют большое практическое значение в задачах о плавании и движении кораблей на поверхности воды. Рассмотрим установившееся прямолинейное поступательное движение корабля на поверхности покоящейся глубокой жидкости.

При движении корабля сопротивление зависит от вязкости и волнового сопротивления, обусловленного образованием волн на поверхности жидкости за счет ее раздвигания корпусом корабля. Сопротивление за счет вязкости уменьшается с увеличением числа Рейнольдса и составляет при достаточно быстром движении корабля хорошо обтекаемой формы (с отрывом потока в корме) малую долю волнового сопротивления и может быть определено отдельно. Такое приближенное вполне достаточное для практики разделение сопротивления на две составляющие: одну, определяемую свойством вязкости, и другую (волновую), определяемую свойством весомости жидкости – подтверждается как теоретическими, так и экспериментальными исследованиями. Волновое сопротивление модели, геометрически подобной натуре, так же как и сопротивление натуре, будет зависеть от

$$L = a_1 \text{ (длина корабля),}$$

$D = a_2$  (объемное водоизмещение – очевидно, что положение корабля относительно воды (осадка) влияет на сопротивление),

$$\rho = a_3 \text{ (плотность жидкости),}$$

$$g = a_4 \text{ (ускорение свободного падения),}$$

$$w = a_5 \text{ (скорость движения корабля).}$$

Параметр  $g$  в данном случае существен, так как сила тяжести оказывает определяющее влияние на возбуждаемые кораблем волны (в невесомости волнового сопротивления не будет, останется только вязкое сопротивление). В классе ЛМТ определяющие параметры имеют следующие размерности:  $[L] = L$ ,  $[D] = L^3$ ,  $[\rho] = ML^{-3}$ ,  $[g] = LT^{-2}$ ,  $[w] = LT^{-1}$ , так что  $n = 5$ ,  $k = 3$  и динамически подобные движения (при соблюдении геометрического и кинематического подобия модели и образца) будут определяться двумя безразмерными параметрами подобия



$$\Pi_1 = \frac{w}{\sqrt{g \cdot L}} \equiv Fr \quad - \text{число Фруда,}$$

$$\Pi_2 = \frac{L}{\sqrt[3]{D}} \equiv \Psi \quad - \text{коэффициент остроты.}$$

Далее размерность силы сопротивления  $[F] = MLT^{-2}$ , так что

$$F = \rho \cdot g \cdot L^3 \cdot \Phi(Fr, \Psi). \quad (33)$$

Критериями подобия служат соотношения (параметр  $g$  можно менять только с большим трудом, при помощи непростых технических решений, обычно не применяемых в практике экспериментальных исследований, поэтому для модели  $g$  остается таким же, как и для образца):

$$\frac{w^{(m)}}{\sqrt{g \cdot L^{(m)}}} = \frac{w^{(o)}}{\sqrt{g \cdot L^{(o)}}}, \quad \frac{L^{(m)}}{\sqrt[3]{D^{(m)}}} = \frac{L^{(o)}}{\sqrt[3]{D^{(o)}}}. \quad (34)$$

Если на модели эти соотношения выполнены, то в силу (33) правило пересчета силы сопротивления с модели, определенной в опыте в той же жидкости, на образец

$$F^{(o)} = \left( \frac{L^{(o)}}{L^{(m)}} \right)^3 \cdot F^{(m)},$$

так что сила сопротивления, пропорциональна кубу масштаба моделирования. Для геометрически подобных судов второе условие (34) выполняется без труда. Первое соотношение (34) показывает, что для обеспечения динамического подобия отношение скоростей модели и натуре должно быть пропорционально квадратному корню из отношения длин модели и образца.

$$w^{(m)} = \left( \frac{L^{(m)}}{L^{(o)}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot w^{(o)},$$

что также можно выполнить в опыте без особых технических сложностей.

Если же отойти от принципа разделения общего сопротивления на сопротивление вязкости и волновое сопротивление и попытаться выполнить полное моделирование для общего сопротивления, то появится третий параметр подобия – число Рейнольдса

$$\Pi_3 = \frac{\rho \cdot w \cdot L}{\mu} \equiv \text{Re}.$$

Полное моделирование с одновременным учетом обоих параметров подобия – числа Фруда и числа Рейнольдса – в одной и той же жидкости ( $\mu^{(M)}/\rho^{(M)} = \mu^{(O)}/\rho^{(O)}$ ) оказывается невозможно. Действительно, выполнение равенства чисел Рейнольдса требует  $w \cdot L = \text{const}$ , то же условие для числа Фруда требует  $w^2 \cdot L = \text{const}$ , поэтому изменение (уменьшение) масштаба модели нарушает подобие, то есть, другими словами, моделирование возможно лишь с моделью в натуральную величину, что бессмысленно. Поэтому и прибегают к частичному моделированию, что требует глубокого проникновения в природу изучаемого явления.

## ***2.4 Математическое моделирование***

### *2.4.1 Математическая модель*

Альтернативой физическому моделированию является математическое моделирование, приведшее к подлинно революционному преобразованию науки вообще и математики в особенности и гармонично дополняющее физическое моделирование. Математическое моделирование представляет собой отдельную междисциплинарную область знаний с совокупностью объектов, подходов и методов исследования.

*Математической моделью* называется [14] совокупность уравнений или других математических соотношений, отражающих основные свойства изучаемого объекта или явления в рамках принятой умозрительной физической модели и особенности его

взаимодействия с окружающей средой на пространственно-временных границах области его локализации. Математические модели различных процессов в континуальных (непрерывных в пространстве) системах строятся, как правило, на языке дифференциальных уравнений, позволяющих наиболее точно описать состояние процесса в любой точке пространства в произвольный момент времени. Однако для ряда процессов, например для описания процесса усталостного разрушения, данный математический аппарат непригоден.

Основными свойствами математических моделей являются *адекватность* и *простота*, указывающие на степень соответствия модели изучаемому объекту и возможности ее реализации. Процесс формулировки математической модели называется постановкой задачи [14].

Под математическим моделированием можно понимать процесс построения и изучения математических моделей. Развернутое определение дано в работе [15]: математическое моделирование – это идеальное научное знаковое формальное моделирование, при котором описание объекта осуществляется на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов.

#### *2.4.2 Обобщенная математическая модель*

Математическая модель описывает зависимость между исходными данными и искомыми величинами [14]. Элементами обобщенной математической модели являются (рис. 7):

- множество входных данных (переменные)  $X$ ,  $Y$ ; где  $X$  – совокупность варьируемых переменных;  $Y$  – независимые переменные (константы);

- математический оператор  $L$ , определяющий операции над этими данными, под которым понимается полная система

математических операций, описывающих численные или логические соотношения между множествами входных и выходных данных (переменные);

- множество выходных данных (переменных)  $G(X, Y)$ ; представляет собой совокупность критериальных функций, включающую (при необходимости) целевую функцию.

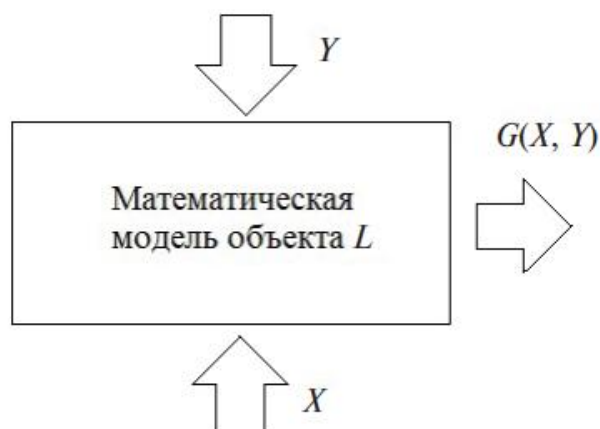


Рис. 7. Обобщенная математическая модель

Математическая модель является математическим аналогом проектируемого объекта. Степень адекватности ее объекту определяется постановкой и корректностью решений задачи проектирования. Множество варьируемых параметров (переменных)  $X$  образует пространство варьируемых параметров  $R_x$  (пространство поиска), которое является метрическим с размерностью  $n$ , равной числу варьируемых параметров.

Множество независимых переменных  $Y$  образуют метрическое пространство входных данных  $R_y$ . В том случае, когда каждый компонент пространства  $R_y$  задается диапазоном возможных значений, множество независимых переменных отображается некоторым ограниченным подпространством пространства  $R_y$ . Множество независимых переменных  $Y$  определяет среду функционирования объекта, т. е. внешние условия, в которых будет работать проектируемый объект. Это могут быть:

- технические параметры объекта, не подлежащие изменению в процессе проектирования;
- физические возмущения среды, с которой взаимодействует объект проектирования;
- тактические параметры, которые должен достигать объект проектирования.

Выходные данные рассматриваемой обобщенной модели образуют метрическое пространство критериальных показателей  $R_G$ .

### *2.4.3. Нелинейность математических моделей*

Простота моделей во многом связана с их линейностью. С точки зрения математики это соответствует принципу суперпозиции, при котором любая линейная комбинация решений в свою очередь тоже есть решение искомой задачи. Пользуясь принципом суперпозиции, можно, найдя решение в каком-либо частном случае, построить решение в более общей ситуации. В этой связи о закономерностях общего случая делается вывод на основе свойств частного. Для линейных моделей отклик объекта на изменение каких-то условий пропорционален величине этого изменения. В случае отсутствия выполнения принципа суперпозиции для математических моделей знание о поведении части объекта нелинейного явления не дает информации о поведении всего объекта в целом. Большинство реальных процессов и соответствующих им математических моделей нелинейны. Линейные модели являются неким приближением реального объекта и решают лишь частные случаи. Так, при расчете деформирования тел зависимость между перемещениями отдельных точек тела и нагрузками, действующими на данное тело, является линейной до тех пор, пока нагрузки не превысят определенные значения. За пределами этих ограничений, то есть в общем случае, зависимости становятся нелинейными.

#### *2.4.4. Степень соответствия математической модели объекту*

Математическая модель никогда не бывает тождественна рассматриваемому объекту и не передает всех его свойств и особенностей. Она является лишь приближенным описанием объекта и носит всегда приближенный характер. Точность соответствия определяется степенью соответствия адекватности модели и объекта. При построении математической модели приходится выдвигать дополнительные предположения – гипотезы. Модель поэтому еще называют гипотетической. Основным критерием применимости модели является эксперимент. Критерий практики позволяет сравнивать гипотетические модели и выбирать из них наиболее подходящую. Каждый объект описывается ограниченным числом моделей или их систем.

Процесс моделирования значительно легче реализуется при использовании унификации математических моделей, т. е. использования наборов готовых моделей. Существует возможность переноса готовых моделей из одних процессов на другие, идентичные, аналогичные. Аналогичными называют объекты и процессы, описываемые одинаковыми по форме уравнениями, содержащими различные физические величины и параметры, связанные между собой одинаковыми операторами. Величины, которые в аналогичных уравнениях стоят на одинаковых местах, называют аналогами. Например, в дисциплине «Сопроотивление материалов» рассматривалась так называемая «пленочная (мембранная) аналогия» [16], согласно которой, закон распределения касательных напряжений при кручении стержней некруглой формы описывается той же математической моделью, что и закон распределения углов наклона гибкой мембраны, натянутой на отверстие той же формы, что и сечение рассматриваемого стержня, и нагруженной равномерным давлением.

Математическая модель описывает реальный объект с каким-то приближением. Степень соответствия описания реальному процессу определяется полнотой учета возмущающих воздействий. При отсутствии или незначительности возмущений, действующих как внутри, так и вне объекта, можно однозначно определить влияние входных и управляющих параметров на выходные.

#### *2.4.5. Классификация математических моделей*

В настоящее время существует огромное количество моделей самого разного типа, которые получили развитие в результате применения методов математического моделирования в различных областях. В связи с этим возникает необходимость в определенной классификации существующих и появляющихся математических моделей [14]. Существуют следующие виды классификаций математических моделей в зависимости от:

- сложности объекта моделирования;
- оператора модели;
- входных и выходных параметров;
- цели моделирования;
- способа исследования модели;
- объектов исследования;
- характера отображаемых свойств;
- порядка расчета;
- использования управления процессом.

По *сложности объекта исследования* модели делятся на простые и исследующие объекты-системы. В простых моделях внутреннее строение объекта не рассматривается и составляющие его элементы и подпроцессы не учитываются. Объект-система является совокупностью взаимосвязанных элементов, которые взаимодействуют с окружающей средой как с единым целым.

В зависимости от *оператора модели* они делятся на линейные, нелинейные, алгоритмические, простые и сложные. При наличии линейной зависимости выходных параметров от входных математическая модель называется линейной, соответственно в случае нелинейной зависимости модель — нелинейная. При обеспечении оператором модели функциональной зависимости выходных параметров от входных в виде алгебраического выражения модель является простой. Модель, включающая системы дифференциальных и интегральных соотношений, называется сложной. В случае построения имитатора модели поведения объекта с помощью алгоритма, его называют оператором модели. При этом сама модель является алгоритмической.

Классификация математических моделей *в зависимости от входных и выходных* параметров представлена на рис. 8.

По характеру моделируемого процесса модели подразделяются на:

– детерминированные, которые соответствуют детерминированным процессам, имеющим строго однозначную связь между физическими величинами, характеризующими состояние системы в какой-либо момент времени; детерминированная модель позволяет однозначно вычислить и предсказать значения выходных величин по значениям входных параметров и управляющих воздействий;

– неопределенные, которые исходят из того, что изменение определяющих величин происходит случайным образом, и значения выходных величин находятся в вероятностном соответствии с входными величинами и не определяются однозначно.





Рис. 8. Классификация математических моделей в зависимости от входных и выходных параметров

Модели с неопределенными параметрами можно подразделить на следующие группы [14]:

- Стохастические – значения всех или отдельных параметров модели определяются случайными величинами, заданными плотностями вероятности.

- Случайные – значения всех или отдельных параметров модели определяются случайными величинами, которые зависят от оценки плотностей вероятности, определяемой в результате обработки ограниченной экспериментальной выборки данных параметров.

- Интервальные – значения всех или отдельных параметров модели описываются интервальными величинами, заданным интервалом, образованным минимальными и максимально возможными значениями параметра.

– Нечеткие – значения всех или отдельных параметров модели описываются функциями принадлежности соответствующему нечеткому множеству.

Модели по отношению к размерности пространства классифицируются на одномерные, двухмерные и трехмерные. Такое разделение применимо для моделей, имеющих в качестве параметров координаты пространства. По отношению ко времени модели делят на динамические и статические. Некоторые характеристики моделей являются неизменными, т. е. не меняют своих значений в течение времени, а некоторые изменяются по определенным законам. Если состояние системы меняется со временем, то модели называют динамическими, в противном случае – статическими. Статическое моделирование служит для описания состояния объекта в фиксированный момент времени, а динамическое – для исследования объекта во времени. Разделение моделей на качественные и количественные, дискретные и непрерывные, а также на смешанные происходит в зависимости от вида используемых множеств параметров модели. По целям моделирования модели делятся на дескриптивные, оптимизационные и управленческие. Среди целей дескриптивных моделей можно выделить установление законов изменения параметров модели. Примером данной модели является модель движения ракеты после запуска. С помощью оптимизационных моделей можно рассчитывать оптимальные критерии параметров объекта моделирования. С другой стороны, данные модели могут применяться для поиска оптимального режима управления процессом. К оптимизационным моделям можно отнести модель ракеты из предыдущей модели с целью подъема на необходимую высоту за ограниченное время.

С целью принятия эффективных управленческих решений в областях жизнедеятельности человека применяются управленческие

модели. В зависимости от метода реализации модели делят на аналитические, если возможно получить выходные параметры в виде аналитических выражений, и на алгоритмические, позволяющие получить лишь приближенные значения искомых параметров (рис. 9).



Рис. 9. Классификация математических моделей в зависимости от метода реализации модели

По объектам исследования математические модели классифицируют на:

- объекты с высокой степенью информации, если в процессе моделирования известны полные системы уравнений, описывающие все стороны моделируемого процесса и все числовые значения параметров этих уравнений;

- объекты с нулевым уровнем информации; математическая модель такого объекта строится на основе статистических экспериментальных данных;

- объекты с известными основными закономерностями; значения констант в математических уравнениях описания модели устанавливают из опыта;

- объекты, о поведении которых имеются сведения эмпирического характера; для них используют методы физического моделирования с применением математического планирования эксперимента.

По характеру отображаемых свойств модели подразделяют на:

– функциональные модели, используемые для описания физических и информационных процессов, протекающих при функционировании объекта;

– структурные, описывающие состав и взаимосвязи элементов системы (процесса, объекта).

Классификация математических моделей по порядку расчета. Подразделяют на прямые, обратные, индуктивные:

– прямые применяются для определения кинетических, статических и динамических закономерностей процессов;

– обратные (инверсионные) используются для определения, например, допустимых отклонений режимов обработки;

– индуктивные применяются для уточнения математических уравнений кинетики, статики или динамики процессов с использованием новых гипотез или теорий.

Классификация математических моделей *в зависимости от использования управления процессом:*

1. Модели прогноза, или расчетные, модели без управления. Основное назначение этих моделей – дать прогноз о поведении системы во времени и в пространстве, зная начальное состояние и информацию о поведении ее на границе. Примерами могут служить модели распределения тепла, электрического поля, химической кинетики, гидродинамики.

2. Оптимизационные модели:

– стационарные модели используются на уровне проектирования различных технологических систем;

– динамические – как на уровне проектирования, так и, главным образом, для оптимального управления различными процессами – технологическими, экономическими и др.

В задачах оптимизации имеется два направления. К первому относятся детерминированные задачи. Вся входная информация в них

является полностью определяемой. Второе направление относится к стохастическим процессам. В этих задачах некоторые параметры носят случайный характер или содержат элемент неопределенности. Методы отыскания экстремума функции многих переменных с различными ограничениями часто называются методами *математического программирования*.

#### *2.4.6. Этапы построения математической модели*

Построение математических моделей является достаточно трудным процессом, включающим большие затраты материальных и временных ресурсов, а также предполагает необходимость в специалистах высокого уровня с компетенциями как в предметной области, так и в таких областях, как прикладная математика, численные методы, программирование, современные вычислительные системы. Среди этапов процесса построения моделей можно выделить следующие (рис. 10) [14]:

1. Обследование объекта моделирования и формулировка технического задания на разработку модели. Конструирование модели начинается со словесно-смыслового описания объекта или явления. Данная стадия содержит сведения общего характера о природе объекта, информацию о целях его исследования и некоторые предположения. Данный этап можно также назвать формулировкой предмодели. Цель этапа – разработка содержательной постановки задачи моделирования, т. е. создание совокупности вопросов об объекте моделирования, записанных в словесной форме.

2. Концептуальная и математическая постановка задачи. На этом этапе происходит завершение идеализации объекта, отбрасываются несущественные факторы и эффекты. Цель концептуальной постановки задачи заключается в формулировке основных вопросов и наборе гипотез касательно свойств и поведения объекта моделирования в терминологии специальных дисциплин. В итоге предположения описываются математически для количественного анализа их выполнения. На этапе составления математического описания предварительно выделяют основные явления и элементы в объекте и затем устанавливают связи

между ними. Далее для каждого выделенного элемента и явления записывают уравнение, отражающее его функционирование. Кроме того, в математическое описание включают уравнения связи между различными выделенными явлениями. В зависимости от процесса математическое описание может быть представлено в виде системы алгебраических или дифференциальных уравнений. Процесс получения совокупности математических уравнений, однозначно описывающих объект моделирования, называется математической постановкой задачи моделирования.



Рис. 10. Этапы построения математической модели

3. Качественный анализ и проверка корректности модели. Для контроля правильности полученной системы математических соотношений требуется проведение ряда обязательных проверок:

- контроль размерности;
- контроль порядков;
- контроль характера зависимостей;
- контроль экстремальных ситуаций;
- контроль граничных условий;
- контроль физического смысла;
- контроль математической замкнутости.

Понятие «корректность модели» очень важно, особенно в прикладной математике, поскольку невозможно применение численных методов к некорректно поставленным задачам. Установить корректность математической задачи является сложной задачей. Для обеспечения корректности математической модели должны быть выполнены все контрольные проверки.

На этом этап построения математической модели заканчивается и далее следует «вычислительный эксперимент», однако многие авторы и следующие этапы относят к процессу построения математической модели, в связи с чем обсуждение понятия «вычислительный эксперимент» будет рассмотрено ниже.

4. Выбор и обоснование выбора методов решения задачи. Созданная модель исследуется любыми возможными методами, в том числе с взаимной проверкой. Поскольку не все модели решаются теоретически, в последнее время широко используются вычислительные методы. Данное обстоятельство важно при анализе нелинейных объектов, поскольку качественное поведение таких объектов неизвестно. В зависимости от метода решения задачи все методы подразделяются на:

- аналитические. Данные методы являются подходящими для анализа результатов, однако они применимы только для относительно простых моделей. При наличии аналитического решения задачи численное решение практически не применяется;

– алгоритмические. Для алгоритмических методов реализуется вычислительный эксперимент с использованием компьютера.

Этап выбора метода решения и разработки моделирующей программы подразумевает выбор наиболее эффективного (по скорости получения решения и его наибольшей точности) метода решения из имеющихся методов, реализацию его в форме алгоритма решения.

5. Поиск решения или реализация алгоритма в виде компьютерной программы. Данный этап будет рассмотрен при описании вычислительного эксперимента.

6. Проверка адекватности модели. На данном этапе определяется соответствие объекту и сформулированным предположениям. При этом также выполняется исследование модели на достижение поставленной цели любыми способами, например, сравнение с экспериментом или сопоставление с другими подходами. Модель необходимо отбросить или модифицировать в случае получения с ее помощью результата, существенно отличающегося от истинного. Этап установления степени соответствия модели объекту является заключительным. Для проверки адекватности математической модели реальному процессу нужно сравнить результаты измерений на объекте в ходе процесса с результатами предсказания модели в идентичных условиях.

7. Практическое использование модели. Независимо от области применения созданной модели необходимо провести качественный и количественный анализ результатов моделирования, который позволяет:

- выполнить модификацию рассматриваемого объекта, найти его оптимальные характеристики;
- обозначить область применения модели;
- проверить обоснованность гипотез, принятых на этапе математической постановки, оценить возможность упрощения модели с целью повышения ее эффективности при сохранении требуемой точности;
- показать, в каком направлении следует развивать модель в дальнейшем.



#### *2.4.7. Подходы к построению математических моделей*

При построении моделей используют два принципа:

- дедуктивный (от общего к частному);
- индуктивный (от частного к общему).

При первом подходе рассматривается частный случай общеизвестной фундаментальной модели. Здесь при заданных предположениях известная модель приспособливается к условиям моделируемого объекта. Например, можно построить модель свободно падающего тела на основе известного закона Ньютона и в качестве допустимого приближения принять модель равноускоренного движения для малого промежутка времени. Второй способ предполагает выдвижение гипотез, декомпозицию сложного объекта, анализ, затем синтез. Здесь широко используется подобие, аналогичное моделированию, умозаключение с целью формирования каких-либо закономерностей в виде предположений о поведении системы. Например, подобным способом происходит моделирование строения атома (модели Томсона, Резерфорда, Бора).

Для разработки математических моделей используют следующие принципы и подходы [14]:

1. Фундаментальные законы природы. Данный принцип является самым распространенным и заключается в использовании фундаментальных законов природы применительно к конкретной ситуации. Как правило, законы признанны, доказаны опытом и являются базой научно-технических достижений. В этой связи нет необходимости в их дополнительной обоснованности. В итоге самый главный вопрос возникает при выборе конкретного закона для решения определенной задачи.

2. Вариационные принципы. Данный подход по широте и универсальности сравним с первым подходом и заключается в применении вариационных принципов, которые являются утверждениями об исследуемом объекте. При этом выбор вариантов поведения осуществляется на основании определенных условий. Полученные вариационные принципы для класса явлений позволяют единообразно

создавать соответствующие математические модели. Данный подход позволяет не учитывать конкретную природу процесса.

3. Применение аналогий при построении моделей. Метод аналогий применяется, когда невозможно выбрать фундаментальные законы или вариационные принципы. Это может быть связано с тем, что на сегодняшний момент подобные законы могут не существовать и, следовательно, описать их математически не представляется возможным. Примером является простейшая модель для динамики популяций (модель Мальтуса), посредством которой можно объяснить явление радиоактивного распада.

4. Иерархический подход к получению моделей. Построение математических моделей с учетом всех значимых факторов не всегда бывает удобным и оправданным. Подход реализации «от простого – к сложному» в этом случае является более предпочтительным. При данном подходе создается иерархия более полных моделей, обобщающих предыдущие модели как частные случаи. Математические модели нижнего уровня могут быть достаточно простыми, типовыми, допускающими широкую унификацию и использование набора готовых моделей. При иерархическом построении общей модели сложной системы задача оптимизации всей системы распадается на ряд частных задач оптимизации на различных уровнях. При этом общий критерий оптимизации разделяется на критерии для каждого уровня. Таким образом, задача большой размерности может быть сведена к ряду задач меньшей размерности. При этом следует учитывать взаимное влияние элементов и уровней.

5. Блочный принцип. При построении математических моделей широко используют блочный принцип. Модель строится из отдельных логически законченных блоков, отражающих ту или иную сторону рассматриваемого процесса. Блочный принцип построения моделей позволяет: разбить общую задачу построения математической модели на отдельные подзадачи и тем самым упростить ее решение, а также использовать разработанные блоки в других моделях, модернизировать

отдельные блоки и заменять их на новые. Общее математическое описание модели представляет собой совокупность математических описаний отдельных блоков. Применение блочного принципа построения математических моделей позволяет во многих случаях решить проблему масштабирования процессов.

Принципиально каждый блок математической модели может иметь различную степень детализации математического описания. Важно лишь, чтобы входные и выходные переменные всех блоков модели находились во взаимном соответствии, что обеспечит получение замкнутой системы уравнений математической модели процесса в целом. В идеале математическое описание каждого блока должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ. При практическом использовании блочного принципа в математическом описании каждого блока на том или ином уровне его детализации приходится применять эмпирические соотношения.

#### *2.4.8. Вычислительный эксперимент*

Обычно моделирование используется для вычисления таких величин, которые нельзя получить из ограниченных по своим возможностям теоретических моделей. Если теория дает желаемые количественные выводы, то моделирование вряд ли необходимо. Но моделирование часто применяется и для расширения теоретических моделей с целью получения новых эмпирических знаний, а также для расширения эмпирических понятий в тех областях, где они пока не могут быть получены. В этом случае большая роль принадлежит вычислительному эксперименту.

Ни одно техническое достижение не повлияло так на интеллектуальную деятельность человека, как электронно-вычислительные машины. Появление компьютеров привело к невероятным изменениям в производительности интеллектуального труда за счет роста скорости выполнения арифметических и логических операций с помощью ЭВМ. В начале XXI века появилась реальная возможность обратиться с их помощью к изучению таких разделов

математики, которые ранее были практически не доступны для исследований. Основа вычислительного эксперимента – это математическое моделирование, теоретическая база данного процесса – прикладная математика, а техническое обеспечение – это мощные компьютеры. При применении вычислительного эксперимента просматриваются как общие основные черты данного процесса, так и специфические особенности конкретных задач [14]. Научное исследование реального процесса можно проводить теоретически или экспериментально независимо друг от друга. Такой путь познания истины носит односторонний характер. В современных условиях развития науки и техники стараются проводить комплексное исследование объекта. Вычислительный эксперимент – это эксперимент над математической моделью объекта на ЭВМ, который состоит в том, чтобы по одним параметрам модели вычислить другие ее параметры и на этой основе сделать выводы о свойствах явления, описываемого математической моделью. Вычислительный эксперимент представляет собой циклический процесс, состоящий из следующих этапов (рис. 11):

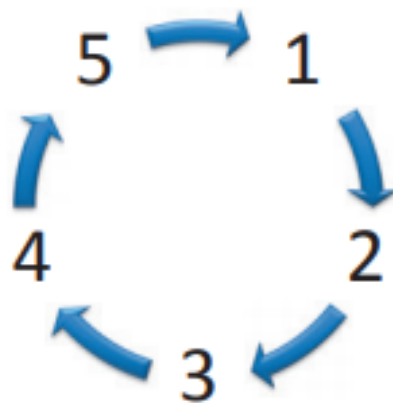


Рис. 11. Схема цикла вычислительного эксперимента:

1 – построение математической модели; 2 – разработка метода расчета;  
3 – программирование; 4 – расчеты на компьютере; 5 – сравнение результатов расчетов с данными опыта, уточнение моделей

1. Построение математической модели. На первом этапе производится выбор физической модели, для которой определяются обязательные для рассмотрения факторы и второстепенные, которыми можно пренебречь. При этом определяются допущения или ограничения

модели, в рамках которых результаты моделирования можно считать корректными. Данная модель формулируется с помощью дифференциальных или интегродифференциальных уравнений, т. е. на основе математических терминов. Этот этап подробно рассмотрен ранее, при описании процесса построения математической модели.

2. Создание метода расчета. В вычислительном эксперименте всегда используется алгоритмический метод решения, представляющий последовательность алгебраических формул и логических операторов. При этом для одной математической задачи могут существовать различные вычислительные алгоритмы. Подобные задачи решаются как приближенными, так и численными методами. Вследствие применения указанных методов возникают погрешности, которые подразделяются на три типа [14]:

- Неустраняемая погрешность, связанная с неточным заданием исходных данных.
- Погрешность метода, связанная с переходом к дискретному аналогу исходной задачи.
- Ошибка округления, связанная с конечной разрядностью чисел на компьютере.

Как численный, так и приближенный метод решения предполагают запись в виде вычислительного алгоритма. Требования, предъявляемые к алгоритмам, в том числе и к вычислительным алгоритмам [14]:

- Реализуемость, т. е. обеспечение решения задачи за допустимое машинное время.
- Точность – получение решения исходной задачи с определенной погрешностью и за конечное число операций.
- Экономичность (эффективность), т. е. выполнение меньшего числа действий для достижения одинаковой точности.
- Устойчивость, т. е. в процессе вычислений не должна возрастать погрешность.

Для создания наиболее точных вычислительных алгоритмов необходимо формировать многочисленные модификации с учетом

специфических особенностей конкретной математической задачи. Можно выделить следующие группы численных методов в зависимости от объектов, к которым они применяются [14]:

- интерполяция и численное дифференцирование;
- численное интегрирование;
- определение корней линейных и нелинейных уравнений;
- решение систем линейных уравнений;
- решение систем нелинейных уравнений;
- решение задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений;
- решение краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений;
- решение уравнений в частных производных;
- решение интегральных уравнений.

Выбор метода для решения конкретной задачи представляется достаточно сложным в силу существования большого количества численных методов. Для реализации модели возможно применение различных альтернативных алгоритмических методов. В этой связи выбор метода решения осуществляется в зависимости от обеспечения наилучшей эффективности, устойчивости и точности результатов.

3. Разработка программы на основе алгоритма для реализации на компьютере.

Данный этап может быть осуществлен как при помощи универсальных языков программирования, так и при помощи различных программных средств как общематематического назначения (MathCad, Mathematica и т. п.), так и специализированных (например средства конечно-элементного анализа, такие как ANSYS, NASTRAN, Лира и т. п, средства имитационного моделирования, например GPSS и т. д). В настоящее время с ростом производительности компьютеров и разработкой все более удобных и универсальных программных продуктов, предназначенных для различного рода моделирования, наблюдается тенденция постепенного отказа от использования универсальных языков программирования в пользу специализированных средств.

4. Проведение расчетов на компьютере. Здесь наиболее отчетливо проявляется сходство с натурным экспериментом. Различие в том, что в лаборатории экспериментатор с помощью специально построенной установки «задает вопросы» природе, в то время как специалисты по вычислительному эксперименту с помощью компьютера ставят эти вопросы математической модели. Ответ в обоих случаях получается в виде некоторой цифровой информации, которую затем предстоит расшифровать. Следует заметить, что достоверность модели обеспечивается точностью информации при вычислительном эксперименте. Именно по этой причине проводят тестовые испытания. Они необходимы для того, чтобы «отладить» программу и проверить адекватность математической модели.

5. Обработка результатов расчетов. На этом этапе выполняется всесторонний анализ результатов расчета и выводы, после которых или становится ясна необходимость уточнения модели, или результаты, пройдя проверку на разумность и надежность, передаются заказчику для исполнения. Дополнительно можно продолжить классификацию следующими этапами [14]:

6. Проведение натурального эксперимента для получения данных, необходимых для уточнения модели.

7. Накопление экспериментальных данных.

8. Построение математической модели.

9. Автоматическое построение программной реализации математической модели.

10. Автоматизированное нахождение численного решения.

11. Автоматизированное преобразование вычислительных результатов в форму, удобную для анализа.

12. Принятие решения о продолжении натуральных экспериментов.

Тем самым основу вычислительного эксперимента составляет триада: модель – алгоритм – программа. Опыт решения крупных задач показывает, что метод математического моделирования и вычислительный эксперимент соединяют в себе преимущества традиционных

теоретических и экспериментальных методов исследования. Видоизмененная цепочка, реализованная в виде единого программного комплекса, и составляет «технологию» вычислительного эксперимента. К основным преимуществам вычислительного эксперимента можно отнести следующие:

- возможность исследования объекта без модификации установки или аппарата;
- возможность исследования каждого фактора в отдельности, в то время как в реальности они действуют одновременно;
- возможность исследования нереализуемых на практике процессов.

Вычислительный эксперимент посредством математического моделирования находит все новые и новые применения в различных областях науки и техники [14]:

*Энергетическая проблема.* Задачи атомной промышленности эффективно решаются с помощью математического моделирования. В частности, при исследовании физических процессов, происходящих в атомных и термоядерных реакторах, используется вычислительный эксперимент, который при совокупности с натурным экспериментом ускоряет и упрощает исследования в данной области.

*Космическая техника.* Математическое моделирование используется для расчета движения летательных средств, задач аэродинамического сопротивления, а также для анализа радиолокационных данных, например, изображений со спутников. Ключевую роль в данном случае играет проблема повышения качества измерительной аппаратуры. Установлено, что измерительный прибор в связке с ЭВМ может получить результаты, сравнимые с приборами самого высокого качества. В итоге совокупность измерительных и вычислительных средств позволяет выходить на новый уровень решения задач.

*Технологические процессы.* Задачи синтеза материалов, в том числе с заданными свойствами, разработка вычислительной техники и элементной базы, анализ технологических режимов конструкций, процессов лазерной плазмы решаются в настоящее время с помощью математического моделирования.



*Экологические проблемы.* В данной области математическое моделирование позволяет решать такие вопросы, как прогнозирование и управление экологическими системами, поскольку они могут быть единичными.

Гео- и астрофизические явления. Исследование климата, прогнозирование различных стихийных бедствий, а также изучение развития звезд и происхождения Вселенной невозможно без математического моделирования.

*Химия.* Математическое моделирование применяется для расчета химических реакций и изучения химических процессов на различных уровнях.

*Биология.* Наибольший интерес к моделированию вызван необходимостью решения фундаментальных проблем генетики и морфогенеза, а также созданием новых перспективных методов биотехнологии.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие Вы знаете методы теоретического исследования?
2. Что такое индукция и дедукция?
3. Перечислите этапы теоретического исследования.
4. Что такое модель и моделирование?
5. Какие требования предъявляются к модели?
6. Что такое физическая модель?
7. Что такое геометрическое, временное и физическое подобия?
8. Что такое критерии подобия, в чем их физический смысл?
9. Что такое критериальное уравнение?
10. О чем говорит вырождение критериев подобия?
11. О чем говорят теоремы подобия?
12. Что такое масштабные преобразования?
13. О чем говорит  $\pi$ -теорема?

14. Каким образом осуществляется пересчет результатов исследований на физической модели к исследуемому реальному объекту?
15. Почему в некоторых случаях исследователи вынуждены прибегать к приближенному физическому моделированию?
16. Что такое математическая модель и математическое моделирование?
17. Назовите элементы обобщенной математической модели.
18. Перечислите признаки, по которым классифицируются математические модели.
19. В чем отличие простых моделей от сложных?
20. Перечислите типы моделей в зависимости от применяемого оператора моделирования.
21. Как классифицируются модели в зависимости от входных и выходных параметров?
22. Для каких целей применяются прямые и обратные модели?
23. В чем отличие моделей прогноза от оптимизационных моделей?
24. Опишите типы содержательной классификации моделей.
25. Перечислите основные этапы процесса построения математической модели.
26. С какой целью применяется проверка адекватности модели?
27. Опишите два принципа построения модели.
28. Какие подходы к построению математической модели вам известны? В чем они заключаются?
29. Сформулируйте составляющие погрешности при использовании численных методов.
30. Дайте определение корректности математической модели.
31. Перечислите основные этапы цикла вычислительного эксперимента.
32. Что составляет основу вычислительного эксперимента?

## Глава 3. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКА ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### *3.1 Общие сведения об экспериментальных исследованиях*

Эксперимент является важнейшей составной частью научных исследований, в основе которого находится научно поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями. В научном языке и исследовательской работе термин *эксперимент* обычно используется в значении, общем для целого ряда сопряженных понятий: целенаправленное наблюдение, воспроизведение объекта познания, опыт, организация особых условий его существования, проверка предсказания. В это понятие вкладывается научная постановка опытов и наблюдение исследуемого явления в точно учитываемых условиях, позволяющих следить за ходом его развития и воссоздавать его каждый раз при повторении этих условий. Само по себе понятие «эксперимент» означает действие, направленное на создание условий в целях воспроизведения того или иного явления и по возможности наиболее чистого, т. е. не осложняемого другими явлениями [3, 7, 17].

Основная цель эксперимента – выявление свойств исследуемых объектов, проверка справедливости гипотез и на этой основе широкое и глубокое изучение темы научного исследования. Постановка и организация эксперимента определяются его назначением. Эксперименты, которые проводятся в различных отраслях науки, являются отраслевыми и имеют соответствующие названия: физические, химические, биологические, социальные, психологические, и т. п.

Эксперименты различаются:

– по целям исследования (констатирующие, преобразующие, поисковые, решающие, контролирующие);

- по способу формирования условий (естественный и искусственный);
- по структуре изучаемых объектов и явлений (простые, сложные);
- по организации проведения (лабораторные, натурные, полевые, производственные и т. п.);
- по характеру внешних воздействий на объект исследования (вещественные, энергетические, информационные);
- по характеру взаимодействия средства экспериментального исследования с объектом исследования (обычный и модельный);
- по типу моделей, исследуемых в эксперименте (материальный и мысленный);
- по числу варьируемых факторов (однофакторный и многофакторный);
- по контролируемым величинам (пассивный и активный);
- по характеру изучаемых объектов или явлений (технологический, социометрический) и т. п.

Для классификации экспериментов могут быть использованы и другие признаки.

*Естественный эксперимент* предполагает проведение опытов в естественных условиях существования объекта исследования (чаще всего используется в биологических, социальных, педагогических и психологических науках).

*Искусственный эксперимент* предполагает формирование искусственных условий (широко применяется в технических и естественных науках).

*Констатирующий эксперимент* используется для проверки определенных предположений. В процессе этого эксперимента констатируется наличие определенной связи между воздействием на объект исследования и результатом, выявляется наличие определенных фактов.

*Преобразующий, или созидательный, эксперимент* предполагает активное изменение структуры и функций объекта исследования в соответствии с выдвинутой гипотезой, формирование новых связей и отношений между компонентами объекта или между исследуемым объектом и другими объектами. Исследователь в соответствии с раскрытыми тенденциями развития объекта исследования преднамеренно создает условия, которые должны способствовать формированию новых свойств и качеств объекта.

*Поисковый эксперимент* проводится в том случае, если затруднена классификация факторов, влияющих на изучаемое явление вследствие отсутствия достаточных предварительных (априорных) данных. По результатам поискового эксперимента устанавливается значимость факторов, осуществляется отсеивание незначимых.

*Контролирующий эксперимент* сводится к контролю за результатами внешних воздействий над объектом исследования с учетом его состояния, характера воздействия и ожидаемого эффекта.

*Решающий эксперимент* ставится для проверки справедливости основных положений фундаментальных теорий в том случае, когда две или несколько гипотез одинаково согласуются с этими явлениями. Этот эксперимент дает такие факты, которые согласуются с одной из гипотез и противоречат другой, например опыты по проверке справедливости ньютоновской теории истечения света и волнообразной теории Гюйгенса.

*Лабораторный эксперимент* проводится в лабораторных условиях с применением специальных моделирующих установок, типовых приборов, стендов, оборудования и т. д. Чаще всего в лабораторном эксперименте изучается не сам объект, а его образец (модель). Этот эксперимент позволяет доброкачественно, с требуемой повторностью изучить влияние одних характеристик при

варьировании других, тем самым получить хорошую научную информацию с минимальными затратами времени и ресурсов. Однако такой эксперимент не всегда полностью моделирует реальный ход изучаемого процесса, поэтому возникает потребность в проведении натурального эксперимента.

*Натурный эксперимент* проводится в естественных условиях и на реальных объектах. Этот вид эксперимента часто используется в процессе натуральных испытаний изготовленных систем. В зависимости от места проведения испытаний натурные эксперименты подразделяются: на производственные, полигонные, полевые, полунатурные и т. п.

Натурный эксперимент всегда требует тщательного продумывания и планирования, а также рационального выбора методов исследования [3, 7, 17].

Основной научной проблемой натурального эксперимента является обеспечение достаточного соответствия (адекватности) условий эксперимента реальной ситуации, в которой затем будет работать создаваемый объект. Поэтому центральными задачами натурального эксперимента являются:

- идентификация статистических и динамических параметров объекта;
- изучение характеристик воздействия среды на испытываемый объект;
- оценка эффективности функционирования объекта и проверка его на соответствие заданным требованиям.

*Простой эксперимент* используется для изучения объектов, не имеющих разветвленной структуры, с небольшим количеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, выполняющих простейшие функции.

В сложном эксперименте изучаются явления или объекты с разветвленной структурой и большим количеством взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, выполняющих сложные функции.

*Информационный эксперимент* используется для изучения воздействия определенной (различной по форме и содержанию) информации на объект исследования. Чаще всего информационный эксперимент используется в биологии, психологии, социологии, кибернетике и т. п. С помощью этого эксперимента изучается изменение состояния объекта исследования под влиянием сообщаемой ему информации.

*Вещественный эксперимент* предполагает изучение влияния различных вещественных факторов на состояние объекта исследования. Например, влияние различных пластифицирующих добавок на подвижность бетонной смеси, прочность бетона и т. п.

*Классический, или обычный, эксперимент* – экспериментатор выступает в роли субъекта, познающего объект или предмет экспериментального исследования при помощи средств для осуществления эксперимента (приборы, инструменты, экспериментальные установки).

Различие между орудиями эксперимента при моделировании позволяет выделить мысленный и материальный эксперименты.

*Мысленный эксперимент* – одна из форм умственной деятельности познающего субъекта, в процессе которой структура реального эксперимента воспроизводится в воображении [3, 7].

*Материальный эксперимент.* В процессе этого эксперимента используются материальные, а не идеальные объекты исследования. Основное отличие материального эксперимента от мысленного в том, что реальный эксперимент представляет собой форму объективной материальной связи сознания с внешним миром, а мысленный

эксперимент является специфической формой теоретической деятельности субъекта.

Сходство мысленного эксперимента с реальным определяется тем, что реальный эксперимент, прежде чем быть осуществленным на практике, сначала проводится человеком мысленно в процессе обдумывания и планирования. Поэтому нередко мысленный эксперимент выступает в роли идеального плана реального эксперимента, в известном смысле предваряя его.

*Модельный эксперимент.* Этот вид эксперимента в отличие от классического имеет дело с моделью исследуемого объекта. Модель входит в состав экспериментальной установки, замещая не только объект исследования, но часто и условия, в которых изучается некоторый объект.

*Энергетический эксперимент* используется для изучения воздействия различных видов энергии (механической, тепловой, электромагнитной и т. д.) на объект исследования. Этот тип эксперимента широко распространен в естественных науках.

*Однофакторный эксперимент* предполагает:

- выделение осознанных факторов;
- поочередное варьирование факторов, интересующих исследователя;
- стабилизацию мешающих факторов.

Суть *многофакторного эксперимента* состоит в том, что варьируются все переменные сразу, и каждый эффект оценивается по результатам всех опытов, проведенных в данной серии экспериментов.

При проведении *пассивного эксперимента* предусматривается измерение только выбранных показателей (переменных, параметров) в результате наблюдения за объектом без искусственного вмешательства в его функционирование. Например, наблюдение: за



числом заболеваний вообще или какой-либо определенной болезнью; за интенсивностью, составом, скоростями движения транспортных потоков, за работоспособность определенной группы лиц; за числом дорожно-транспортных происшествий и т. п.

*Активный эксперимент* связан с выбором специальных входных сигналов (факторов) и контролирует вход и выход исследуемой системы.

*Технологический эксперимент* направлен на изучение элементов технологического процесса (производства, оборудования, деятельности работников и т. п.) или процесса в целом.

*Вычислительным экспериментом* называют методологию и технологию исследований, основанных на применении прикладной математики и электронно-вычислительных машин как технической базы при использовании математических моделей. Он основывается на создании математических моделей изучаемых объектов, которые формируются с помощью особой математической структуры, которая способна отражать свойства объекта, проявляемые им в различных экспериментальных условиях.

Но эти математические структуры превращаются в модели при некоторых условиях:

- когда элементам структуры дается физическая интерпретация;
- при установлении соотношения между параметрами математической структуры и экспериментально определенными свойствами объекта;
- когда характеристики некоторых элементов модели и модели в целом находят соответствие свойствам объекта.

Математические структуры являются моделью изучаемого объекта и отражают в математической, то есть символической или знаковой форме объективно существующие в природе зависимости, связи и законы.

Практически всегда математическая модель или ее часть может сопровождаться элементами наглядности с соответствующими пояснениями, например, диаграммами, графиками, рисунками и т. д. Иногда модель какого-либо сложного устройства может по некоторым свойствам уподобляться модели простого объекта.

В основе каждого вычислительного эксперимента находится математическая модель, основанная на приемах вычислительной математики. Вместе с бурным развитием электронно-вычислительной техники развивается и современная вычислительная математика, состоящая из многих разделов. Например, не так давно появился дискретный анализ, дающий возможность получения любого численного результата только с помощью арифметических и логических действий. Здесь задача математики сводится к представлению решений, возможно приближительных, в виде последовательности арифметических операций, то есть алгоритма решения.

Теория и практика вычислительного эксперимента создавалась на основе математического моделирования методов вычислительной математики.

Технологический цикл вычислительного эксперимента делят на несколько этапов.

1. Для исследуемого объекта строится физическая модель. В рассматриваемом явлении она фиксирует разделение всех действующих факторов на главные и второстепенные. Последние на этом этапе исследования отбрасываются. Одновременно формулируются допущения и условия применимости модели, а также границы, в которых будут справедливы полученные результаты. Создают математическую модель специалисты, хорошо знающие данную область естествознания или техники, а также математики, представляющие себе возможности решения математической задачи.

Модель записывается в математических терминах, в виде дифференциальных или интегродифференциальных уравнений.

2. Разрабатывается метод расчета сформулированной математической задачи. Эта задача представляется в виде совокупности алгебраических формул, по которым должны проводиться вычисления, а также условий, показывающих последовательность применения этих формул. Набор таких формул и условий носит название вычислительного алгоритма.

Вычислительный эксперимент имеет многовариантный характер, потому что решение поставленных задач часто зависит от многочисленных входных параметров. Но тем не менее каждый конкретный расчет в вычислительном эксперименте проводится при фиксированных значениях всех параметров. В результате вычислительного эксперимента довольно часто ставится задача определения оптимального набора параметров. При создании оптимальной установки приходится проводить большое число расчетов однотипных вариантов задачи, отличающихся значением лишь некоторых параметров. Поэтому при организации вычислительного эксперимента экспериментатору необходимо использовать эффективные численные методы.

3. Разрабатывается алгоритм и программа решения задачи.

4. При проведении расчетов в программе результат получается в виде некоторой цифровой информации, которую затем необходимо расшифровать. При вычислительном эксперименте точность информации определяется достоверностью модели, положенной в его основу, правильностью программ и алгоритмов, для чего обычно проводятся предварительные «тестовые» испытания модели.

5. Обработка результатов расчетов, их анализ и выводы. На данном этапе может возникнуть необходимость уточнения математической модели, то есть ее упрощения или усложнения; могут

появятся предложения по созданию упрощенных инженерных способов решения и формул, дающих возможность получить необходимую информацию более простым способом.

В науке и технике также известно немало областей, в которых вычислительный эксперимент оказывается единственно возможным при исследовании сложных систем [3].

В заключение отметим, что для проведения эксперимента любого типа необходимо:

- сформулировать гипотезу, подлежащую проверке;
- создать программы экспериментальных работ;
- определить способы и приемы вмешательства в объект исследования;
- обеспечить условия для осуществления процедуры экспериментальных работ;
- разработать пути и приемы фиксирования хода и результатов эксперимента;
- подготовить средства эксперимента (модели, установки, приборы, и т. п.);
- обеспечить эксперимент необходимым обслуживающим персоналом.

### ***3.2 Методика и планирование эксперимента***

*Методика* – это совокупность мыслительных и физических операций, размещенных в определенной последовательности, в соответствии с которой достигается цель исследования. При разработке методики проведения эксперимента необходимо предусматривать:

- проведение предварительного целенаправленного наблюдения над изучаемым объектом или явлением с целью определения его исходных данных (выбор варьирующих факторов, гипотез);

- создание оптимальных условий, в которых возможно экспериментирование (подбор объектов для экспериментального воздействия, устранение влияния случайных факторов);
- систематическое наблюдение за ходом развития изучаемого явления и точные описания фактов;
- определение пределов измерений;
- проведение систематической регистрации измерений и оценок фактов различными способами и средствами;
- создание перекрестных воздействий, повторяющихся ситуаций, изменение условий и их характера;
- создание усложненных ситуаций с целью подтверждения или опровержения ранее полученных данных;
- переход от эмпирического изучения к логическим обобщениям, анализу и теоретической обработке полученного фактического материала.

Правильно разработанная методика экспериментального исследования предопределяет его ценность. Поэтому разработка, выбор, определение методики должно проводиться особенно тщательно.

Исследователь при выборе методики эксперимента должен удостовериться в ее практической пригодности.

В методике подробно разрабатывается процесс проведения эксперимента, составляется последовательность проведения наблюдений и операций измерений, детально описывается каждая операция в отдельности с учетом выбранных средств для проведения эксперимента, обосновываются методы контроля качества операций, обеспечивающие при минимальном (установленном ранее) количестве измерений их заданную точность и высокую надежность.

Не менее важным разделом методики является выбор методов обработки и анализа экспериментальных данных. Обработка данных

сводится к систематизации всех цифр, классификации и анализу. Результаты экспериментов должны быть сведены в графики, формулы, таблицы, позволяющие качественно и быстро сопоставлять и анализировать полученные результаты. Все переменные должны быть оценены в единой системе единиц физических величин.

Особое внимание в методике должно быть уделено математическим методам обработки и анализу данных, например, аппроксимации связей между варьирующими характеристиками, установлению эмпирических зависимостей, установлению различных критериев. Диапазон чувствительности или нечувствительности критериев должен быть стабилизирован. При разработке плана-программы эксперимента всегда необходимо стремиться к его упрощению без потери достоверности и точности.

По своему объему эксперименты могут быть различными. В лучшем случае достаточно лабораторного, в худшем приходится проводить серию исследований: полигонных, поисковых или предварительных, лабораторных. На проведение любого эксперимента затрачивается большое количество ресурсов, производится множество наблюдений и измерений. Иногда может оказаться, что выполнено много лишнего и ненужного. Чаше это вызвано тем, что экспериментатор нечетко обосновал цель и задачи эксперимента. Поэтому важно, прежде чем приступать к проведению эксперимента, правильно и четко разработать его методологию.

В последнее время исследователи чаще стали применять математическую теорию эксперимента, которая позволяет значительно уменьшить объем работы и повысить точность исследования. Методология эксперимента в этом случае включает такие этапы, как разработка плана-программы; оценка измерений и выбор средств для проведения эксперимента; математическое

планирование эксперимента с одновременным проведением эксперимента; обработка и анализ полученных данных.

Таким образом, методика эксперимента – это система различных способов или приемов для последовательного и наиболее эффективного осуществления эксперимента.

Каждый экспериментатор должен составить *план* или *программу* проведения эксперимента, который включает:

- постановку цели и задач эксперимента;
- обоснование объема эксперимента, числа опытов;
- выбор варьируемых факторов;
- определение последовательности изменения факторов;
- порядок реализации опытов;
- выбор шага изменения факторов, задание интервалов между будущими экспериментальными точками;
- описание проведения эксперимента;
- обоснование средств измерений;
- обоснование способов обработки и анализа результатов эксперимента [3, 10].

Кроме перечисленных выше пунктов план эксперимента включает: наименование темы исследования; рабочую гипотезу, методику эксперимента, перечень необходимых материалов, приборов, установок; список исполнителей, календарный план и смету.

Таким образом, проведение эксперимента – это важнейший и наиболее трудоемкий этап, при его выполнении очень важна последовательность проведения опыта. После установления объема эксперимента составляют перечень средств измерений, материалов, список исполнителей, календарный план и смету расходов.

Ведение журнала, в котором фиксируются все характеристики исследуемого процесса и результаты наблюдений, является

обязательным требованием проведения эксперимента. Также одновременно с проведением эксперимента исполнитель должен проводить предварительную обработку результатов и их анализ [3, 9].

Планирование эксперимента необходимо производить в наиболее короткий срок и с наименьшими затратами, получая при этом достоверную и точную информацию. Этого можно достигнуть при планировании определенных правил, которые учитывают вероятностный характер результатов измерений и наличие внешних помех, которые могут воздействовать на изучаемый объект.

Все факторы, определяющие процесс, изменяются одновременно по специальным правилам, а результаты эксперимента представляются в виде математической модели, обладающей некоторыми статическими свойствами.

Таким образом, можно выделить несколько этапов планирования эксперимента:

- сбор и анализ собранной информации;
- выбор входных и выходных переменных, области экспериментирования;
- выбор математической модели, при помощи которой будут представляться экспериментальные данные;
- план эксперимента и выбор критерия оптимальности;
- проведение анализа данных и определение метода;
- проведение эксперимента;
- проверка статических предпосылок для полученных экспериментальных данных;
- обработка полученных результатов;
- интерпретация и рекомендации по использованию полученных результатов.

В процессе сбора и анализа собранной и обработанной информации устанавливают и анализируют все известные данные об



изучаемом процессе или объекте, какие факторы и как влияют на состояние процесса или объекта, их взаимосвязь, возможные пределы изменения и т. д.

Основные требования для выбора входных факторов – это возможность установления нужного значения данного фактора и поддержание его в течение всего опыта.

Факторы могут быть качественными и количественными. Уровням количественных факторов соответствует числовая шкала (давление, температура и т. п.). Качественными факторами могут являться конструкции аппаратов, катализаторы, и т. п.

*Выходные переменные* – реакции либо отклики на воздействие входных параметров. Они могут быть *экономическими* (прибыль, расход энергии и т. п.), *технологическими* (надежность, стабильность горения дуги, и т. п.) и т. д.

Выбор модели исследования зависит от наших знаний об объекте или процессе, его целей и математического аппарата. Чаще исследуемые модели и задачи сводятся к задаче получения статической модели. Она представляет собой математическую зависимость между входными и выходными параметрами изучаемого процесса или объекта. Теоретической основой для решения задачи статического моделирования является предположение о возможности описания протекающего процесса математическим уравнением.

Часто задачей исследования является оптимизация процесса, т. е. определение таких значений входящих параметров, при которых выходящий параметр имеет максимальное или минимальное значение.

В решении этой задачи выделяют два основных подхода: теоретический и эмпирический.

Существует также и промежуточный подход. При использовании этого подхода вид исходящей модели представляется

теоретически, а значения параметров рассчитываются по экспериментальным данным, полученным при изучении объекта.

В последние годы эмпирический подход используется гораздо шире. Это объясняется ростом сложности изучаемых объектов, недостатком времени на их детальное изучение, появлением новых эмпирических способов оптимизации и др. [2].

### **Методика проведения эксперимента**

В соответствии с объектом и целью исследования определяется метод исследования: наблюдение или эксперимент.

Под измерением понимается сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения. Измерения разделяют на прямые и косвенные. Прямыми называют такие измерения, в которых значение интересующей нас величины получается непосредственно путем отсчета по прибору (например, измерение длины линейкой, измерение интервала времени помощью секундомера и т. д.). При косвенных измерениях значение искомой величины вычисляется как функция одной или нескольких непосредственно измеряемых величин (например, измерение плотности тела по измерениям массы и линейных размеров тела и т. д.).

Измеряя какую-либо физическую величину, мы в принципе не можем получить ее истинное значение. Поэтому необходимо как-то указать, насколько полученный результат близок к истинному значению, иными словами, указать, какова погрешность измерений. Вместо термина «погрешность измерения» употребляют также термин «ошибка измерений». Погрешность измерений зависит от точности измерительных приборов, методики эксперимента, субъективных качеств экспериментатора, влияния внешней среды и т. д.

### ***3.3 Метрологическое обеспечение экспериментальных исследований***

Измерения занимают чрезвычайно важное место в экспериментальных исследованиях.

*Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (ГОСТ 16263-70). Сущность измерения составляет сравнение измеряемой величины с известной величиной, принятой за единицу, то есть эталон. Измерить какую-либо физическую величину  $Q$  – значит сравнить ее с другой величиной  $q$ , принятой за единицу измерений, и выразить первую в долях последней.

В математической форме это можно представить в виде зависимости

$$Q = kq,$$

где  $k$  – любое положительное целое или дробное число, показывающее, во сколько раз  $Q$  больше или меньше  $q$ .

*Метрология* занимается теорией и практикой измерения. Это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. К основам метрологии относятся:

- общая теория измерений;
- единицы физических величин, то есть величины, которым по определению присвоено числовое значение, равное единице. Также их системы, то есть совокупность основных и производных единиц, образованная в соответствии с некоторыми принципами, например, Международная система единиц СИ;
- методы и средства измерений. К методам относят совокупность приемов использования принципов и технических средств, применяемых при измерениях и имеющих нормирование метрологических свойств;
- методы определения точности измерений;

– основы обеспечения единства измерений. Результаты измерений обязательно должны быть выражены в узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью, что возможно только при единообразии средств измерения. Они должны быть проградуированы в узаконенных единицах, и их метрологические свойства должны соответствовать нормам [3, 12].

В метрологии важнейшее значение имеют эталоны и образцовые средства измерения. *Эталоном* считаются средства измерения или их комплекс, обеспечивающие воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим средствам измерения. Эталоны выполняются по особой спецификации. В России эталонная база содержит более 120 государственных эталонов, в том числе единицы массы, длины и др. [3, 13].

Измерения могут быть *статическими*, когда измеряемая величина не изменяется во времени, и *динамическими*. Измерения также бывают прямые и косвенные. При *прямых* измерениях искомую величину устанавливают непосредственно из опытов. При *косвенных* – функционально от других величин, определяемых прямыми измерениями, например измерение плотности тела через его массу и объем. Еще различают измерения абсолютные и относительные.

***Абсолютные*** – это прямые измерения в единицах измеряемой величины.

***Относительные*** – измерения, представленные отношением измеряемой величины к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Также существуют три класса измерений: особоточные, высокоточные и технические.

Как уже говорилось ранее, измерения являются основной составляющей частью любого эксперимента. От тщательности измерений зависит конечный результат эксперимента. Поэтому

каждый исследователь должен уметь правильно измерять изучаемые величины, знать закономерности измеряемых процессов, правильно оценивать погрешности при измерениях, определять наилучшие условия измерений, при которых ошибки будут наименьшими, вычислять значения величин и их необходимое минимальное количество и проводить общий анализ результатов измерений [3].

В метрологии различают несколько основных методов измерения.

*Метод непосредственной оценки.* Он определяет значение величины непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия (например, измерение массы на циферблатных весах).

*Метод сравнения с мерой.* При его использовании измеряемую величину сравнивают с величиной воспроизводимой меры (например, измерение массы на рычажных весах с уравновешением гирями).

*Нулевой метод* применяется для результирующего эффекта воздействия величины на прибор до нуля, например, измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием.

*Дифференциальный метод* основан том, что на измерительный прибор воздействует разность измеряемой и известной величины, воспроизводимой мерой, например, измерения, выполняемые при проверке мер длины сравнением с образцовой мерой на компараторах.

*Метод совпадений.* Разность между измеряемой величиной и величиной воспроизводимой меры измеряется с использованием периодических сигналов или совпадения отметок шкал.

*Метод замещения.* При его использовании измеренную величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой,

например, взвешиванием с поочередным помещением измеряемой массы и гири одну и ту же чашку весов.

Средства измерений являются обязательной и неотъемлемой частью экспериментальных исследований. Они являются совокупностью технических средств, имеющих нормированные погрешности, которые дают необходимую информацию для экспериментатора. К средствам измерений относятся измерительные приборы, меры, установки и системы.

*Мера* является самым простым средством измерения и предназначена она для воспроизведения физической величины заданного размера, например, гиря – мера массы.

Также выделяют средства измерения, которые позволяют непосредственно определить испытываемый показатель, например пресс для определения прочности материалов. Средства измерения, которые дают возможность косвенно судить об исследуемом показателе, например ультразвуковой дефектоскоп, который позволяет оценить прочность материала по скорости прохождения ультразвука.

*Измерительная установка* или *стенд*. Это особая система, состоящая из основных и вспомогательных средств измерений, предназначенных для измерения одной или нескольких величин. Установки могут вырабатывать сигналы, удобные для автоматической обработки результатов измерений. При проведении эксперимента иногда приходится создавать измерительные установки с фиксацией различных физических величин.

*Измерительный прибор* – это средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателя. Характеристиками измерительных приборов являются стабильность измерений, величина погрешности и точности и чувствительность.

Все приборы классифицируются по точности измерения, стабильности показаний, чувствительности, пределам измерения и др.

*Точность измерений* – это степень приближения измерения к действительному значению измеряемой величины.

*Погрешность измерения* – это алгебраическая разность между действительным значением и полученным при измерении. Количество минимальных измерений обеспечивает устойчивое среднее значение измеряемой величины, удовлетворяющее заданной степени точности.

Погрешность является одной из важных характеристик любого прибора, используемого при проведении эксперимента. Она может быть абсолютной и относительной:

абсолютная погрешность

$$\Delta X = \pm(X_u - X_d),$$

относительная погрешность

$$\delta_x = \frac{\Delta X}{X_d} \cdot 100\%,$$

где  $X_u$  – показания прибора;  $X_d$  – действительное значение измеряемой величины, полученное более точным методом.

*Основными погрешностями прибора* называются суммарные погрешности, которые установлены при нормальных условиях.

Чтобы повысить достоверность измерений и их точность, необходимо уменьшить погрешность. Погрешности при измерениях могут возникнуть вследствие ряда причин: влияние различных внешних факторов в процессе опытов, недостаточно тщательное проведение опытов; несовершенство методов и средств измерений; субъективные особенности экспериментатора и т. д.

Различают систематические и случайные погрешности.

*Систематические* – это погрешности, которые при повторных опытах остаются постоянными. При известных численных значениях

погрешностей их нужно учитывать во время повторных опытов. Систематические погрешности можно разделить на пять групп:

- 1) влияние внешней среды: вибрация, магнитные и электрические поля, влажность и т. д.;
- 2) неправильная установка средств измерений;
- 3) инструментальные, например, из-за износа инструмента, и т. д.;
- 4) методические, которые обоснованы выбором метода измерения;
- 5) субъективные.

*Случайные погрешности.* Они могут возникнуть случайно при повторных измерениях. Эти погрешности нельзя учесть и исключить, но при многократно повторенных измерениях с помощью статических методов их можно выявить и исключить.

*Диапазон измерения прибора* – это часть диапазона показаний прибора, для которой установлены его погрешности. При известных погрешностях прибора диапазон измерений и показаний прибора совпадает.

*Размахом прибора* называют разность между его максимальными и минимальными показателями. Если это непостоянная величина, то есть если при обратном ходе имеется увеличение или уменьшение хода, то эту разность называют *вариацией* показаний. Эта величина является простейшей характеристикой погрешности прибора.

Способность отсчитывающего устройства реагировать на изменения измеряемой величины является еще одной характеристикой прибора и называется *чувствительностью*. Порогом чувствительности прибора является наименьшее значение измеренной величины, вызывающее изменение показания прибора, которое можно зафиксировать.



Еще одной из основных характеристик прибора является его *точность*. Она характеризуется суммарной погрешностью.

Все приборы в зависимости от допускаемой погрешности делятся на классы. *Классом точности* является обобщенная характеристика, определяемая пределами основной и дополнительных допускаемых погрешностей, влияющих на точность. Класс точности часто обозначают допускаемой погрешностью в процентах (1-2 и т. д.).

*Воспроизводимость прибора*, или стабильность. Это свойство отсчетного устройства прибора обеспечивает постоянство показаний одной и той же величины. Она определяется вариацией показаний.

Выходной сигнал средств измерения фиксируется отсчетными устройствами. Они могут быть цифровыми, шкальными и регистрирующими.

Важной частью прибора является *шкала*. Длиной деления шкалы называют расстояние в миллиметрах между двумя смежными отметками на шкале. Разность между значениями измеряемой величины, соответствующую началу и концу шкалы, называют диапазоном показаний прибора [3, 14, 15].

Все средства измерения, используемые в научных исследованиях, проходят обязательную периодическую *поверку* на точность. Поверка предусматривает уменьшение погрешностей прибора. Она позволяет установить соответствие данного прибора регламентированной степени точности, а также определить возможность его применения для данных измерений. При поверке средств измерения определяются погрешности и устанавливается, не выходят ли они за пределы допускаемых значений.

В России государственные метрологические институты и лаборатории по надзору за стандартами и измерительной техникой производят государственный контроль по обеспечению единства мер.

Все средства измерений проверяются каждые 1-2 года. Средства измерения должны:

- максимально соответствовать тематике, цели и задачам научно-исследовательской работы;
- обеспечивать при проведении экспериментальных работ высокую производительность труда;
- обеспечивать требуемое количество экспериментальных работ, то есть заданную степень точности при минимальном количестве измерений;
- обеспечивать высокую воспроизводимость и надежность, по возможности исключать систематические ошибки, при этом желательно максимально использовать средства измерений с автоматической записью;
- иметь высокую экономическую эффективность, то есть минимум затрат людских, денежных и материальных ресурсов;
- обеспечивать эргономические требования эксперимента;
- удовлетворять требованиям техники безопасности и пожарной безопасности.

Таким образом, важнейшим фактором успешного проведения научных исследований является метрологическое обеспечение научных исследований и особенно обеспечение единства измерений, однообразие средств измерения. Поэтому без успешного развития метрологии невозможен прогресс в развитии науки и, наоборот, без успешного развития науки невозможен прогресс в метрологии.

### ***3.4 Полный факторный эксперимент***

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 удается 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 (ММ) исследуемого объекта. На эмпирическом уровне исследований в качестве ММ обычно используют алгебраические полиномы (полиномиальные

математические модели). Подобные модели называют так же уравнениями регрессии.

При планировании эксперимента исследуемый объект представляется «черным ящиком» (рис. 12), на который воздействуют факторы  $x_i$ , и на выходе из которого фиксируются исследуемые параметры  $y_i$ .

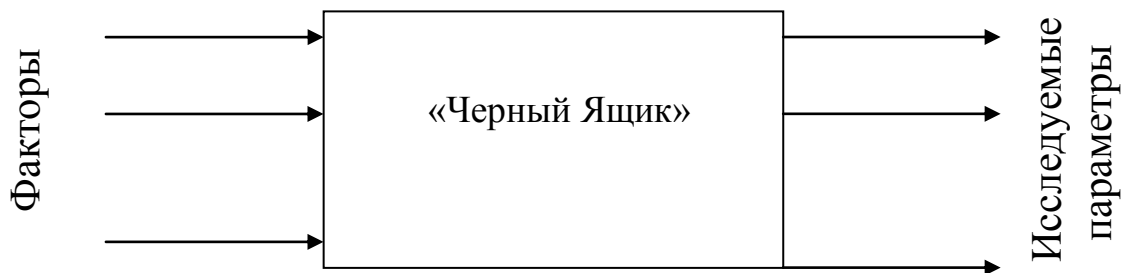


Рис. 12. Представление эксперимента в виде «черного ящика»

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:

$$x = \begin{pmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_n(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1(N) & x_2(N) & \dots & x_n(N) \end{pmatrix} \quad (35)$$

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

Точка

$$x^{(0)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j) \quad (36)$$

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

Математическая статистика доказывает, что наиболее адекватно описывают объект математические модели, полученные в результате эксперимента, план которого удовлетворял следующим критериям [17]:

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

Критерий рототабельности – 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

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n \sum_{l=k+1}^n a_{ikl} x_i x_k x_l, \quad (37)$$

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

Так, например, при  $n = 2$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2, \quad (38)$$

при  $n = 3$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + a_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (39)$$

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 [17].

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 дополнительные 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. 13).

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

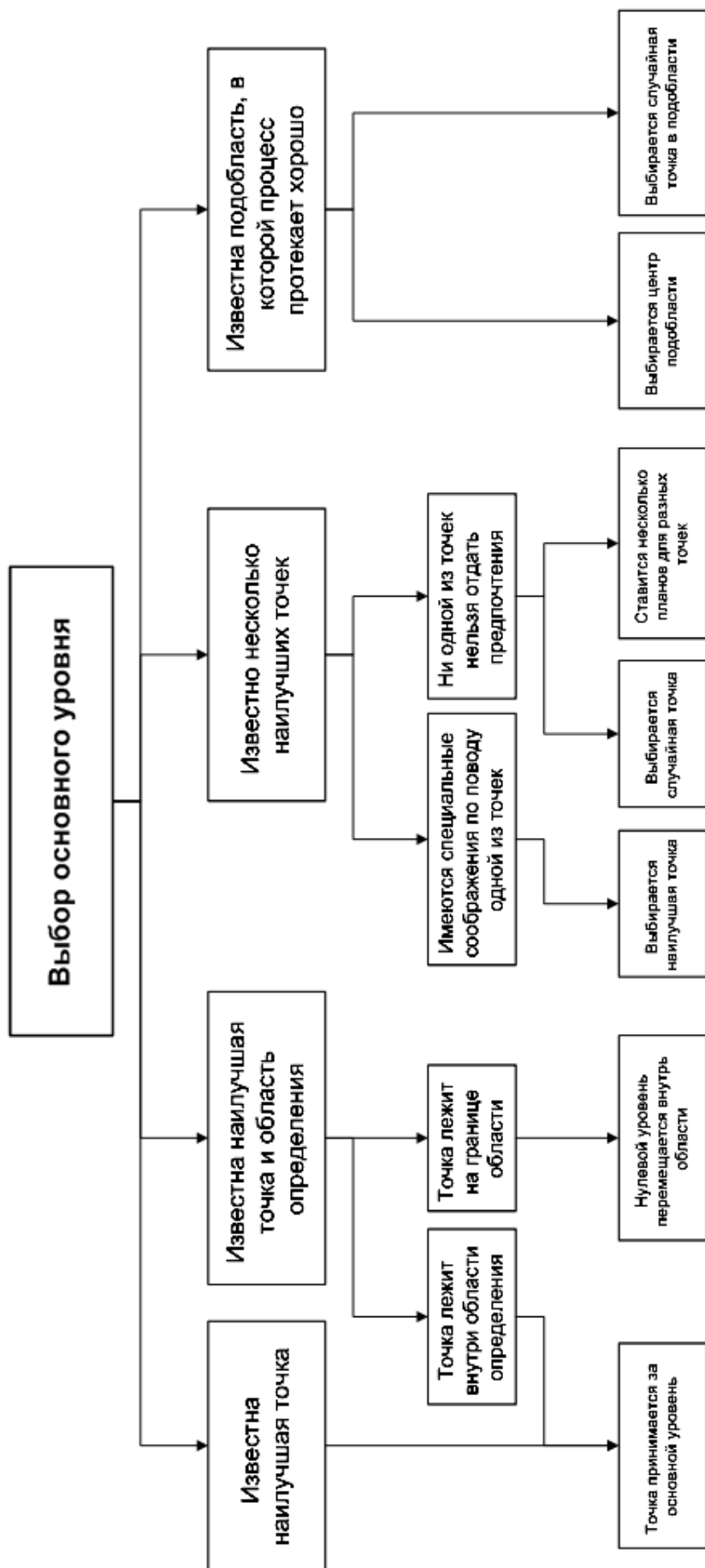


Рис. 13 Выбор основного уровня плана эксперимента

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 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:

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})}{I}, \quad (40)$$

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

Интеграл варьирования  $I$  равен:

$$I = |\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}|. \quad (41)$$

### ***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 взаимодействующих факторов. Для удобства расчета свободного члена  $a_0$  математической модели (37) 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

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0, \quad (42)$$

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

б) *условие нормировки*

$$\sum_{j=1}^N |x_{ij}| = N; \quad (43)$$

в) *ортогональность*

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{fj} = 0, \quad (44)$$

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 (37) 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  $\sigma_{y_i}^2$  выходного параметра  $y_i$  однородна в каждой точке факторного пространства. Для проверки этого в каждой точке факторного пространства проводится оценка дисперсии  $\sigma_{y_i}^2$  по формуле

$$\sigma_{yi}^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (y_{it} - \bar{y}_i)^2 . \quad (45)$$

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

$$G_p = \frac{\max \sigma_{yj}^2}{\sum_{i=1}^N \sigma_{yj}^2} . \quad (46)$$

Критическое значение  $G_{кр}$  критерия находят из таблицы распределения Кохрена (Приложение 1) по числу степеней свободы числителя  $f_1=K-1$ , знаменателя  $f_2=N$  и уровню значимости  $\alpha$ . 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

$$\begin{aligned}a_i &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i \bar{y}_j, \\a_{ik} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i x_k \bar{y}_j, \\a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j.\end{aligned}\tag{47}$$

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

### ***Проверка значимости коэффициентов регрессии***

Не все члены математической модели (37) 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  $\sigma_a$ :

$$t_p = \frac{|a_i|}{\sigma_a} . \quad (48)$$

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):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_y}{N} , \quad (49)$$

где  $\sigma_y$  – оценка дисперсии воспроизводимости эксперимента,

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{yj}}{N} . \quad (50)$$

Критическое значение критерия  $t_{кр}$  находят из таблицы распределения Стьюдента по числу степеней свободы  $f=N(K-1)$  и уровню значимости  $\alpha$  (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

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{(N-L)} \sum_{j=1}^N (y_{ip} - \bar{y}_j)^2, \quad (51)$$

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

$$F_p = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_y^2}. \quad (52)$$

Критическое значение  $F_{кр}$  находят из таблицы распределения Фишера (Приложение 3) по числу степеней свободы числителя  $f_1=K(N-L)$ , знаменателя  $f_2=N(K-1)$  и уровню значимости  $\alpha$ . 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

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})}{I}. \quad (53)$$

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

*Пример.*

Исследуется зависимость смазывающих свойств моторного масла от состава и содержания присадки, содержащей 3 компонента. Спланировать полный факторный эксперимент, по результатам получить уравнение регрессии, провести проверку воспроизводимости результатов, значимости коэффициентов регрессии, адекватности математической модели.

***Решение***

В качестве факторов выбираем содержание (массовая доля) первого компонента в присадке ( $x_1$ ), содержание второго компонента в присадке ( $x_2$ ), содержание присадки в масле ( $x_3$ ). Содержание компонентов в присадке может колебаться от 0% до 100%. Поэтому принимаем для  $x_1$  и  $x_2$  основной уровень 0,5 (50%), интервал варьирования 0,25 (25%). Содержание присадок в масле не превышает 4%. Поэтому в качестве основного уровня  $x_3$  принимаем 0,02 (2%), интервал варьирования 0,01 (1%). Условия проведения эксперимента сведем в таблицу 3.1. В качестве отклика будем рассматривать разницу изменения массы ролика трения, после проведения испытаний в стандартных условиях с маслом с присадкой и изменения массы ролика трения при испытаниях на масляной основе без присадки.

Расширенный план эксперимента представлен в табл. 3.2. Составляем серии опытов:

1 серия: 1,35,7,8,6,4,2; 2 серия: 3,7,6,4,2,1,5,8; 3 серия: 4,2,6,5,3,1,8,7.

Таблица 3.1

## Уровни факторов эксперимента

Характеристика	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Основной уровень	0,5	0,5	0,02
Интервал варьирования	0,25	0,25	0,01
Верхний уровень	0,75	0,75	0,03
Нижний уровень	0,25	0,25	0,01

Таблица 3.2

## Расширенный план эксперимента

$N$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Эксперимент спланирован.

Пусть получены результаты, представленные в табл. 3.3.

Расчет начинаем с определения значения величин  $\bar{y}_i$  по зависимости

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i,$$

где  $n$  – число измерений в одной точке плана (в данном примере  $n=3$ );  
и  $\sigma_{y_i}^2$  по зависимости (45) соответственно.

Результаты расчета представлены в таблице 3.4.

Проверим воспроизводимость результатов эксперимента (однородность дисперсий). Расчетное значение критерия Кохрена, рассчитанное по зависимости (46), равно  $G_p=0,29$ . Критическое значение находим по таблицам  $G$  распределения (Приложение 2) по числу степеней свободы числителя  $f_1=K-1=2$ , знаменателя  $f_2=N=8$  и доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ ,  $G_{кр}=0,52$ .  $G_p < G_{кр}$ , следовательно, дисперсии однородны.

Таблица 3.3

Результаты эксперимента

Номер точки	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	10,88	10,57	13,06
2	23,98	17,85	18,62
3	8,30	11,89	11,13
4	9,39	16,80	10,32
5	10,23	9,60	14,67
6	44,02	40,30	40,76
7	12,25	11,56	17,09
8	27,73	30,80	27,81

Таблица 3.4

Пример расчета коэффициентов уравнения регрессии

N	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$	$y_{i1}$	$y_{i2}$	$y_{i3}$	$\bar{y}_i$	$\sigma_{y_i}^2$	$y_{ip}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	10,88	10,57	13,06	11,50	1,84	11,72
2	+	+	-	-	-	-	+	+	23,98	17,85	18,62	20,15	11,15	20,37
3	+	-	+	-	-	+	-	+	8,30	11,89	11,13	10,44	3,58	10,22
4	+	+	+	-	+	-	-	-	9,39	16,80	10,32	12,17	16,28	11,95
5	+	-	-	+	+	-	-	+	10,23	9,60	14,67	11,50	7,63	11,28
6	+	+	-	+	-	+	-	-	44,02	40,30	40,76	41,70	4,12	41,48
7	+	-	+	+	-	-	+	-	12,25	11,56	17,09	13,63	9,09	13,85
8	+	+	+	+	+	+	+	+	27,73	30,80	27,81	28,78	3,07	29,00
$\sum_{i=1}^N x_i y_i$	149,87	55,72	-19,83	41,35	-21,96	34,97	-1,74	-8,13						
$a_i$	18,73	6,96	-2,48	5,17	-2,75	4,37	-0,22	-1,02						
$t_i$	56,26	20,92	7,44	15,52	8,25	13,13	0,65	3,03						
Значимость	да	да	да	да	да	да	нет	да						



Рассчитываем значения коэффициентов регрессии  $a_i$  по зависимостям (47). Результаты представлены в таблице 3.4.

Проверяем значимость коэффициентов регрессии. Расчетные значения критерия Стьюдента  $t_i$ , вычисленные по зависимостям (48)-(50) для каждого коэффициента, приведены в таблице 3.4. Критическое значение находим по таблице t-распределения (Приложение 1) по числу степеней свободы  $f=N(K-1)=8(3-1)=16$  и уровню значимости  $\alpha=0,95$ .  $t_{кр}= 2,120$ . Для коэффициента  $a_{23}$   $t_p < t_{кр}$ , следовательно, этот коэффициент незначим и может быть приравнен к нулю. Для остальных коэффициентов  $t_p > t_{кр}$  и коэффициенты значимы.

Уравнение регрессии в нормированном масштабе факторов имеет вид:

$$y = 18,73 + 6,96x_1 - 2,48x_2 + 5,17x_3 - 2,75x_1x_2 + 4,37x_1x_3 - 1,02x_1x_2x_3.$$

Рассчитываем по уравнению значения  $y_{pi}$  в каждой точке факторного пространства, результат представлен в таблице 3.4.

Рассчитываем по зависимостям (50)-(52) значения дисперсии адекватности, дисперсии воспроизводимости и F критерия Фишера:

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{(N - L)} \sum_{j=1}^N (y_{ip} - \bar{y}_j)^2 = 0,19,$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{yj}}{N} = 7,10,$$

$$F_p = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_y^2} = 0,03.$$

Критическое значение критерия Фишера  $F_{кр}$  находим по таблице F-распределения (Приложение 3) по числу степеней свободы

числителя  $f_1 = K(N - L) = 3(8 - 6) = 6$ , знаменателя  $f_2 = N(K - 1) = 8(3 - 1) = 16$  и уровню значимости  $\alpha = 0,95$ .  $F_{кр} = 2,74$ . Так как  $F_p < F_{кр}$ , математическая модель признается адекватной.

Переводим математическую модель в натуральный масштаб:

$$\begin{aligned} y &= 18,73 + 6,96x_1 - 2,48x_2 + 5,17x_3 - 2,75x_1x_2 + 4,37x_1x_3 - 1,02x_1x_2x_3 = \\ &= 18,73 + 6,96 \cdot \left( \frac{\tilde{x}_1 - 0,5}{0,25} \right) + 5,17 \cdot \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0,5}{0,25} \right) + 5,17 \cdot \left( \frac{\tilde{x}_3 - 0,02}{0,01} \right) - \\ &- 2,75 \cdot \left( \frac{\tilde{x}_1 - 0,5}{0,25} \right) \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0,5}{0,25} \right) + 4,37 \cdot \left( \frac{\tilde{x}_1 - 0,5}{0,25} \right) \left( \frac{\tilde{x}_3 - 0,02}{0,01} \right) - \\ &- 1,02 \cdot \left( \frac{\tilde{x}_1 - 0,5}{0,25} \right) \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0,5}{0,25} \right) \left( \frac{\tilde{x}_3 - 0,02}{0,01} \right). \end{aligned}$$

После математических преобразований уравнение регрессии примет вид:

$$\begin{aligned} y &= 14,07 - 1,44\tilde{x}_1 - 4,24\tilde{x}_2 - 765\tilde{x}_3 - 11,36\tilde{x}_1\tilde{x}_2 + 2564\tilde{x}_1\tilde{x}_3 + \\ &+ 816\tilde{x}_2\tilde{x}_3 - 1632\tilde{x}_1\tilde{x}_2\tilde{x}_3. \end{aligned}$$

Задача решена.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какова роль эксперимента в научном исследовании?
2. Какие виды экспериментов вы знаете?
3. Что в себя включает план эксперимента?
4. Как планируется эксперимент?
5. Что такое факторы эксперимента?
6. Что такое измерение? Его виды.
7. Что такое погрешность измерения?
8. Что такое систематические погрешности и как их устранить?
9. Что такое случайные погрешности? В чем их природа? Как их устранить?
10. Что такое класс точности прибора?

11. Что такое полный факторный эксперимент?
12. Что такое воспроизводимость эксперимента?
13. В чем заключается свойство адекватности математической модели?

## **Глава 4. ОСОБЕННОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ И КОЛЛЕКТИВНОЙ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.**

### **ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОГО КОЛЛЕКТИВА**

#### ***4.1 Особенности индивидуальной и коллективной научной деятельности***

Научная деятельность имеет ряд специфических особенностей. Говоря об этих особенностях, необходимо различать два их вида. *Индивидуальная научная деятельность* – процесс научной работы отдельного исследователя. *Коллективная научная деятельность* – деятельность всего сообщества ученых, работающих в данной отрасли науки, или работа научного коллектива исследовательского института, научных групп.

Рассмотрим несколько особенностей индивидуальной научной деятельности.

1. Любая научная работа строится «на плечах предшественников». Прежде чем приступать к научной работе по какой-либо проблеме, необходим наиболее полный анализ научной литературы, т. е. того, что было сделано в исследуемой области предшественниками.

2. Научный работник должен четко ограничивать рамки своей деятельности и определять цели своей научной работы. В науке, как и в других областях профессиональной деятельности, происходит естественное разделение труда.

Научный работник не может заниматься «чистой наукой». Он должен выбрать четкое направление работы, поставить конкретную цель и последовательно идти к ее достижению. Свойством научной работы является то, что на пути исследователя постоянно «попадают» интереснейшие явления и факты, которые сами по себе имеют большую ценность и которые хочется изучить подробнее. Но тем самым исследователь рискует отвлечься от

главной цели своей научной работы и заняться изучением этих побочных явлений и фактов, за которыми могут открыться новые явления и факты, и это может продолжаться без конца. Таким образом, работа «расплывется» и результатов может не быть. Это является типичной ошибкой большинства начинающих исследователей.

Одним из главных качеств является способность научного работника сосредоточиться только на той проблеме, которой он занимается, а все побочные использовать только на том уровне и в той мере, как они описаны в современной научной литературе.

3. Научный работник обязательно должен освоить научную терминологию и строго выстроить свой понятийный аппарат. Многие начинающие научные работники считают, что если писать как можно сложнее и непонятнее, тем это будет научнее. Главным достоинством настоящего ученого является то, что он говорит и пишет о самых сложных вещах простым языком.

Исследователь должен провести четкую грань между обыденным и научным языком. Различие заключается в том, что к обыденному разговорному языку не предъявляется особых требований. А научный язык подчиняется определенным правилам и нормам.

В любой науке параллельно существуют различные научные школы, и каждая выстраивает свой собственный понятийный аппарат. Поэтому, если исследователь возьмет один термин в трактовке одной научной школы, другой – в понимании другой и т. д., в результате получится полный разнобой в использовании понятий. Таким образом, никакой новой системы научного знания исследователь не создаст, поскольку, что бы он ни писал и ни говорил, он не выйдет за рамки обыденного знания.

4. Результат любого исследования должен быть обязательно оформлен в электронном и печатном виде. Обязательное условие –

публикация работы. Она может быть в виде научного доклада, статьи, научного отчета, реферата или монографии.

Такое требование вызвано двумя обстоятельствами. Во-первых, только в письменном виде можно изложить свои идеи и результаты на строго научном языке. В устной речи это получается крайне редко. Причем написание любой научной работы, даже самой маленькой статьи, для начинающего исследователя представляет большую сложность, поскольку то, что легко проговаривается в публичных выступлениях или же мысленно «про себя», оказывается трудно изложить на бумаге. Здесь та же разница, что и между обыденным и научным языками. В устной речи мы не замечаем логических огрехов. Письменный же текст требует строгого логического изложения, а это сделать намного труднее.

Во-вторых, главная цель любой научной работы – получить и довести до людей новое полученное научное знание. И если это «новое научное знание» остается только в голове исследователя и о нем никто не сможет прочитать, то это знание пропадет. Кроме того, количество и объем научных публикаций являются показателем продуктивности любого научного работника. И каждый исследователь постоянно старается пополнять список своих опубликованных работ.

Рассмотрим некоторые особенности коллективной научной деятельности.

1. Коммуникации в науке. Любые научные исследования могут проводиться только в определенном сообществе ученых. Это обусловлено тем, что любому исследователю, даже самому квалифицированному, всегда необходимо обговаривать и обсуждать с коллегами свои идеи, полученные факты, теоретические построения, чтобы избежать ошибок и заблуждений.

Начинающие исследователи нередко считают, что будут заниматься научной работой сами по себе, а когда получат большие результаты, тогда и будут их публиковать. Такие исследователи запутывались в своих исканиях и, разочаровавшись, оставляли научную деятельность. Поэтому необходимо научное общение.

Одним из условий научного общения для любого исследователя является его непосредственное и опосредованное общение со всеми коллегами, работающими в данной отрасли науки. Это могут быть различные научно-практические конференции, семинары и симпозиумы (непосредственное или виртуальное общение), а также научная литература – статьи в печатных и электронных журналах, сборниках (опосредованное общение). И в том и в другом случае исследователь, с одной стороны, выступает сам или публикует свои результаты, а с другой стороны, слушает и читает то, чем занимаются другие исследователи, его коллеги.

2. Плюрализм научного мнения. Поскольку любая научная работа является процессом творческим, очень важно, чтобы этот процесс не был «зарегламентирован». Научная работа каждого исследовательского коллектива должна довольно строго планироваться. Но при этом каждый исследователь имеет право на свою точку зрения, свое мнение, которые, безусловно, должны уважаться. Навязывание всем общей единой точки зрения никогда не приводило к положительному результату. Этим фактором обусловлено существование в одной и той же отрасли науки различных научных школ.

3. Внедрение результатов исследования – важнейший этап научной деятельности, поскольку конечной целью науки как отрасли народного хозяйства является внедрение полученных результатов в практику. Однако не все результаты научной работы должны быть обязательно внедрены.

Довольно часто исследования проводятся для обогащения самой науки, развития ее теории и арсенала ее фактов. Лишь при накоплении определенной «критической массы» фактов, концепций, происходят качественные скачки – внедрение достижений науки в массовую практику. Например, микология – наука о плеснях. Десятилетиями ученые–микологи пытались доказать, что плесень надо изучать, а не уничтожать. Это происходило до тех пор, пока в 1940 г. А. Флеминг не открыл бактерицидные свойства пенициллов (разновидности плесени). Созданные на их основе антибиотики позволили во время Второй мировой войны спасти миллионы человеческих жизней, а сегодня мы уже не представляем, как бы без них обходилась медицина [1].

#### ***4.2 Структурная организация научного коллектива и методы управления научными исследованиями***

Организацией научных исследований является система взаимосвязанных структур и организаций, которые обеспечивали бы оптимальный режим и непрерывное совершенствование научного труда с целью получения эффективных результатов. В соответствии с иерархией структур научных учреждений и ведомств различают организацию научных исследований на различных уровнях:

- организация труда научного работника;
- работа подразделений научного учреждения;
- деятельность научного учреждения.

Важное место занимает научная организация труда. Ее основные положения предусматривают высокую организованность труда научного работника, плавность научной работы, контролирование и точное фиксирование результатов работы, обеспечение резерва в научной работе, строгое соблюдение режима и гигиены умственного труда, использование средств для механизации и автоматизации.



Вопросы организации работы научных коллективов приобретают особое значение, так как их структура должна обеспечить возможность специализации и кооперации труда ученых.

*Структурная организация научного коллектива.* В настоящее время наиболее распространена четырехзвенная структура научного учреждения: группа, лаборатория, отдел, учреждение (или группа, кафедра, факультет, институт).

Оптимальный состав группы может быть от 3 до 10 научных работников и от 5 до 10 человек вспомогательного персонала. Состав лабораторий колеблется от 20 до 60 человек. Однако не только количество научных сотрудников определяет результат научной работы. Весьма важное значение имеет подбор их по квалификации и специальности. Значительную роль играет руководитель коллектива, который обязан последовательно принимать меры по сплочению коллектива вокруг общих целей [2].

В научном учреждении образуют Совет, который является совещательным органом при директоре (ректоре). В состав Совета входят руководители учреждения, его отделов, лабораторий, ведущие ученые и представители общественных организаций. Совет рассматривает научные и технические проблемы, планы, работу отделов и лабораторий и др.

*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.

Численность научного коллектива имеет серьезное значение при выборе методов и средств его управления. Когда в непосредственном подчинении оказывается более семи или восьми человек, руководитель в процессе управления начинает испытывать

определенные трудности, и они непрерывно возрастают, с ростом численности коллектива.

Выделяют три стиля управления коллективом:

- 1) руководитель как можно дольше пытается удержать управление каждым человеком в своих руках;
- 2) руководитель выделяет группу для непосредственного управления;
- 3) руководитель пытается структурировать коллектив.

Первый стиль руководства часто приводит к хаотичному управлению, когда начальник отдает указания одним подчиненным, а спрашивает с других, при этом не выдерживается плановое распределение обязанностей. В результате получается, что в руководимом коллективе почти всегда находятся сотрудники, которые, пообещав выполнить задание, ничего не делают, но стараются не попадаться на глаза начальнику, рассчитывая, что поручение может забыться.

Второй стиль руководства частично свободен от вышеназванных недостатков, так как руководитель внимательно следит за деятельностью не более 5 подчиненных.

Третий – считается пассивным, так как управление практически полностью отдается в руки подчиненных. Чаще это приводит к порочному кругу управления, когда все в равной степени безответственны.

Методы управления научными исследованиями подразделяются:

- на организационно-распорядительные;
- экономические;
- социально-психологические.

Организационные методы существуют в форме организационного и распорядительного воздействия. Методы организационного воздействия определяют структуру научного учреждения, нормативные документы. Этот метод имеет периодический характер, так как структура и документы изменяются через относительно длительные промежутки времени. Наиболее активной и гибкой формой является распорядительное воздействие. Оно направлено на устранение различных отклонений от поставленных задач и реализуется в форме приказов и распоряжений.

#### ***4.3 Основные принципы организации деятельности научного коллектива***

Успешная деятельность научного коллектива во многом зависит от того, соблюдаются ли принципы организации работы с людьми.

*Принцип предупреждающей оценки работы* заключается в своевременном информировании сотрудников для исключения отождествления ими временных затруднений с отрицательными последствиями самого управленческого мероприятия.

*Принцип информированности о существующей проблеме.* Любое полезное нововведение может быть воспринято позитивно и даже с энтузиазмом, если для членов коллектива станет ясно, какие производственные или социальные задачи будут решены в результате их работы.

*Принцип всеохватываемости.* Работники всех звеньев, на которых прямо или косвенно окажет влияние новое задание, должны быть не только заранее проинформированы о возможных проблемах, но и привлечены к участию в их разрешении.

*Принцип инициативы снизу.* Информация о предстоящей задаче должна войти в сознание непосредственных исполнителей. Когда

работники понимают нужность и пользу работы, она выполняется гораздо быстрее и более качественно.

*Принцип непрерывности деятельности.* Завершение одной разработки должно совпадать с началом разработки другого задания, которое может усилить возможности первой разработки либо придет к ней на смену.

*Принцип индивидуальной компенсации.* Этот принцип учитывает особенности ценностных ориентаций людей, их потребности и интересы.

*Принцип постоянного информирования.* Руководитель коллектива должен систематически информировать весь коллектив о достигнутых успехах в решении задачи и о трудностях и срывах. При этом следует устанавливать самые разнообразные формы обратной связи.

*Принцип учета общих особенностей* восприятия инноваций различными людьми. Результаты исследований психологов показывают, что всех людей по их отношению к новым заданиям и нововведениям можно подразделить на энтузиастов, новаторов, нейтралов, рационалистов, скептиков, консерваторов, ретроградов. Учитывая индивидуальные особенности характеров, руководитель может целенаправленно влиять на работников, тем самым формируя их поведение, способствующее более эффективной деятельности.

#### ***4.4 Методы сплочения научного коллектива***

Чаще всего руководитель приходит в уже сформированный коллектив и, соответственно, должен по мере необходимости решать вопросы естественной текучести кадров. Это является одним из аспектов управления коллективом. Чтобы успешно сотрудничать с человеком, руководитель должен иметь определенное представление о качествах личности каждого работающего или вновь привлекаемого для работы в коллективе сотрудника. Важно учитывать такие

личностные качества, как профессиональная подготовка; социальная активность; способность выполнять определенный тип работы; социально-психологические качества, то есть умение взаимодействовать с другими людьми в процессе совместной работы; деловые качества, то есть способность без суеты добиваться достижения определенных практических результатов за короткое время; интеллектуально-психологические возможности (интеллектуальный уровень, творческий потенциал, инициативность, силу воли). То есть надо знать все, что может влиять на процесс работы человека и на его результат. Кроме вышперечисленного, надо уметь оперировать этим знанием так, чтобы получать надежный прогноз делового поведения работника.

Дифференцированный подход в работе с людьми опирается на схему управленческого решения задач подбора и расстановки кадров «хочу» – «могу» – «нужно». Эти три компонента взаимосвязаны. Первый компонент характеризует систему потребностей и интересов каждого отдельного работника. Второй характеризует личные возможности человека (профессиональные и общественные). И третий определяет потребность системы в кадрах определенной квалификации претендента на рабочее место. Не всегда компоненты «хочу» и «нужно» полностью совпадают.

Следует иметь в виду, что способности работника при соответствующих условиях могут развиваться и корректироваться. В настоящее время разработан ряд методов изучения деловых и личностных качеств работников. Например, один из методов «Типология-7» предназначен для выявления у человека врожденных или приобретенных «управленческих» качеств, таких как креативность, то есть способность к прогрессивным преобразованиям, авантюризм, надежность, исполнительность, деловитость, консервативность.

При формировании научного коллектива руководителю необходимы знания и выполнение организационных и психологических принципов и правил. Например, полезно учитывать правило неадекватности отображения человека человеком, чтобы не попасть в зависимость от ранее полученных сложившихся оценочных установок. Или на основе эффекта ложного согласия («так говорят все») может сложиться неверное представление о сотруднике.

Также вредит деятельности коллектива эффект снисхождения. Он проявляется при излишне положительной оценке качества личности, события и поступка. Типичная логическая ошибка может быть построена на неверном предположении тесной связи определенных свойств личности с признаками поведения. Например, молчаливость не всегда является признаком ума.

Иногда неверная оценка личности формируется из-за так называемых ошибок контраста. Например, люди могут казаться более раскованными и легкими в общении, если их сопоставлять с людьми застенчивыми. Нередко встречаются также ошибки национальных, профессиональных и других стереотипов.

Учет всех перечисленных выше оценок сотрудников, составляющих научный или другой тип коллектива, может способствовать повышению его работоспособности. Основой сплоченности, а, следовательно, и эффективной работы коллектива является его здоровый психологический климат.

Здоровый психологический климат способствует ориентации стимулов к труду на личные потребности. Но это не означает, что руководитель должен заботиться прежде всего о материальных стимулах. Также крайне важно удовлетворить основные нравственные потребности личности, которые возникают в профессиональной деятельности и профессиональном общении в процессе работы. К таким нравственным качествам относятся:

стремление творчески выразить себя в труде; осознание личной сопричастности к делам и планам коллектива; уважение товарищей по работе; гордость своим знанием, мастерством; признание социальной значимости результатов работы, то есть почет по заслугам.

Веским аргументом для сплочения коллектива является общественная работа. Она помогает развивать коммуникативные способности, полностью раскрывать сильные стороны личности, такие как интеллект, характер, нравственные качества. Достаточно эффективным методом сплочения коллектива считается широкое привлечение сотрудников к техническому творчеству, изобретательству и, особо, управлению делами производства. И, наконец, очень сближают людей совместное проведение досуга, то есть занятия спортом, отдых, культурные развлечения [2, 26, 28].

#### ***4.5 Психологические аспекты взаимоотношений руководителя и подчиненного***

Руководитель должен обладать такими качествами, как предприимчивость, то есть изобретательность, находчивость, инициативность, энергичность, практичность. Развитию инициативы и предприимчивости способствуют постоянное изучение и обобщение передовых достижений науки и техники в той области знаний, в которой работает данный коллектив.

Руководитель должен периодически повышать свой профессиональный уровень. Каждый руководитель должен обладать соответствующим уровнем компетентности, определяемым его знанием и опытом. Именно компетентность позволяет ему принимать участие в разработке определенного круга решений или решать самому.

При управлении коллективом руководитель всегда должен придерживаться определенной служебной этики, то есть норм и правил поведения, которые основываются на общественном мнении и традициях. Он должен уметь выделять существенные общие и особенные черты в людях и в ситуациях, понимать логику развития ситуации, переносить положительный опыт из одной ситуации в другую.

Важно уметь сопереживать другим людям, уметь в условиях ограниченного времени свертывать до минимума процесс общения с подчиненными, воспитывать в себе память на людей и типичные социальные ситуации. Для экономии энергетических затрат на руководство уметь избирательно реагировать на поступки людей, проявлять настойчивость в реализации своих целей и владеть всеми этими этически оправданными методами воздействия на людей. Руководителю следует иметь в виду, что отдельные сотрудники иногда применяют различные приемы «самозащиты» в целях приобретения каких-то привилегий. Например, держаться подальше от руководства, чтобы иметь возможность сказать, что им не руководили, не помогали, что задача для него слишком сложна: «я не профессор».

При положительной оценке сотрудника руководитель должен учитывать ряд факторов, от соотношения которых зависит правильность его оценочного решения. К таким факторам можно отнести:

- опыт выполнения подобной работы прежде;
- характер выполняемой работы, то есть важность задания, объем, качество, сроки;
- реакция коллектива;
- притязания сотрудника (похвала должна быть в меру).



Взвесив все факторы, можно точнее сориентироваться в положительной оценке сотрудника и форме ее оглашения (публично или наедине).

При негативной оценке деятельности сотрудника от руководителя требуется особое чувство меры и большой психологический такт. Только с учетом факторов, которые могут охарактеризовать последствия допущенной ошибки, переживание его вины, руководитель может правильно оценить работника и в связи с этим усилить или ослабить критику. Высказать её сразу или спустя некоторое время публично или наедине. Руководитель также должен решить, в какой форме будет высказываться (устный или письменный выговор). Любое принимаемое руководителем решение не должно зависеть от его настроения и самочувствия.

Если сотрудник в чем-то провинился, то с ним необходимо побеседовать. Подобный разговор удобнее провести в конце рабочего дня, но ни в коем случае не перед ответственной, а тем более опасной работой.

Чтобы работа коллектива стала более эффективной и творческой, руководитель может воспользоваться следующими советами:

- хороший коллектив – это чаще всего продукт повседневных и длительных усилий руководителя;
- воспитать хорошего подчиненного – благородная, хотя и трудная задача. Нужно научить его думать, а не делать из него безукоризненного, но бездумного исполнителя;
- во избежание недоразумений отдавать приказы и распоряжения в письменной форме;
- не критиковать подчиненных на людях, особенно когда вы взволнованны и раздражены; уметь слушать подчиненных;
- говорите кратко, предварительно обдумывая все, что хотите сказать;

– уметь честно признавать свои ошибки, в этом залог эффективной совместной работы;

– контролировать работу подчиненных постоянно, своевременно, оперативно, при этом основной акцент делать на важных этапах работы;

– не выполнять работу за подчиненных;

– ориентироваться на положительную мотивацию, так как она эффективнее отрицательной;

– передавать задание на тот уровень компетентности, на котором оно может быть успешно выполнено;

– будьте мудрее других, но не показывайте этого.

Руководителю в психологии общения с подчиненными нужно учитывать особенности психологии мужчин и женщин, возраст, темперамент, образовательный уровень сотрудников, обладать знаниями о конфликтах в коллективе и способах их разрешения.

Конфликт является одним из средств управления, и неверно поступает тот руководитель, который стремится либо подавлять все возникающие конфликты без разбора, либо не вмешиваться в них. Обе эти позиции являются неверными. Полезная функция конфликтов вытекает из известного положения о том, что источником всякого развития является противоречие, столкновение противоположных сил или тенденций. Конечно, не всякий конфликт способствует развитию коллектива, поэтому руководитель должен стремиться воздействовать на конфликт в нужном направлении.

Конфликты можно подразделить на эмоциональные и деловые. Источник эмоциональных кроется в личностных качествах оппонентов или в их психологической несовместимости. Деловые конфликты происходят, например, из-за распределения ответственности за выполнение должностных функций.

Известно несколько способов поведения человека в конфликте. Рациональный или целенаправленный предполагает логический анализ позиций каждого из участников конфликта, определение цели и средств конфликтного взаимодействия, построение стратегии поведения. Эмоциональный направляется сиюминутными требованиями ситуации и неосознанными побуждениями.

В конфликтные ситуации чаще всего попадают неуправляемые личности, характеризующиеся отсутствием самоконтроля, неумением планирования своего поведения и пренебрежением последствиями поступков, и сверхточные личности, которые отличаются особой скрупулезностью и добросовестностью в работе и поведении; их завышенные требования предъявляются не только к себе, но и к окружающим, что иногда приводит к придирчивости.

На стиль научной и производственной деятельности влияет также тип нервной системы человека. Люди с сильной нервной системой способны дольше и с большей интенсивностью трудиться в течение суток. Но вследствие этого они порой не щадят своего здоровья, расшатывают свою нервную систему и портят отношения с другими сотрудниками на работе. Людям же со слабой нервной системой особенно необходимо планирование режимов труда и отдыха.

Также заметны различия и между работниками разного возраста. Молодые сотрудники нередко оказываются участниками конфликтов из-за неумения соблюдать требования трудовой дисциплины, подчинять свои интересы интересам дела и коллектива. Эта может стать причиной конфликтов как со старшими товарищами, так и с руководителем, предъявляющим к ним законные требования. Чем старше человек, тем требовательнее он относится к условиям своего труда, в частности к санитарно-гигиеническим условиям.

Руководитель должен учитывать, что образовательный уровень сотрудников предъявляет к нему свои дополнительные требования.

Чем выше этот уровень, тем больше сотрудники ищут возможности для реализации своего потенциала, ищут дело, которое приносило бы им удовлетворение, позволяло бы проявить свои творческие способности. И это стремление необходимо использовать максимально.

Нередко в коллективе в результате неформальных контактов складываются группы людей, тяготеющих друг к другу не только из-за рабочих моментов. Такие группы, чаще всего из трех человек, в социальной психологии называются неформальными. Такая группа обладает большой силой влияния на своих членов. Человек, входящий в такую группу, подвергается двум видам управляющих воздействий: со стороны своего непосредственного руководителя и со стороны неформальной группы. Если руководитель сумеет направить воздействие группы на отдельного ее члена по нужному пути, то группа становится союзником руководителя. Если же группа ожидает от своего члена одного поведения, а руководитель другого, то, как правило, возникает конфликт.

Исследования психологов показали, что хорошее отношение членов такой группы обычно ценится дороже, чем благодарность в приказе. Боязнь потерять уважение и расположение группы действует на человека сильнее, чем угроза выговора. Если же член группы, следуя групповым ожиданиям, идет на конфликт с руководителем, то группа обычно «принимает удар на себя», в результате возникает конфликт между руководителем и группой. Поэтому руководитель должен найти формы управления не отдельными работниками, а неформальными группами, рассматривая каждую из них как самостоятельную единицу. Нужно стремиться к тому, чтобы его действия были эффективными, и учитывать эту специфику при формировании стратегии управления.

Эффективность работы группы во многом зависит от позиции ее неформального лидера. Некоторые руководители иногда чересчур настороженно относятся к деятельности лидера и стремятся потеснить его с занимаемых позиций. Такая тактика обычно кончается неудачей, так как всякие нападки на лидера лишь укрепляют его позицию в группе и сплачивают ее вокруг него. Нужно попытаться привлечь лидера на свою сторону, опереться на его реальный авторитет, сделать его своим союзником. Управлять – значит создавать такую обстановку, в которой с необходимостью будет получен запланированный результат. Полный успех может быть достигнут тогда, когда цели организации воспринимаются членами группы как свои, личные.

Трудовой коллектив не просто функционирует, он постоянно развивается, но не всегда его развитие напоминает постепенную эволюцию. Как известно, новое рождается в борьбе со старым. Сознательные изменения, какие вносятся в деятельность коллектива, нередко встречают сопротивление, порождают споры и противоречия, так как не всегда и не все сразу оказываются подготовленными к тем новым требованиям, с которыми им приходится столкнуться. Этот фактор не должен останавливать руководителя. В конце концов, страшны не сами противоречия между людьми, а негативное следствие конфликтных ситуаций, то есть несправедливость и нанесение обиды, неразрешенный конфликт, ухудшение отношений, а иногда и увольнение работников.

Попытка полностью избежать конфликтов даже может нанести вред работе коллектива. Поэтому руководитель должен стремиться правильно разрешить любые конфликтные ситуации, обращать их на пользу дела и устранять возможные негативные последствия [2].

## **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие виды методов управления научными исследованиями вам известны?
2. Перечислите основные принципы организации и управления научным коллективом.
3. Что такое конфликт?
4. Какие психологические аспекты взаимоотношения руководителя и подчиненного вам известны?
5. Кого относят к неформальной группе?
6. Как сотрудник может повысить свою работоспособность?
7. Что такое научный коллектив?
8. Назовите наиболее распространенную структуру научного подразделения.
9. Как сплотить научный коллектив?
10. Что может навредить деятельности научного коллектива?

## **Глава 5. ОСНОВЫ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКОГО ТВОРЧЕСТВА**

### ***5.1 Общие сведения***

В нашей стране осуществляется правовая охрана объектов промышленной собственности: *изобретений, полезных моделей и промышленных образцов.*

Права на изобретение, полезную модель, промышленный образец подтверждает патент на изобретение, свидетельство на полезную модель и патент на промышленный образец (далее – патент).

*Патент* - это документ, удостоверяющий приоритет, авторство, исключительное право на использование изобретения (полезной модели, промышленного образца). Патент предоставляется государством на определенный период времени. Он позволяет его обладателю запрещать третьим лицам использовать (в том числе изготовление, использование, продажу, ввоз) его изобретения [2, 19].

Правом на подачу заявки и получение патента обладает автор (авторы) изобретения, работодатель или их правопреемник (далее – заявитель) [2, 19].

Рассмотрение заявок на изобретение, их экспертизу и выдачу патентов осуществляет Всероссийский научно-исследовательский институт государственной патентной экспертизы (ВНИИГПЭ) Комитета РФ по патентам и товарным знакам (Патентного ведомства).

### ***5.2 Объекты изобретения***

Объектами изобретения могут являться: устройство, способ, вещество, а также применение известного ранее устройства, способа, вещества по новому назначению (п. 2 ст. 4 Патентного закона РФ (в дальнейшем Закона)).

*К устройствам* как объектам изобретения относятся конструкции и изделия. Устройство является наиболее распространенным объектом изобретения. К ним относятся машины, приборы, аппараты, оборудование, инструмент, транспортные средства, крепежные изделия, строительные конструкции, здания, сооружения, части зданий и т. д. и т. п.

Для характеристики устройств регламентируются следующие *признаки*:

- наличие конструктивного элемента;
- наличие связи между элементами;
- взаимное расположение элементов;
- форма выполнения элемента (элементов) или устройства в целом и, в частности, геометрическая форма; форма выполнения связи между элементами;
- параметры и другие характеристики элемента (элементов) и их взаимосвязь;
- материал, из которого выполнен элемент (элементы) или устройство в целом; среда, выполняющая функции элемента.

*Наличие конструктивного элемента.* Элементы, детали и узлы, из которых состоит устройство, являются основными его признаками, дающими о нем необходимое представление. Например, здания каркасного типа состоят из фундамента, колонн, ригелей (ферм и др.), плит перекрытия и покрытия, плит стенового ограждения.

*Наличие связи между элементами.* Эти признаки, которые практически всегда присутствуют в формуле изобретения. Они дают представление о конструктивной схеме устройства, так как простое перечисление узлов и деталей недостаточно для его полной характеристики. Например, в здании дробилок, имеющих стеновое ограждение из сборных панелей, элементы перекрытия (ригели и плиты), как правило, не соединяются с колоннами здания. В то же



время в обычном каркасном здании (без больших динамических нагрузок) такие соединения выполняются всегда.

*Взаимное расположение элементов.* Эти признаки характеризуют пространственное расположение отдельных элементов, узлов и деталей устройства. Например, расположение плит перекрытия в промышленном здании преимущественно горизонтальное, а в галерее подачи инертных материалов на растворобетонных узлах всегда имеется наклонный участок.

*Форма выполнения элемента* или устройства в целом, геометрическая форма. Существует множество устройств, имеющих одинаковый набор узлов и деталей, которые нельзя назвать идентичными, поскольку одни и те же узлы могут иметь свои конструктивные особенности. Например, форма поперечного сечения железобетонной колонны или сваи может быть круглой, квадратной, прямоугольной и т. п., хотя выполнены они из одинаковых материалов (монолитного бетона и арматуры).

Необычная геометрическая форма устройства также может характеризовать его особенности, Например, сваи конической или пирамидальной формы по своим характеристикам работы под нагрузкой в определенных грунтовых условиях намного эффективнее свай с цилиндрической формой поверхности; для висячих свай более эффективной формой поперечного сечения будет квадрат или прямоугольник по сравнению с кругом.

*Форма выполнения связи между элементами.* Форма связи между элементами устройства оказывает значительное влияние на характеристики всего устройства в целом. Например, соединения между колоннами и ригелями или колоннами и фундаментами могут быть выполнены по шарнирной или жестко заземленной схемам. Это существенно влияет на геометрические размеры поперечных сечений этих элементов здания.

*Параметры* и другие характеристики элементов и их взаимосвязь. Этот признак характеризует взаимосвязь геометрических размеров отдельных элементов, узлов и деталей устройства. К нему, в частности, относятся и математические выражения, описывающие эти взаимосвязи. Так, например, очертание арочных конструкций описывается алгебраическим уравнением, в которое в качестве параметров входят длина пролета и стрела подъема арки. Соотношение между этими параметрами существенно влияет как на несущую способность арки, так и на ее массу.

*Материал*, из которого выполнен элемент или устройство в целом; среда, выполняющая функции элемента. Если материал отдельных элементов, деталей и узлов устройства влияет на его работоспособность и достижение технического результата изобретения и он не может быть произвольно заменен другим, тогда его необходимо учитывать при формулировке существенных признаков изобретения. Например, при конструировании металлодеревянных ферм ее элементы, испытывающие деформации растяжения, выполняются металлическими (часто в виде арматурных стержней), а элементы, работающие на сжатие, деревянными. Замена материала растянутых элементов фермы с дерева на металл в этом случае существенно влияет на достижение технического результата, то есть увеличение несущей способности фермы и перекрытия большего пролета. В то же время, например, замена деревянной балки пролетом 4 м на металлическую должна считаться простым конструктивным подбором материала.

Различают три группы способов как объектов изобретений:

- способы, направленные на изготовление продуктов (изделий, конструкций, веществ и др.);
- способы, направленные на изменение состояния предметов материального мира (управление, регулирование, транспортировка и т. п.);

– способы для определения состояния предметов материального мира (измерение, диагностика и др.).

Для характеристики способов регламентируются следующие признаки:

- наличие действий или совокупности действий;
- порядок выполнения таких действий во времени (последовательно, одновременно, в различных сочетаниях и т. п.);
- условия осуществления действий (режим) использования веществ (исходного сырья, реагентов и т. п.), устройств (оборудования, приспособлений, инструментов, приборов и средств измерения и т. п.).

*Наличие действий или совокупности действий.* Указание действий (операций, приемов) над материальными объектами дает возможность определить основные стадии процесса, позволяет составить общее представление о цикле основных действий от начальной до конечной операций.

*Порядок выполнения действий во времени.* Этот вид признаков определяет функциональность процесса, поскольку изменение последовательности действий может не привести к техническому результату.

*Условия осуществления действий, использования веществ, устройств.* Эти условия включают в себя различные сочетания приведенных признаков действия. Например, при проведении динамических испытаний строительных конструкций можно использовать различные режимы возбуждения механических колебаний: режим свободных затухающих колебаний и режим вынужденных незатухающих колебаний. Порядок определения резонансной частоты для указанных случаев возбуждения колебаний будет разным, что повлечет за собой и различную последовательность действий. К тому же будет отличаться и приборное обеспечение,

необходимое для реализации этих процессов. И то, и другое может оказаться существенным отличительным признаком при достижении определенного технического результата.

*К веществам как объектам изобретения* относятся: композиции (составы, смеси); индивидуальные химические соединения, включая высокомолекулярные объекты генной инженерии; продукты ядерного превращения.

К композициям относятся составы, содержащие не менее двух ингредиентов (сплавы, керамика, стекла, бетонные смеси, механические смеси любого назначения). Отличием композиции может быть введение дополнительного (дополнительных) ингредиента и его количественный состав. Во многих случаях в качестве отличительного признака композиции, состоящей из одних и тех же ингредиентов, используется их количественный состав. Для характеристики композиций, состав которых не установлен, могут быть привлечены их физико-химические показатели и специфические признаки способов их получения, если они достаточны для идентификации композиции.

Для характеристики *индивидуальных химических соединений* используются следующие признаки:

- для низкомолекулярных соединений: качественный состав, количественный состав, химическая формула структуры;
- для высокомолекулярных соединений: структура макромолекулы звена и в целом периодичность звеньев, молекулярная масса, геометрия и стереометрия макромолекулы;
- для индивидуальных соединений с неустановленной структурой: физико-химические и иные характеристики, позволяющие их идентифицировать.

При подаче заявок на изобретения на любые новые вещества необходимо раскрытие способа, с помощью которого оно получается.

К применению известных ранее устройств, способов, веществ по новому назначению как объекту изобретения относится их использование в соответствии с новым предназначением. К нему приравнивается первое применение известных веществ (природных и искусственно полученных) для удовлетворения общественной потребности. Большинство изобретений направлено на создание нового средства удовлетворения общественных потребностей путем его синтеза и поэтому выражается в виде устройства, способа, вещества.

Многие вещества, которые первоначально были синтезированы с какой-либо конкретной целью, обладают целым рядом свойств, способных проявиться в зависимости от условий использования, и поэтому могут иметь различное назначение.

Известное устройство может быть использовано по новому назначению, например, при изменении условий его работы; за счет установления нового свойства материала, из которого оно изготовлено.

Предложения, не признаваемые патентоспособными изобретениями. В соответствии с п. 3 ст. 4 Закона не могут быть признаны патентоспособными изобретениями:

- научные теории и математические методы;
- проекты и схемы планировки сооружений, зданий, территорий;
- решения, касающиеся только внешнего вида изделий, направленные на удовлетворение эстетических потребностей;
- методы выполнения умственных операций;
- алгоритмы и программы для вычислительных машин;
- методы организации и управления хозяйством;
- условные обозначения, расписания, правила;
- решения, противоречащие общественным интересам, принципам гуманности и морали [2, 19].

### ***5.3 Условия патентоспособности изобретения***

На основании ст. 4 п. 1 Закона изобретению предоставляется правовая охрана, если оно является *новым*, имеет *изобретательский уровень* и *промышленно применимо*.

Изобретение является новым, если оно не известно из уровня техники. Изобретение имеет изобретательский уровень, если оно для специалиста явным образом не следует из уровня техники.

Уровень техники включает любые сведения, ставшие общедоступными в мире до даты приоритета изобретения.

При установлении новизны изобретения в уровень техники включаются все поданные в РФ заявки на изобретения и полезные модели при условии их более раннего приоритета, а также запатентованные в Российской Федерации изобретения и полезные модели.

*Изобретение является промышленно применимым*, если оно может быть использовано в строительстве, промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении и других отраслях деятельности. Если автор изобретения или заявитель до подачи заявки в Патентное ведомство каким-либо образом раскрыл информацию, относящуюся к изобретению, и сведения о его сущности стали общедоступными, то за ним сохраняется право на подачу заявки на изобретение в течение шести месяцев с даты раскрытия информации. При этом обязанность доказательства данного факта лежит на заявителе.

Анализ новизны изобретения предусматривает поиск аналогов в уровне техники, выбор аналога, наиболее близкого к изобретению (прототипа) и сравнительный анализ изобретения с прототипом. Если изобретение имеет хотя бы один отличительный от прототипа признак, то делается вывод о соответствии изобретения условию «новизна».

Изобретение также соответствует условию «новизна», если в уровне техники не обнаружен аналог, совокупность признаков которого идентична всем признакам изобретения.

Проверка изобретательского уровня проводится в отношении изобретения, охарактеризованного в независимом пункте формулы, и включает: определение наиболее близкого аналога, выявление признаков, которыми отличается заявленное изобретение от наиболее близкого аналога; выявление из уровня техники таких решений, которые имеют признаки, совпадающие с отличительными признаками рассматриваемого изобретения. Изобретение признается соответствующим условию изобретательского уровня, если не выявлены решения, имеющие признаки, совпадающие с его отличительными признаками, или такие решения выявлены, но не подтверждена известность влияния отличительных признаков на указанный заявителем технический результат.

Условию изобретательского уровня также соответствуют:

- способы получения новых индивидуальных соединений с установленной структурой;
- способы получения известных индивидуальных соединений с установленной структурой, если они основаны на новой для данного класса или группы соединений реакции;
- композиция, состоящая из двух известных ингредиентов, обеспечивающая синергетический эффект, возможность достижения которого не вытекает из уровня техники;
- индивидуальное соединение, подпадающее под общую структурную формулу группы известных соединений, но не описанное как специально полученное и исследованное, и при этом проявляющее новые неизвестные для этой группы соединений свойства, как качественные, так и количественные (селективное изобретение).

Не признаются соответствующими условию изобретательского уровня изобретения, основанные:

- на дополнении известного средства какой-либо известной частью, присоединяемой к нему по известным правилам, для достижения технического результата, в отношении которых установлено влияние именно таких дополнений:

- на замене какой-либо части известного средства другой известной частью для достижения технического результата, в отношении которого установлено влияние именно такой замены;

- на исключении какой-либо части элемента с одновременным исключением обусловленной ее наличием функции и достижением при этом обычного для такого исключения результата (материалоемкости, упрощение, уменьшение габаритов, повышение надежности, сокращение продолжительности процесса и пр.);

- на увеличении количества однотипных элементов, действий для усиления технического результата, обусловленного наличием в средстве именно таких элементов, действий;

- на выполнении известного средства и его части из известного материала для достижения технического результата, обусловленного известными свойствами такого материала;

- на создании средства, состоящего из известных частей, выбор которых и связь между ними осуществлены на основании известных правил, рекомендаций, и достигаемый при этом технический результат обусловлен только известными свойствами частей это средства и связей между ними;

- на применении известного устройства, способа, вещества по новому назначению, если новое назначение обусловлено известными свойствами, структурой, выполнением и также известно, что именно такие свойства, структура, выполнение необходимы для реализации этого назначения.



Для подтверждения возможности промышленной применимости изобретения в материалах заявки должны быть указания на предназначение заявляемого объекта изобретения, а также описание средств и методов, с помощью которых возможно осуществление изобретения [19].

#### ***5.4 Условия патентоспособности полезной модели***

К *полезным моделям* относится конструктивное выполнение средств производства и предметов потребления, а также их составных частей. Полезной модели предоставляется правовая охрана, если она является новой и промышленно применимой.

Полезная модель является новой, если совокупность ее существенных признаков не известна из уровня техники.

Уровень техники включает опубликованные в мире сведения о средствах того же назначения, что и заявляемая полезная модель, ставшие общедоступными до даты ее приоритета, а также сведения об их применении в России. В уровень техники включаются все запатентованные в Российской Федерации другими заявителями изобретения и полезные модели, также все поданные заявки при условии их более раннего приоритета.

Полезная модель является промышленно применимой, если она может быть использована в строительстве, промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства.

Если автор (авторы) полезной модели или заявитель до подачи заявки в Патентное ведомство раскрыли информацию, относящуюся к полезной модели, и сведения о ее сущности стали общедоступными, то за ними сохраняется право на подачу заявки на полезную модель в течение шести месяцев с даты раскрытия информации. При этом обязанность доказательства данного факта лежит на заявителе [19].

### ***5.5 Условия патентоспособности промышленного образца***

К *промышленным образцам* относится художественно-конструкторское решение изделия, определяющее его внешний вид. Промышленному образцу предоставляется правовая охрана, если он является новым, оригинальным и промышленно применимым.

Промышленный образец признается новым, если совокупность его существенных признаков, определяющих эстетические или эргономические особенности изделия, не известна из сведений, ставших общедоступными в мире до даты приоритета промышленного образца.

При установлении новизны промышленного образца учитываются все запатентованные в Российской Федерации другими заявителями промышленные образцы, а также все поданные заявки на промышленные образцы при условии их более раннего приоритета.

Промышленный образец признается оригинальным, если его существенные признаки обуславливают творческий характер эстетических особенностей изделия.

Промышленный образец признается промышленно применимым, если может быть многократно воспроизведен путем изготовления соответствующего изделия.

Если автор (авторы) промышленного образца или заявитель до подачи заявки в Патентное ведомство каким-либо образом раскрыл информацию, относящуюся к заявляемому промышленному образцу, и сведения о ее сущности стали общедоступными, то за ним сохраняется право на подачу заявки на промышленный образец в течение шести месяцев с даты раскрытия информации. При этом обязанность доказательства данного факта лежит на заявителе.

Не признаются патентоспособными промышленными образцами решения:

- объектов архитектуры (кроме малых архитектурных форм), промышленных, гидротехнических и других стационарных сооружений;
- обусловленные исключительно технической функцией изделия;
- печатной продукции как таковой; объектов неустойчивой формы из жидких, газообразных, сыпучих или им подобных веществ;
- изделий, противоречащих общественным интересам, принципам гуманности и морали [19].

### **5.6 Патентный поиск**

Обязательным этапом научного исследования является *патентный поиск*. С его помощью осуществляется процесс поиска в патентных фондах документов, соответствующих теме запроса.

Патентный поиск проводится для следующих целей:

- проверка уникальности изобретения;
- обзор последних новинок в области исследования;
- выяснение, не посягает ли изобретение на чужую интеллектуальную собственность;
- определение сфер использования нового изобретения;
- поиск патентов на изобретение, полезную модель;
- определение состояния исследований в интересующей области;
- поиск дополнительных информационных материалов;
- сбор информации о конкурентах;
- нахождение решения технических проблем.

Патентный поиск может осуществляться вручную, с помощью информационно-поисковых систем или с использованием соответствующих компьютерных программ.

*РОСПАТЕНТ* – это Российское патентное ведомство Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. В информационной поисковой системе возможен поиск по изобретениям, рефератам патентных документов на русском и английском языках, перспективным изобретениям, полезным моделям. По состоянию на 2020 г. в базе данных Роспатента насчитывалось около 2,5 млн документов на изобретения и полезные модели.

*Патентный поиск* – это процесс отбора соответствующих запросу документов или сведений по одному или нескольким признакам из массива патентных документов или данных. При этом осуществляется поиск из множества документов и текстов только тех, которые соответствуют теме или предмету запроса.

Предмет поиска определяют исходя из конкретных задач патентных исследований категории объекта (устройство, способ, вещество), а также из того, какие его элементы, свойства, параметры и другие характеристики предполагается исследовать.

При патентном поиске сравниваются выражения смыслового содержания информационного запроса и содержания документа.

Для оценки результатов поиска создаются определенные правила – критерии соответствия, устанавливающие, при какой степени формального совпадения поискового образа документа с поисковым предписанием текст следует считать отвечающим информационному запросу.

Проведение патентных исследований направлено на достижение следующих основных целей:

– определение технического уровня разработки или продукта, который предполагается поставлять на рынок, что определяет его потребительские свойства, а также тенденций развития в данной области;

– проверка на патентную чистоту, то есть выявление внешних угроз, связанных с наличием на аналогичную продукцию конкурентов охранных документов (патентов, свидетельств и т. п.), которые могут блокировать выход продукции на рынок;

– оценка конкурентоспособности продукции: если продукт характеризуется невысоким техническим уровнем, то велика вероятность, что его трудно будет реализовать по приемлемой цене в условиях конкуренции;

– патентоспособность разработки при решении ее патентирования.

В соответствии со стандартом патентными исследованиями являются исследования технического уровня и тенденции развития объектов техники, их патентоспособность, патентная чистота, конкурентоспособность на основе патентной и другой информации.

Патентные исследования проводят:

– при создании объектов техники;

– при разработке планов развития науки и техники;

– при разработке научно-технических прогнозов;

– при освоении и производстве продукции;

– при определении целесообразности экспорта промышленной продукции и экспонировании ее образцов на международных выставках и ярмарках; продаже и приобретении лицензий;

– при решении вопроса о патентовании созданных объектов промышленной собственности и в других целях.

Цели патентного поиска определяются задачами использования патентной информации на конкретной стадии создания, освоения и реализации новой техники или продукции. При планировании тематики исследования патентный поиск проводится для того, чтобы выяснить, решалась ли поставленная техническая задача ранее, какие решения защищены патентами, какие фирмы работают в данной

области техники, каковы перспективы разработки темы. Поиск проводится также с целью технико-экономического анализа изобретений при прогнозировании тенденций развития техники.

Работы по проведению патентных исследований проводят в такой последовательности:

- 1) разработка задания на проведение патентного исследования;
- 2) разработка регламента поиска;
- 3) поиск и отбор патентной и другой научно-технической информации, в том числе конъюнктурно-экономической;
- 4) систематизация и анализ отобранной информации;
- 5) обобщение результатов и составление отчета о патентном исследовании.

В задании указываются наименование темы и ее шифр, задачи патентных исследований, краткое содержание работ, которое формируется в зависимости от задач патентного исследования, ответственные исполнители, сроки исполнения и формы отчетности.

Регламент поиска представляет собой программу, определяющую область проведения поиска по фондам патентной, научно-технической и конъюнктурно-экономической информации. В регламенте поиска определяют следующие данные:

- предмет поиска (технический объект в целом, его составные части, узлы или элементы, т. е. устройство, технический процесс, вещество);
- страны поиска;
- ретроспективность;
- классификационные индексы объекта техники, технического процесса или вещества по МПК, НПК и УДК, а также по международной классификации промышленных образцов (МКПО) (УДК – Универсальная десятичная классификация).

Предмет поиска должен быть четко сформулирован, поскольку от этого зависит качество и длительность поиска.

Если темой патентных исследований является устройство, то предметами поиска могут быть:

- устройство в целом (общая компоновка, принципиальная схема);
- принцип (способ) работы устройства;
- узлы и детали;
- материалы (вещества), используемые для изготовления отдельных элементов устройства;
- области возможного применения.

Если темой патентных исследований является технологический процесс, то предметами поиска могут быть:

- технологический процесс в целом;
- его этапы, если они представляют собой самостоятельный охраноспособный объект;
- исходные продукты;
- промежуточные продукты и способы их получения;
- конечные продукты и области их применения;
- оборудование, на базе которого реализуется данный способ.

Формулировать предмет поиска следует, по возможности, с использованием терминологии, принятой в соответствующей системе классификации изобретений.

Регламент патентного поиска выбранные элементы рекомендует оформлять так, как в табл. 1.

Таблица 1

**Регламент поиска**

Предмет поиска	Индексы: МПК, МКПО, УДК	Широта поиска	Глубина поиска	Источники информации

*Глубина поиска* или ретроспективность информации – это число лет, по которым будет вестись поиск, отсчитываемое от года, в

котором осуществляется поиск. Глубина поиска зависит от цели патентных исследований. Если целью является определение технического уровня или новизны объекта, то глубину выбирают с учетом особенностей развития области техники, к которой относится объект. Если данная область техники известна давно, то ограничиваются периодом ее наиболее интенсивного развития. Следует иметь в виду, что объекты техники в среднем обновляются каждые 7–10 лет, однако возможна глубина поиска в 50 лет. При экспертизе на патентную чистоту глубину поиска принимают равной сроку действия патентов в стране поиска. Этот срок в большинстве стран составляет 20 лет.

*Широта поиска* – это перечень стран, по которым предполагается вести поиск. Она также зависит от цели патентных исследований. Например, при определении технического уровня или новизны объекта выбирают страны с наиболее развитой областью техники, к которой относится объект. В этих странах может быть наиболее полная информация об исследуемой области техники.

В перечень стран, по которым следует проводить поиск, включаются наиболее развитые в промышленном отношении страны, занимающие ведущее место в данной отрасли. Выбор стран поиска информации зависит от задачи патентного исследования. Так, при проверке новизны технического решения поиск должен проводиться как минимум по фондам следующих стран: России, Беларуси, США, Франции, Великобритании, ФРГ, Японии, Швейцарии, а также стран, в которых наиболее развита данная область техники.

При экспертизе объектов техники на патентную чистоту поиск проводится по фондам стран, в которые будет осуществляться экспорт продукции или продажа лицензий, то есть по тем странам, в отношении которых не должны быть нарушены права патентообладателей.



Классификационные индексы определяются по каждому предмету поиска. Для поиска описания изобретений к патентам используют международную и национальную патентные классификации (МПК, НПК), а для поиска научно-технической и конъюктурно-экономической информации Универсальную десятичную классификацию (УДК). В регламенте указываются также источники информации, по которым проводится поиск.

Поиск и отбор информационных материалов является наиболее трудоемким этапом патентных исследований. Он имеет свои особенности в зависимости от задач патентных исследований. Поиск информации проводится по всем видам источников, указанным в регламенте.

Различают несколько видов патентного поиска: тематический (предметный), именной и нумерационный, поиск патентов аналогов, установление правового статуса патента.

Основным и наиболее распространенным является *тематический поиск*. Поскольку патентные законодательства большинства стран мира различают такие виды изобретений, как устройство, способ, вещество, биотехнологические продукты, процедура поиска определяется непосредственно объектом поиска, в качестве которого выступает вид изобретения. При этом область поиска в различных странах имеет свои особенности. Например, в Германии важна общая идея технического решения, независимо от вида изобретения, в США необходимо рассматривать функциональные возможности использования изобретения в разных областях.

Тематический поиск проводится по фонду описаний изобретений, по фондам промышленных образцов либо путем просмотра официальных бюллетеней. Тематический поиск ведут, если нужно определить технический уровень или новизну объекта. Поиск в этом случае ведут по заданной тематике, в известной области

техники с использованием не только патентной, но и научно-технической информации (табл. 2).

Таблица 2

**Этапы и средства тематического патентного поиска**

Задачи этапа	Средства
Установление точного технического наименования предмета поиска	Терминологические словари, справочники, энциклопедии и т. д.
Установление ориентировочных классификационных индексов предмета поиска	Алфавитно-предметные указатели к МПК
Установление классификационных индексов	Указатели классов к МПК
Составление перечня номеров охранных документов, относящихся к определенному классификационному индексу	Систематические указатели (итоговые, годовые, текущие), базы данных
Составление перечня номеров охранных документов, относящихся к теме поиска	РЖ <sup>1</sup> «Изобретения стран мира» (ИСМ), базы данных, описания изобретений

*Именной поиск* ведут, когда известно имя автора или патентовладельца и нужно найти относящиеся к ним охранные документы. Этот поиск может быть использован как дополнительный к тематическому поиску (табл. 3).

По наименованию фирмы-патентообладателя, заявителя, фамилии автора (авторов) изобретения определяют номера выданных патентов и их принадлежность к определенной рубрике классификации изобретений. Основную задачу именного поиска при установлении патентных прав составляет поиск патентов, принадлежащих тому или иному изобретателю, фирме. Для проведения именного поиска пользуются алфавитно-именными

<sup>1</sup> РЖ – реферативный журнал

указателями, фирменными указателями и другими торгово-экономическими справочниками.

Таблица 3

**Этапы и средства именованного патентного поиска**

<b>Задачи этапа</b>	<b>Средства</b>
Составление списка наименований фирм, фамилий изобретателей, занимающихся аналогичной тематикой за рубежом (поисковый образ)	Фирменные каталоги, справочники, энциклопедии и т. д.
Составление перечня номеров охранных документов, полученных фирмой, изобретателем за определенное время	Именные указатели (годовые, текущие), базы данных
Составление перечня номеров охранных документов, относящихся к теме поиска	РЖ, ИСМ, базы данных, описания изобретений

*Нумерационный поиск*, то есть поиск по номеру документа, осуществляется для установления тематической принадлежности документа и его правового статуса на момент проверки. Поиск осуществляется по нумерационным указателям.

Для патентного фонда, расставленного по рубрикам классификации, необходимо по нумерационному указателю определить индекс классификации, а потом найти нужный документ в фонде.

Для проведения поиска целесообразно обратиться к первичным источникам – описаниям изобретений. Поскольку в РНТБ<sup>2</sup> фонды описаний на бумажных носителях хранятся в папках и систематизированы в соответствии с МПК, поиск доступен и не вызывает трудностей практически для всех пользователей. Кроме того, поиск можно провести с использованием дисков CD-ROM и DVD. Данный поиск может проводиться, например, для установления

<sup>2</sup> РНТБ – Российская научно-техническая библиотека

срока действия патента при проведении экспертизы объекта техники на патентную чистоту, перед заключением лицензионных договоров и договоров уступки прав на патент (табл. 4).

*Поиск патентов-аналогов* (отличать от аналогов изобретений) проводится для выяснения того, как конкретный патент данного правообладателя защищен в других странах. Осуществляется поиск по электронным базам данных, по наименованию патентообладателя и другим необходимым данным.

Таблица 4

**Этапы и средства нумерационного патентного поиска**

Задачи этапа	Средства
Сформулировать предмет поиска (номер охранного документа или номер заявки, страна)	
Отыскать патентный документ	Электронные базы данных
Установить индекс МПК, к которому относится данный документ. Заказать патентный документ	При отсутствии доступа к электронной базе данных использовать нумерационные указатели к официальным бюллетеням, картотеки в библиотеках, фонды библиотек и т. д.

Завершает патентные исследования формулирование выводов, в которых показано, что найденных и отобранных аналогов достаточно для последующего использования и цель исследований достигнута.

В целом отчет о патентных исследованиях позволяет судить об уровне технического развития, возможностях обеспечения коммерческого успеха на конкретном рынке в условиях конкуренции. С расширением применения новых информационных технологии уровень патентных исследований неизмеримо возрастает и оказывает все большее влияние на конечные результаты деятельности субъектов хозяйствования [19].

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Над какими объектами промышленной собственности осуществляется охрана в РФ?
2. Что такое патент?
3. Что может являться объектом изобретения?
4. Что можно отнести к веществам как объектам изобретения?
5. Какие изобретения не могут быть признаны патентоспособными?
6. Что такое полезная модель?
7. Какие условия патентоспособности полезной модели вам известны?
8. Что такое промышленный образец?
9. Что такое патентный поиск?
10. Как осуществлять патентный поиск?
11. Каковы цели патентного поиска?
12. Какие виды патентного поиска вам известны?
13. Что является целью тематического патентного поиска?
14. Что является целью именованного патентного поиска?
15. Что является целью нумерационного патентного поиска?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии изложен теоретический материал дисциплины «Методология и методы научных исследований» в соответствии с рабочей программой. Авторы надеются, что степень подробности изложения материала окажется достаточной для усвоения материала дисциплины и использования его в дальнейшей деятельности.

## ТАБЛИЦА t-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

t – случайная величина, распределенная по закону Стьюдента с числом степеней свободы n.

n\α	0,99	0,95	0,90	0,80	0,50	0,20
1	63,657	12,706	6,314	3,078	0,727	0,325
2	9,935	4,303	2,920	1,886	0,617	0,289
3	5,841	3,182	2,353	1,638	0,584	0,277
4	4,604	2,776	2,132	1,533	0,569	0,271
5	4,032	2,571	2,015	1,476	0,559	0,67
6	3,707	2,447	1,943	1,440	0,553	0,265
7	3,499	2,365	1,895	1,415	0,549	0,263
8	3,355	2,306	1,860	1,397	0,546	0,262
9	3,250	2,262	1,833	1,383	0,543	0,261
10	3,169	2,228	1,812	1,372	0,542	0,260
11	3,106	2,201	1,796	1,363	0,540	0,260
12	3,055	2,119	1,782	1,356	0,539	0,259
13	3,012	2,160	1,771	1,350	0,538	0,259
14	2,977	2,145	1,761	1,345	0,537	0,258
15	2,947	2,131	1,753	1,341	0,536	0,258
16	2,921	2,120	1,746	1,337	0,535	0,258
18	2,878	2,101	1,734	1,330	0,534	0,257
20	2,845	2,086	1,725	1,325	0,533	0,257
23	2,807	2,069	1,714	1,319	0,532	0,256
25	2,787	2,060	1,708	1,316	0,531	0,256
30	2,750	2,042	1,697	1,310	0,530	0,256
40	2,704	2,021	1,684	1,303	0,529	0,255
60	2,660	2,000	1,671	1,296	0,527	0,254
100	2,617	1,980	1,685	1,289	0,526	0,254
	2,576	1,960	1,645	1,282	0,524	0,253

*Примечание.* Допускается интерполяция только по аргументу n.

Погрешность линейной интерполяции не превышает 0,007.

## ТАБЛИЦА G-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

G – случайная величина, распределения по закону Кохрена с числом степеней свободы  $f_1=n_1$  для числителя и  $f_2=n_2$  для знаменателя.

Таблица содержит значения  $\varepsilon$ , полученные из условия  $P(|G|< \varepsilon )=0,95$  (верхняя строка при всех  $n_2$ ),  $P(|G|< \varepsilon )=0,99$  (нижняя строка при тех же  $n_2$ ).

$n_2$	$n_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	10
2		0,998	0,975	0,94	0,91	0,86	0,85	0,83	0,82	0,79
		0,999	0,995	0,99	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88
3		0,966	0,87	0,80	0,75	0,71	0,68	0,65	0,63	0,60
		0,991	0,94	0,88	0,83	0,79	0,76	0,71	0,69	0,67
4		0,91	0,77	0,68	0,63	0,59	0,56	0,54	0,52	0,49
		0,97	0,96	0,78	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58	0,55
5		0,84	0,68	0,60	0,54	0,51	0,48	0,46	0,44	0,41
		0,93	0,79	0,70	0,63	0,59	0,55	0,52	0,50	0,47
6		0,78	0,62	0,53	0,48	0,45	0,42	0,40	0,38	0,36
		0,88	0,72	0,63	0,56	0,52	0,49	0,46	0,44	0,40
7		0,73	0,56	0,48	0,43	0,39	0,37	0,36	0,347	0,32
		0,84	0,66	0,57	0,51	0,47	0,44	0,46	0,39	0,36
8		0,68	0,52	0,44	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30	0,28
		0,79	0,62	0,52	0,46	0,43	0,39	0,37	0,35	0,33
9		0,64	0,48	0,40	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28	0,26
		0,75	0,57	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30
10		0,60	0,45	0,37	0,33	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24
		0,72	0,54	0,45	0,39	0,36	0,33	0,31	0,30	0,27
11		0,54	0,39	0,33	0,29	0,26	0,24	0,23	0,22	0,21
		0,65	0,48	0,39	0,34	0,31	0,29	0,27	0,25	0,23
15		0,47	0,33	0,28	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,1
		0,57	0,41	0,33	0,29	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19
20		0,39	0,27	0,22	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,130
		0,48	0,33	0,27	0,23	0,20	0,19	0,17	0,16	0,150
24		0,34	0,24	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,116	0,111
		0,42	0,29	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15	0,142	0,133
30		0,29	0,20	0,16	0,14	0,12	0,11	0,106	0,100	0,092
		0,36	0,24	0,19	0,16	0,15	0,13	0,123	0,116	0,105
40		0,24	0,16	0,13	0,11	0,10	0,089	0,083	0,078	0,071
		0,29	0,19	0,15	0,13	0,11	0,103	0,095	0,090	0,082
60		0,17	0,11	0,09	0,08	0,068	0,062	0,058	0,055	0,050
		0,22	0,14	0,11	0,09	0,080	0,072	0,067	0,063	0,057
120		0,10	0,06	0,05	0,042	0,037	0,034	0,030	0,029	0,027
		0,027	0,08	0,06	0,049	0,043	0,039	0,036	0,033	0,030



## ТАБЛИЦА F-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

F – случайная величина, распределенная по закону Фишера с числом степеней свободы  $f_1=n_1$  для числителя и  $f_2=n_2$  для знаменателя. Таблица содержит значения  $\varepsilon$ , полученные из условия  $P(|F| < \varepsilon) = 0.95$  (верхняя строка при всех  $n_2$ ),  $P(|F| < \varepsilon) = 0.99$  (нижняя строка при тех же  $n_2$ ).

$n_2$	$n_1$	2	3	4	6	9	12	24	
1		199,5	215,7	224,0	234,0	241,0	244,9	249,0	254,3
		4999	5403	5625	5859	6022	6106	6235	6366
2		19,00	19,16	19,25	19,33	19,38	19,41	19,55	19,50
		99,00	99,17	99,25	99,33	99,39	99,42	99,46	99,50
3		9,55	9,28	9,12	8,94	8,81	8,74	8,64	8,53
		30,82	29,46	28,71	27,99	27,34	27,05	26,60	26,12
4		6,94	9,59	6,39	6,16	6,00	5,91	5,77	5,63
		18,00	16,69	15,98	15,21	14,66	14,37	13,93	13,46
5		5,79	5,41	5,19	4,95	4,77	4,68	4,53	4,36
		13,27	12,06	11,39	9,67	10,16	9,87	9,47	9,02
6		5,14	4,76	4,53	4,28	4,10	4,00	3,84	3,67
		10,52	9,78	9,15	8,47	7,98	7,72	7,31	6,88
7		4,74	4,35	4,12	3,87	3,68	3,57	3,41	3,23
		9,55	8,45	7,85	7,19	6,72	6,49	6,07	6,65
8		4,46	4,07	3,84	3,58	3,39	3,28	3,12	2,93
		8,65	7,59	7,01	6,37	5,91	5,67	5,28	4,86
9		4,26	3,86	3,63	3,37	3,18	3,07	2,90	2,71
		8,02	6,99	6,42	5,80	5,35	5,11	4,73	4,31
10		4,10	3,71	3,48	3,22	3,02	2,91	2,74	2,54
		7,56	6,55	5,99	5,39	4,94	4,71	4,33	3,91
11		3,98	5,59	3,36	3,09	2,90	2,79	2,51	2,40
		7,21	6,22	5,76	5,07	4,63	4,40	4,02	3,60
12		3,88	3,49	3,26	3,00	2,80	2,69	2,50	2,30
		6,93	5,95	5,41	4,82	4,39	4,16	3,78	3,36
13		3,80	3,41	3,18	2,92	2,71	2,60	2,42	2,21
		6,70	5,74	5,21	4,62	4,19	3,96	3,59	3,17
14		3,74	3,34	3,11	2,85	2,65	2,53	2,35	2,13
		6,51	5,56	5,04	4,46	4,03	3,80	3,43	3,00
16		3,63	3,24	3,01	2,74	2,54	2,42	2,24	2,01
		6,23	5,29	4,77	4,20	3,78	3,55	3,18	2,75
18		3,55	3,16	2,93	2,66	2,46	2,34	2,15	1,92
		6,01	5,09	4,58	4,01	3,60	3,37	3,00	2,57
20		3,49	3,10	2,87	2,60	2,39	2,28	2,08	1,84
		5,85	4,94	4,43	3,87	3,46	3,23	2,86	2,42
24		3,40	3,01	2,78	2,51	2,30	2,18	1,98	1,37
		5,61	4,72	4,22	3,67	3,26	3,03	2,66	2,21

Окончание приложения 3

$n_2$	$n_1$	2	3	4	6	9	12	24	
32		3,29	2,90	2,67	2,40	2,19	2,07	1,86	1,59
		5,34	4,46	3,97	3,43	3,02	2,80	2,42	1,96
48		3,19	2,80	2,57	2,30	2,08	1,96	1,75	1,45
		5,08	4,22	3,74	3,20	2,80	2,58	2,20	1,70
		2,99	2,60	2,37	2,09	1,88	1,75	1,52	1,00
		4,61	3,78	3,32	2,80	2,41	2,18	1,79	1,00

*Примечание.* Допускается линейная интерполяция по аргументу  $n_2$  и квадратичная по  $n_1$ . Погрешность интерполяции не превышает 0,01

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Адекватность модели** 50, 163-164
- Анализ размерностей** 89-90
- Актуальность темы научного исследования** 28-29
- Воспроизводимость** 159
- Гипотеза** 9
- объяснительная 10
  - описательная 10
  - рабочая 10
  - теоретическая 10
  - частная 10
- Дедукция** 43
- Задачи исследования** 26-27
- Значимость коэффициентов регрессии** 161-162
- Индукция** 43-45
- Исследования**
- индивидуальные 22, 173-175
  - коллективные 22, 175-177
  - поисковые 18
  - прикладные 18
  - теоретические 46-47
  - фундаментальные 18
  - экспериментальные 35
- Критерии подобия** 61-63
- вырожденные 84-88
- Метод**
- исследования 31,41
  - теоретический 33,41
  - эмпирический 33
- Методика эксперимента** 132-134
- Модель**
- математическая 13,52-53, 103-109
  - физическая 51
  - эвристическая 51
- Моделирование** 49
- математическое 98-121
  - приближенное 91-98
  - физическое 53-58
- Направление научное** 23
- Новизна научная** 29
- Объект**
- изобретения 192-198
  - исследования 25
- Патент** 192
- План**
- исследования 30
  - эксперимента 135-137

<b>Погрешность</b> 140-141	<b>Теория</b>
	- научная 15
<b>Подобие</b> 58	- подобия 58-88
- временное 60	- размерностей 89-90
- геометрическое 59-60	
- начальных и граничных условий 61	<b>Условия</b>
- физическое 61	- патентоспособности изобретения 199-202
<b>Поиск патентный</b> 204-213	- патентоспособности полезной модели 202
<b>Предмет исследования</b> 25	- патентоспособности промышленного образца 203-204
<b>Преобразования масштабные</b> 64-82	- состоятельности гипотез 11
<b>Проблема научная</b> 7,23	<b>Уравнения критериальные</b> 83-84
<b>Тема исследований</b> 23	<b>Цели исследования</b> 26
<b>Теоремы подобия</b> 63	<b>Эксперимент</b> 35, 123-132
	- вычислительный 115-121

## ГЛОССАРИЙ

**Ана́лиз** (др.-греч. ἀνάλυσις – «разложение, расчленение») – логический прием, когда данное понятие раскладывают по признакам на составные части, чтобы таким образом сделать его познание ясным в полном его объеме.

**Гипóтеза** (др.-греч. ὑπόθεσις – «предположение; допущение», от др.-греч. ὑπό – «под; по причине; из-за» и др.-греч. θέσις «место; положение; тезис») – предположение или догадка: утверждение, предполагающее доказательство, в отличие от аксиом, постулатов, не требующих доказательств. Гипотеза считается научной, если она, в соответствии с научным методом, объясняет факты, охватываемые этой гипотезой; не является логически противоречивой; принципиально опровергаема, то есть потенциально может быть проверена критическим экспериментом; не противоречит ранее установленным законам; возможно приложима к более широкому кругу явлений.

**Мéтод** (от др.-греч. Μέθοδος – путь исследования или познания, от μετά-+ ὁδός «путь») – способ достижения какой-либо цели. В отличие от области знаний или исследований, является авторским, то есть созданным конкретной персоной или группой персон, научной или практической школой. В силу своей ограниченности рамками действия и результата, методы имеют тенденцию устаревать, преобразовываясь в другие методы, развиваясь в соответствии со временем, достижениями технической и научной мысли, потребностями общества. Совокупность однородных методов

принято называть подходом. Развитие методов является естественным следствием развития научной мысли.

**Методика** – это, как правило, некий готовый «рецепт», алгоритм, процедура для проведения каких-либо нацеленных действий. Методика отличается от метода конкретизацией приемов и задач. Например, математическая обработка данных эксперимента может объясняться как метод (математическая обработка), а конкретный выбор критериев, математических характеристик – как методика.

**Методоло́гия** (от греч. Μεθοδολογία – учение о способах; от др.-греч. μέθοδος из μετά- + ὁδός, букв. «путь вслед за чем-либо» и др.-греч. λόγος – мысль, причина) – учение о методах, способах и стратегиях исследования предмета.

**Моде́ль** (фр. Modèle от лат. Modulus – «аналог, образец») – система, исследование которой служит средством для получения информации о другой системе; представление некоторого реального процесса, устройства или концепции.

**Патент** (от лат. Patens – открытый, ясный, очевидный, от полного наименования – litterae patentes – открытое письмо) – охранный документ, удостоверяющий исключительное право, авторство и приоритет изобретения, полезной модели, промышленного образца либо селекционного достижения.

**Синтез** (др.-греч. Σύνθεσις – «соединение, складывание, связывание») — процесс соединения или объединения ранее разрозненных вещей или понятий в целое или набор.

**Теория** (греч. θεωρία – «рассмотрение, исследование») – учение, система научного знания, описывающая и объясняющая некоторую совокупность явлений и сводящая открытые в данной области закономерные связи к единому объединяющему началу.

**Эксперимент** (от лат. Experimentum – проба, опыт) – процедура, выполняемая для поддержки, опровержения или подтверждения гипотезы или теории. Эксперименты могут значительно различаться по целям и масштабам, как правило полагаются на повторяемую процедуру и логический анализ результатов. Эксперимент является одним из источников опыта и эмпирических данных. Научным называют эксперимент, реализуемый в рамках научного метода.

**Эмпирическая формула** – математическое уравнение, полученное опытным путем, методом проб и ошибок или как приближенная формула из экспериментальных данных. Таким образом, на момент открытия оно не имеет известного теоретического обоснования. В частности, размерности используемых и вычисляемых в формуле величин могут не соответствовать друг другу (примером может служить размерность гравитационной постоянной, размерность которой следует из формулы, но не имеет логического обоснования).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рузавин, Г.И. Методология научного познания: учебное пособие для вузов / Г.И. Рузавин. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. – 287 с.
2. Пономарев, А.Б. Методология научных исследований: учеб. пособие / А.Б. Пономарев, Э.А. Пикулева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 186 с.
3. Новиков, А.М. Методология научного исследования / А.М. Новиков, Д.А. Новиков. – М.: Либроком, 2010. – 280 с.
4. Крампит, А.Г. Методология научных исследований / А.Г. Крампит, Н.Ю. Крампит. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. – 164 с.
5. Крампит, А.Г. Методология научных исследований: учебное пособие / А.Г. Крампит. – Юрга: Изд-во ЮТИ ТПУ, 2006. – 240 с.
6. Новиков, А.М. Методология / А.М. Новиков, Д.А. Новиков. – М.: Синтег, 2007.
7. Кузнецов, И.Н. Научное исследование / И.Н. Кузнецов. – М.: Дашков и К°, 2004. – 432 с.
8. Тирский, Г.А. Анализ размерностей / Г.А. Тирский // Соросовский Образовательный Журнал. – 2000. – Т. 6, №5. – С. 76–82.
9. Тирский, Г.А. Подобие и физическое моделирование / Г.А. Тирский // Соросовский Образовательный Журнал. – 2001. – Т. 7, № 8. – С. 122–127.
10. Седов, Л.И. Методы подобия и размерностей в механике / Л.И.Седов. – 10-е изд. – М.: Наука, 1987. – 430 с.
11. Баренблатт, Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика / Г.И. Баренблатт. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 255 с.
12. Биркгоф, Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие / Г. Биркгоф. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 244 с.



13. Кутателадзе, С.С. Анализ подобия и физические модели / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1986. – 290 с.

14. Звонарев, С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие / С.В. Звонарев. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.

15. Введение в математическое моделирование : учебное пособие / под ред. П.В. Трусова. – М. : Университетская книга, Логос, 2007. – 440 с.

16. Федосьев, В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Федосьев. – 11-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2003. – 592 с.

17. Вольсков, Д.Г. Основы научных исследований: методические указания к выполнению практических работ / Д.Г. Вольсков, Д.В. Мухин. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 131 с.

18. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс : учебник : в 2 книгах / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов [и др.] ; под редакцией В.Г. Айнштейна. Книга 1. – 8-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 916 с.

19. Патентоведение и изобретательство. Практикум : учебное пособие / А.О. Харченко, А.Г. Карлов, А.А. Харченко, К.Н. Осипов. — Москва : Центркаталог, 2018. – 112 с.

Учебное издание

ДМИТРИЕНКО Герман Вячеславович,  
МУХИН Дмитрий Викторович

**МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Учебное пособие

Редактор Н.А. Евдокимова  
ЛР №020640 от 22.10.97.

Подписано в печать 28.09.2021. Формат 60 × 84/16.

Усл. печ. л. 13,26. Тираж 75 экз. Заказ 486. ЭИ № 1651.

Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.  
ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.