

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МИНИСТЕРСТВА ВНУТРЕННИХ ДЕЛ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ИМЕНИ В.Я. КИКОТЯ»

Н. И. Виноградова, Е. А. Матвиенко

ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЕ МЕТОДЫ СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Курс лекций

Москва
2018

Виноградова Н. И., Матвиенко Е. А.

В49

Естественнонаучные методы судебно-экспертных исследований : учебное пособие. – М. : Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя, 2018. – 362 с. ISBN 978-5-9694-0572-2

Дисциплина «Естественнонаучные методы судебно-экспертных исследований» является дисциплиной базовой части математического и естественнонаучного цикла, предшествующей для всех профильных экспертных дисциплин. Для ее изучения необходимы входные знания, умения и компетенции обучающегося, полученные при изучении общеобразовательных предметов таких, как физика, химия, математика, биология на базе среднего полного (общего) или среднего специального образования.

Курс лекций предназначен для слушателей факультетов по подготовке экспертов-криминалистов высших учебных заведений МВД России и других заведений, обучающихся по специальности 40.05.03, специализации: «Криминалистические экспертизы». Рассчитан на слушателей, курсантов и преподавателей юридических учебных заведений.

ББК 67.72

Рецензенты:

– профессор кафедры криминалистической техники Учебно-научного комплекса Волгоградской академии МВД России кандидат химических наук, доцент **Кочубей А. В.**;

– начальник отдела экспертиз запаховых следов человека Управления медико-биологических экспертиз и учетов Экспертно-криминалистического центра МВД России кандидат юридических наук **Панфилов П. Б.**

Авторы курса лекций: **Виноградова Н. И.** – лекции 1–9, 13–19;

Матвиенко Е. А. – лекции 10–12.

ISBN 978-5-9694-0572-2

© Московский университет МВД России
имени В.Я. Кикотя, 2018

© Виноградова Н. И., 2018

© Матвиенко Е. А., 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Общая характеристика методов и средств экспертного исследования следов преступления и их классификация.....	6
1. Определение метода и средства в экспертных исследованиях. Критерии использования методов и средств в судебной экспертизе.....	7
2. Классификация методов экспертных исследований	11
3. Понятие методики экспертного исследования	18
4. Основные цели использования технико-криминалистических средств и методов	20
Лекция 2. Основные положения математического анализа.....	21
1. Основные положения математического анализа. Понятие переменной величины	21
2. Элементарные функции и графики.....	26
3. Производная функция	29
4. Исследование функции с помощью производной функции.....	34
5. Математические методы в судебной экспертизе.....	37
Лекция 3. Научные основы метрологии, используемой в криминалистике.....	41
1. Определение метрологии, использование ее положений криминалистами. Требования к методам и средствам в экспертно-криминалистической деятельности	41
2. Понятие стандарта, стандартизации, технического регламента и сертификации, паспортизации и поверки технических средств, используемых в экспертно- криминалистической деятельности	42
3. Физические величины. Размеры физических величин	45
Лекция 4. Элементы математической обработки результатов измерений	53
1. Виды погрешностей измерений физических величин	53
2. Оценка случайной погрешности прямых измерений	54
3. Примеры расчета случайных погрешностей прямых измерений	63
Лекция 5. Строение вещества: основные понятия и законы	67
1. Понятие вещества, химического элемента, молекулы, атома.....	67
2. Строение атома. Периодический закон Д. И. Менделеева.....	68
3. Основные постулаты Н. Бора	73
4. Строение молекул. Теория химического строения А. М. Бутлерова	74
5. Теоретические основы строения вещества	79
6. Состав и структура исследуемых веществ.....	87
Лекция 6. Свойства твердых тел и жидкостей	89
1. Механические свойства твердых тел и жидкостей	89
2. Тепловые свойства твердых тел и жидкостей	104
3. Определения электрических свойств твердых тел и жидкостей	105
4. Определения магнитных свойств твердых тел	106
Лекция 7. Природа света. Основы фотометрии	108
1. Световой поток	108

2. Точечные источники света.....	110
3. Сила света и освещенность	113
4. Законы освещенности	116
5. Яркость источников и освещенных поверхностей	119
6. Световые измерения и измерительные приборы	122
Лекция 8. Геометрическая оптика	126
1. Прямолинейное распространение света и световые лучи.....	126
2. Законы отражения и преломления света	131
3. Показатель преломления	137
4. Полное отражение.....	139
Лекция 9. Волновая оптика	142
1. Интерференция света.....	142
2. Дифракция света	150
3. Дисперсия света. Цвет тел.....	154
4. Поляризация света	159
Лекция 10. Применение отражения и преломления света для получения изображения.....	163
1. Источник света и его изображение	163
2. Получение и построение изображения в зеркалах	164
3. Получение изображения в линзах. Виды линз.....	171
4. Построение изображения в линзах.....	176
Лекция 11. Оптические приборы и их погрешности	187
1. Оптические системы	187
2. Оптические приборы	195
3. Глаз как оптическая система.....	198
4. Оптические приборы, вооружающие глаз	202
5. Разрешающая способность оптических приборов.....	210
6. Дифракционные решетки	212
Лекция 12. Электромагнитные волны	216
1. Понятие электромагнитных волн	216
2. Шкала электромагнитных волн	217
3. Способ исследования электромагнитных волн различной длины	219
4. Получение и свойства электромагнитных волн различной длины	220
5. Методы определения скорости света	228
Лекция 13. Микроскопические методы исследования объектов судебной экспертизы. 232	
1. Методы световой микроскопии	232
2. Различные виды микроскопии, используемые в судебных экспертизах.....	241
3. Методы электронной микроскопии	243

Лекция 14. Химические методы исследования объектов судебной экспертизы	248
1. Правила по технике безопасности при работе в химической лаборатории.....	248
2. Понятие растворов, растворителей, растворенных веществ, концентрации.....	250
3. Классификация методов аналитической химии. Химические методы и использование их в криминалистике	252
Лекция 15. Физические и физико-химические методы исследования.....	263
1. Понятие физических методов и их классификация	263
2. Методы определения некоторых физических величин	267
3. Физико-химические методы анализа	270
Лекция 16. Методы определения элементного состава вещества объектов судебной экспертизы.....	277
1. Основные теоретические положения спектроскопии	278
2. Понятие электромагнитного спектра. Виды и классификация спектров.....	282
3. Спектральные приборы. Принцип их работы, классификация.....	284
4. Атомно-эмиссионный спектральный анализ	287
5. Атомно-абсорбционный спектральный анализ	291
6. Атомно-флуоресцентный спектральный анализ	294
7. Рентгеновский спектральный анализ	295
Лекция 17. Методы определения состава и структуры объектов судебной экспертизы.....	298
1. Молекулярный спектральный анализ. Основной закон светопоглощения	298
2. Спектрофотометрия в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.....	300
3. Инфракрасная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеивания	305
4. Люминесцентный анализ	308
5. Масс-спектрометрический метод.....	310
6. Радиоспектроскопические методы	312
7. Рентгенографические методы	315
Лекция 18. Хроматографические методы исследования	318
1. Сорбция и десорбция	318
2. Некоторые понятия хроматографии	322
3. Классификация хроматографических методов и их применение в экспертных исследованиях	323
4. Тонкослойная хроматография	331
Лекция 19. Биологические методы исследования объектов судебной экспертизы	339
1. Понятие биологических методов	339
2. Основы и возможности метода ДНК-анализа	343
3. Ольфакторный метод исследования запаховых следов в судебной экспертизе	348
4. Сравнение биологических методов, применяемых в судебной экспертизе	352
Библиографический список	359

Лекция 1. Общая характеристика методов и средств экспертного исследования следов преступления и их классификация

Вопросы, рассматриваемые на лекции

- 1. Определение метода и средства в экспертных исследованиях. Критерии использования методов и средств в судебной экспертизе.*
- 2. Классификация методов экспертных исследований.*
- 3. Понятие методики экспертного исследования.*
- 4. Основные цели использования технико-криминалистических средств и методов.*

При проведении раскрытия преступления имеют дело с различными объектами. В экспертизе понятие объекта следует рассматривать с точки зрения науки и практики.

С научной точки зрения объект судебной экспертизы – это род (вид) объектов, какой-либо класс, категория предметов, характеризующихся общими свойствами.

В практической экспертной деятельности объект – это определенный предмет (предметы), поступающий на исследование эксперту. Объекты могут быть нематериального и материального происхождения.

Как правило, это вещественные доказательства (материального происхождения), к которым относятся: изображения людей и животных, следов предметов, механизмов, агрегатов, части этих предметов, вещества, материалы, изделия, документы и полиграфическая продукция, трупы человека и животных и их части, разнообразные объекты растительного и животного происхождения и др.

К объектам экспертизы также относятся события, факты, явления и другие объекты нематериального происхождения, необходимость изучения которых в процессе расследования требует использования специальных знаний и проведения экспертного исследования. Изучение этих событий, фактов, явлений и других нематериальных объектов осуществляется путем исследования материальных носителей информации о них.

В словаре основных терминов судебных экспертиз под объектом экспертизы (экспертного исследования) понимаются «материализованные, определенные уголовно-процессуальным и гражданско-процессуальным законодательством источники информации – мате-

риалы уголовного либо гражданского дела. В качестве объектов экспертизы, в частности, выступают: вещественные доказательства, части трупа, вещная обстановка или фрагменты места происшествия, образцы, иные сведения, содержащиеся в различных материалах дела». По объему объекты экспертизы могут быть рассмотрены с точки зрения их полноты, множественности (количества, числа) и величины (микро- и макрообъекты).

Для изучения объектов экспертизы необходимы знания методов и средств в экспертных исследованиях.

1. Определение метода и средства в экспертных исследованиях. Критерии использования методов и средств в судебной экспертизе

Метод (по определению, данному С. И. Ожеговым, в словаре русского языка) – способ теоретического исследования или практического осуществления чего-нибудь.

В широком смысле метод – это способ достижения определенных результатов в познании и практике.

Метод экспертизы по определению, данному в словаре основных терминов судебных экспертиз, – «это система логических и (или) инструментальных операций, способов, приемов получения данных для решения вопроса, поставленного перед экспертом. Операции, образующие метод, представляют собой практическое применение знаний закономерностей объективной действительности для получения новых знаний».

Методы экспертных исследований формируются и основываются на:

- соответствующих научных методах;
- характере и свойствах объектов экспертизы;
- опыте решения практических задач, в том числе алгоритмических правилах, и разработанных самим экспертом приемах изучения объектов судебной экспертизы.

Различают методы исследования, применяемые в науках при разработке теоретических и экспериментальных проблем, и методы, применяемые в экспертной деятельности. Это деление очень условно, так как используемые в экспертной деятельности методы также имеют научный характер и основываются на достижениях науки и техники.

Средство (по определению, данному С. И. Ожеговым, в словаре русского языка) – это прием, способ действия для достижения чего-нибудь, орудие (предмет, совокупность приспособлений) для осуществления какой-нибудь деятельности.

Средство – это инструмент реализации методов.

Средство экспертных исследований – это научно-технические средства: техника (приборы, приспособления), применяемая для обнаружения и исследования объектов судебной экспертизы. Понятие «техничко-криминалистические средства» более широкое. К ним относят помимо средств экспертных исследований средства обнаружения следов преступления и предметов – вещественных доказательств, средства фиксации следов (в широком смысле) и получаемой в ходе следственных действий доказательной информации, средства для закрепления и изъятия следов и вещественных доказательств, средства криминалистического учета, розыска преступников и похищенного имущества.

Разработка нового технического средства в ряде случаев приводит к возникновению нового метода. В свою очередь развитие методов является стимулом к созданию новых технических средств.

Основными критериями возможности использования методов и средств экспертных исследований являются: научная обоснованность, безопасность, эффективность, допустимость (законность и этичность) метода.

Научная обоснованность метода подразумевает надежность метода с точки зрения возможности получения с его помощью достоверных результатов, их воспроизводимость, точность и надежность, определяемые базовой наукой, в которой метод был разработан.

В судебной экспертизе в настоящее время используются современные физико-химические, биохимические и другие аналитические методы исследования, надежность которых подтверждена их использованием в проведении исследований и практическим применением в разных областях науки и техники.

Безопасность метода определяется исходя из того, что его применение не должно угрожать жизни и здоровью людей. Следует разделять понятие безопасности метода для объекта исследования (в отношении живых лиц) и для субъекта исследования – эксперта. При

экспертном исследовании живых лиц или при получении у них сравнительных образцов не могут применяться вредные для здоровья реактивы или излучения. В то же время самому эксперту при проведении исследований приходится работать с органическими растворителями, едкими, канцерогенными веществами, рентгеновским и другими видами излучения, без которых порой невозможно получить необходимые для расследования и раскрытия преступлений факты. Поэтому особое значение для эксперта приобретает точное соблюдение правил техники безопасности.

Эффективность метода определяется возможностью получения максимального объема информации об объекте при минимальных временных, трудовых и материальных затратах. Получаемые при этом результаты должны характеризоваться точностью, наглядностью и надежностью.

Допустимость метода. В правоохранительной деятельности, помимо критериев оценки метода, общих для научного исследования и практической деятельности (обоснованность, достоверность получаемых результатов, безопасность и экономичность), существует и специфический критерий – допустимость метода.

Допустимо применение только таких методов и средств, которые не нарушают конституционных прав и интересов граждан, исключают угрозу и насилие, не угрожают их жизни и здоровью, не противоречат нормам процессуального законодательства и нравственным критериям общества.

Возможность применения метода в экспертных исследованиях определяется его допустимостью (законностью и этичностью), достоверностью получаемых с его помощью результатов, а также в некоторых случаях его воздействием на объект. Как правило, предпочтение отдается неразрушающим методам исследования объектов. В некоторых случаях выбор метода может быть обусловлен и требованиями наглядности для участников процесса, получаемыми с его помощью результатами, возможностью их проверки в заданных условиях и др.

При соблюдении всех перечисленных выше критериев, в каждом конкретном случае экспертного исследования перед экспертом встает проблема выбора метода для решения поставленной задачи.

Целесообразность применения того или иного метода для решения экспертной задачи определяется следующим:

- объемом выявляемой с использованием данного метода информации и ее значимостью для решения поставленной задачи;
- возможностью сохранения объекта для дальнейших исследований;
- чувствительностью метода и объемом необходимых для исследования материалов;
- временем проведения исследований;
- стоимостью затрат на приборы, оплату труда специалистов;
- универсальностью (возможностью получения качественной и количественной информации, установлением одновременно нескольких свойств исследуемого объекта).

При выборе метода для решения поставленной экспертной задачи необходимо оценить все перечисленные выше факторы. Необходимо решить, что целесообразнее – использовать более чувствительный, но более дорогой и трудоемкий, длительный метод или достаточно применить более грубый (дающий менее точные в количественном отношении данные), но экспрессный метод. Выбор метода определяется порой не целесообразностью его применения, а просто имеющимся в лаборатории оборудованием.

Одним из важных факторов, определяющих целесообразность использования метода в экспертных исследованиях, является его воздействие на объект. По этому основанию методы делятся на методы: *не разрушающие объект и разрушающие объект.*

К неразрушающим методам исследования вещественных доказательств относятся такие, которые никак не влияют на объект и не требуют для их реализации пробоподготовки. Но поскольку в ряде случаев приходится оказывать определенное воздействие на объект, то применяются методы, не разрушающие объект, но изменяющие его состав, структуру или отдельные свойства.

К разрушающим методам относятся методы, не разрушающие объект, но требующие для его изготовления разрушения или видоизменения, и методы, полностью или частично разрушающие образец или объект исследования.

2. Классификация методов экспертных исследований

Обстоятельная характеристика методов экспертного исследования впервые была дана А. Р. Шляховым в 1972 г.

В последующем были разработаны классификации методов по различным основаниям:

- степени общности и субординации;
- источнику происхождения;
- целевому назначению (решаемым задачам);
- характеру получаемой информации (выявляемые свойства и признаки объектов);
- природе явлений, лежащих в основе метода;
- областям науки, из которых они заимствованы;
- стадиям экспертного исследования.

Вопросам классификации экспертных методов посвящены работы А. И. Винберга и А. Р. Шляхова, И. В. Постики, Т. В. Аверьяновой, Е. Р. Российской.

Основной классификацией методов экспертных исследований в настоящее время принята классификация по степени общности и субординации. Предложено три варианта классификаций по данному основанию, которые в основных чертах совпадают.

Классификация А. И. Винберга и А. Р. Шляхова состоит из четырех уровней: всеобщий метод – материалистическая диалектика; общие (познавательные) методы – наблюдение, измерение, описание, эксперимент, моделирование и др.; частные инструментальные и иные вспомогательные технические методы; специальные методы (экспертные методики).

Т. В. Аверьянова также предложила четырехуровневую систему классификации экспертных методов: всеобщий, общие, частнонаучные и специальные (монообъектные) методы.

Классификация Е. Р. Россинской включает логические методы, общенаучные методы, общеэкспертные методы и частноэкспертные методы.

Все предложенные классификации имеют четырехуровневую структуру.

Высшим является метод диалектического материализма как всеобщий метод познания.

Всеобщий метод – это диалектико-материалистический метод, который пронизывает все уровни и всю структуру методов, так как является базой для их развития. Всеобщий метод определяет, что при решении любых вопросов, в том числе возникающих при расследовании и раскрытии преступлений, соблюдается объективный подход к исследуемым явлениям, учитываются все их отношения и связи, а также собственное движение, собственная жизнь исследуемых явлений со всеми присущими им противоречиями.

Основными категориями диалектического материализма являются: качество и количество, противоречие, причинность, сущность и явление, содержание и форма, случайность и необходимость, возможность и действительность и др.

Непосредственно к диалектическому методу примыкают и формально-логические операции познания (законы, категории формальной логики): индукция и дедукция, анализ и синтез, сравнение, обобщение и др.

Рассмотрим основные логические методы, используемые в экспертных исследованиях.

Индукция – метод опытного познания явлений от отдельных фактов к общему положению. В реальном познании индукция всегда выступает в единстве с дедукцией. Непосредственной основой индуктивного умозаключения является повторяемость явлений действительности, их свойств и признаков. Обнаруживая сходные признаки у многих объектов, можно сделать вывод, что эти признаки присущи всем предметам определенного класса.

Дедукция – форма мышления, когда новая мысль выводится чисто логическим путем из некоторых данных мыслей – посылок.

Таким образом, индукция и дедукция – это парные, взаимосвязанные способы познания, причем первый – это способ познания от частного к общему, а второй – способ рассуждения, когда вывод строится от общего к частному.

Анализ и синтез также представляют собой два взаимосвязанных метода.

Анализ – это метод исследования, состоящий в том, что изучаемый предмет мысленно или практически расчленяется на составные элементы (признаки, свойства, отношения), каждый из которых затем

исследуется в отдельности как часть расчлененного целого для того, чтобы выделенные в ходе анализа элементы соединить с помощью другого логического приема – синтеза – в целое, обогащенное новыми знаниями.

Любое экспертное исследование начинается с анализа представленных на экспертизу материалов, в процессе исследования проводится анализ выявленных свойств и признаков исследуемых объектов.

Синтез – это мысленное соединение частей предмета, расчлененного в процессе анализа, установление взаимодействия и связей частей и познание этого предмета как единого целого. Синтез всех установленных в процессе экспертного исследования фактов приводит экспертов к выводу – ответу на поставленный перед экспертизой вопрос.

Сравнение – это сопоставление объектов в целях выявления черт сходства или различия между ними (или того и другого вместе). При сравнениях, производимых в криминалистических целях, большое значение имеет частота встречаемости признаков. Чем реже они встречаются, тем большее значение имеет результат сравнения.

Обобщение – логический прием перехода от единичного к общему, от менее общего к более общему знанию.

Общие методы (общепознавательные, общенаучные) – это универсальные методы исследования, так как каждый из них может использоваться для решения большой группы вопросов, которые ставятся перед судебной экспертизой. Общие методы применяются в экспертизе всех родов на основных стадиях экспертного исследования. К ним относят: наблюдение, измерение, описание, эксперимент, моделирование.

Рассмотрим основные общие методы экспертных исследований.

Наблюдение – это метод исследования предметов и явлений объективной действительности в том виде, в каком они существуют и происходят в природе и в обществе в естественных условиях и являются доступными непосредственному восприятию человека. Научное наблюдение отличается от простого восприятия конкретной целью, планируется по заранее обдуманной процедуре, фиксируется. Оно не может применяться в отрыве от других методов. Наблюдение при экспертном исследовании используется либо для выявления (обнару-

жения) микрообъектов или следов на предметах-носителях, либо для установления конкретных свойств и признаков исследуемого объекта. Некоторые факты, установленные путем наблюдения, могут иметь доказательственное значение, другие – могут служить основой для построения версий.

Измерением какой-либо физической величины называется операция, в результате которой мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за единицу. Основной задачей физического эксперимента является измерение численных значений наблюдаемых физических величин.

Описание – это фиксирование результатов наблюдений посредством обычного текста, рисунков, цифр, графиков, схем, символов и т. п. При этом информация обобщается. Описание может быть непосредственным, когда отображаются результаты наблюдения объекта самим экспертом, либо опосредованным, когда в нем указаны результаты, полученные другими лицами, участвующими в исследовании, или с помощью технических средств.

Эксперимент – это опытное действие, искусственное систематическое изменение условий наблюдения явления, его связи с другими явлениями. Эксперимент отличается от наблюдения активным вмешательством экспериментатора в процессы развития наблюдаемых явлений. Любой эксперимент основан на моделировании изучаемых явлений. В судебной экспертизе широко распространен эксперимент, проводимый экспертом в целях выявления механизма взаимодействия объектов экспертного исследования, механизма следообразования, получения экспериментальных образцов для сравнительного исследования.

Моделирование – опосредственное исследование изучаемого объекта в тех случаях, когда объект недоступен для непосредственного изучения. Суть моделирования состоит в замене объекта – оригинала моделью, т. е. специально созданным аналогом. *Моделью* можно назвать любой специально созданный предмет, наделенный признаками вещественных доказательств.

Модельный эксперимент – обязательная стадия экспертного исследования при решении задач, связанных с декодированием источников информации на фоне естественных помех.

При решении конкретных задач в отношении определенных объектов используются разные частные аналитические (инструментальные) и специальные методы.

Частные (инструментальные, частнонаучные, общекспертные) методы – это методы, применяющиеся либо в одной конкретной области научного знания, либо в нескольких науках для изучения морфологических и субстанциональных свойств объектов.

Существует множество классификаций частных методов. В судебной экспертизе традиционно выделяют восемь основных классов методов, отличающихся принципами построения и набором технических средств:

- 1) микроскопические (оптическая и электронная микроскопия);
- 2) фотографические (запечатлевающие, измерительные, исследовательские);
- 3) химические (разделение и концентрирование, определение качественного и количественного состава соединений и смесей);
- 4) спектральные (элементного и молекулярного состава);
- 5) хроматографические (газовая хроматография, тонкослойная хроматография, жидкостная хроматография);
- 6) рентгеновские (просвечивающие и дифракционные методы);
- 7) физико-технические (определение механических, тепловых, электрических, магнитных свойств);
- 8) математические (математическая логика, теория вероятностей, математический анализ и др.).

Все перечисленные выше классы делятся на роды, виды и подвиды по целевому назначению, способу регистрации изучаемых свойств объектов и т. п. Например, класс микроскопических методов делится на методы оптической и электронной микроскопии, методы электронной микроскопии в свою очередь делятся по способу исследования объектов на просвечивающие электронные микроскопы, растровые электронные микроскопы, отражательные электронные микроскопы, эмиссионные электронные микроскопы.

Специальные методы (монообъектные, частноэкспертные) – это методы, разрабатываемые или приспособляемые для исследования конкретного, единичного объекта или применяемые только в экспертизах данного рода. Такие методы создаются либо на основе при-

способления существующих в других областях знаний, науках методов, либо создаются специально экспертами на их основе.

Классификация методов по решаемым задачам, характеру получаемой информации, по природе явлений, лежащих в основе метода:

а) по решаемым задачам можно разделить методы на следующие группы:

- методы обнаружения следов или иных объектов и их фиксации;
- методы предварительного исследования объектов в целях установления их природы и выбора направления исследования;
- методы аналитического и сравнительного исследования объектов;
- методы оформления результатов исследования;

б) по характеру получаемой информации частные методы экспертного исследования можно разделить на методы:

- морфологического анализа, т. е. изучения внешнего и внутреннего строения физических тел на макро-, микро- и ультрамикроуровнях;
- анализа состава материалов и веществ (элементного, молекулярного (структурно-группового), фазового, фракционного);
- анализа структуры вещества;
- анализа отдельных свойств вещества (физических, химических, биологических и др.);

в) по природе явлений, лежащих в основе метода (для инструментальных методов):

- микроскопические (световая и электронная микроскопия);
- атомный спектральный анализ (атомно-абсорбционный, атомно-эмиссионный);
- молекулярный спектральный анализ (спектрофотометрия в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, люминесценция, спектроскопия комбинационного рассеяния, спектроскопия электронного парамагнитного резонанса и ядерно-магнитного резонанса);
- масс-спектрометрические;
- рентгеноспектральные (электронно-зондовый микроанализ и рентгенофлуоресцентный анализ);

- рентгенографические (рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ);
- разделительные (хроматография, капиллярный электрофорез и др.).

Все представленные классификации являются достаточно условными и допускают «пересечение» методов.

Основное внимание в курсе изучения методов экспертного исследования будет уделено изучению именно частных общеэкспертных методов. Изложение методов будет основано на классификации методов как по природе получаемой информации об объекте, так и в рамках этой классификации, по природе явлений, лежащих в основе методов.

Классификация методов по источнику происхождения, по областям науки, из которых они заимствованы, по стадиям экспертного исследования:

а) по источнику происхождения и степени приспособленности к нуждам уголовного судопроизводства методы разделяют на три группы:

- заимствованные из других областей науки и техники и применяемые в непреобразованном виде;

- заимствованные из других областей науки и техники, но преобразованные, приспособленные для целей расследования и раскрытия преступлений (специальные приемы судебной фотографии, методы исследования документов в ультрафиолетовом и инфракрасном свете и др.);

- разработанные специально для целей расследования и раскрытия преступлений (методы, применяемые в дактилоскопии, почерковедения и др.);

б) по областям науки, из которых они заимствованы: физические, химические, биологические и т. д. – также можно отнести к классификации по источнику происхождения. Однако такая классификация очень условна, так как многие современные аналитические методы сформированы на основе интеграции различных областей знаний, например, физико-химические, биохимические, биофизические методы и т. п. Кроме того, в такой классификации сложно определить место морфологическим методам, имеющим очень большое значение в экспертных исследованиях;

в) по стадиям экспертного исследования: подготовительной, аналитической, экспериментальной, сравнительной, синтезирующей. Комплекс методов, применяемых для каждой из этих стадий, позволяет решать специфические экспертные задачи, однако это уже будет классификация скорее методик, а не методов.

Метод или комплекс методов – лишь составляющая, хотя и основная, часть экспертной методики.

3. Понятие методики экспертного исследования

Определение понятия методики экспертного исследования дано в словаре основных терминов судебных экспертиз.

Методика экспертного исследования – это система научно обоснованных методов, приемов и технических средств, применяемых в логической последовательности при изучении объектов судебной экспертизы для установления фактов, относящихся к предмету определенного рода, вида и подвида судебных экспертиз.

Любая методика экспертизы – это программа использования комплексов методов, приемов и технических средств, применяемых в определенной последовательности для решения экспертных задач.

Экспертная методика – это, прежде всего, программа действий, которые могут носить категорический или рекомендательный характер. Она ориентирована не просто на исследование объектов экспертизы, а на решение экспертной задачи, поэтому методика экспертного исследования специфична для каждого рода экспертизы, характеризующегося своими объектами и задачами.

По степени общности методики делятся на типовые и частные (конкретные).

Типовые методики излагаются в методических пособиях, методических рекомендациях или методических письмах, подготавливаемых и издаваемых ведущими судебно-экспертными учреждениями.

Частная методика, формируемая в процессе экспертного исследования, обычно излагается в письменном виде только в заключении эксперта при описании процесса экспертного исследования.

Структуру типовой экспертной методики составляют следующие элементы:

– указание на типичные для данного вида экспертизы объекты;

- указание на возможности методики и ее надежность;
- указания на методы и средства исследования;
- предписания последовательности использования методов и средств;
- условия и процедура применения методов, средств и методики;
- описание возможных результатов применения методов и средств, характеристика этих результатов в аспекте экспертной задачи.

Типовая методика – это выражение обобщенного опыта решения типовых экспертных задач. В определенных случаях эта методика может применяться экспертом без какой-либо адаптации, изменения. Такая методика, по существу, является стандартной и направлена на решение типичных экспертных задач, содержит рекомендации и обязательные правила для экспертов, определяющие схему исследования.

Частная (конкретная) методика – это способ решения конкретной задачи: результат приспособления, изменения типовой экспертной методики либо плод творческого подхода эксперта к решению задачи. По существу, это методика, которая направлена на решение нестандартных задач и формируется в процессе исследования.

В целях обеспечения научно-методического единообразия применяемых методик в разных ведомствах и подразделениях, а также в целях облегчения доступа к ним всех заинтересованных лиц проводится систематизация методик в области каждого рода экспертизы по видам и подвидам экспертных исследований. Эта работа проводится под эгидой Федерального межведомственного координационно-методического совета по проблемам экспертной деятельности, образованного в 1996 г. Предполагается создать паспорта всех действующих в экспертной практике типовых методик.

Термином «экспертная методика» обозначают, главным образом, программы решения экспертных задач. В то же время можно, отвлекаясь от рода или вида экспертизы, говорить о методике экспертного исследования вообще. При этом речь идет не о производстве экспертизы, а о программе экспертной деятельности в целом.

На формирование экспертных методик существенное влияние оказывает характер экспертных задач, которые определяют специфику стадии исследования.

4. Основные цели использования технико-криминалистических средств и методов

При исследовании используют различные методы и средства исследования.

Основные цели использования технико-криминалистических средств и методов: обнаружение, фиксация, сбор и упаковка объектов, их хранение, предварительное и экспертное исследование. Например, эффективность поиска доказательств с места происшествия значительно повышается при использовании технических средств. Без этих средств (криминалистические лупы, осветительные устройства, источники УФ-излучения, магнитные кисти и т. д.) невозможно работать на месте происшествия. Работа с объектами биологического происхождения (сперма, слюна, кровь), с нефтепродуктами достигает наибольшей эффективности при использовании УФ-осветителей.

Экспертные исследования проводят с учетом специфики судебно-экспертных исследований.

Методология общей теории судебной экспертизы включает в качестве необходимого элемента методы и методики решения задач судебной экспертизы.

Лекция 2. Основные положения математического анализа

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Основные положения математического анализа. Понятие переменной величины.
2. Элементарные функции и графики.
3. Производная функции.
4. Исследование функции с помощью производной функции.
5. Математические методы в судебной экспертизе.

1. Основные положения математического анализа.

Понятие переменной величины

Наблюдая какое-либо явление, видно, что одни величины, участвующие в нем, остаются неизменными, в то время как другие изменяются. Приведем несколько примеров.

1. Пусть поезд движется по направлению от Санкт-Петербурга к Москве. Такие величины, как, скажем, длина поезда, число колес будут оставаться неизменными, а объем горючего, имеющегося в поезде, будет изменяться. Расстояние от Санкт-Петербурга до Москвы будет оставаться неизменным, а расстояния от поезда до Санкт-Петербурга и Москвы будут изменяться.

2. Пусть произошел выстрел из оружия. Масса пули остается постоянной. Скорость ее движения и перемещение будут меняться.

Величина, участвующая в том или ином процессе и остающаяся неизменной, называется постоянной.

Величина, участвующая в том или ином процессе и изменяющаяся во время этого процесса, называется переменной.

Рассмотрим несколько примеров, в каждом из которых участвует пара переменных величин, изменяющихся в определенной связи между собой.

1. Будем наблюдать изменение стороны квадрата и происходящее при этом изменение площади квадрата. Обозначим длину стороны квадрата, выраженную, например, в сантиметрах, буквой x , а площадь квадрата, выраженную в квадратных сантиметрах, буквой y . Тогда x и y будут величинами переменными, изменяющимися в определенной взаимосвязи. Эту взаимосвязь можно выразить равенством

$$y = x^2.$$

Здесь x и y могут принимать лишь положительные значения, так как бессмысленно рассматривать сторону и площадь квадрата отрицательными. Составим таблицу 1.

Таблица 1

Таблица некоторых значений x и соответствующих им значений y

x	1/4	1/2	1	1/0,5	2	...	10	11
y	1/16	1/4	1	1/0,25	4	...	100	121

Составляя эту таблицу, мы давали переменной величине x произвольные значения; значения же переменной величины y мы вычисляли каждый раз с помощью одного и того же правила, даваемого равенством $y = x^2$. Поэтому естественно назвать величину x независимой переменной, а величину y – зависимой переменной.

2. Пусть мы наблюдаем движение поезда по Октябрьской железной дороге от Санкт-Петербурга к Москве, происходящее без остановок с постоянной скоростью 60 км в час, и пусть в полночь, т. е. в 0 часов поезд проходит ст. Бологое.

Обозначим время, отсчитываемое в сторону прошедшего и сторону будущего с момента полуночи, буквой t , а расстояние от ст. Бологое до поезда, также отсчитываемое в двух противоположных направлениях, буквой s .

Будем считать, что буква t выражает время в часах, а s – расстояние в километрах. Здесь t и s будут величинами переменными, изменяющимися в определенной взаимосвязи. Эту взаимосвязь можно выразить равенством $s = 60 t$.

В этом примере t и s могут принимать как положительные, так и отрицательные значения (табл. 2).

Таблица 2

Таблица некоторых значений t и соответствующих значений s

t	1/4	1/2	1	1,5	2	-1/4	-1/2	-1	-1,5	-2
s	15	30	60	90	120	-15	-30	-60	-90	-120

Составляя эту таблицу, переменной величине t давали произвольные значения; значения переменной s мы вычисляли каждый раз с помощью одного и того же правила, даваемого равенством $s = 60 t$.

Поэтому естественно и здесь назвать величину t независимой переменной, а величину s – зависимой переменной.

3. Связь между двумя переменными величинами, при которой изменение одной из них влечет за собой определенное изменение другой, называют функциональной зависимостью между этими величинами.

Переменная величина, значения которой мы задаем произвольно, называется *независимой переменной или – аргументом*.

Переменная, значение которой вполне определяется значением аргумента, называется *зависимой переменной или функцией*.

Величина y называется функцией одного аргумента x , если каждому значению величины x соответствует единственное значение величины y .

Следует иметь в виду, что совокупность различных возможных значений аргумента x определяется всякий раз условиями данной задачи. Поясним это примечание на примерах:

1. Площадь квадрата есть функция его стороны, определяемая равенством $y = x^2$.

Здесь x есть аргумент, а y – функция аргумента x . В этом примере возможными значениями аргумента x являются лишь положительные числа.

2. Расстояние от ст. Бологое до паровоза (см. пример 2) есть функция времени, определяемая равенством $s = 60 t$.

t есть аргумент, а s функция аргумента t . В этом примере возможными значениями аргумента t являются числа положительные, отрицательные и нуль.

3. Площадь круга S есть функция его радиуса R , определяемая равенством

$$S = \pi R^2 \quad (\pi = 3, 14\ 159\dots).$$

Способы задания функции

Обратимся теперь к самому правилу соответствия между значениями переменных, которое составляет сущность понятия функциональной зависимости. Правило это может быть весьма разнообразной природы, поскольку оно ничем не было ограничено.

Существует несколько способов задания функций: аналитический, табличный и графический, словесный.

Аналитический способ. Наиболее простым и естественным представляется осуществление этого правила в виде аналитического вы-

ражения или формулы, содержащей указания на те операции или действия над постоянными числами и над значением независимой переменной x , которые надо произвести, чтобы получить соответствующее значение y . Этот аналитический способ задания функций является наиболее важным в математике.

Примерами аналитического задания функции могут служить функции:

$$y = \frac{1}{1+x^2}, y = \frac{1}{\sqrt{1-x}}, y = kx + b$$

Табличный способ. В технике и естествознании часто встречаются такие величины x и y , зависимость между которыми заведомо существует, но неизвестна. Тогда производят ряд опытов, в каждом из которых измеряют значение величины x и соответствующее ему значение y . В результате составляется более или менее обширная таблица, в которой сопоставляются измеренные значения x измеренным значениям y .

Полученная таблица и будет представлять собой табличное задание функциональной зависимости величины y от величины x . Например, подвергая воду различным давлениям p (атм.) и измеряя каждый раз температуру t ($^{\circ}\text{C}$) кипения воды, можно получить табличное задание функциональной зависимости температуры t кипения от давления p .

Таблица значений синусов, косинусов углов представляют собой примеры табличного способа задания функции. Немало примеров табличного способа задания функции можно встретить в технических справочниках.

Графический способ. В некоторых случаях при помощи самопишущих приборов функциональная зависимость между физическими величинами задается непосредственно графиком. Например, «индикаторная диаграмма», снимаемая при помощи индикатора, дает зависимость между объемом V и давлением p пара в цилиндре работающей паровой машины; «барограмма», доставляемая барографом, представляет суточный ход атмосферного давления и т. п.

Хотя в математическом анализе функции графически не задают, но к графической иллюстрации функций прибегают очень часто.

Словесный способ. Функцию можно вполне однозначно задать словами.

Функцию $y = 2x$ можно задать следующим словесным описанием: каждому действительному значению аргумента x ставится в соответствие его удвоенное значение.

Рассмотрим пример. Пусть y есть ребро куба, а x его объем. Тогда функциональная зависимость y от x изобразится:

- 1) аналитически формулой $y = \sqrt[3]{x}$;
- 2) графически кривой (рис. 1);

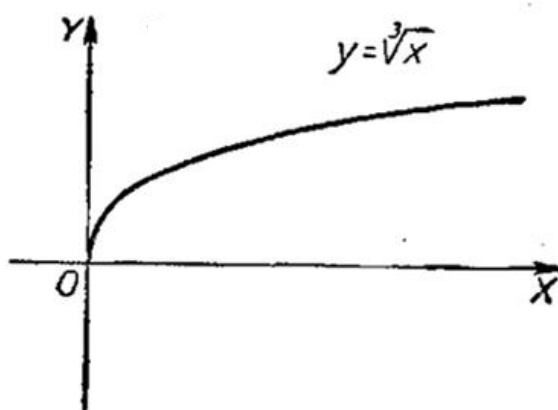


Рис. 1. График функции $y = \sqrt[3]{x}$.

- 3) табличным способом следующей таблицей:

Таблица 3

Таблица некоторых значений x и соответствующие им значения $y = \sqrt[3]{x}$

x	1	2	3	4	5	6	7
y	1	1.26	1.44	1.59	1.71	1.82	1.91

- 4) словесным способом: каждому действительному значению аргумента x ставится в соответствие значение его кубического корня.

Область определения функции и область значений функции

Областью определения функции называется совокупность всех значений независимой переменной x , для которых y принимает определенные действительные значения.

Областью определенности аналитического выражения (областью значений функции) называется совокупность всех значений независимой переменной, для которых это аналитическое выражение принимает определенные действительные значения.

Если функция задается аналитическим выражением без всяких дополнительных условий, то всегда подразумевают, что областью ее определения является область определенности этого аналитического выражения.

Таблица некоторых функций и их области определения

Функция	Ее область определения
$y = \frac{1}{1+x^2}$	Все множество действительных чисел
$y = \sqrt{1-x^2}$	Множество действительных чисел от -1 до $+1$ включительно
$y = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	Множество действительных чисел, заключенных между -1 и $+1$

Приведем простейшие примеры функций.

Температура T воздуха в данном месте, измеряемая через каждый час в течение суток, является функцией целочисленного аргумента – времени t , принимающего значения $x = 0, 1, 2, 3, \dots, 23$. Действительно, каждому из этих значений величины t соответствует вполне определенное значение величины T , и, значит, она в согласии с данным определением является функцией величины t . Здесь область определения функции состоит из 24 «целых» точек. Если измерения производить не через каждый час, а через каждую минуту, то температура будет функцией целочисленного аргумента, принимающего уже $24 \times 60 = 1440$ последовательных целых значений.

2. Элементарные функции и графики

Основными элементарными функциями, называются следующие функции:

- степенная функция: $y = x^n$, где n – действительное число;
- показательная функция: $y = a^x$, где a – положительное число и $a \neq 1$;
- логарифмическая функция: $y = \log_a x$, где основание логарифмов a – положительное число и $a \neq 1$;
- тригонометрические функции: $y = \sin x$, $y = \cos x$, $y = \operatorname{tg} x$.

Линейная функция

Линейной функцией называется функция вида $y = kx + b$, где k , b – постоянные.

Графиком является прямая линия (рис. 2).

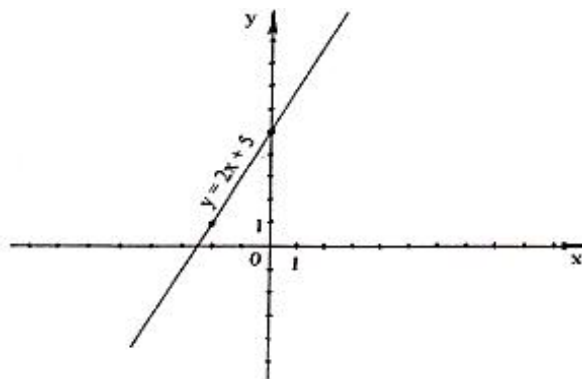


Рис. 2. График линейной функции вида $y = 2x + 5$

При $b = 0$ получается прямая зависимость $y = kx$ (рис. 3).

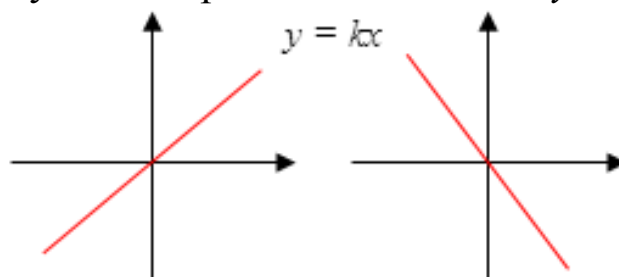


Рис. 3. График функции $y = kx$

При $k = 0$ получается зависимость $y = b$ (рис. 4).

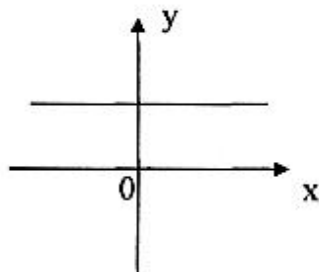


Рис. 4. График функции $y = b$

Квадратичная функция

Квадратичной функцией называется функция вида

$$y = ax^2 + bx + c \quad (a \neq 0).$$

Рассмотрим частные случаи.

1. Этот случай получается при $b = c = 0$. График функции $y = ax^2$ называется параболой (рис. 5).

Парабола $y = ax^2$ располагается в верхней полуплоскости, когда $a > 0$, и в нижней, когда $a < 0$. Эта парабола располагается симметрично относительно оси Y_1Y .

Ось симметрии параболы называется ее осью. Точка пересечения параболы со своей осью называется вершиной параболы.

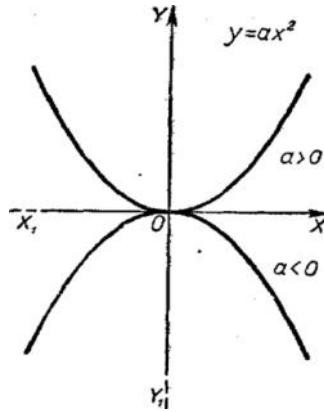


Рис. 5. График функции $y = ax^2$

Парабола $y = ax^2$ располагается тем ближе к оси Y_1Y , чем больше абсолютное значение коэффициента a .

2. $y = ax^2 + c$.

Этот случай получается при $b = 0$. Графиком функции является парабола, вершина которой смещена вверх по оси Y_1Y , если $c > 0$, на величину c (рис. 6).

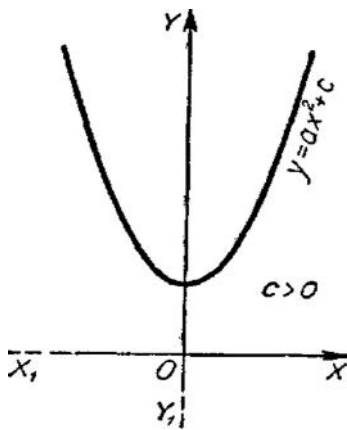


Рис. 6. График функции $y = ax^2 + c$ при $c > 0$

Графиком функции является парабола, вершина которой смещена вниз по оси Y_1Y , если $c < 0$, на величину c (рис. 7).

3. Графиком функции $y = a(x+m)^2$ есть парабола $y = ax^2$, смещенная параллельно оси X_1X вправо, когда $m < 0$, и влево, когда $m > 0$ (рис. 8). Осью этой параболы является прямая, параллельная оси Y_1Y , проходящая через точку $(-m; 0)$, которая служит ей вершиной.

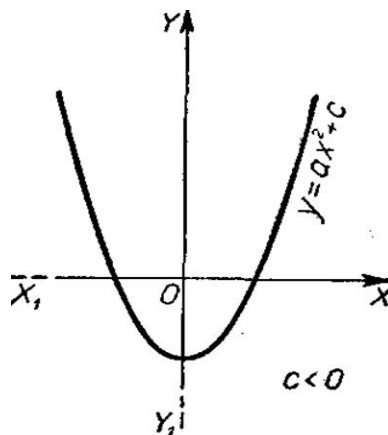


Рис. 7. График функции $y = ax^2 + c$ при $c < 0$

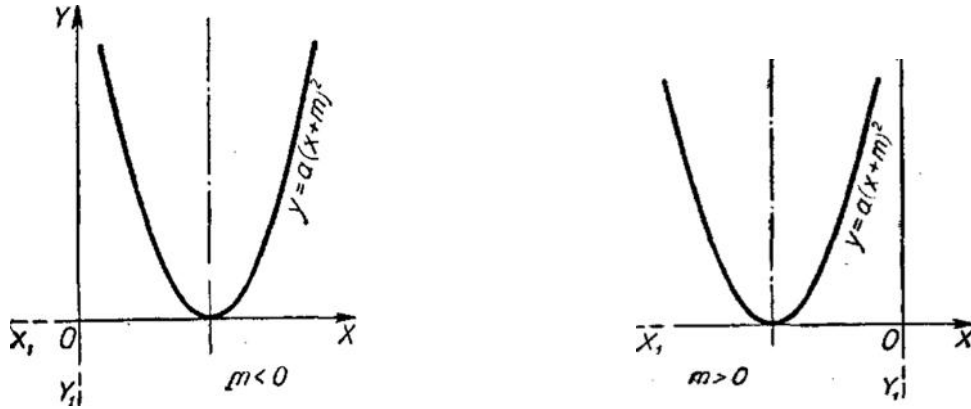


Рис. 8. График функции $y = a(x+m)^2$

Показательная функция

Показательная функция – функция вида $y = ax^n$, где $a > 0$, $a \neq 1$, x – любое число.

Область определения показательной функции: $D(y) = R$ – множество всех действительных чисел.

Область значений показательной функции: $E(y) = R^+$ – множество всех положительных чисел.

Показательная функция $y = ax^n$ возрастает при $a > 1$.

Показательная функция $y = ax^n$ убывает при $0 < a < 1$ (рис. 9).

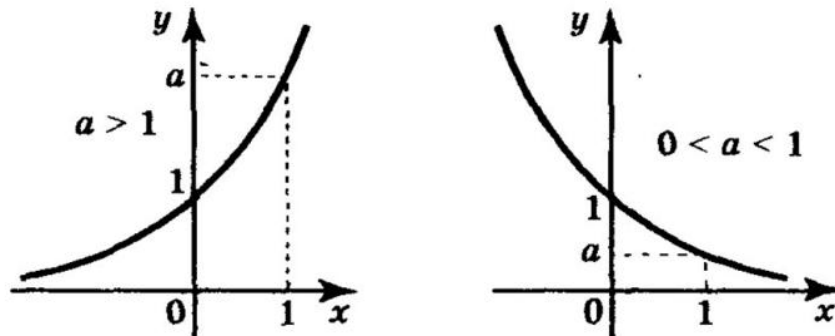


Рис. 9. График показательной функции $y = ax^n$

3. Производная функция

Понятие производной

Возьмем какую-нибудь функцию, например x^2 (x^2 есть функция аргумента x , так как каждому значению x соответствует определенное значение выражения x^2).

Дадим аргументу x некоторое произвольное приращение Δx (положительное или отрицательное) $(x + \Delta x)^2$. Тогда вместо выражения x^2 появится выражение $(x + \Delta x)^2$.

Выражение называется *наращенным значением функции* x^2 .

Разность же $x + \Delta x)^2 - x$ называется приращением функции x^2 .

Рассмотрим отношение приращения функции к приращению аргумента, т. е. дробь $\frac{x+\Delta x)^2-x^2}{\Delta x}$. Величина этой дроби зависит и от величины x и от величины Δx . Например, при $x = 2$ и $\Delta x = 0,1$ значение дроби равно 4,1; при $x = 3$; $\Delta x = 0,01$ равно 6,01 и т. д.

Если теперь мы станем приближать величину Δx неограниченно к нулю, то числитель и знаменатель дроби $\frac{x+\Delta x)^2-x^2}{\Delta x}$ станут одновременно приближаться неограниченно также к нулю. При этом величина самой дроби будет как-то изменяться.

Характер этого изменения мы не можем обнаружить, если ограничим себя лишь рассмотрением отношения $\frac{x+\Delta x)^2-x^2}{\Delta x}$.

Если сделаем преобразования

$$\frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} = \frac{x^2 + 2x\Delta x + \Delta x^2 - x^2}{\Delta x} = \frac{2x\Delta x + \Delta x^2}{\Delta x} = 2x + \Delta x,$$

то увидим, что при $\Delta x \rightarrow 0$ выражение $2x + \Delta x$, а, следовательно, и дробь неограниченно приближается к выражению $2x$.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{\Delta x}.$$

$2x$ будет являться пределом дроби:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} = 2x.$$

Выражение $2x$ представляет собой новую функцию, которая получилась из исходной функции x^2 с помощью определенного процесса. Этот процесс заключался в вычислении предела отношения приращения функции x^2 к приращению аргумента Δx при условии, что приращение аргумента стремится к нулю. Полученная с помощью такого процесса функция $2x$ называется производной от функции x^2 .

Процесс нахождения производной является новым математическим действием. Это действие обозначается поставленным над данной функцией знаком штрих (').

Например, чтобы указать, что $2x$ есть производная функции x^2 , пишут так: $(x^2)' = 2x$.

Производной от данной функции называется предел отношения приращения этой функции к приращению аргумента при условии, что приращение аргумента стремится к нулю.

Пример. Найти производную функции $\sqrt{x}$.

Решение. $(\sqrt{x})' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sqrt{x+\Delta x} - \sqrt{x}}{\Delta x} =$
 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\sqrt{x+\Delta x} - \sqrt{x}}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(\sqrt{x+\Delta x})(\sqrt{x+\Delta x} + \sqrt{x})}{\Delta x (\sqrt{x+\Delta x} + \sqrt{x})} =$
 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta x (\sqrt{x+\Delta x} + \sqrt{x})} = \frac{1}{2\sqrt{x}}.$
 Значит, $(\sqrt{x})' = \frac{1}{2\sqrt{x}}.$

Подобным образом можно найти производные и других функций.

Приведем без выводов основную таблицу производных и общие правила вычисления производных (табл. 5).

Таблица 5

Основная таблица производных

№ п/п	Производные некоторых функций
1	$(x^a)' = ax^{a-1}; (x)' = (x^0)' = 1$
2	$(a^x)' = a^x \ln a$
3	$(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$
4	$(\ln x)' = \frac{1}{x}$
5	$(\sin x)' = \cos x$
6	$(\cos x)' = -\sin x$

Заметим, что производными обратных тригонометрических функций служат функции алгебраические, а производными тригонометрических функций – функции тригонометрические.

Общие правила нахождения производных

1. Производная суммы равна сумме производных.

$$(V + U)' = V' + U'.$$

Например: $(x^2 + \sqrt{x} + \sin x)' = (x^2)' + (\sqrt{x})' + (\sin x)' = 2x + \frac{1}{2\sqrt{x}} + \cos x.$

2. Постоянный множитель можно выносить за знак производной.

$$(AU)' = A(U)'$$

Например, $(19x^3)' = 19(x^3)' = 19 \cdot 3(x^2) = 57x^2;$

$$(5 \sin x)' = 5(\sin x)' = 5 \cos x.$$

3. Производная произведения двух функций равна первой функции, умноженной на производную второй, плюс вторая функция, умноженная на производную первой.

$$(V U)' = V'U + VU'.$$

Например:

$$(x^2 \sin x)' = x^2 (\sin x)' + (\sin x)(x^2)' = x^2 \cos x + (\sin x) \cdot 2x = x^2 \cos x + 2x \sin x.$$

4. Производная дроби равна произведению знаменателя на производную числителя, минус произведение числителя на производную знаменателя, все разделенное на квадрат знаменателя.

$$\left(\frac{V}{U}\right)' = \frac{(V)'U - V(U)'}{U^2}.$$

Например:

$$\left(\frac{\sin x}{x^2}\right)' = \frac{x^2(\sin x)' - (x^2)' \sin x}{(x^2)^2} = \frac{x^2 \cos x - 2x \sin x}{x^4}; (x \neq 0).$$

5. Производная постоянной величины равна нулю: $a' = 0$.

Например: $(5)' = 0$; $(\sqrt{3})' = 0$;

$$(ax^2 + bx + c)' = 2ax + b;$$

$$(\sin^2 x + \cos^2 x)' = (1)' = 0.$$

Механический смысл производной

Известно, что функция $\frac{gt^2}{2}$ выражает путь, пройденный при свободном падении. Придадим аргументу приращение Δt .

Тогда приращение функции окажется равным $\frac{1}{2}g(t + \Delta t)^2 - gt^2$.

Отношение $\frac{\frac{1}{2}g(t+\Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt^2}{\Delta t}$ – средняя скорость на промежутке времени от момента t до момента $(t + \Delta t)$.

Скоростью в момент t будем называть тот предел, к которому стремится эта дробь при $\Delta t \rightarrow 0$. Но этот предел по определению, данном выше, есть производная функция $\frac{gt^2}{2}$ и gt .

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2}g(t+\Delta t)^2 - \frac{1}{2}gt^2}{\Delta t} = \left(\frac{1}{2}gt^2\right)' = \frac{1}{2}g \cdot 2t = gt = v.$$

Таким образом, оказывается, что производная от функции, выражающей пройденный путь при прямолинейном движении, выражает скорость этого движения. В этом заключается физический (механический) смысл производной.

Получили, что производная от пути по времени есть скорость.

Геометрический смысл производной

К кривой PQ проведена секущая AB через две ее точки M и M_1 , (рис. 10).

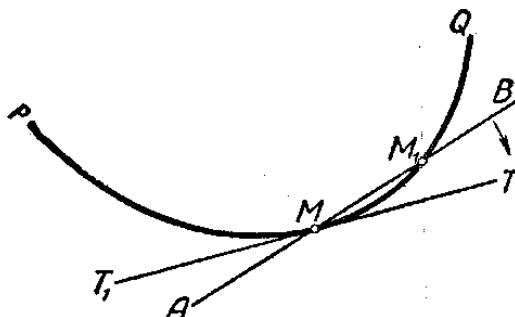


Рис. 10. График, поясняющий геометрический смысл производной

Оставляя точку M неподвижной, вообразим, что точка M_1 , движется по кривой, неограниченно приближаясь к M . Тогда секущая AB станет поворачиваться вокруг неподвижной точки M , стремясь к предельному положению T_1T . Это предельное положение секущей называется касательной к кривой в точке M .

Касательной к данной кривой в данной на ней точке M называется предельное положение секущей, проходящей через данную точку M и через другую точку M_1 кривой, при условии, что точка M_1 , приближается по кривой неограниченно к неподвижной точке M .

Было бы неправильно называть касательной прямую, имеющую с кривой лишь одну общую точку. Например, ось Y_1Y имеет с параболой $y=x^2$ лишь одну общую точку и не является касательной (рис. 11).

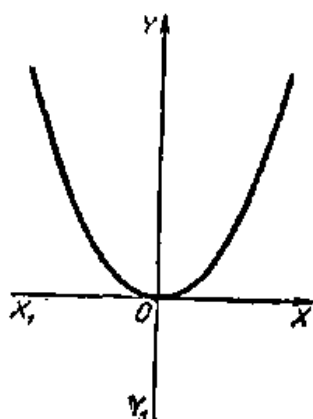


Рис. 11. График функции $y = x^2$

Кратко можно говорить так: касательной называется предельное положение секущей.

Приведем еще несколько примеров, разъясняющих смысл производной.

1. При неравномерном прямолинейном движении скорость есть функция времени. Обозначим приращение времени буквой Δt , а приращение скорости – буквой Δv . Тогда $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ будет среднее ускорение, а $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$ – будет ускорение.

Таким образом, производная от скорости по времени есть ускорение.

С помощью производной изучается характер кривизны любой кривой. Производная позволяет иметь общий метод для решения задач о наибольших и наименьших значениях величин и т. д.

4. Исследование функции с помощью производной функции

Критические точки функции, область возрастания и убывания

Пусть кривые MABCDE есть график функции $y = f(x)$ (рис. 12) и пусть в точках A, B, C, D, E абсциссами, равными соответственно a, b, c, d, e , проведены к этой кривой касательные.

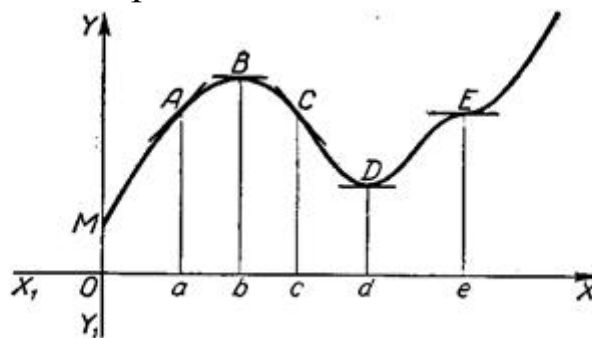


Рис. 12. График функции $y = f(x)$

Касательная в точке A составляет с положительным направлением оси X_1X острый угол.

Касательная в точке C составляет с положительным направлением оси X_1X тупой угол.

Касательные в точках B, D, E параллельны оси X_1X или составляют с ней угол, равный нулю.

Из геометрических наглядных представлений видно, что функция в точках A и E является возрастающей, в точке C – убывающей, а в точках B, D – ни возрастающей, ни убывающей.

В точке B функция переходит от возрастания к убыванию.

В точке D , наоборот, – от убывания к возрастанию.

Значение функции, определяющее такую точку, как B , называется максимумом функции.

Значение функции, соответствующее точке B , больше, чем ее значения, соответствующие точкам, близлежащим к точке B , слева и справа.

Значение функции, определяющее такую точку, как D , называется минимумом функции.

Пользуясь геометрическим значением производной, можно записать,

$$f'(a) > 0; \quad f'(b) = 0; \quad f'(c) < 0;$$

$$f'(d) = 0; \quad f'(e) = 0.$$

Значение функции $f(x)$, соответствующее точке $x = b$, называется максимумом этой функции.

Значение функции $f(x)$, соответствующее точке $x = d$, называется минимумом функции.

Значение функции $f(x)$, соответствующее точке $x = e$, не является ни максимумом, ни минимумом.

Отсюда мы можем сделать следующие выводы:

1. Если при $x = b$, $f'(x) = 0$ и если слева от точки $x = b$ в непосредственной близости к ней $f'(x) > 0$, а справа $f'(x) < 0$, то в точке $x = b$ функция $f(x)$ имеет максимум.

2. Если при $x = d$, $f'(x) = 0$ и если слева (от точки d) $f'(x) < 0$, а справа (от точки d) $f'(x) > 0$, то в точке $x = d$ функция $f(x)$ имеет минимум.

3. Если при $x = e$, $f'(x) = 0$ и при этом слева и справа $f'(x)$ сохраняет один и тот же знак, то в точке $x = e$ не будет ни максимума, ни минимума.

Например.

1. Найдем те значения аргумента x , при которых функция $y = x^2$ имеет максимум или минимум.

Сначала найдем производную от данной функции. Искомая производная будет $y' = 2x$.

Затем найдем корни производной, т. е. те значения x , при которых производная равна нулю. Для этого приравняем производную нулю и решим полученное уравнение $2x = 0$. Видно, что производная в данном случае имеет лишь один корень, равный нулю.

Теперь исследуем знак производной, т. е. знак функции $2x$ и слева и справа от точки $x = 0$.

При $x < 0$ $2x < 0$,

при $x > 0$ $2x > 0$.

Следовательно, данная функция $y = x^2$ имеет только один минимум при $x = 0$.

Минимальное значение функции $y = x^2$, т. е. ее значение при $x = 0$, будет равно также нулю.

Исследование функции с помощью ее производной

Исследуем функцию $f(x) = 3x^5 - 5x^3 + 2$ и построим ее график:

- $D(f) = R$, так как $f(x)$ – многочлен;
- функция $f(x)$ не является ни четной, ни нечетной;
- график $f(x)$ пересекается с осью ординат в точке $(0; f(0))$, т. е. в точке $(0; 2)$. Чтобы найти пересечение с осью абсцисс, $3x^5 - 5x^3 + 2 = 0$. Один из корней ($x = 1$) находится легко, другие корни (если они есть) могут быть найдены приближенно. Поэтому для данной функции остальные точки пересечения графика с осью абсцисс и промежутки знакопостоянства мы находить не будем (приведенная схема имеет примерный характер).

Найдем производную функции $f(x)$: $f'(x) = 15x^4 + 15x^2 = 15x^2(x^2 + 1)$.

Заметим, что $f'(x) = 0$, если $x^2(x^2 + 1) = 0$, т. е. при значениях аргумента, равных 0, -1, 1.

Рассматриваемая функция имеет три критические точки. Составляем таблицу.

Таблица 6

Критические точки функции $f(x) = 3x^5 - 5x^3 + 2$, ограниченные ими промежутки, знаки производной на этих промежутках и изменение значения функции

x	$(-\infty; -1)$	-1	$(-1; 0)$	0	$(0; 1)$	1	$(1; \infty)$
$f'(x)$	+	0	-	0	-	0	+
$f(x)$	↗	4	↘	2	↘	0	↗
		max				min	

В первой строке этой таблицы указаны в порядке возрастания критические точки функции и ограниченные ими промежутки.

Во второй строке отмечены знаки производной на этих промежутках. (На каждом таком интервале знак производной не меняется,

его можно найти, определив знак производной в какой-либо точке рассматриваемого интервала).

В третьей строке записаны выводы о ходе изменения данной функции « $\nearrow$ » – возрастает, « $\searrow$ » – убывает, а в четвертой – о виде критических точек.

Критическая точка 0 функции f не является точкой экстремума, поэтому в четвертой строке таблицы она не отмечена. Вывод о ходе изменения функции на промежутке между критическими точками можно сделать, сравнив значения функции на концах этого промежутка (вместо определения знака производной).

Например, $f(0) < f(-1)$ ($2 < 4$), поэтому на промежутке $(-1; 0)$ функция убывает (и, следовательно, $f' < 0$ на этом промежутке).

Построение проведем по промежуткам, которые указаны в табл. 6.

Например, в таблице указано, что функция убывает на интервале $(0; 1)$. Функция f непрерывна в точках 0 и 1 (так как она непрерывна всюду), следовательно, она убывает на отрезке $[0; 1]$. Рисуем график убывающим на отрезке $[0; 1]$ от значения $f(0) = 2$ до значения $f(1) = 0$. При этом касательные к графику в точках 0, ± 1 должны быть горизонтальными, во второй строке таблицы сказано, что в этих точках производная равна нулю.

Аналогично строится график и на остальных промежутках (рис. 13).

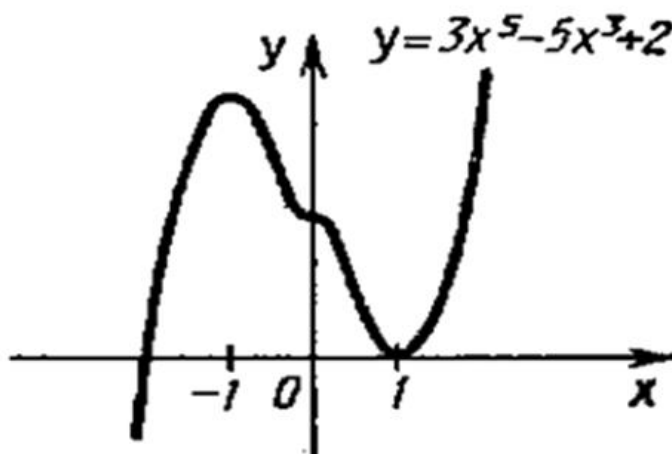


Рис. 13. График функции $y = 3x^5 - 5x^3 + 2$

5. Математические методы в судебной экспертизе

В настоящее время для решения задач экспертной практики широко используются математические методы. Рассмотрим некоторые из них.

Определение номера обуви и роста человека по следам – отображениям

В следах обутых ног наряду с другими признаками, характерными для каждой отдельной пары обуви, отображаются также размерные параметры обуви, что позволяет в благоприятном случае устанавливать номер обуви, оставившей исследуемый след. Размеры многих видов обуви выражаются в так называемых штихмассах. Один штихмасс равен 6,67 мм, или $\frac{2}{3}$ см. Пользуясь указанным количественным соотношением, можно вычислить номер обуви, которой был оставлен след на месте совершенного преступления. Для этого производится тщательное измерение следа в сантиметрах и миллиметрах. От полученного числа вычитается 10 мм. Затем разность делят на 6,67 мм. Допустим, что длина следа, обнаруженного при проведении следственного действия, составляет 29 см. Тогда номер обуви будет равен 42.

Необходимо отметить, что под действием температурных деформаций происходит изменение линейных размеров самого следа. Ввиду этого грунт, на котором был обнаружен след, может давать усадку. Поэтому необходимо все измерения производить в условиях, в которых происходил процесс следообразования.

Вторая задача, которая может быть решена при получении информации о размерах следа обуви, – определение роста человека, оставившего данный след. В этом случае применяются основные антропометрические зависимости и табличные данные.

Применение геометрических методов при определении высот

Для определения некоторых размеров объектов при осмотре места происшествия приходится производить расчёты, когда нет возможности по разным причинам непосредственно произвести измерение. Иногда при расследовании возникает необходимость в определении значительных высот, непосредственное измерение которых в данных условиях невозможно или сопряжено с большими трудностями. Например, в уголовных делах, возбуждаемых в связи со смертью человека, разбившегося при падении с высоты. При этом существенное значение имеет установление расследуемого события, т. е. решение вопроса о том, что фактически произошло: свободное падение тела или его сбрасывание. Решение указанной задачи предполагает наличие данных о высоте падения тела и степени его отклонения от вер-

тикали. На них основывается эксперт, производя необходимые расчеты и опытные действия.

Невозможность или затруднительность непосредственного измерения значительных высот с помощью рулетки, шнура, мягкого или складного метра обуславливается либо отсутствием соответствующих измерительных средств, либо особенностями осматриваемого объекта и его расположения, не позволяющими приблизиться к тому или иному пункту отсчета. Например, подойти к объекту мешает канава, наполненная водой; подняться на нужную высоту не удастся из-за отсутствия лестницы требуемой длины.

В подобных случаях высоту можно установить путем визирования. Имеется несколько способов определения высот. Все они основываются на использовании простейших положений геометрии, таких как теорема подобия.

Рассмотрим некоторые способы определения высот путем визирования. Измеряемой высотой является расстояние от A до B (рис. 14). Для расчета высот можно применять высотомер следующей конструкции. Он представляет собой квадрат из фанеры или плотного картона. К одному из углов квадрата прикреплен отвес. При визировании одну из сторон, верхний конец которой совмещается с точкой прикрепления отвеса, располагают на одной прямой линии с точкой, высота которой подлежит определению. Правильное расположение прибора показано на рис. 14.

В зависимости от измеряемой высоты нить отвеса пересекает противоположный край высотомера в той или иной точке (c). Треугольники BCa и abc подобны как прямоугольные с соответственно параллельными сторонами и равными острыми углами $\angle CBa$ и $\angle acb$.

Значит, $\frac{BC}{bc} = \frac{Ca}{ab}$. Отсюда $BC = Ca \frac{bc}{ab}$. Все величины, входящие в указанное уравнение, измеряются непосредственно. Прибавив к BC отрезок AC (высота точки a над землей), получают окончательный результат.

Высота может быть определена и при отсутствии какого-либо прибора, с помощью записной книжки и карандаша. Карандаш вставляется в имеющуюся при записной книжке петельку или в промежуток между корешком переплета и сброшюрованными листами. Визирование заключается в расположении на одной прямой линии верхне-

го, ближнего к наблюдателю угла книжки, окончания выступающего отрезка карандаша и точки, высоту которой требуется определить (рис. 15).

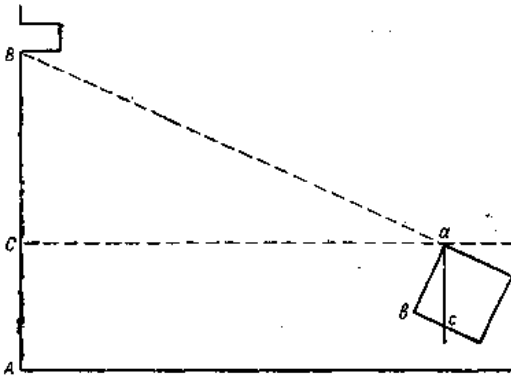


Рис. 14. Определение высоты посредством простейшего высотомера с отвесом

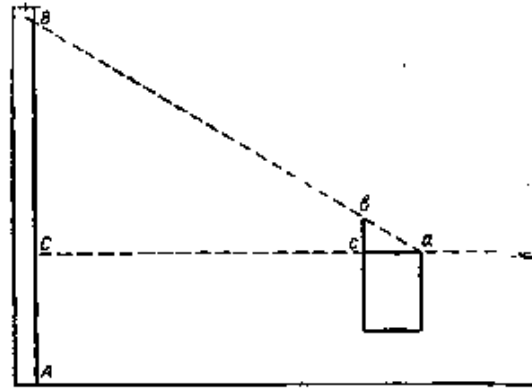


Рис. 15. Определение высоты посредством записной книжки и карандаша

Подобие треугольников aBC и abc позволяет записать уравнение $BC / bc = aC / ac$. Отсюда $BC = aC \cdot bc / ac$. Отрезки aC , bc и ac измеряются непосредственно. Искомую высоту определяют сложением отрезков BC и AC (расстояние от земли до верхнего края книжки).

На рис. 16 показан способ определения высоты при помощи шеста. Здесь AB – определяемая высота; ab – шест; o – точка расположения глаза наблюдателя; bc – расстояние между концом шеста и высотой расположения глаза человека, производящего визирование над землей; ac – высота расположения глаза при визировании, равная AC . Ввиду подобия треугольников BCo и bco составляем уравнение $\frac{BC}{bc} = \frac{oc}{oc}$. Отсюда $BC = oc \cdot \frac{bc}{oc}$. Искомая высота AB складывается из отрезков BC и AC .

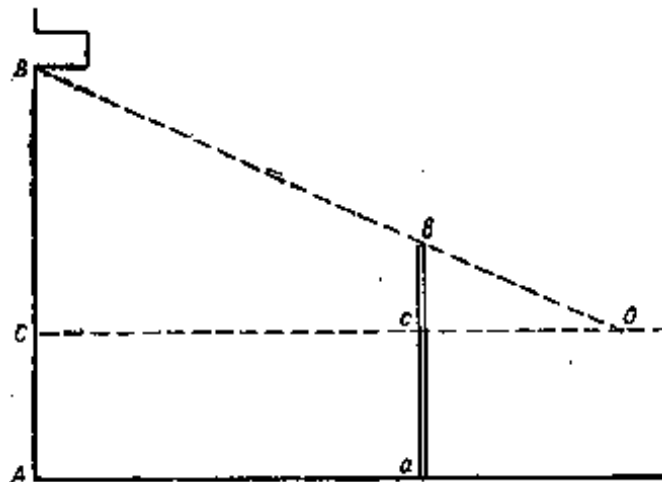


Рис. 16. Визирование при помощи шеста

Лекция 3. Научные основы метрологии, используемой в криминалистике

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. *Определение метрологии, использование ее положений криминалистами. Требования к методам и средствам в экспертно-криминалистической деятельности.*
2. *Понятие стандарта, стандартизации, технического регламента и сертификации, паспортизации и поверки технических средств, используемых в экспертно-криминалистической деятельности.*
3. *Физические величины. Размеры физических величин.*

Исследование любого объекта судебной экспертизы – это сложный многостадийный процесс. На стадии аналитического исследования свойств и признаков объекта экспертизы можно выделить следующие этапы:

- постановка задачи;
- выбор метода и схемы анализа;
- подготовка пробы к анализу;
- измерения;
- обработка результатов измерений;
- выводы.

Без измерения не обходится ни одно исследование, ни описание протоколов на месте происшествия, так как всегда делается измерение размеров, объема, массы объектов.

Рассмотрим некоторые общие положения измерения и методы обработки результатов измерения.

1. Определение метрологии, использование ее положений криминалистами. Требования к методам и средствам в экспертно-криминалистической деятельности

Метрология (от греч. *metron* – мера и *logos* – слово, учение) – это наука об измерениях, методах и средствах достижения их единства и способах достижения требуемой точности.

Основными задачами метрологии являются:

- установление единиц измерения и воспроизведение их в виде конкретных эталонов с максимально возможной точностью;
- разработка методов передачи верных значений единиц от эталонов к рабочим мерам и измерительным приборам;

- совершенствование методов измерений и разработка новых методов высокоточных измерений;

- осуществление поверок мер и измерительных приборов, применяемых в науке и во всех отраслях человеческой деятельности.

Требования к методам и средствам в экспертно-криминалистической деятельности – обеспечение точности измерений разных параметров и свойств объектов исследования, стандартизация методик экспертного исследования для внедрения в экспертную практику эффективных и надежных методов.

Для выполнения этих требований необходимо знание понятий технического регламента, стандарта, стандартизации и сертификации, паспортизации и поверки технических средств – элементов и средств метрологии, используемых в экспертно-криминалистической деятельности.

Требования к метрологии изложены в Законе Российской Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» и в Федеральном законе от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

2. Понятие стандарта, стандартизации, технического регламента и сертификации, паспортизации и поверки технических средств, используемых в экспертно-криминалистической деятельности

Стандарт (англ. *standard* – норма, образец, мерило) в широком смысле имеет два значения:

- 1) образец, эталон, модель, принимаемые за исходные для сопоставления с ними других объектов;

- 2) нормативно-технический документ, устанавливающий:

- единицы величин;

- термины и их определения;

- требования к продукции и производственным процессам;

- требования, обеспечивающие безопасность людей и сохранность материальных ценностей и т. д.

Основным результатом стандартизации является установление стандарта. Вопросами стандартизации в нашей стране занимается Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации.

Стандартизация (англ. *standart* – норма, образец, мерило) – осуществляется в целях: повышения уровня безопасности жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества, экологической безопасности, безопасности жизни или здоровья животных и растений и содействия соблюдению требований технических регламентов; повышения уровня безопасности объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера; обеспечения научно-технического прогресса; повышения конкурентоспособности продукции, работ, услуг; рационального использования ресурсов; технической и информационной совместимости; сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных; взаимозаменяемости продукции.

Более упрощенно стандартизацию можно определить как установление в государственном масштабе единых норм и требований, предъявляемых к повышению уровня безопасности жизни или здоровья граждан.

Объекты технического регулирования подчиняются техническому регламенту.

Технический регламент – документ, который принят международным договором Российской Федерации, ратифицированным в порядке, установленном законодательством Российской Федерации или федеральным законом, или указом Президента Российской Федерации, или постановлением Правительства Российской Федерации, и устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования (продукции, в том числе зданиям, строениям и сооружениям, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации).

Техническое регулирование осуществляется в соответствии с принципами:

- независимости органов по аккредитации, органов по сертификации от изготовителей, продавцов, исполнителей и приобретателей;
- применения единых правил установления требований к продукции, процессам производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг;

- соответствия технического регулирования уровню развития национальной экономики, развития материально-технической базы, а также уровню научно-технического развития;

- единой системы и правил аккредитации; единства правил и методов исследований (испытаний) и измерений при проведении процедур обязательной оценки соответствия; единства применения требований технических регламентов независимо от видов или особенностей сделок;

- недопустимости ограничения конкуренции при осуществлении аккредитации и сертификации; недопустимости совмещения полномочий органа государственного контроля (надзора) и органа по сертификации; недопустимости совмещения одним органом полномочий на аккредитацию и сертификацию; недопустимости внебюджетного финансирования государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов.

Методами стандартизации являются унификация и типизация.

Унификация (лат. *unus* – один, *facto* – делаю) – это рациональное сокращение числа объектов одинакового функционального назначения.

Типизация (греч. *typos* – образец, отпечаток формы) – это установление типовых конструкций, методик на основе общих характеристик для ряда изделий, методик и т. д.

Контроль за техническими средствами невозможен без паспорттизации их после изготовления.

Паспорттизация – это обеспечение технического средства или методики паспортом, содержащим основные сведения о данном техническом средстве или методике и правилах применения (эксплуатации).

Все используемые в экспертной практике приборы должны иметь паспорт, в котором указаны параметры прибора, допуски и погрешности, даваемые в процессе измерения.

В процессе работы прибора необходим периодический контроль параметров прибора, который называют поверкой.

Поверка – это определение метрологическими организациями погрешности средств измерений и установление их пригодности. Поверка осуществляется соответствующими органами один раз в год.

Настройка прибора, т. е. получение заданных в паспорте параметров, называется юстировкой.

Юстировка (нем. *justiren* – выверять, контролировать) – это совокупность операций по доведению погрешностей средств. Актуальной задачей в области каждого рода судебной экспертизы является систематизация методик по видам и подвидам экспертных исследований в целях обеспечения научно-методического единообразия применяемых методик в разных ведомствах и подразделениях, а также в целях облегчения доступа к ним всех заинтересованных лиц.

Задача метрологии в криминалистике – обеспечение точности измерений разных параметров и свойств объектов исследования, стандартизация методик экспертного исследования для внедрения в экспертную практику эффективных и надежных методов.

3. Физические величины. Размеры физических величин

Все то, что может изменяться количественно, **называется величиной**.

Величины, характеризующие физические явления или определенные свойства материи, **называются физическими**.

Выбор удобных единиц измерения для физических величин имеет огромное значение для науки.

Каждая единица измерения должна быть строго определенной и неизменной, так как только в этом случае научные измерения и установленные с их помощью закономерности будут объективными и могут быть проверены при проведении повторных (или контрольных) опытов.

Наличие различных единиц измерения в отдельных странах тормозило развитие науки и мешало торговле, поэтому в 1889 г. была созвана Международная генеральная конференция по мерам и весам, которая для всех стран установила единые единицы измерения. На этой конференции, в частности, были установлены международные единицы измерения важнейших физических величин: длины, массы, силы, времени.

Для двух первых были изготовлены образцы. Образец единицы измерения, который условились считать единственным подлинным

образцом, называется международным прототипом, или эталоном, данной единицы измерения.

Предполагалось, что создание эталонов наилучшим образом обеспечивает неизменность принятых единиц. Однако это оказалось не совсем верным.

Последующие, более точные, измерения показали, что изготовленные образцы метра и килограмма несколько отличаются от задуманных.

Причины такого расхождения понятны: сделать абсолютно точное измерение невозможно, также невозможно изготовить два абсолютно одинаковых образца единицы измерения. Поскольку методы измерений совершенствуются, то после каждой новой проверки пришлось бы менять размеры метра и килограмма. Это заставило отказаться от первоначальных определений метра и килограмма.

По заказу Международного бюро мер и весов были изготовлены максимально точные копии «архивных» метра и килограмма из сплава платины с иридием.

Генеральная конференция 1889 г. выбрала из них по одному образцу и утвердила их как международные эталоны метра и килограмма. Остальные образцы были признаны копиями с эталонов и распределены по жребию между странами, участвовавшими в конференции. Россия получила по две копии с эталонов метра и килограмма.

Наличие эталонов позволило организовать выпуск строго выверенных образцов единиц измерения. Эти образцы систематически сверяются с эталонами для устранения ошибок и злоупотреблений, а с выверенными образцами в свою очередь сличаются измерительные приборы, выпускаемые для массового употребления.

Хранению эталонов, изготовлению новых эталонов и стандартизации приборов для измерения каждая страна уделяет большое внимание.

Д. И. Менделеев (1834–1907) организовал в 1893 г. Главную палату мер и весов и был ее первым директором. Большая заслуга Менделеева – создание высококвалифицированных кадров специалистов – метрологов. В России стандартизованы как единицы измерения физических величин, так и их обозначения. Они определяются государственными стандартами (ГОСТ).

Можно ли считать, что международные эталоны метра и килограмма однозначно определяют их величину? Оказывается, нет, так как с течением времени сами эталоны, как и все в природе, изменяются. Поэтому через много лет метр и килограмм окажутся не такими, как сейчас. Чтобы сохранить их для потомков, на XI Генеральной конференции по мерам и весам в 1960 г. было принято новое определение метра – через длину световой волны, излучаемой атомами криптона – 86, которое дано в ГОСТе 9867–61. Новое определение килограмма пока не установлено.

Главной задачей современной метрологии является создание полной системы взаимосвязанных естественных эталонов на основе использования фундаментальных физических констант и высокостабильных квантовых явлений. Важный шаг в решении этой задачи сделан XVII Генеральной конференцией по мерам и весам, принявшей в 1983 г. новое определение метра – как длины пути, проходимого светом в вакууме за промежуток времени, равный $1 / 199\,792\,458$ с. При таком подходе единица длины может воспроизводиться с помощью фундаментальной физической константы – скорости света – и единицы времени секунды, определяемой через период эталонной частоты, передаваемой по радио. Единицы времени и частоты воспроизводятся сейчас с наименьшей погрешностью.

Характерной особенностью метрологии как отрасли науки является то, что ее деятельность регламентируется в законодательном порядке. Одним из основных компонентов системы метрологического обеспечения является нормативная база. В настоящее время основу нормативной базы составляют стандарты Государственной системы обеспечения единства измерений, которые устанавливают взаимосвязанные правила и положения, требования и нормы, определяющие организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений.

Различают международную, региональную и национальную стандартизацию. Наиболее крупными международными организациями по стандартизации являются Международная организация по стандартизации (ИСО), созданная в 1946 г., и Международная электротехническая комиссия (МЭК), созданная в 1906 г. и присоединившаяся к ИСО в 1947 г. на автономных правах. Цель этих международ-

ных организаций – обеспечение международного сотрудничества в области интеллектуальной, научно-технической и экономической деятельности. МЭК и ИСО разрабатывают международные стандарты, имеющие силу рекомендаций, значительная их часть внедряется в стандарты Российской Федерации полностью или частично. Это приводит к повышению конкурентоспособности российской продукции, облегчает международное сотрудничество и дает значительный экономический эффект. Примером региональной международной организации по стандартизации является Европейская организация по контролю качества (ЕОКК), созданная в 1956 г. и объединяющая большинство европейских стран. Главная задача ЕОКК – пропаганда методов контроля и управления качеством продукции.

Иметь только одну единицу измерения для данной физической величины практически неудобно. Поэтому кроме основной единицы обычно вводятся дополнительные как большие, так и меньшие ее в десятичной системе. Для обозначения дополнительных единиц, за исключением очень редких случаев, пользуются одними и теми же приставками. Смысл этих приставок всегда один и тот же, они даются в ГОСТе 7663–61 и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Десятичные приставки

Множитель	Наименование	Обозначение	
		Русское	Международное
10^{-12}	пико	п	p
10^{-9}	нано	н	n
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-3}	милли	м	m
10^{-2}	санتي	с	s
10^{-1}	деци	д	d
10^1	дека	да	da
10^2	гекто	г	h
10^3	кило	к	k
10^6	мега	М	M
10^9	гига	Г	G
10^{12}	тера	Т	T

В Англии, США и некоторых других странах широко распространены так называемые английские меры длины:

– дюйм = 25,4 мм = 2,54 см;

- фут = 12 дюймов = 304,8 мм;
- миля сухопутная («статутная») = 1609 м;
- миля морская («адмиралтейская») = 1852 м (длина одной минуты дуги земного меридиана).

Старые русские меры длины (рис. 1) составляли:

- вершок = 4,445 см;
- аршин = 28 дюймов = 16 вершков = 0,7112 м;
- сажень = 3 аршина = 2,1336 м;
- верста = 500 сажен = 1,0668 км;
- русская миля = 7 верст = 7,4676 км.

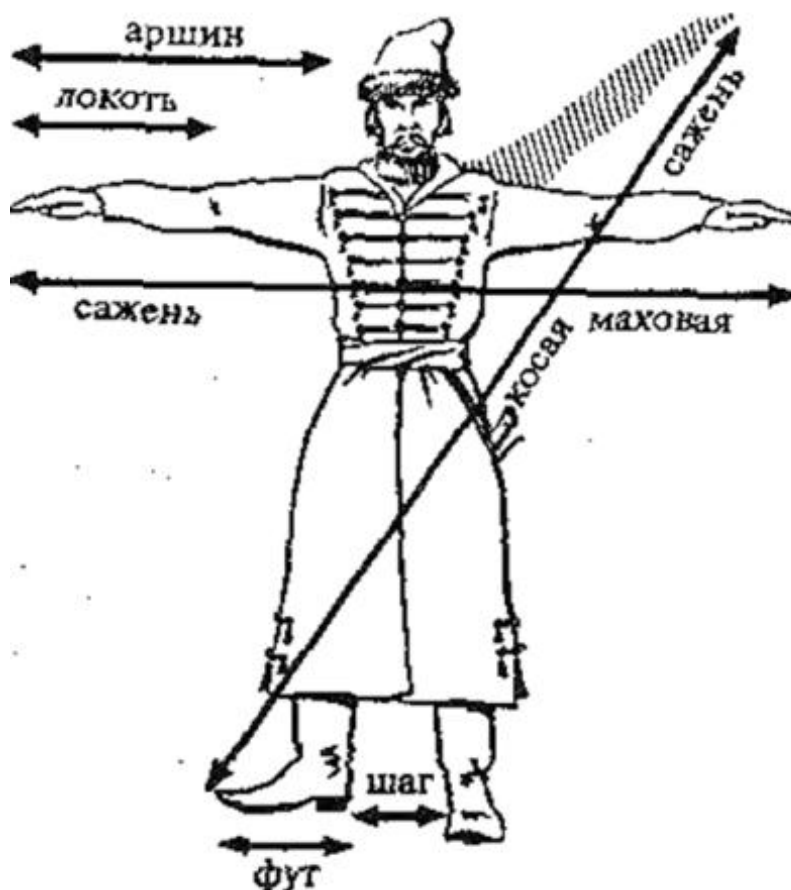


Рис. 1. Старые русские меры длины

Единицы измерения, устанавливаемые по соглашению, называются основными.

Производные единицы измерения (от основных) выводятся по единому правилу из формул.

Совокупность основных единиц совместно с выведенными из них производными единицами составляет систему единиц измерения физических величин.

Обилие разных единиц длины (а также и единиц для других физических величин) весьма неудобно на практике, поэтому была принята Международная система единиц СИ (французское наименование – *Système International*).

В системе единиц измерения СИ *основными единицами* (установленные по соглашению) принимаются:

- единицы длины – метр (м);
- единицы массы – килограмм (кг);
- единицы времени – секунда (с).

Производные единицы:

- единицы площади – квадратный метр (м^2);
- единицы объема – кубический метр (м^3);
- единицы плотности – $\text{кг}/\text{м}^3$ и другие.

Количественное различие значений какой-либо величины устанавливается путем сравнения. Сравнивать можно только длину с длиной, силу с силой и т. п., но бессмысленно спрашивать, что больше: длина стола или его вес.

Иногда величины, которые можно сравнивать друг с другом, называются однородными, но правильнее говорить о сравнении различных значений одной и той же физической величины. Так, например, при сравнении двух длин одну из них можно условно принять за единицу меры длины и сосчитать, сколько раз она содержится в другой длине. Такое сравнение представляет собой измерение. Очевидно, для каждой физической величины должна быть своя единица измерения.

Таким образом, *измерить* – значит определить, сколько раз в данной величине содержится соответствующая единица измерения.

Число, полученное в результате измерения, называется *числовым значением* физической величины. Например, если при измерении длины стержня сантиметром было получено число 45,5 см, то оно представляет собой числовое значение длины (для данного стержня). Такое число нельзя записывать без наименования (см), так как будет непонятно, с какой единицей измерения производилось сравнение.

Выбор удобных единиц измерения для физических величин имеет огромное значение. Каждая единица измерения должна быть строго определенной и неизменной, так как только в этом случае научные измерения и установленные с их помощью закономерности будут

объективными и могут быть проверены при проведении повторных (или контрольных) опытов.

Измерением какой-либо физической величины называется операция, в результате которой мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за единицу. Так, например, за единицу длины принят метр, и в результате измерения длины некоторого отрезка определяется, сколько метров содержится в этом отрезке.

Основной задачей физического эксперимента является измерение численных значений наблюдаемых физических величин.

Принято различать прямые и косвенные измерения.

При прямом измерении производится непосредственное сравнение величины измеряемого объекта с величиной единичного объекта. В результате искомая величина находится прямо по показаниям измерительного прибора (например, сила тока – по отклонению стрелки амперметра, вес – по растяжению пружинных весов и т. д.).

Однако гораздо чаще измерения проводят косвенно (например, площадь прямоугольника определяют по измерению длин его сторон, электрическое сопротивление по измерениям силы тока и напряжения и т. д.).

Во всех этих случаях искомое значение измеряемой величины получается путем соответствующих расчетов.

Результат всякого измерения всегда содержит некоторую погрешность. Поэтому в задачу измерений входит не только нахождение самой величины, но также и *оценка допущенной при измерении погрешности*. Ошибки погрешности измерения бывают абсолютные и относительные.

Абсолютной погрешностью определенного при измерении приближенного числа называется разность между этим числом и его точным значением, причем ни точное значение, ни абсолютная погрешность принципиально неизвестны и подлежат оценке по результатам измерений.

Относительной погрешностью приближенного числа называется отношение абсолютной погрешности приближенного числа к самому этому числу.

Если оценка погрешности результата физического измерения не сделана, то можно считать, что измеряемая величина вообще неизвестна, поскольку погрешность может быть того же порядка, что и сама измеряемая величина или даже больше.

В этом состоит отличие физических измерений от бытовых или технических, в которых в результате практического опыта заранее известно, что выбранный измерительный инструмент обеспечивает приемлемую точность, а влияние случайных факторов на результат измерений пренебрежимо мало по сравнению с ценой деления применяемого прибора.

В экспертной практике ни одно исследование не обходится без измерения. Измеряют размеры объектов, несущих значимую информацию, объем, массу. Например, измеряют массу пули, обнаруженную на месте происшествия, массу неизвестного вещества, размер пятна, похожего на кровь, твердость металла и т. д. В соответствии с этим используют линейные измерения, угловые измерения. Для линейных измерений используют линейки, рулетки, дальномеры, штангенциркули, микрометры, толщиномеры. Для угловых измерений (например, для измерения угла отклонения стопы при ходьбе) применяются теодолиты, угломеры и т. д. Измерение массы проводят различными весами с различной точностью в зависимости от необходимой точности.

Лекция 4. Элементы математической обработки результатов измерений

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Виды погрешностей измерений физических величин.
2. Оценка случайной погрешности прямых измерений.
3. Примеры расчета случайных погрешностей прямых измерений.

1. Виды погрешностей измерений физических величин

Если оценка погрешности результата физического измерения не сделана, то можно считать, что измеряемая величина вообще неизвестна, поскольку погрешность может быть того же порядка, что и сама измеряемая величина или даже больше.

В этом состоит отличие физических измерений от бытовых или технических, в которых в результате практического опыта заранее известно, что выбранный измерительный инструмент обеспечивает приемлемую точность, а влияние случайных факторов на результат измерений пренебрежимо мало по сравнению с ценой деления применяемого прибора.

Погрешности физических измерений бывают:

- грубые (промахи);
- систематические;
- случайные.

Под грубой погрешностью (промахом) измерения понимается погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Она может быть сделана вследствие неправильного применения прибора, неверной записи показаний прибора, ошибочно прочитанного отсчета, если не учли множителя шкалы, и т. п.

Систематические погрешности вызываются факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений. Они скрыты в неточности самого инструмента и неучтенных факторах при разработке или применении метода измерений. Обычно величина известной производителю систематической погрешности прибора указывается в его техническом паспорте.

Систематические ошибки можно разделить на четыре группы.

1. Ошибки, природа которых нам известна и величина их может быть точно определена. Такие ошибки устраняются введением попра-

вочного коэффициента (например, стрелка весов стоит не на нулевой отметке, а на отметке 10 мг).

2. Ошибки известного происхождения, но неизвестной величины. Например, на приборе указан класс точности 0,5, значит показания правильны с точностью 0,5 %. Шкала вольтметра от 1 до 150В, ошибка составляет 0,75В и измеренная величина, например 80В, будет иметь погрешность $(80 \pm 0,75)\text{В}$.

3. Ошибки, о которых мы не подозреваем, хотя величина их может быть весьма значительной (обычно проявляются при сложных измерениях). Например, определяем плотность материала, деля его массу на объем, а материал внутри имеет полость. Чтобы убедиться в отсутствии таких ошибок, проводят измерения другим методом.

4. Ошибки, связанные со свойствами измеряемого объекта (измерение поверхности цилиндра, имеющего в основании не круглое, а овальное сечение; измерение электропроводности материала проволоки, имеющей дефект – утолщение, трещину, неоднородность).

Случайные погрешности обязаны своим происхождением ряду причин, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено. Они имеют различные значения даже для измерений, выполненных одинаковым образом, т. е. носят случайный характер.

Случайные ошибки – это ошибки, о появлении которых не может быть сделано точного предсказания.

Правила определения таких ошибок изучаются в теории ошибок – математической дисциплине, основанной на законах теории вероятностей.

2. Оценка случайной погрешности прямых измерений

Рассмотрим основы теории случайных погрешностей, позволяющие оценить величину погрешности для серии измерений.

В основе теории погрешностей лежат два предположения, подтверждаемых опытом.

При большом числе измерений случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака, т. е. погрешности, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, встречаются одинаково часто.

Большие (по абсолютной величине) погрешности встречаются реже, чем малые, т. е. вероятность появления погрешности уменьшается с ростом величины погрешности.

Допустим, что мы произвели n прямых (непосредственных) измерений некоторой физической величины, истинное значение которой (нам неизвестное) обозначим через a . Обозначим через $a_1, a_2, \dots, a_n$ результаты отдельных измерений, а через Δa_i – истинную абсолютную погрешность i -го измерения.

$$\Delta a_i = a - a_i$$

Тогда результаты измерений можно представить в виде

$$\begin{aligned} a_1 &= a - \Delta a_1, \\ a_2 &= a - \Delta a_2, \\ &\dots\dots\dots \\ a_n &= a - \Delta a_n \end{aligned} \quad (1)$$

Естественно, что абсолютные погрешности $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$ могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Суммируя левую и почленно правую стороны равенств (1), получаем

$$\sum_{i=1}^n a_i = na - \sum_{i=1}^n \Delta a_i. \quad (2)$$

Если ввести понятие среднеарифметической величины

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (3)$$

то, разделив обе стороны равенства (2) на число измерений n , получаем после перестановки членов:

$$a = \bar{a} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i. \quad (4)$$

Если число n измерений достаточно велико (строго говоря, при $n \rightarrow \infty$), то согласно предположению 1:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta a_i = 0, \quad (5)$$

так как в серии из большого числа измерений всякой положительной погрешности можно сопоставить равную ей по абсолютной величине отрицательную погрешность.

$$\text{Из (4) следует, что } a = \bar{a} \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (6)$$

т. е. при бесконечно большом числе измерений истинное значение измеряемой величины равно среднеарифметическому значению a всех результатов произведенных измерений. Однако при ограниченном числе измерений ($n \neq \infty$) среднеарифметическое значение a будет отличаться от истинного значения a , т. е. равенство (6) будет не точным, а приближенным:

$$a \approx \bar{a}. \quad (7)$$

Оценим величину этого расхождения.

Появление того или иного значения a_i в процессе измерения является случайным событием. Существует некоторая вероятность появления этого значения a_i в интервале $a_i - \frac{1}{2} da_i, a_i + \frac{1}{2} da_i$, а следовательно, и появления соответствующего значения абсолютной погрешности Δa_i .

За вероятность $y(a_i)da_i$ появления величины a_i в интервале da_i принимают относительную частоту появления значений a_i в интервале da_i , т. е. отношение числа всех значений a_i , попадающих в интервал da_i , к числу всех значений a_i (при $n \rightarrow \infty$).

Эта вероятность, как показывается в теории вероятностей, определяется законом нормального распределения Гаусса (рис. 1).

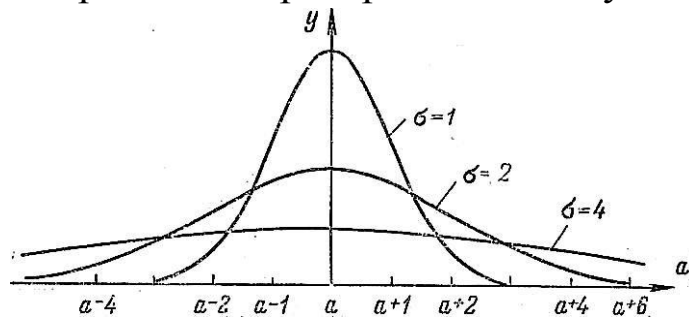


Рис. 1. Кривые $y(a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(a_i-a)^2}{2\sigma^2}}$ разных значений σ .

$$y(a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(a_i-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где e – основание натуральных логарифмов, σ^2 – постоянная величина, называемая дисперсией распределения.

По оси абсцисс отложены единицы подходящим образом выбранного масштаба. Значения σ – в тех же единицах.

Аналогичным образом можно записать распределение истинных погрешностей Δa_i (рис. 2).

$$y(\Delta a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta a_i)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(a_i-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

Индекс i , оставленный у Δa_i , означает, что речь идет о распределении вероятностей появления погрешности отдельного измерения.

Функция $y(a_i)$ (или $y(\Delta a_i)$ соответственно) называется плотностью распределения вероятностей.

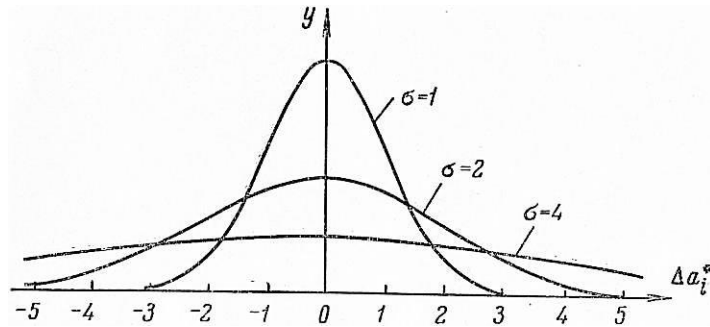


Рис. 2. Кривые $y(\Delta a_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta a_i)^2}{2\sigma^2}}$ для тех же значений σ . По оси абсцисс отложены единицы выбранного масштаба. Значения σ – в тех же единицах

Как видно из (9), нормальное распределение характеризуется двумя параметрами:

- 1) генеральным средним значением случайной величины;
- 2) дисперсией (или дисперсией генеральной совокупности).

Генеральное среднее значение представляет собой то значение, относительно которого происходит разброс случайных величин.

Другими словами, генеральное среднее значение Δa_i определяется абсциссой оси симметрии кривой нормального распределения. Так, например, в случае распределения отдельных результатов измерений a_i генеральным средним значением будет «истинное» значение a (см. рис. 1). В случае распределения истинных абсолютных погрешностей Δa_i , это генеральное среднее равно нулю (см. рис. 2).

Дисперсия σ^2 характеризует быстроту уменьшения вероятности появления погрешности Δa_i с ростом величины этой погрешности.

Дисперсия случайной величины – мера разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания.

Под генеральной совокупностью подразумевается все множество возможных значений измерений a_i или возможных значений погрешностей Δa_i .

На рис. 1 и 2 приведены кривые $y = f(a_i)$ и $y = f(\Delta a_i)$ для трех значений σ : $\sigma = 1$, $\sigma = 2$ и $\sigma = 4$. Видно, что при малых значениях σ кривые $y = f(a_i)$ и $y = f(\Delta a_i)$ идут более круто и имеют большее значение y_{max} , чем при больших значениях σ . При этом площади под кривыми $y = f(a_i)$ и $y = f(\Delta a_i)$ с различными значениями σ одинаковы. Кривые $y = f(a_i)$ и $y = f(\Delta a_i)$ симметрично расположены относительно ординаты, на которой $y = y_{max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$; $\Delta a_i = 0$ и $a = \bar{a}$.

Остановимся несколько подробнее на связи между истинным значением a измеряемой величины и средней величиной $\bar{a}$.

На рис. 3 приведены положения a и $\bar{a}$, полученного из некоторых измеренных значений a_1, a_2 , и a_3 . Видно, что даже при фиксированных значениях a_1, a_2 различные значения a_3 приводят к различному положению $\bar{a}$ относительно a . Так как вероятность появления разных значений $a_3 = a - \Delta a_3$ различна (Δa_3 подчиняется нормальному закону (9), то и вероятность появления разных значений $\bar{a}$ также различна: с увеличением величины $|\bar{a} - a|$ она уменьшается.

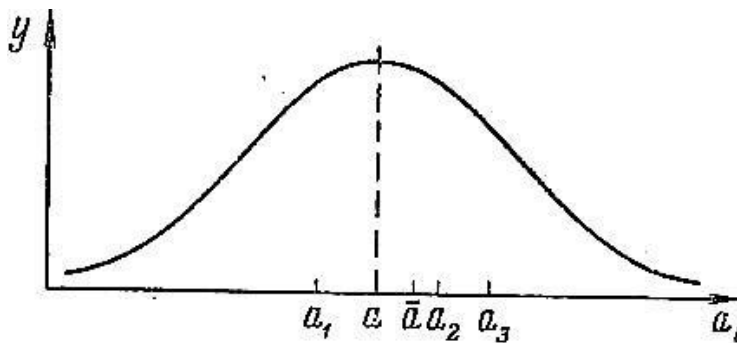


Рис. 3. Взаимное расположение истинного значения a и среднего значения $\bar{a}$, полученных из трех измерений a_1, a_2 и a_3

Поскольку результаты отдельных измерений носят случайный характер, отклонение

$$\widetilde{\Delta a} = a - \bar{a}, \quad (10)$$

т. е. величина абсолютной погрешности результата серии измерений, также имеет случайный характер, так как оно зависит от вероятности появления того или иного значения a .

При малом числе измерений n величина отдельного измерения, например a_3 , довольно сильно влияет на величину $\bar{a}$.

Следует различать $\overline{\Delta a}$ – случайную величину (возможное значение $\overline{\Delta a}$) и Δa – частное значение этой величины, проявившееся в данной серии измерений или заданное для получения определенного значения надежности.

Назовем *доверительным интервалом* интервал,

$$(\bar{a} - \Delta a, \bar{a} + \Delta a), \quad (11)$$

в который по определению попадает истинное значение a измеряемой величины с заданной вероятностью.

Надежностью результата серии измерений называется вероятность α того, что истинное значение a измеряемой величины попадает

в данный доверительный интервал. Эта величина α выражается или в долях единицы, или в процентах.

Чем больше величина доверительного интервала $(\bar{a} - \Delta a, \bar{a} + \Delta a)$, т. е. чем больше задаваемая погрешность результата измерений Δa , тем с большей надежностью искомая величина a попадает в этот интервал.

Естественно, что величина надежности α будет зависеть от числа n произведенных измерений, а также от величины задаваемой погрешности Δa . Так, например, при $n \geq 30$, выбирая Δa равным значению $\sigma_{\bar{a}}$, мы получаем величину надежности $\alpha \approx 0,68$ (точнее 0,68269).

Рассмотрим Δa – оценку погрешности результата серии измерений. Величина Δa может быть представлена в виде $\Delta a = k_{\alpha} \sigma_{\bar{a}}$, где k_{α} – некоторый численный коэффициент, зависящий от надежности α . Этот коэффициент может быть принят за меру, характеризующую величину доверительного интервала, а, следовательно, и величину Δa абсолютной погрешности результата измерений при заданной надежности α . Остается установить, как выражается величина $\sigma_{\bar{a}}$, через измеряемые величины.

В случае большого числа измерений ($n \rightarrow \infty$) величина дисперсии σ^2 , входящая в закон (9), оказывается равной так называемому среднему квадрату погрешности отдельного измерения ΔS_n^{*2} :

$$\Delta S_n^{*2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i^*)^2}{n} \quad (12)$$

Это выражение нуждается в некотором преобразовании. Дело в том, что, как правило, точное значение искомой величины a нам неизвестно, и поэтому погрешности Δa_i^* не могут быть вычислены. Вместо погрешностей Δa_i^* находят обычно «измеряемые» абсолютные погрешности Δa_i , равные

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i. \quad (13)$$

При конечном числе n измерений, когда истинное значение a неизвестно, оценен дисперсии σ^2 является так называемая *выборочная дисперсия* или *дисперсия выборки* ΔS_n^2 :

$$\Delta S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n-1}. \quad (14)$$

При ограниченном числе n величина ΔS_n^2 , является лишь *оценкой дисперсии* σ^2 , а не равна ей. Здесь следует отметить также, что из

измерений мы можем непосредственно определить лишь величину ΔS_{Π}^2 , а не σ^2 .

Корень квадратный из выборочной дисперсии определяет так называемую среднеквадратичную погрешность отдельного измерения

$$\Delta S_n = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n-1}}. \quad (15)$$

Покажем теперь, как найти оценку погрешности результата всей серии из n измерений, т. е. Величину $\overline{\Delta a} = a - \bar{a}$ (10) с заданным значением надежности α .

Так как среднеквадратичная погрешность результата серии измерений связана со среднеквадратичной погрешностью отдельного измерения равенством

$$\Delta S_{\bar{a}}^2 = \frac{\Delta S_n^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i^2}{n(n-1)} \quad (16)$$

Отсюда среднеквадратичная погрешность результата серии измерений равна

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\Delta S_{\bar{a}}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (17)$$

Оценки дисперсий σ^2 , полученные в (12) и (14), и дисперсии $\sigma_{\bar{a}}^2$, полученные в (16), являются предельными, справедливыми лишь при $n \rightarrow \infty$, т. е. при больших n .

При малых значениях n эти оценки ΔS_n^2 и $\Delta S_{\bar{a}}^2$ сами являющиеся случайными величинами, в лучшем случае определяют лишь порядок величины дисперсий. Поэтому при нахождении границ доверительного интервала для величины α при малых значениях n мы не можем пользоваться коэффициентом $k_{\alpha} = \frac{\Delta a}{\sigma_{\bar{a}}}$, поскольку величина $\sigma_{\bar{a}}$ нам неизвестна.

Для того чтобы получить оценки границ доверительного интервала для α в этом случае (при малых n) приходится ввести новый коэффициент t_{α} . Этот коэффициент был предложен в 1908 г. английским математиком и химиком В. С. Госсетом, публиковавшим свои работы под псевдонимом «Стьюдент» – студент, и получил впоследствии название *коэффициента Стьюдента*.

Рассмотрим случайную величину t , равную отношению случайных величин $\widetilde{\Delta a}$ и $\Delta S_{\bar{a}}$: $t = \frac{\widetilde{\Delta a}}{\Delta S_{\bar{a}}} = \frac{a - \bar{a}}{\Delta S_{\bar{a}}}$, где $\Delta S_{\bar{a}}$ – среднеквадратичная

погрешность результата серии измерений, определяемая соотношением (17). При этом предполагается, что случайная величина $\bar{\Delta a}$ распределена по нормальному закону (11). При недостаточно большом числе измерений (практически при $n < 20$) при расчете Δa при заданной надежности α необходимо вводить вместо коэффициентов k_α , рассмотренных выше, коэффициенты Стьюдента t_α , зависящие от числа произведенных измерений n и от величины надежности α :

$$t_\alpha(n) = \frac{\Delta a}{\Delta S_{\bar{a}}} = \frac{\Delta a}{\Delta S_n / \sqrt{n}}, \quad (18)$$

где $\Delta S_{\bar{a}}$ определяется соотношением (17), а ΔS_n – соотношением (15). При $n \rightarrow \infty$ коэффициенты t_α переходят в коэффициенты k_α .

В табл. 1 приведены значения коэффициентов Стьюдента t_α для разных значений надежности α при разных значениях n .

Таблица 1

Значения коэффициентов Стьюдента					
n/α	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
2	6,31	12,71	31,82	63,66	636,62
3	2,92	4,30	6,96	9,92	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,36	3,00	3,50	5,40
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78

Задавая вероятность того, что истинное значение измеряемой величины a попадает в данный доверительный интервал, т. е. другими словами, задавая надежность α , равную определенной величине (например, $\alpha = 0,95$), по числу проведенных измерений n (например, $n = 7$) определяем по табл. 7 значение коэффициента Стьюдента t_α для этих данных. Оно равно $t_\alpha = 2,45$. Тогда, определив предварительно $\Delta S_{\bar{a}}$ (используя формулу (17)), найдем погрешность Δa : $\Delta a = t_\alpha \Delta S_{\bar{a}}$.

После этого результат измерений можно записать в виде:

$$- \Delta a \leq a \leq + \Delta a \text{ или } a = \bar{a} \pm \Delta a.$$

Что означает, что истинное значение величины a попадает и доверительный интервал $(\bar{a} - \Delta a, \bar{a} + \Delta a)$ с надежностью, равной α .

Рассмотрим применение табл. 1 на конкретном примере.

Пусть, проведя пять измерений толщины пластинки микрометром, мы получили $\bar{x} = 2,16$ мм и $\Delta S_n = 0,05$ мм.

$$\text{Тогда } \Delta S_{\bar{a}} = \Delta S_n / \sqrt{n} = \frac{0,05}{2,24} = 2,2 \times 10^{-2} \text{ мм.}$$

Задавая $\alpha = 0,95$, мы получаем из табл. 1 значение t_α при $n = 5$ и $\alpha = 0,95$, равное 2,78. Тогда $\Delta x = t_\alpha \cdot \Delta S_{\bar{a}} = 2,78 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ мм} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$
и $(2,16 - 0,06) \text{ мм} < x < (2,16 + 0,06) \text{ мм}$
или $2,10 \text{ мм} < x < 2,22 \text{ мм}$ при $\alpha = 0,95$.

Следует отметить, что величина абсолютной погрешности Δa результата измерений сама по себе еще не определяет точности измерений.

Пусть, например, измеряя длину карандаша рулеткой, разделенной на сантиметры, мы получили, что эта длина равна $l = (18,0 \pm 0,5)$ см ($\pm 0,5$ см составляет погрешность ленты рулетки). Если при помощи этой же рулетки мы измерим диаметр карандаша, то получим $d = (0,5 \pm 0,5)$ см. Хотя абсолютная погрешность измерений одинакова, точность измерения различна. Если в первом случае измерения достаточно точны, то во втором случае измерения позволяют судить лишь о порядке величины.

Для оценки точности измерений вводится понятие относительной погрешности ε , равной отношению абсолютной погрешности Δa результата измерений к результату измерений

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta a}{\bar{a}}. \quad (19)$$

Обычно эта погрешность выражается в процентах

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta a}{\bar{a}} 100 \%. \quad (20)$$

За меру точности измерения принимают величину, обратную ε . Следовательно, чем меньше относительная погрешность ε , тем выше точность измерений.

Для облегчения расчетов среднего значения и погрешностей $\Delta S_{\bar{n}}$ и $\Delta S_{\bar{a}}$ следует применять следующие соотношения:

$$\bar{a} \equiv a_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - a_0) \quad (21)$$

$$\text{и } \Delta S \frac{2}{\bar{a}} \equiv \frac{1}{n(n-1)} [\sum_{i=1}^n (a_i - a_0)^2 - n(\bar{a} - a_0)^2], \quad (22)$$

где a_0 – произвольное число, выбираемое таким образом, чтобы разности $a_i - a_0$ содержали в основном не более двух значащих цифр.

3. Примеры расчета случайных погрешностей прямых измерений

Рассмотрим на числовом примере применение выведенных выше формул и влияние числа измерений на точность, результата. Для этого сравним погрешности результата измерений, полученные с учетом ограниченного числа измерений, т. е. рассчитанные с помощью коэффициента Стьюдента, с результатами, рассчитанными с помощью нормального распределения, полагая, что в последнем можно применять предельное соотношение $\Delta S_n^2 = \sigma^2$.

Обработка измерений диаметра цилиндра. Проведем ее для двух значений надежности $\alpha = 0,95$ и $\alpha = 0,99$. Десять значений диаметра цилиндра приведены в табл. 2. Намерения проводились микрометром с ценой деления 0,01 мм.

Таблица 2

Значение измерений диаметра цилиндра

i	d_i , мм	i	d_i , мм
1	14,85	6	14,81
2	14,80	7	14,80
3	14,84	8	14,85
4	14,81	9	14,84
5	14,79	10	14,80

1. Возьмем пять первых измерений из табл. 2 и найдем среднее значение диаметра и границы доверительного интервала из этих измерений. Выберем произвольное число d_0 , удобное для расчетов (пусть $d_0 = 14,80$ мм); вычислим разности $(d_i - d_0)$ и квадраты этих разностей. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Пять первых измерений диаметра d_i , разность $(d_i - d_0)$, квадраты этих разностей

i	d_i , мм	$d_i - d_0$, мм	$(d_i - d_0)^2$, мм ²
1	14,85	0,05	0,0025
2	14,80	0,00	0,0000
3	14,84	0,04	0,0016
4	14,81	0,01	0,0001
5	14,79	-0,01	0,0001
Сумма		0,09	0,0043

Найдем среднее значение диаметра:

$$\bar{d} = d_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_0) = 14,80 + \frac{0,09}{5} = 14,818 \text{ мм}, \quad \bar{d} - d_0 = 0,018 \text{ мм}.$$

Средний квадрат погрешности серии из пяти измерений равен

$$\Delta S_{\bar{d}}^2 \equiv \frac{1}{n(n-1)} [\sum_{i=1}^n (d_i - d_0)^2 - n(\bar{d} - d_0)^2] = \frac{1}{5 \cdot 4} (0,0043 - 5 \cdot 0,000324) = 10^{-4} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2.$$

Извлекая квадратный корень из $\Delta S_{\bar{d}}^2$, получим $\Delta S_{\bar{d}} = 1,16 \cdot 10^{-2}$ мм.

Для надежности $\alpha = 0,95$ и $n = 5$ из табл. 1 находим значение коэффициента Стьюдента $t_\alpha = 2,78$ и вычисляем абсолютную погрешность результата измерений $\Delta d_{\bar{d}} = t_\alpha \cdot \Delta S_{\bar{d}} = 2,78 \cdot 0,0116 = 0,0322$ мм.

Тогда результат измерения можно представить в виде:

$$(14,818 - 0,032) \text{ мм} \leq d \leq (14,818 + 0,032) \text{ мм}.$$

Или, сохраняя в величине погрешности одну значащую цифру:

$$(14,82 - 0,03) \text{ мм} \leq d \leq (14,82 + 0,03) \text{ мм, т. е.}$$

$$14,79 \text{ мм} \leq d \leq 14,85 \text{ мм}.$$

(При этом мы предполагаем, что погрешность микрометра меньше 0,03 мм).

$$\text{Или } d = (14,82 \pm 0,03) \text{ мм,} \quad (\text{а})$$

Относительная погрешность

$$\varepsilon_d = \pm \frac{0,03}{14,82} \cdot 100\% \approx \pm \frac{3}{15} \% = \pm 0,2 \%.$$

Теперь найдем абсолютную и относительную погрешности для тех же пяти измерений при другом значении надежности: $\alpha = 0,99$. По табл. 1 находим для $n = 5$ и $\alpha = 0,99$ значение $t_\alpha = 4,60$.

$$\text{Тогда } \Delta d_{\bar{d}} = t_\alpha \cdot \Delta S_{\bar{d}} = 4,60 \cdot 1,16 \cdot 10^{-2} = 5,34 \cdot 10^{-2} \text{ мм}.$$

Следовательно,

$$d = (14,82 \pm 0,05) \text{ мм}$$

$$\text{и } \varepsilon_d = \pm \frac{0,05}{14,82} \cdot 100 \% \approx \pm \frac{5}{15} \% = \pm 0,3 \%. \quad (\text{б})$$

Сравнив результат (а) и (б), мы видим, что границы доверительного интервала при увеличении надежности от $\alpha = 0,95$ до $\alpha = 0,99$ возросли.

2. Найдем теперь средние значения и погрешности из следующих пяти измерений (6–10), приведенных в табл. 4.

$$d_0 = 14,80 \text{ мм,}$$

$$\bar{d} = d_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_0) = 14,80 + \frac{0,10}{5} = 14,82 \text{ мм, } \bar{d} - d_0 = 0,02 \text{ мм,}$$

$$\Delta S_{\bar{d}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} [\sum_{i=1}^n (d_i - d_0)^2 - n(\bar{d} - d_0)^2] = \frac{1}{20} (0,0042 - 5 \cdot 0,0004) = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2,$$

$$\Delta S_{\bar{d}} = 1,05 \times 10^{-2} \text{ мм}.$$

Таблица 4

i	d_i , мм	$d_i - d_0$, мм	$(d_i - d_0)^2$, мм
6	14,81	+0,01	0,0001
7	14,80	0	0
8	14,85	+0,05	0,0025
9	14,84	+0,04	0,0016
10	14,80	0	0
Сумма		+0,10	+0,0042

При $\alpha = 0,95$ имеем

$$\Delta d_{\bar{d}} = t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{d}} = \pm 2,78 \cdot 1,05 \cdot 10^{-2} = 2,92 \times 10^{-2} \text{ мм} \simeq \pm 3 \cdot 10^{-2} \text{ мм},$$

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d_{\bar{d}}}{\bar{d}} \cdot 100 \% = \pm \frac{0,03}{14,82} \cdot 100 \% = \pm 0,2 \% \text{ и } d = (14,82 \pm 0,03) \text{ мм}.$$

При $\alpha = 0,99$ получаем

$$\Delta d_{\bar{d}} = t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{d}} = \pm 4,60 \cdot 1,05 \cdot 10^{-2} = \pm 4,83 \cdot 10^{-2} \text{ мм} \simeq \pm 5 \cdot 10^{-2} \text{ мм},$$

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d_{\bar{d}}}{\bar{d}} \cdot 100 \% = \pm \frac{0,05}{14,82} \cdot 100 \% = \pm 0,3 \% \text{ и } d = (14,82 \pm 0,05) \text{ мм}.$$

Результаты практически не отличаются от результатов, полученных из данных табл. 1.

Найдем теперь погрешность результата всей серии из десяти измерений, приведенных в табл. 2, 3 и 4. В этом случае имеем табл. 5, полученную суммированием последних строчек табл. 2 и 3.

Таблица 5

Сумма
$d_i - d_0$, мм
+0,19
$(d_i - d_0)^2$, мм
0,0085

$$d_0 = 14,80 \text{ мм},$$

$$\bar{d} = d_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_0) = 14,80 + \frac{1}{10} \cdot 0,19 = 14,819 \text{ мм},$$

$$\bar{d} - d_0 = 0,019 \text{ мм}, \Delta S_{\bar{d}}^2 = \frac{1}{n(n-1)} \left[\sum_{i=1}^n (d_i - d_0)^2 - n(\bar{d} - d_0)^2 \right] = \frac{1}{90} (0,0085 -$$

$$10 \cdot 0,000361) = \frac{49}{90} \cdot 10^{-4} = 54 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2,$$

$$\Delta S_{\bar{d}} = 7,35 \cdot 10^{-3} \text{ мм}.$$

При $\alpha = 0,95$ имеем

$$\Delta d_{\bar{d}} = t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{d}} = \pm 2,26 \cdot 7,35 \cdot 10^{-3} = \pm 1,66 \cdot 10^{-2} \text{ мм} = \pm 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ мм},$$

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d_{\bar{d}}}{\bar{d}} \cdot 100 \% = \pm \frac{1,7 \cdot 10^{-2}}{14,82} \cdot 100 \% = \pm 0,11 \% ,$$

$$d = (14,819 \pm 0,017) \text{ мм.}$$

При $\alpha = 0,99$ получаем

$$\Delta d_{\bar{d}} = t_{\alpha} \cdot \Delta S_{\bar{d}} = \pm 3,25 \cdot 7,35 \cdot 10^{-3} = \pm 2,39 \cdot 10^{-2} \text{ мм} = \pm 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ мм},$$

$$\varepsilon_d = \pm \frac{2,4 \cdot 10^{-2}}{14,82} \cdot 100 \% = \pm 0,16 \%,$$

$$d = (14,819 \pm 0,024) \text{ мм.}$$

Мы видим, что абсолютная и относительная погрешности результата десяти измерений стали почти в два раза меньше погрешностей пяти измерений.

Лекция 5. Строение вещества: основные понятия и законы

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Понятие вещества, химического элемента, молекулы, атома.
2. Строение атома. Периодический закон Д. И. Менделеева.
3. Основные постулаты Н. Бора.
4. Строение молекул. Теория химического строения А. М. Бутлерова.
5. Теоретические основы строения вещества.
6. Состав и структура исследуемых веществ.

На определение структуры и состава объектов направлены современные методы экспертных исследований.

Понять принципы, на которых строится исследование с помощью данных методов, нельзя без знания основных положений теории строения вещества.

1. Понятие вещества, химического элемента, молекулы, атома

Вещество – это отдельный вид материи, обладающий при определенных условиях постоянными физическими свойствами.

Химический элемент – это вид атомов, характеризующийся определенной совокупностью свойств. Химический элемент не может разделиться (расщепиться) на простейшие вещества в процессе химических реакций.

Разница элемента и простого вещества заключается в том, что элемент в соединении не обладает свойствами, присущими веществу. Например, железо как металл Fe и железо в соединении FeS; фосфор белый и красный – разные вещества из одного элемента.

М. В. Ломоносов впервые указал на различие между атомами и молекулами, рассматривая молекулы как мельчайшие частицы вещества, обладающие теми же свойствами, что и вещество в целом.

В конце XVIII и начале XIX в. учеными были определены относительные весовые количества, в которых соединяются между собой различные элементы; в результате было установлено понятие химического эквивалента и определены относительные веса атомов различных элементов (Джон Дальтон). Это позволило характеризовать состав веществ их атомным составом и химическими формулами.

Однако теория существования молекул, несмотря на работы Амедео Авогадро и Андре Мари Ампера, получила признание только

в 1860 г., когда на Международном съезде химиков было принято решение различать понятия атома и молекулы.

Атом – наименьшая частица элемента, обладающая его химическими свойствами.

Молекула – наименьшая частица вещества, способная к самостоятельному существованию, обладающая его химическими свойствами и состоящая из одинаковых (в простом веществе) или разных (в химическом соединении) атомов, объединенных в одно целое химическими связями.

2. Строение атома. Периодический закон Д. И. Менделеева.

Представление об атомах как о мельчайших неделимых частицах, из которых состоят все вещества, впервые возникло еще в V в. до нашей эры в трудах древнегреческих философов Демокрита и других, но было чисто умозрительным, не основанным на опытных данных. Только в XVII в. учение об атомах уже как научная гипотеза разрабатывалось Рене Декартом, Исааком Ньютоном и другими учеными. Михаил Васильевич Ломоносов показал, что атом обладает определенными для данного элемента химическими свойствами.

В результате открытия законов электролиза было установлено, что атомы в действительности не являются неделимыми частицами, что они содержат в себе *электроны* – элементарные частицы, обладающие наименьшим отрицательным электрическим зарядом.

В начале XX в. было открыто явление радиоактивности: способности некоторых атомов испускать более простые частицы, а также способности атомов некоторых элементов самопроизвольно превращаться в атомы других элементов. Это заставило признать, что представление об атоме как о неделимой частице было ошибочным.

На основании обобщения ряда экспериментальных данных в 1911 году Эрнестом Резерфордом была предложена ядерная модель атома, в которой атом состоит из положительно заряженного ядра и вращающихся вокруг него по тем или иным орбитам электронов.

Подробный анализ проведенных Резерфордом опытов позволил сделать следующие выводы:

1) весь положительный заряд и почти вся масса атома сосредоточены в ядре, находящемся в центре атома;

2) размеры ядра имеют порядок 10^{-14} м, т. е. примерно в 10 000 раз меньше размеров самого атома;

3) вокруг массивного ядра по замкнутым орбитам движутся легкие электроны, общий отрицательный заряд которых равен положительному заряду ядра атома.

Созданная Резерфордом модель строения атома, получившая название ядерной, напоминала строение солнечной системы, где вокруг массивного Солнца на больших расстояниях от него движутся сравнительно легкие планеты. Такую модель строения атома иногда называют еще планетарной.

Электронная конфигурация атома натрия приведена на рис. 1.

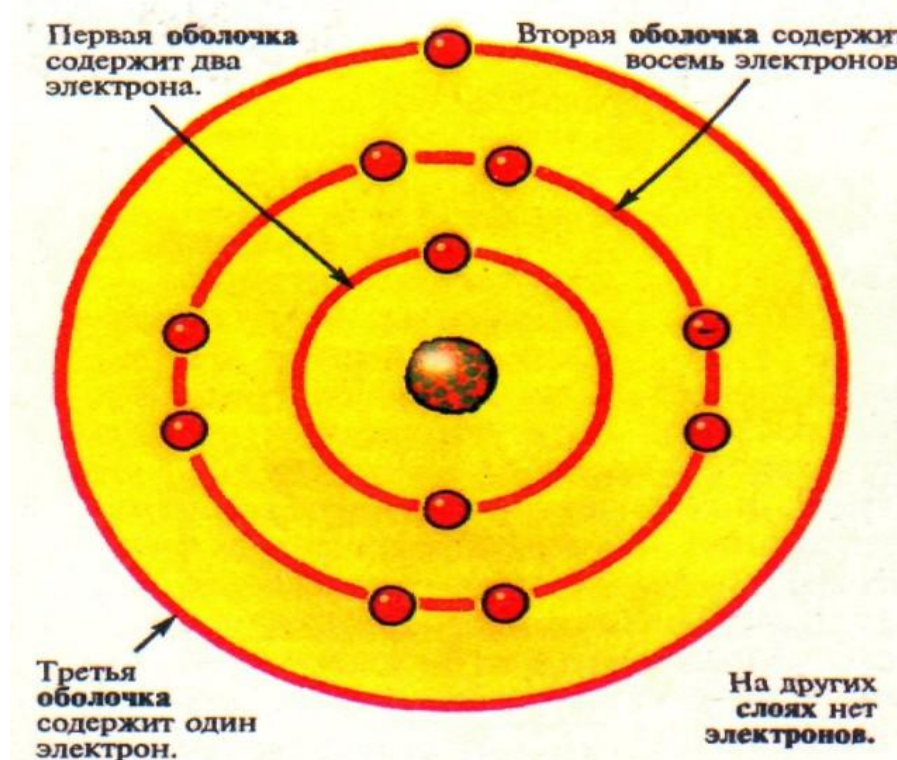


Рис. 1. Электронная конфигурация атома натрия.

Ядро атома всегда содержит целое число положительных элементарных зарядов e , т. е. заряд любого ядра выражается формулой:

$$q = Z \times e, \quad (1)$$

где q – заряд любого ядра, Z – число электронов.

Так как в нормальном состоянии атом нейтрален, то общий заряд всех электронов в атоме тоже выражается соотношением (1).

Поскольку абсолютная величина заряда электрона равна e , вокруг ядра атома должно вращаться Z электронов, если атом находится в нормальном состоянии.

В дальнейшем было установлено, что масса атома в условных единицах примерно вдвое превышает номер химического элемента в таблице Менделеева (см. рис. 2), а заряд ядра Z (если за единицу принять наименьший в природе заряд e) точно равен порядковому номеру элемента в таблице Менделеева.

Химическая таблица Д.И. Менделеева																	
1																	2
1	H водород 1,00794																2
2	Li литий 6,941	Be бериллий 9,012182	3	4	B бор 10,811	5	C углерод 12,011	6	N азот 14,00674	7	O кислород 15,9994	8	F фтор 18,9984032	9	Ne неон 20,1797		
3	Na натрий 22,989768	Mg магний 24,3050	11	12	Al алюминий 26,981539	13	Si кремний 28,0855	14	P фосфор 30,973762	15	S сера 32,066	16	Cl хлор 35,4527	17	Ar аргон 39,948		
4	K калий 39,0983	Ca кальций 40,078	19	20	Sc скандий 44,955910	21	Ti титан 47,88	22	V ванадий 50,9415	23	Cr хром 51,9961	24	Mn марганец 54,93805	25	Fe железо 55,847	26	Co кобальт 58,93320
	Cu медь 63,546	Zn цинк 65,39	29	30	Ga галлий 69,723	31	Ge германий 72,61	32	As мышьяк 74,92159	33	Se селен 78,96	34	Br бром 79,904	35	Kr криптон 83,80	36	Ni никель 58,69
5	Rb рубидий 85,4678	Sr стронций 87,62	37	38	Y иттрий 88,90585	39	Zr цирконий 91,224	40	Nb ниобий 92,90638	41	Mo молибден 95,94	42	Tc технеций 97,9072	43	Ru рутений 101,07	44	Rh родий 102,90550
	Ag серебро 107,8682	Cd кадмий 112,411	47	48	In индий 114,82	49	Sn олово 118,710	50	Sb сурьма 121,75	51	Te теллур 127,60	52	I йод 126,90447	53	Xe ксенон 131,29	54	Pd палладий 106,42
6	Cs цезий 132,90543	Ba барий 137,327	55	56	La лантан 138,90549	57	Hf гафний 178,49	72	Ta тантал 180,9479	73	W вольфрам 183,85	74	Re рений 186,207	75	Os осмий 190,2	76	Ir иридий 192,22
	Au золото 196,96654	Hg ртуть 200,59	79	80	Tl таллий 204,3833	81	Pb свинец 207,2	82	Bi висмут 208,98037	83	Po полоний 209	84	At астат 209	85	Rn радон 222	86	Pt платина 195,08
7	Fr франций 223	Ra радий 226	87	88	Ac актиний 227	89	(Ku) (куратовий) 261	104	(Ns) (нильсборий) 261	105	(106) 262	(107) 262	(108) 262	(109) 262	(110) 262	(111) 262	(112) 262
* лантаноиды																	
* актиноиды																	
* транзитные металлы																	

Рис. 2. Периодическая таблица Менделеева

Измерения масс атомов показали, что наименьшей массой обладает ядро атома водорода. Его масса оказалась в 1836 раз больше, чем масса электрона, а заряд по абсолютной величине оказался равным заряду электрона, т. е. $+e$, или $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл. Ядро атома водорода получило название протон. Следовательно, *порядковый номер элемента Z в таблице Менделеева показывает, во сколько раз заряд ядра атома этого элемента больше, чем заряд протона, или сколько протонов содержится в ядрах атомов этого элемента.*

Периодический закон был открыт Дмитрием Ивановичем Менделеевым в 1869 г., когда атом еще считался неделимой частицей.

Он гласит: «Свойства простых тел, а также формы и свойства соединений элементов находятся в периодической зависимости от величины атомных весов элементов».

Таким образом, изменение свойств химических элементов по мере возрастания их атомного веса не совершается непрерывно в одном и том же направлении, а имеет периодический характер.

Через определенное число элементов происходит как бы возврат к исходным свойствам, после чего вновь повторяются свойства предыдущих элементов в той же последовательности, но с некоторыми качественными и количественными различиями.

В составленной периодической таблице элементов в трех случаях Д. И. Менделеев отступил от принципа расположения элементов по возрастанию атомных весов: аргон (атомный вес 39,948) впереди калия (39,098); кобальт (58,9332) впереди никеля (58,71); теллур (127,60) впереди йода (126,9045).

В результате развития учения о строении атомов было показано, что *порядковый номер в периодической системе равен заряду ядра атомов этого элемента*. Исходя из теории, установленное Д. И. Менделеевым размещение элементов является абсолютно правильным.

Д. И. Менделеев, открыв периодический закон химических элементов, предвосхитил открытие закономерности в строении атомов.

Зная эту закономерность, можно определить число электронов и число протонов, входящих в состав атома любого химического элемента.

Гелий имеет порядковый номер в таблице Менделеева, равный 2, следовательно, ядро гелия обладает двумя положительными зарядами, а в оболочке содержится два электрона.

Согласно современным воззрениям, каждый электрон в атоме в каждый данный момент находится на определенной орбите и на этой орбите может находиться только один электрон.

Все электроны в атоме распределены по слоям, радиусы орбит которых возрастают пропорционально квадратам натурального ряда чисел 12, 22, 32, 42.

Средние радиусы орбит одних и тех же электронных слоев у атомов разных элементов разные; они тем меньше, чем больше порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

Максимальное число слоев шесть, имеющих такие обозначения: *K, L, M, N, O, P*.

Наиболее близкий к ядру слой K (упрощенные схемы строения атомов показаны на рис. 3). В этом слое у всякого атома, кроме водорода, могут быть только 2 электрона.

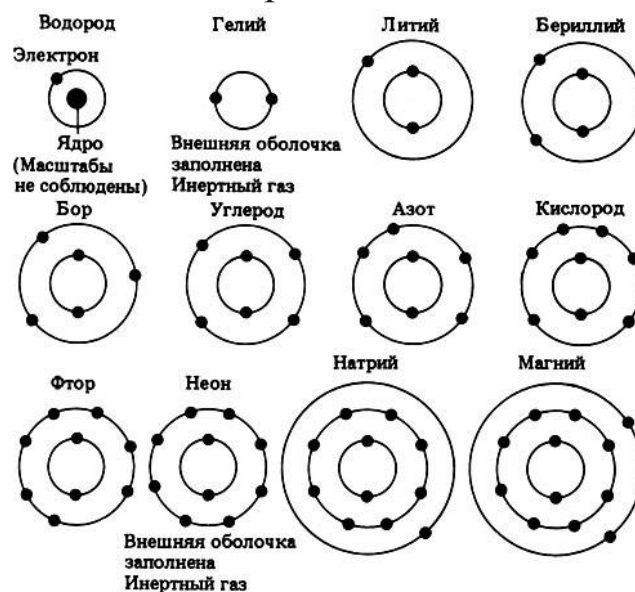


Рис. 3. Упрощенные схемы строения атомов

Атом гелия имеет всего лишь два электрона, которые расположены в слое K .

Следующий элемент – *литий* (с порядковым номером 3) имеет в электронной оболочке три электрона. Два электрона расположены в слое K и один электрон – в слое L .

Бериллий (с порядковым номером 4) имеет два электрона в слое K и два электрона в слое L и т. д. до неона, имеющего 10 электронов, из которых два электрона в слое K , а восемь электронов в слое L .

Если во внешнем слое 8 электронов, то такой слой устойчивый, поэтому химические элементы, имеющие 8 электронов во внешнем слое, оказываются инертными.

Электрон – наименьшая отрицательно заряженная частица,

Протон – положительно заряженная элементарная частица, образующаяся при отрыве электрона от атома водорода.

Изотопы – атомы одного элемента, обладающие одинаковым зарядом, но различной массой.

Нейтрон – незаряженная частица, по массе почти одинаковая с протоном.

Протоны и нейтроны обозначают общим термином – *нуклоны*.

Изотопы содержат одинаковое количество протонов, но различаются по содержанию нейтронов.

3. Основные постулаты Н. Бора

Развитая Э. Резерфордом ядерная модель атома была значительным шагом в познании строения атома. Однако она не могла объяснить устойчивости атома.

Ядерная модель атома оказалась неожиданной для физиков по следующим причинам.

При ускоренном движении электрических зарядов должно возникать электромагнитное излучение. Действительно, при колебании зарядов в контуре, состоящем из индуктивности и емкости, создаются электромагнитные волны, а при торможении быстро летящих электронов возникают рентгеновские лучи. Электроны движутся вокруг ядра с центростремительным ускорением под действием силы притяжения к ядру, а это означает, что их движение должно сопровождаться электромагнитным излучением, уносящим энергию электронов. Итак, с каждым оборотом электрон должен приближаться к ядру и, в конце концов, упасть на ядро, т. е. с точки зрения классической физики ядерная модель атома неустойчива, а между тем в действительности атом очень устойчив.

Второе противоречие между ядерной моделью атома и законами классической физики относится к спектру излучения атома. По классическим законам электрон, приближаясь к ядру, должен двигаться все быстрее, создавая все более короткие электромагнитные волны, поэтому спектр излучения атома должен бы быть сплошным. Однако, все проведенные эксперименты показывают, что спектр излучения атома линейчатый.

Ученые столкнулись с дилеммой: либо считать, что предложенная Резерфордом ядерная модель атома не соответствует действительности, либо считать, что законы классической физики имеют ограниченное значение и не могут применяться к движению таких маленьких частиц материи, как электрон.

Заменить ядерную модель атома другой моделью, которая соответствовала бы опытам Резерфорда и не противоречила классической физике, не удалось. Наоборот, новые опыты подтвердили правильность ядерной модели атома. Поэтому ученым пришлось остановиться на втором предположении, т. е. признать ограниченность применения законов классической физики к атомам.

Первым решился на это один из самых выдающихся физиков XX в. датский ученый Н. Бор.

Макс Планк в 1900 г. показал, что лучистая энергия испускается и поглощается телами не непрерывно, а дискретно, т. е. есть отдельными порциями – квантами.

На основании этой теории Нильс Бор сформулировал основные постулаты, объясняющие строение электронной оболочки атомов:

1. Электрон может вращаться вокруг ядра не по любым, а только по некоторым определенным круговым (стационарным) орбитам.

2. Двигаясь по стационарной орбите, электрон не излучает электромагнитной энергии.

3. Излучение происходит при скачкообразном переходе с одной стационарной орбиты на другую. При этом излучается (при переходе на нижнюю орбиту) или поглощается (при переходе на более удаленную орбиту) квант электромагнитного излучения, энергия которого равна разности энергий атома в исходном и конечном состояниях.

Электроны внешнего слоя, которые атом может отдавать или присоединять, называются валентными.

Число валентных электронов соответствует номеру группы данного элемента в таблице Менделеева (вертикальные колонки в таблице). Элементы одной группы имеют одно и то же число электронов.

Валентность – понятие очень сложное. Наиболее общим можно считать следующее определение.

Валентность элементов – это способность их атомов соединяться с другими атомами в определенных соотношениях.

4. Строение молекул. Теория химического строения А. М. Бутлерова

Состав и строение данного вещества не зависят от способа его получения.

Качественный и количественный состав молекулы определяется химической формулой вещества, а порядок связей атомов в молекуле выражается структурной формулой молекулы.

Когда вещества реагируют между собой, их атомы могут получать электроны, терять их или приобретать в общее пользование, при этом атомы проявляют тенденцию к образованию устойчивой конфигурации внешней электронной оболочки.

При образовании химического соединения атомы связываются друг с другом, их удерживает вместе *химическая связь*.

Химическая связь бывает: ионная, ковалентная, металлическая, межмолекулярная. Атомы соединяются в молекулы, образуя химические связи, которые создаются в большинстве случаев путем той или иной перегруппировки электронов, содержащихся во взаимодействующих атомах.

Важнейшими формами таких перегруппировок являются:

1) передача электронов от одного атома к другому (ионная связь);

2) смещение электронов в направлении к одному из атомов, причем большей частью при этом образуются электронные пары, общие для взаимодействующих атомов и связывающие их между собой (ковалентная связь).

Ионы – это заряженные частицы, в которые превращаются атомы в результате потери или присоединения одного или более электронов, при этом образуются стабильные внешние электронные оболочки. Ионы бывают катионами и анионами.

Катион – положительно заряженный ион, образующийся, когда атом отдает электроны в ходе реакции (он теперь имеет больше протонов, чем электронов).

Водород и металлы имеют тенденцию к образованию катионов.

Их атомы имеют один, два или три электрона на внешней электронной оболочке, и им легче отдать электроны (чтобы образовать стабильную электронную оболочку), чем присоединить их.

У атома магния два электрона на внешней оболочке. Он отдает их с образованием иона (катиона) с зарядом $+2$.

Анион – отрицательно заряженный ион, образующийся, когда атом получает электроны в ходе реакции (он имеет теперь больше электронов, чем протонов).

К образованию анионов имеют тенденцию неметаллы. Их атомы имеют пять, шесть или семь электронов на внешней электронной оболочке, и им легче приобрести электроны (чтобы образовать стабильный слой), чем отдать их.

Атом фтора имеет семь электронов на внешней электронной оболочке, поэтому он приобретает один электрон, при этом образует-

ся ион (анион) с зарядом -1 . Некоторые анионы образуются группой атомов, получившей электроны, например кислотные остатки.

Ионизация хлористого водорода в воде, образуются ионы водорода и ионы хлора.

Ионная связь

Если два элемента реагируют между собой с образованием ионов, возникающие противоположно заряженные катион и анион притягиваются друг к другу. Они остаются вместе благодаря этому притяжению.

Химическая связь, возникающая между ионами в результате действия электростатических сил притяжения, называется *ионной связью* (см. рис. 4).

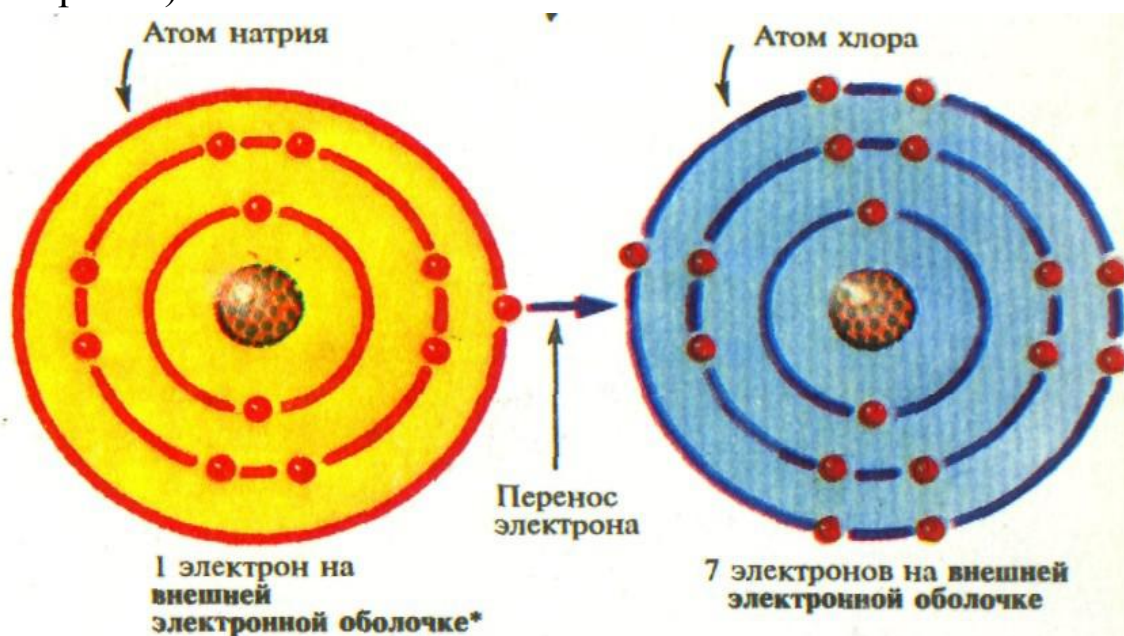


Рис. 4. Схема образования ионной связи в молекуле NaCl

Этот тип связи образуется при взаимодействии атомов элементов, далеко отстоящих друг от друга в периодической таблице, например, натрий и хлор (хлорид натрия), магний и кислород (окись магния), атомы которых удерживаются ионной связью.

В них нет молекул, катионы и анионы, притягиваясь, образуют большую ионную решетку (рис. 5).

У ионных соединений высокие температуры плавления и кипения (связь прочная и, следовательно, большая энергия требуется, чтобы разрушить ее).

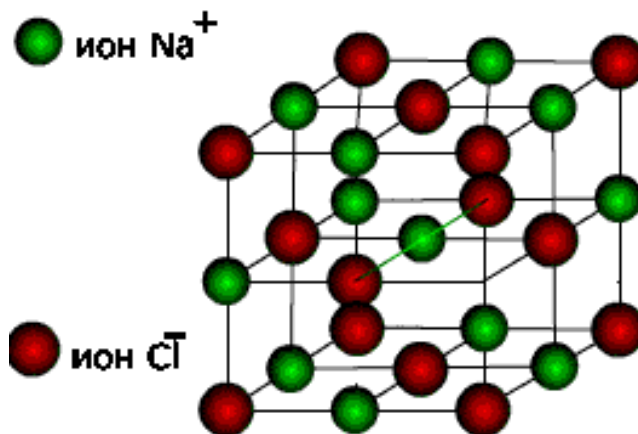


Рис. 5. Кристаллическая структура NaCl

В расплавленном состоянии или в водных растворах они проводят электричество, так как содержат заряженные частицы (ионы), которые способны двигаться.

Ковалентная связь

Ковалентная связь возникает, когда два атома совместно владеют электронами, при этом каждый атом приобретает стабильную конфигурацию внешней электронной оболочки (см. рис. 5).

Электроны, объединенные в такие пары, называются электронными парами (одна пара образует ковалентную связь).

Ковалентная связь образуется путем передачи каждым из взаимодействующих атомов одного (или большего числа) электрона на образование электронной пары (или пар), общей для обоих атомов, которой и осуществляется связь между ними.

Если эта пара принадлежит атомам в одинаковой степени, то образуется *неполярная ковалентная связь* (рис. 6), если смещена к одному из атомов – *полярная ковалентная связь*.

Ковалентная связь характерна для органических соединений.

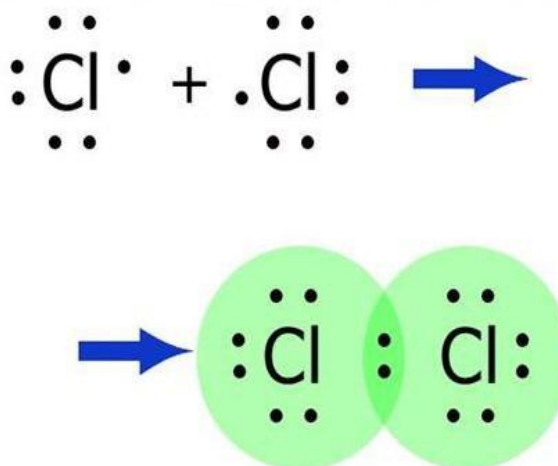


Рис. 6. Схема образования ковалентной связи в молекуле хлора

Ковалентная связь между атомами достаточно прочная. Температуры плавления и кипения этих соединений низкие, так как притяжение между молекулами мало и, следовательно, небольшая энергия требуется, чтобы его преодолеть. Они не проводят электричество, так как в них нет заряженных частиц (ионов).

В 1861 г. Александр Михайлович Бутлеров создал *теорию химического строения органических соединений*, заключающуюся в следующем:

- атомы в молекулах соединены друг с другом в определенной последовательности. Изменение этой последовательности приводит к образованию новых соединений;

- соединение атомов происходит в соответствии с их валентностью;

- свойства веществ зависят не только от их состава, но и от их «химического строения», т. е. от порядка соединения атомов в молекулах и характера их взаимного влияния.

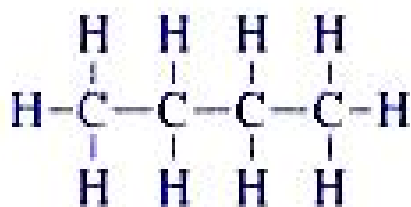
Наиболее сильно влияют друг на друга атомы, непосредственно связанные между собой.

Теория строения химических соединений, предложенная

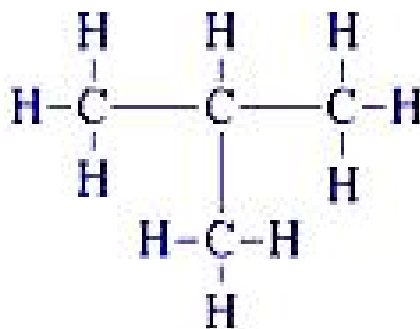
А. М. Бутлеровым, лежит в основе современных воззрений на строение молекул как мельчайших частиц вещества, обладающих его свойствами.

Вещества, имеющие одинаковый качественный и количественный состав, но различное строение и, следовательно, разные свойства – это изомеры (рис. 7).

Изомеры состава C_4H_{10}



n-Бутан
(т. кип. -0.5°C)



Изобутан
(т. кип. -11.4°C)

Рис. 7. Изомеры

5. Теоретические основы строения вещества

Объектами экспертных исследований обычно являются материальные носители информации об исследуемом событии. Ими часто являются вещества разной природы, в разном агрегатном состоянии, в разном количестве.

Вещества бывают *простые* (состоящие из одного элемента – водород, хлор, медь, алюминий и др.) и *сложные* (состоящие из нескольких элементов – вода, щелочи, кислоты и др.).

Вещества разделяют по разным признакам: *по агрегатному состоянию, по природе и составу.*

1. По *агрегатному состоянию* вещества делятся на твердые, жидкие и газообразные.

Существует и четвертое особое состояние вещества – плазма.

Плазма – это ионизированный газ, в котором объемные плотности положительных и отрицательных электрических зарядов, образующих плазму заряженных частиц, практически одинаковы, а концентрация этих частиц сравнительно велика.

Плазма образуется при электрических разрядах в газах, при нагреве газа до температуры, достаточно высокой для протекания термической ионизации. От обычного газа плазма отличается рядом качественных особенностей. Например, активным взаимодействием с внешними электрическими и магнитными полями.

Плазма – наиболее распространенное состояние вещества в космосе: Солнце, горячие звезды и некоторые межзвездные облака состоят из плазмы.

Твердые вещества – это вещества, имеющие устойчивую внешнюю кристаллическую и (или) аморфную формы.

Кристаллическая форма характеризуется точной четкой *температурой перехода вещества в жидкое состояние (температурой плавления)* и *определенной* геометрической формой кристаллов.

Кристаллы обладают анизотропией. *Анизотропия* – неодинаковое распространение свойств по различным направлениям (например, теплопроводность).

В кристаллическом состоянии осуществляется дальний порядок строения. *Дальним порядком* называется такое расположение частиц, при котором в произвольном направлении, проведенном через центр

любой частицы, на равных расстояниях друг от друга расположены центры других частиц; для разных направлений эти расстояния различны. Таким образом, зная положение одной какой-либо частицы в кристалле, скажем 1-й, и ее расстояние a до соседней, можно точно указать положение любой частицы (3-й, 10-й, 100-й), лежащей с ними на одной прямой: это будут соответственно расстояния $2a$, $9a$, $99a$ (рис. 8).

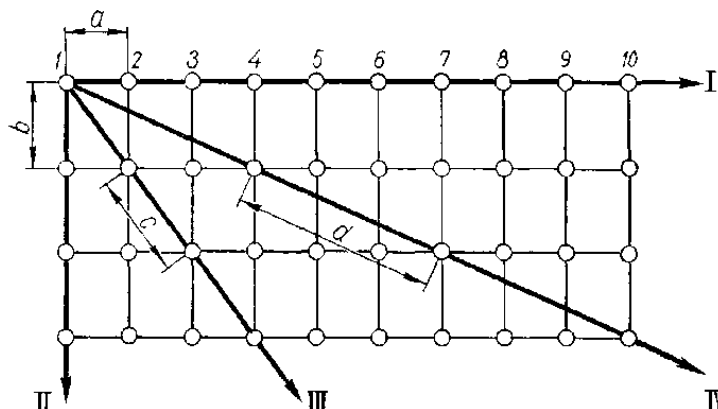


Рис. 8. Дальний порядок расположения частиц

Дальний порядок в расположении частиц и является причиной правильной, симметричной формы кристаллов.

Частицы, образующие кристалл (ионы – разноименно заряженные, например в NaCl , одноименно заряженные – в металлах; нейтральные атомы одного и того же элемента – алмаз; молекулы – кристаллы льда или бензола), располагаются в нем в разной, типичной для данного вещества, закономерности.

Некоторые природные кристаллы показаны на рис. 9.



Рис. 9. Природные кристаллы

В кристаллах помимо ионных и ковалентных существуют металлическая и межмолекулярная связи.

Форма и размер кристаллов очень разнообразны.

Одним из важных и характерных свойств кристаллов является симметрия (плоскости и оси симметрии).

Они зависят от взаимного расположения частиц (атомов, молекул или ионов) в кристалле.

Взаиморасположение в пространстве частиц и способ их соединения называется кристаллической решеткой.

Форма конкретного кристалла зависит от его кристаллической решетки и от того, как эта решетка может быть разрушена вдоль плоскости спайности.

Основные формы кристаллов приведены ниже на рис. 10.

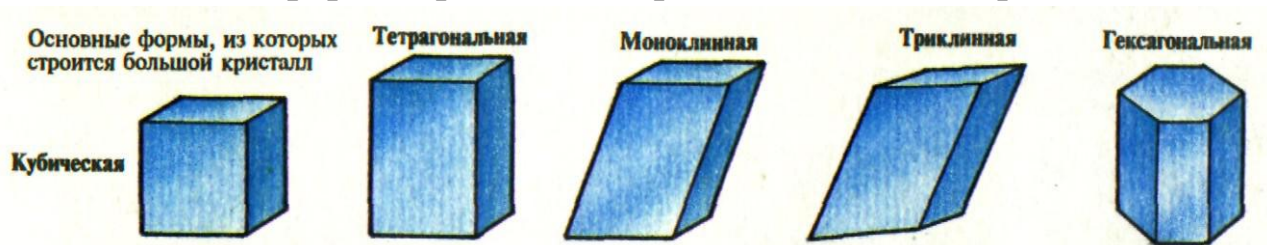
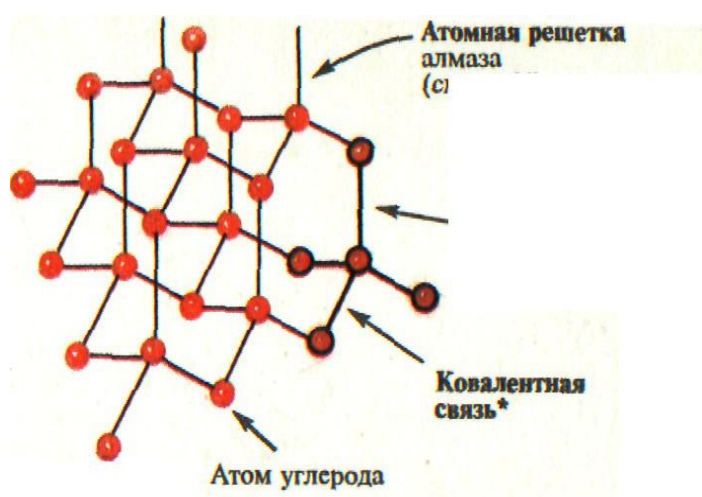


Рис. 10. Различные формы кристаллов

Кристаллическая решетка бывает: атомная, ионная, молекулярная, металлическая (рис. 11–14).



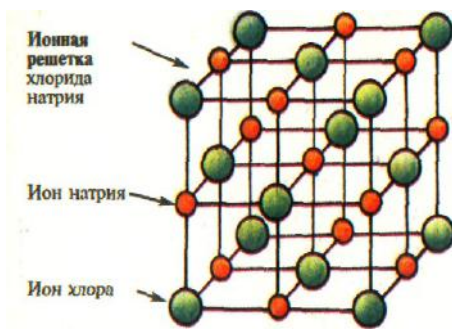
Атомная кристаллическая решетка - кристаллическая решетка, состоящая из атомов, удерживаемых ковалентной связью, например в алмазе.

Вещества с атомными кристаллическими решетками чрезвычайно прочны и имеют очень высокие температуры плавления и кипения.

Рис. 11. Атомная кристаллическая решетка

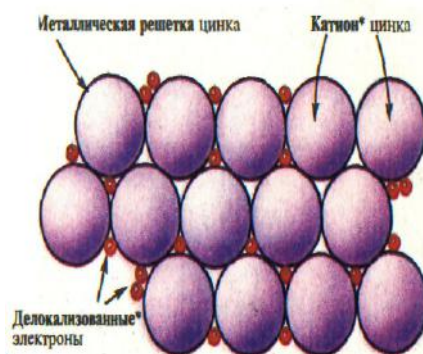
Для кристаллов типичных металлов характерна металлическая связь.

В отличие от ковалентной связи, такая связь не обладает ни направленностью, ни насыщенностью.



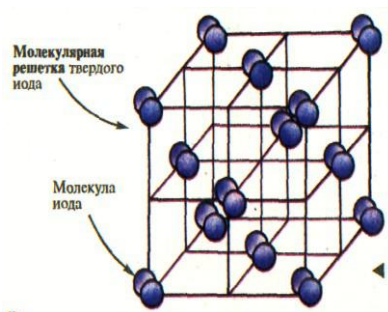
- **Ионная решетка - кристаллическая решетка**, состоящая из ионов, удерживаемых **ионной связью**, например в хлориде натрия.
- Ионные связи прочные, что означает, что вещество имеет высокие температуры плавления и кипения.

Рис. 12. Ионная кристаллическая решетка



- **Металлическая решетка - кристаллическая решетка**, состоящая из атомов металла, удерживаемых **металлической связью**, например в цинке.
- Делокализованные электроны свободно движутся, делая металл хорошим проводником тепла и электричества.
- Слои атомов могут скользить один вдоль другого, придавая металлам свойства **ковкости и пластичности**.

Рис. 13. Металлическая кристаллическая решетка



Молекулярная решетка - кристаллическая решетка, состоящая из молекул, связанных слабыми межмолекулярными силами, например в иоде.

Именно межмолекулярные силы преодолеваются, когда кристалл разрушается.

Ковалентные связи в молекуле при этом сохраняются, поэтому такие кристаллы имеют более низкие температуры плавления и кипения по сравнению с **ионными** соединениями.

Рис. 14. Молекулярная кристаллическая решетка

В кристаллах с частицами одинакового размера, например, для металлических решеток, возможно, самое разнообразное расположение частиц. Наиболее простые формы показаны на рис. 15.



Рис. 15. Различные формы металлических решеток

Металлическая связь – это своеобразная связь между двумя частями в металлах. Решетка металла состоит из положительно заряженных ионов металла с валентными электронами, свободно движущимися между ними (их называют электронным газом) (см. рис. 16).

Свободные или делокализованные электроны образуют связи между атомами металлов, и благодаря их движению металл проводит тепло и электричество. Сила взаимодействия между электронами и ионами очень велика. Из-за этого у металлов высокие температуры плавления и кипения, так как для разрыва металлической связи требуется большая энергия.

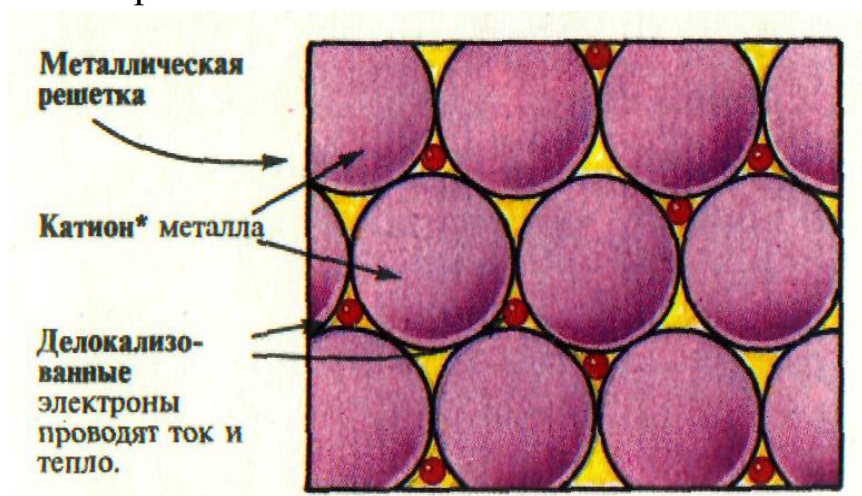


Рис. 16. Металлическая связь

Твердые вещества, кроме кристаллической формы, могут иметь аморфную форму.

Аморфная форма вещества – это состояние твердого вещества, в котором, в отличие от кристаллического состояния, молекулы расположены беспорядочно, и вещество изотропно, т. е. имеет одинаковые физические свойства по всем направлениям, кроме того, отсутствует четко выраженная температура плавления (не точка плавления, а некоторый интервал температур).

В аморфных телах, как и в жидкостях, нет дальнего порядка в расположении частиц. В них осуществляется лишь ближний порядок. При ближнем порядке центры частиц несколько смещены относительно тех положений, которые они занимают в условиях дальнего порядка, однако в среднем расстояние между центрами любых двух соседних частиц в каком-либо направлении остается постоянным и близким по величине к соответствующему расстоянию при дальнем порядке (рис. 17). Таким образом, в случае ближнего порядка, зная

положение, скажем, 1-й части, можно указать лишь положения частиц, близких к 1-й; 2-я – будет находиться на расстоянии, приблизительно равном a , 3-я – на расстоянии, еще близком к $2a$, а вот положение 10-й или 100-й уже вообще указать невозможно даже приблизительно.

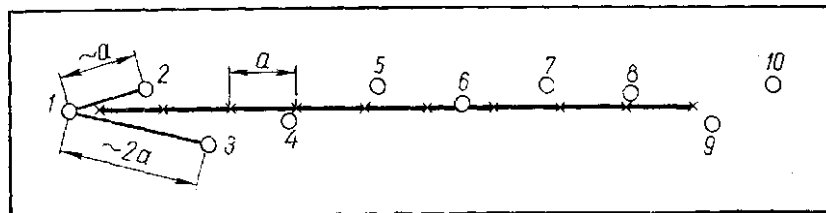


Рис. 17. К понятию ближнего порядка (крестиками обозначены положения центров частиц при дальнем порядке)

Различие в строении кристалла и аморфного тела удобно объяснить с помощью рис. 18.

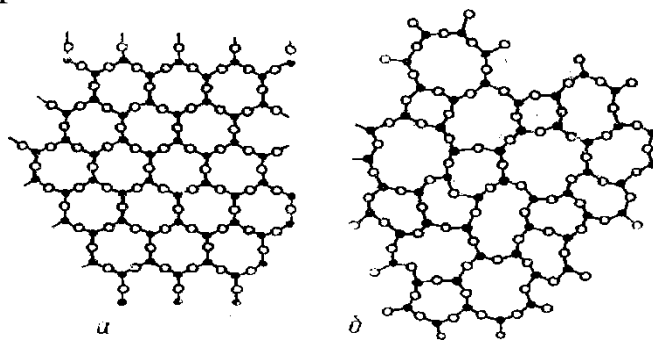


Рис. 18. Структура кварца: а – кристаллического; б – аморфного

В кристаллическом и в аморфном состоянии кварца число ближайших соседей и характер их расположения одинаковы: каждый атом кремния окружен тремя симметрично расположенными атомами углерода. Но дальний порядок осуществляется лишь в кристаллическом состоянии. Отсутствие дальнего порядка в расположении частиц аморфного тела является причиной отсутствия точки плавления. При переходе кристалл – жидкость происходит разрушение дальнего порядка, меняется характер расположения атомов, иными словами, разрушается кристаллическая решетка. На это и расходуется теплота в процессе плавления. В аморфных телах характер расположения атомов при нагревании не меняется, увеличивается лишь их подвижность. Поэтому переход аморфное тело – жидкость правильнее называть не плавлением, а размягчением.

К аморфным телам относятся природные соединения: опал, вулканическое стекло, янтарь, смолы – и получаемые искусственным путем: обычное стекло, плавленый кварц, пластмассы. Иногда аморф-

ные тела называют *стеклообразными* или просто *стеклами*, поскольку стекло – типичный представитель аморфных тел.

Пластмассы – материалы, состоящие в основном из высокомолекулярных соединений и обладающие в одних условиях пластичностью, а в других – ведущие себя как упругие твердые тела.

Вещества, находящиеся в агрегатном состоянии, промежуточном между твердым кристаллическим и газообразным, – это *жидкости*.

В жидкостях расстояние между молекулами соизмеримо с размерами самих молекул $\sim 0,1 \text{ нм} = 10^{-10} \text{ м}$, силы межмолекулярного взаимодействия весьма значительны, поэтому они сохраняют постоянный объем, но не сохраняют форму, а принимают форму сосуда, в которую налиты.

Отличительные характеристики веществ в различных агрегатных состояниях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Отличительные характеристики веществ в различных агрегатных состояниях

Состояние вещества	Характер упаковки частиц	Степень порядка	Характер теплового движения частиц	Величина сил сцепления
Газообразное	Газ занимает весь предоставленный ему объем	Беспорядок	Поступательное движение на длине свободного пробега	Очень малы
Жидкое	Несколько более рыхлая упаковка, чем в кристаллах	Ближний Порядок	Колебательное движение вокруг положения равновесия и медленные перемещения внутри оседлой жизни порядка	Несколько меньше, чем в твердом теле
Кристаллическое	Плотная Упаковка	Дальний и ближний порядок	Колебательное движение вокруг положения равновесия; время оседлой жизни много больше, чем в жидкостях	Очень велики

2. По *природе и составу* все вещества делятся на неорганические и органические.

Неорганические вещества – это вещества, образуемые всеми химическими элементами (исключение – большинство соединений углерода).

Основные типы неорганических веществ: оксиды, гидроксиды, неорганические кислоты, соли. Известно более 300 тыс. неорганических соединений.

Под органическими веществами до середины XIX в. понимали вещества, образующиеся в организмах растений и животных.

В настоящее время под *органическими веществами* понимают соединения углерода (углеводороды и их производные).

Известно свыше 4 млн соединений углерода, и их число возрастает за счет новых открываемых природных веществ и веществ, синтезируемых в лабораториях. На их долю приходится подавляющая часть массы растительных и животных организмов.

Специфика органических соединений заключается, прежде всего, в строении атома углерода и природе химических связей.

Все органические соединения содержат, помимо углерода, водород, а кроме того, могут содержать кислород, азот, серу, галогены и металлы.

Органические соединения отличаются от неорганических веществ следующим:

1) почти все органические соединения горят, тогда как большинство неорганических соединений не обладает горючестью;

2) при незначительных внешних воздействиях (небольшом нагревании) многие органические вещества изменяются, что вызывает необходимость применения при работе с ними специфических методов;

3) в молекулах органических соединений углерод может быть соединен почти с любым элементом периодической системы (кроме инертных газов), в то время, как ни один другой элемент не обладает такой способностью;

4) молекулы органических соединений содержат несколько (иногда большое число) углеродных атомов, обладают изомерией.

Органические соединения по своему строению делятся на следующие классы: алифатические, ароматические, гетероциклические; предельные; непредельные.

Кроме того, можно выделить и специальный класс веществ – высокомолекулярные соединения.

Высокомолекулярные соединения – это вещества, молекулы которых построены из большого числа одинаковых для данного вещества более простых молекул, последовательно связанных между собой посредством химических связей (белки, целлюлоза, крахмал – природные, синтетический каучук).

Высокомолекулярные соединения обладают свойством высокоэластичности. Как правило, высокомолекулярные соединения имеют органическую или элементоорганическую природу.

6. Состав и структура исследуемых веществ

Главными информативными признаками веществ как объектов экспертного исследования являются их состав и структура, определяемые с помощью современных аналитических методов.

Состав вещества включает молекулярный, структурно-групповой, фазовый, элементный составы.

Молекулярный состав – это качественное и количественное содержание индивидуальных химических соединений, присутствующих в исследуемом веществе или материале.

Молекулярный состав индивидуального соединения – это содержание в молекуле структурных фрагментов, порядок их связывания и пространственное расположение.

Структурно-групповой состав – это наличие в молекулах, составляющих исследуемые материал или вещество, структурных фрагментов, определяющих, как правило, класс химических соединений.

Понятие используется при невозможности установления индивидуального соединения.

Фазовый состав – это качественное и количественное содержание фаз в исследуемом объекте.

В химии вещество или смесь веществ в определенном ограниченном объеме называется системой. Система может быть гомогенной и гетерогенной.

Гомогенная система представляет собой единое по составу и внутренней структуре скопление частиц либо одинаковых, либо разных, но полностью перемешанных друг с другом. Такой гомогенной системой будет, например, вода, раствор сахара или соли, смесь газов, однородное твердое вещество и т. п.

Наоборот, система является *гетерогенной*, если в ней одновременно содержатся различные по составу или внутренней структуре скопления частиц, отграниченные друг от друга поверхностями раздела. К гетерогенным относятся, например, системы, состоящие из двух несмешивающихся жидкостей, льда и воды, смеси твердых веществ и т. п.

Ограниченные друг от друга составные части гетерогенной системы, называют фазами.

Фаза – гомогенная часть гетерогенной системы. Это более общее понятие, чем индивидуальное вещество (вещество может существовать в виде различных фаз – агрегатных состояний, а фаза может содержать несколько химических соединений в растворе).

Например: вода и хлороформ не смешиваются и образуют две фазы; вода в равновесии со льдом и паром – трехфазная система;

Итак, *фаза* – однородная часть смеси (см. рис. 19.)



Рис. 19. Смесь песка и воды содержит две фазы: твердую (песок) и жидкую (вода)

Элементный состав – это качественное и количественное содержание химических элементов в виде атомов или ионов в образце.

Структура вещества – это строение (пространственное расположение) входящих в вещество частиц (молекул, атомов).

Внутренняя структура твердого тела – это строение входящих в твердое тело частиц (атомов, молекул), имеющиеся в нем структурные дефекты и микровключения.

Нами были рассмотрены различные понятия и некоторые основные положения строения вещества, необходимые при изучении методов и средств экспертного исследования.

Лекция 6. Свойства твердых тел и жидкостей

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Механические свойства твердых тел и жидкостей.

1.1. Механические свойства твердых тел.

1.1.1. Виды деформации.

1.1.2. Диаграмма растяжения. Закон Гука.

1.1.3. Прочность твердых тел.

1.2. Механические свойства жидкостей.

2. Тепловые свойства твердых тел и жидкостей.

3. Определения электрических свойств твердых тел.

4. Магнитные свойства твердых тел.

1. Механические свойства твердых тел и жидкостей

1.1. Механические свойства твердых тел

1.1.1. Виды деформации

Механические свойства – характеристики, определяющие поведение вещества или материала под действием приложенных внешних механических сил.

Одним из проявления механических свойств является возникновение в твердых телах и жидкостях деформаций.

Деформация – изменение размеров и формы тела под действием приложенных сил.

Существует несколько видов деформации: кручение, сдвиг, изгиб, растяжение, сжатие, упругая и пластическая деформация.

Все виды деформаций могут быть сведены к двум наиболее простым видам: всестороннему растяжению (сжатию) и сдвигу.

Растяжение (сжатие) может быть:

- односторонним (изменяется объем и форма);
- всесторонним (изменяется объем тела, форма не меняется);
- объемным (сжимаемость твердых тел очень мала).

Например, если увеличить давление на кусок кварца на одну техническую атмосферу, то каждый кубический сантиметр уменьшится на ничтожно малую величину – $2,7 \times 10^{-8} \text{ см}^3$.

При деформации сдвига меняется лишь форма тела, объем же остается постоянным.

Деформации, которые исчезают полностью, как только исчезают деформирующие силы, называют *упругими*.

Деформации, которые не исчезают при снятии деформирующих сил, называют *пластическими*.

Упругая деформация у тел с течением времени переходит в пластическую. Вещества, у которых упругая деформация в заметной мере переходит в пластическую в течение длительного времени (годы!), называют *упругими веществами*. Например, сталь, стекло.

Вещества, у которых упругая деформация в заметной мере переходит в пластическую в течение короткого времени (секунды, доли секунды), называют *пластичными веществами*. Например: свинец, мягкий воск и т. д.

Однако если промежуток времени будет слишком мал, то деформация и в пластичном веществе не успеет перейти в пластическую. Например, при очень кратковременной деформации свинцовая пластинка может повести себя сходно со стальной.

Условность деления твердых тел на упругие и пластические сказывается еще и в том, что характер деформации зависит:

– *от величины напряжения деформации;*

В зависимости от величины напряжения деформация одного и того же образца, например латунной или стальной линейки, может быть упругой или пластической. Чем больше деформация, тем меньший промежуток времени требуется для ее перехода в пластическую.

– *от времени действия силы.*

Например, пластилин – типичный пластический материал, поэтому куску пластилина можно придать любую форму. Но если кусок пластилина сильно ударить о пол; то он подпрыгивает, как упругое тело. Если стальную пластинку подержать в согнутом состоянии несколько лет, то после снятия напряжения она не разогнется полностью.

Объясним упругую деформацию, опираясь на знания о характере сил взаимодействия между частицами и о зависимости этих сил от расстояния.

По оси абсцисс откладываем среднее расстояние между частицами, условно принимая, что одна из частиц неподвижна и находится в начале координат, а другая – перемещается относительно первой вдоль оси абсцисс. По оси ординат откладываем значение сил отталкивания $F_{от}$ и притяжения $F_{пр}$, причем, как принято, считаем первые

положительными, а вторые отрицательными. Те и другие действуют одновременно, причем, как следует из формы графиков, силы отталкивания убывают с расстоянием быстрее, чем силы притяжения (рис. 1). На том же рисунке показана зависимость равнодействующей силы F взаимодействия двух частиц от расстояния между ними, равная векторной сумме сил $F_{от}$ и $F_{пр}$.

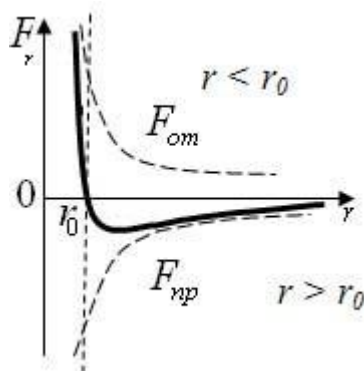


Рис. 1. Зависимость сил взаимодействия двух молекул от расстояния между ними

Когда силы $F_{от}$ и $F_{пр}$ взаимно уравновешены и равнодействующая сила $F=0$, частицы находятся на так называемом *равновесном расстоянии* друг от друга r_0 (при этом их электронные оболочки соприкасаются или перекрываются). Если $r > r_0$, преобладают силы взаимного притяжения, если $r < r_0$, — силы отталкивания.

Зная зависимости $F_{от}(r)$, $F_{пр}(r)$ и $F(r)$, можно построить графики зависимости потенциальной энергии отталкивания $E_{от}^I$ и притяжения $E_{пр}^2$ от расстояния, а также график зависимости всей потенциальной энергии взаимодействия двух частиц E_p от расстояния между ними $E_p(r)$ (рис. 2). Из графика видно, что потенциальная кривая $E_p(r)$ асимметрична: в сторону уменьшения расстояния она идет круто вверх, в сторону увеличения — асимптотически приближается к оси абсцисс. Такая форма кривой отражает определенную физическую картину.

В положении равновесия r_0 (силы притяжения равны силам отталкивания) потенциальная энергия частиц минимальна. При увеличении расстояния между частицами потенциальная энергия возрастает плавно — это говорит о том, что удалению частиц друг от друга предела нет. При уменьшении расстояния между частицами потенциальная энергия возрастает очень резко.

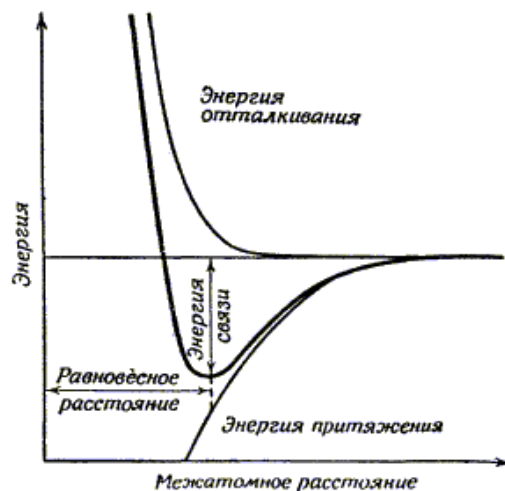


Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии двух молекул от расстояния между ними

Последнее обстоятельство может быть интерпретировано следующим образом: поскольку в равновесном состоянии частицы упакованы плотно, дальнейшее их сближение приводит к деформации электронных оболочек. При этом резко возрастают силы отталкивания и потенциальная энергия.

При *упругой деформации* расстояния между частицами изменяются. В случае растяжения, например, расстояние увеличивается, и силы притяжения получают перевес над силами отталкивания. Потенциальная энергия при этом возрастает. Если растяжение происходит при постоянной температуре, то кинетическая энергия молекул (атомов) не изменяется (кинетическая энергия молекулы определяется величиной kT) за счет возрастания потенциальной энергии молекул (атомов) возрастает внутренняя энергия образца. После снятия напряжения вследствие избытка внутренней энергии возникает упругая сила, возвращающая частицы на свои места. Внутренняя энергия вновь становится минимальной.

Таким образом, упругая деформация имеет энергетическую природу.

Объясним упругость формы (рис. 3). В случае простейшей кубической решетки происходит превращение куба в косоугольный параллелепипед. Диагональ AC удлиняется, а BD укорачивается, поэтому между частицами A и C получают перевес силы притяжения, а между частицами B и D — отталкивания. В результате возникают возвращающие упругие силы, и первоначальная форма тела восстанавливается.

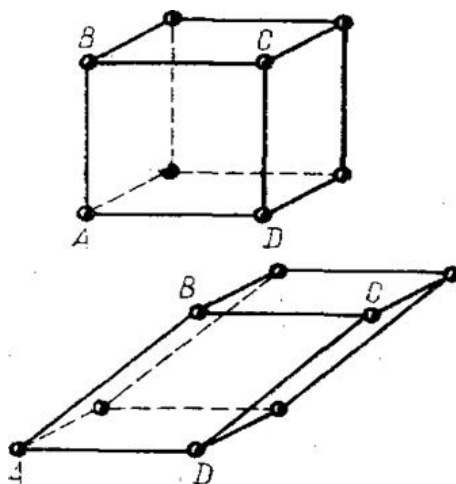


Рис. 3. К объяснению упругости формы кристалла

При *пластической деформации сдвига* в результате действия внешней силы одна часть кристалла вдоль атомной плоскости смещается по отношению к другой так, что новое взаимное расположение атомов по существу ничем не отличается от первоначального (рис. 4 а и б). При этом потенциальная энергия взаимодействия остается минимальной и возвращающие упругие силы не возникают (за счет энергии, затраченной на деформацию, увеличивается кинетическая энергия частиц, т. е. тело нагревается). Пластическая деформация при растяжении и сжатии тоже, как видно из рис. 4 в, г и д, в конечном виде сводится к сдвигу одних атомных плоскостей вдоль других. Возникающие на поверхности кристалла ступеньки можно наблюдать в микроскоп в виде так называемых линий или полос скольжения.

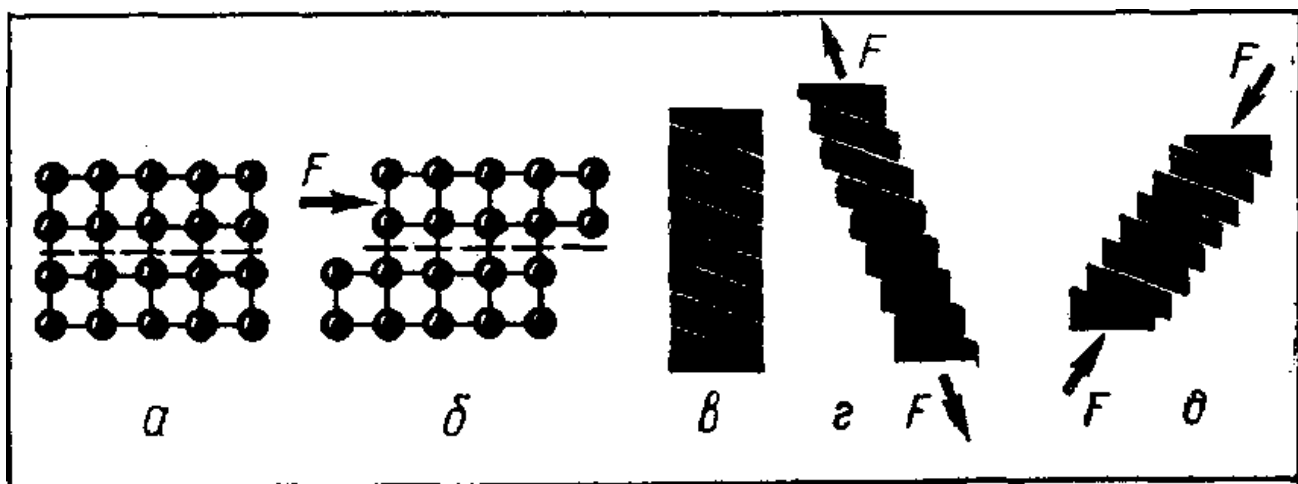


Рис. 4. Пластическая деформация:

а – бездефектный кристалл до деформации; б – деформация сдвига;
в – недеформированный монокристалл; г – деформация растяжения;
д – деформация сжатия

На рис. 5 приведена электронно-микроскопическая фотография боковой поверхности кристалла алюминия, деформированного на 30% (перед деформацией образец был отполирован).



Рис. 5. Электронно-микроскопическая фотография боковой поверхности деформированного кристалла алюминия

Рассмотрим, каков механизм сдвига. Можно представить, что под действием внешней силы разрываются сразу все связи между атомами двух соседних атомных плоскостей, происходит смещение, а затем возникают новые связи. Зная величину сил взаимодействия между частицами (различную для разных типов связи), можно теоретическим путем найти напряжение, необходимое для одновременного разрыва всех связей между соседними атомными плоскостями. Для металлов получается напряжение порядка 10^3 кГ/мм².

Рассматривая деформацию, различают абсолютную деформацию и относительную деформацию.

Абсолютной деформацией называется величина изменения какого-либо размера тела под действием приложенных сил.

Например, при продольном растяжении абсолютная деформация есть прирост длины $\Delta l = l_2 - l$, а при всестороннем растяжении – прирост объема $\Delta V = V_2 - V$, где l (V) – начальная длина (объем), l_2 (V_2) – конечная длина (объем).

Относительной деформацией называется число, показывающее, какую часть от первоначального размера тела составляет абсолютная деформация.

Относительная деформация при продольном растяжении или сжатии выражается формулой

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta l}{l}, \quad (1)$$

где l – начальная длина, Δl – абсолютная деформация.

1.1.2. Диаграмма растяжения. Закон Гука

Для определения деформации введем понятие напряжения в материале. Проведем мысленно поперечное сечение стержня, площадь которого обозначим S (рис. 6). Это сечение разделяет стержень на две части: верхнюю и нижнюю. Тогда действие верхней части деформированного тела на нижнюю можно заменить силой F , которую называют *внутренней силой*. Сила F должна быть равна силе F_1 , если пренебречь весом стержня, иначе равновесие нижней части не сохранится. Аналогично нижняя часть в сечении S действует на верхнюю с силой F' , равной F , но направленной в противоположную сторону. Таким образом, в сечении деформированного тела плоскостью, вообще говоря, возникают силы реакции (внутренние силы), которые уравнивают действующие силы. Эти силы создают внутри тела напряжение, обозначаемое буквой σ (греческая буква «сигма»).

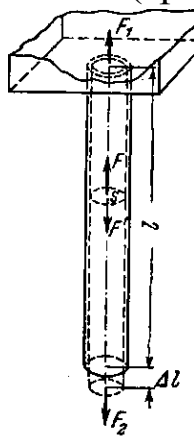


Рис. 6. Деформация продольного растяжения

Механическим напряжением называется величина, измеряемая внутренней силой, действующей на единицу площади сечения деформированного тела.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

Формула (2) верна, если внутренняя сила равномерно распределена по всей площади сечения.

В системе СИ за единицу механического напряжения принимается такое напряжение в материале, при котором на площадь в 1 м^2 равномерно действует сила в 1 н.

Связь между упругим напряжением и относительной деформацией была установлена английским ученым Р. Гуком (1635–1703 гг.) и называется законом Гука: *механическое напряжение упруго де-*

формированного тела прямо пропорционально относительной деформации $\sigma = E \varepsilon$ (3) или $\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$. (4)

Величина E , характеризующая зависимость механического напряжения в материале от рода этого материала, называется *модулем упругости*. Модуль упругости E измеряется механическим напряжением, возникающим в материале при относительной деформации, равной единице.

Закон Гука можно сформулировать и по-другому:

1. При упругой деформации деформирующая сила и величина деформации пропорциональны между собой.

$$F = -k\Delta l, \quad (5)$$

где k – коэффициент упругости. Коэффициент упругости зависит от свойств материала и от размеров тела.

2. Деформация какой-либо части тела пропорциональна напряжению, которое имеется в этой части тела.

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \sigma \quad (6)$$

где $\alpha=1/E$ – коэффициент линейного расширения.

В технике принято вести расчеты по модулю упругости, чем больше модуль упругости E , тем меньше растягивается образец при прочих равных условиях (длине, площади сечения, силе). Таким образом, физически модуль E характеризует сопротивляемость материала упругой деформации при растяжении.

Рассмотрим опыт, подтверждающий закон Гука.

Концы медной проволоки 1 (рис. 7 а) зажимают винтовыми зажимами, обеспечивающими достаточную прочность закрепления. Один из зажимов надевается на стержень трубки 2, и проволока перекидывается через блок 3. Ко второму зажиму подвешиваются грузы. На расстоянии 6–7 см от блока к проволоке прикрепляется стрелка 4 из металлической фольги. Подвешивая к проволоке грузы, получаем диаграмму в таком виде, как показано на рис. 7 б.

Закон Гука соблюдается не для всех упругих деформаций, а лишь на прямолинейном участке диаграммы (рис. 8): предел пропорциональности лежит несколько ниже предела упругости. Однако, поскольку предел упругости расположен очень близко к пределу пропорциональности, в технике часто считают их совпадающими.

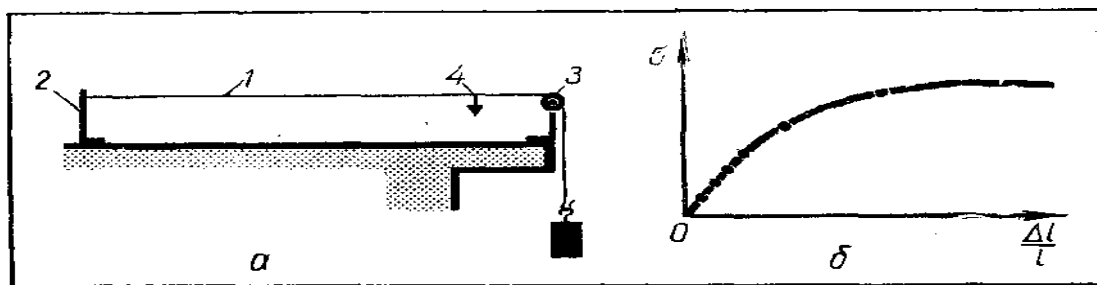


Рис. 7. К изучению деформации растяжения:
 а – установка для построения диаграммы растяжения)
 б – полученная на ней диаграмма

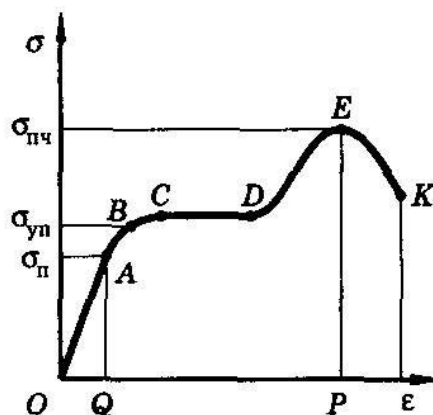


Рис. 8. Диаграмма растяжения

На участке OA , т. е. в пределах упругости, деформация поликристаллического образца идет в основном за счет увеличения расстояния между атомами. После снятия напряжения атомы возвращаются в свои равновесные положения. Максимальное напряжение, при котором еще выполняется закон Гука, называется *пределом пропорциональности*.

Если увеличивать нагрузку дальше, то деформация становится нелинейной: напряжение перестает быть прямо пропорциональным относительному удлинению. Тем не менее, при небольших нелинейных деформациях после снятия нагрузки форма и размеры тела практически восстанавливаются (участок AB диаграммы). Максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации (относительная остаточная деформация не превышает 0,1%) называется *пределом упругости*. Если предел упругости превышает предел пропорциональности лишь на сотые доли процента, то появляется точка B .

Если напряжение, приложенное к образцу, больше предела упругости, то наряду с упругой деформацией развивается и пластическая.

В результате величина деформации растет быстрее, чем величина напряжения; при некотором значении напряжения материал «течет», (увеличение деформации не требует увеличения напряжения), и на диаграмме образуется горизонтальная площадка текучести (участок CD диаграммы). Напряжение (ордината D), при котором материал «течет», называется пределом текучести.

Для дальнейшего развития деформации снова необходимо увеличивать напряжение (DE). E – предел прочности. Это значит, что возрастает сопротивление материала пластической деформации, т. е. происходит упрочнение.

Для объяснения этого явления следует, что по мере развития пластической деформации число дислокаций (смещений, несовершенство структуры кристалла) в образце растет. Как видно из рис. 9, пересоединения связей происходят последовательно, эстафетным порядком; одновременно в процессе деформации участвует очень небольшое число атомов. Этим и объясняются заниженные значения необходимых для деформации напряжений.

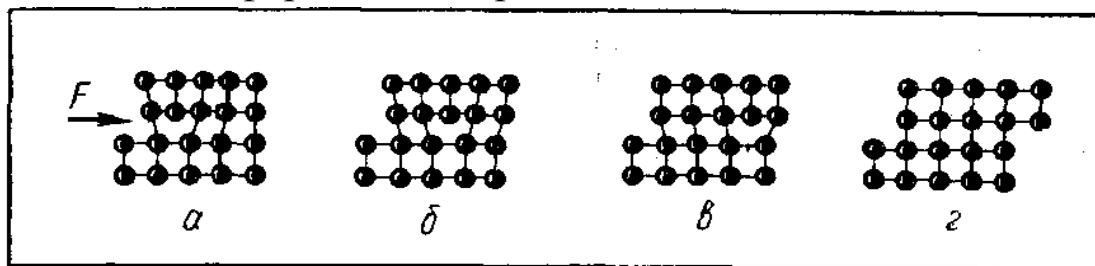


Рис. 9. Дислокационный механизм пластической деформации

Все дефекты кристаллической решетки (в том числе и сами дислокации) являются препятствием для движения дислокаций.

Кроме того, растет и число других дефектов. Но все дефекты решетки препятствуют перемещению дислокаций (при очень большой плотности дефектов дислокации практически, неподвижны), что и приводит к упрочнению материала. Например, в известном опыте А. Ф. Иоффе: монокристалл цинка легко изгибается, однако разогнуть его трудно из-за происшедшего в результате пластической деформации упрочнения.

После точки E (в диаграмме на рис. 8) начинается образование шейки, поэтому для дальнейшего растяжения образца требуется все меньшее и меньшее напряжение – диаграмма идет вниз. Затем происходит разрыв точка K .

Разрыв происходит после того как напряжение достигает максимального значения $\sigma_{\text{пч}}$, называемого *пределом прочности*. Предел прочности определяется как наименьшее напряжение, при котором начинается разрушение образца. На диаграмме ему соответствует точка E , окончательное же разрушение происходит при меньшем напряжении вследствие образования шейки – сужение поперечного сечения.

Изучение зависимости деформации материалов от приложенного напряжения имеет огромное значение в машиностроении. Механические свойства материалов изучаются путем испытаний специальных образцов. Наиболее распространенными являются испытания на растяжение, осуществляемые на машинах различных типов.

1.1.3. Прочность твердых тел

Существует два вида разрушений – хрупкое и пластическое. Для введения понятия «хрупкость» сравним диаграмму растяжения пластического и хрупкого материалов, например мягкой стали и чугуна.

Диаграмма растяжения чугуна отличается следующими особенностями: очень трудно точно определить предел упругости, так как переход из прямой в кривую происходит плавно, участка текучести нет, наивысшая точка диаграммы совпадает с ее концом, т. е. не снижающейся ветви, что объясняется отсутствием шейки на образце при разрыве.

Сравним диаграммы растяжения и внешний вид образцов после разрушения (рис. 10).

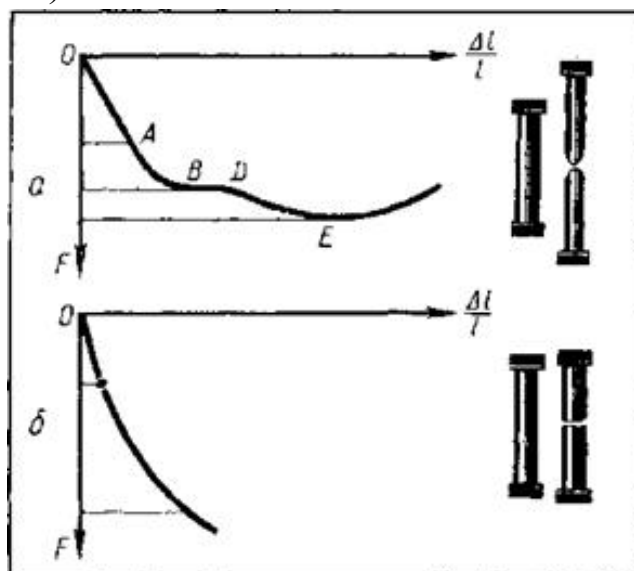


Рис. 10. Диаграмма растяжения: а – стали; б – чугуна

В первом случае разрушение происходит постепенно, ему предшествуют значительные пластические деформации и образование шейки.

Во втором случае разрушение происходит почти мгновенно и поэтому является наиболее опасным. В зависимости от того, каким образом ведет себя материал при разрушении, его обычно считают пластичным или хрупким.

Это деление условно, так как на характер разрушения образца влияет фактор времени (точнее, скорость изменения нагрузки) и температура.

Бывают случаи, когда материал, отличающийся при статических нагрузках прекрасными пластическими качествами, при ударе оказывается хрупким. Поэтому при выборе материалов для деталей, подвергающихся ударам, образцы материала на специальных машинах испытываются на удар.

Рассмотрим явление усталости, имеющее чрезвычайно большое практическое значение. В середине прошлого века внимание исследователей привлекли следующие факты: оси почтовых карет, железнодорожных вагонов и некоторые другие конструкции иногда без всякой видимой причины внезапно ломались, причем разрушение носило ярко выраженный хрупкий характер. Было замечено, что эти разрушения возникают лишь тогда, когда материал детали подвергается многократным повторно – переменным нагрузкам (т. е. периодически изменяющимся во времени) (рис. 11). Дальнейшие исследования показали, что детали разрушаются не сразу, а после некоторого (иногда довольно длительного) срока службы. На этом основании возникла гипотеза о «перерождении», «усталости» металла. Считали, что металл за время работы «устает», структура его меняется и из пластического он делается хрупким. Однако при испытании образцов, вырезанных из разрушенных деталей, оказалось, что ни предел прочности, ни относительное удлинение не изменились по сравнению с теми же характеристиками для исходного материала. Таким образом, никакого «перерождения» или «уствания» металла под действием переменных нагрузок не происходит. Термин «усталость» сохранился благодаря своему широкому распространению и краткости, однако теперь в него вкладывается иной смысл. Многочисленные исследования установи-

ли, что под действием переменных нагрузок в металле возникает микроскопическая трещина, постепенно увеличивающаяся и проникающая вглубь изделия (рис. 12). Неповрежденное сечение детали становится все меньше и меньше, а это значит, что оно подвергается все большему напряжению. В результате при случайном толчке или ударе происходит окончательное разрушение. Такой взгляд на причину разрушения при усталости является в настоящее время общепринятым. Что же касается механизма появления микротрещин, то это сложный процесс, связанный с перемещением дислокаций, вакансий и других дефектов.



Рис. 11. Усталостный излом рельса Рис. 12. Усталостная трещина

Типичный усталостный излом состоит из четырех плавно переходящих одна в другую зон: зоны развития очаговой трещины, зон медленного и ускоренного роста трещины и зоны долома.

Механические свойства материалов зависят также от температуры. Это знание этой зависимости тоже имеет очень большое значение в технике, так как многие детали длительное время работают при высоких температурах, например диски и лопасти паровых и газовых турбин, трубы и другие детали.

Причина расхождения теории и эксперимента — наличие внутренних и поверхностных дефектов в реальных кристаллах.

Кристаллические материалы с высокой прочностью на разрыв, как и с высокой прочностью на сдвиг (т. е. с большой сопротивляемостью пластическим деформациям), могут быть получены двумя, казалось бы, противоположными путями. Первый путь состоит в изготовлении бездефектных кристаллов. Удастся получать в

лабораториях бездислокационные кристаллы в виде тонких нитей (усов) методом выращивания из паров; их прочность приближается к теоретической (табл. 1). Второй путь состоит в максимальном искажении правильной структуры кристалла, что затрудняет распространение трещин и движение дислокаций. Техника получения сверхпрочных материалов пока использует только второй путь. С этой целью материал подвергается такой обработке, при которой увеличивается плотность дефектов.

Прочность тела может быть вычислена теоретически по величине сил связи (табл. 1).

Таблица 1

**Таблица прочности (теоретическая и экспериментальная)
для некоторых металлов**

Материал	Теоретическая прочность, кГ/мм ²	Экспериментальная прочность, кГ/мм ²
Цинк катаный	840	13
Медь (отожженный поликристалл)	1200	23
Медь (усы)	1200	340
Железо (отожженный поликристалл)	2100	29
Железо (усы)	2100	До 1000

1.2. Механические свойства жидкостей

Жидкость, как и твердое тело, можно подвергнуть деформации.

При одностороннем сжатии объем жидкости не меняется, и объясняем это явление текучестью жидкости. Если увеличить давление на жидкость на 1 атм, то объем каждого кубического сантиметра уменьшается для воды на $47 \cdot 10^{-6}$, для глицерина на $24 \cdot 10^{-6}$, для ртути на $2,95 \cdot 10^{-6}$ первоначального объема (для кристаллического кварца – на $2,70 \cdot 10^{-6}$). Из опытных данных следует, что жидкость можно не только сжать, но и растянуть. То, что жидкость можно растянуть, как раз и свидетельствует о том, что она обнаруживает прочность на разрыв.

Повседневный опыт заставляет, казалось бы, сделать вывод, что жидкость не обладает упругостью формы. Действительно, под действием даже незначительного сдвигающего усилия жидкость начинает течь. Слои воды легко перемещаются относительно друг друга, но по-

сле прекращения действий силы они не возвращаются назад. Однако упругость формы просто маскируется текучестью жидкости. Жидкости имеют квазикристаллическое строение (кристаллоподобным), частицы жидкости в течение очень короткого времени своей оседлой жизни порядка 10^{-10} – 10^{-12} сек. колеблются около своих положений равновесия. Так как время действия внешней силы обычно гораздо больше времени оседлой жизни, то частицы, выведенные из положения равновесия, назад вернуться уже не успевают. Поэтому в обычных условиях не наблюдается упругости жидкости на сдвиг. Однако, если время действия силы того же порядка, что и время оседлой жизни частиц, то жидкость вследствие своего квазикристаллического строения обнаруживает упругость на сдвиг. Вязкость жидкостей противоположно свойстве – текучести.

Вязкость жидкостей характеризует их сопротивление течению, вызванному действием внешней силы (в данном случае внешней силой является сила тяжести).

С повышением температуры вязкость жидкостей уменьшается.

Частицы большинства жидкостей расположены менее плотно по сравнению с частицами твердого тела, т. е. жидкость является более рыхлым образованием. Промежутки между частицами не столь велики, чтобы в них можно было поместить добавочное число частиц, но достаточны, чтобы существовала возможность передвижения. Эта картина напоминает ту, что мы наблюдаем в переполненном автобусе. Благодаря существованию незначительных промежутков между пассажирами один из них, растолкав остальных, может продвинуться к выходу. При нагревании происходит тепловое расширение жидкости, промежутки между частицами увеличиваются, и передвижение частиц становится более легким (подобно тому, как стало бы более легким передвижение пассажира, если бы он вместе со всеми остальными оказался в немного более вместительном автобусе), иными словами, уменьшается вязкость.

Знание вязкости имеет большой практический интерес. Вязкость приходится учитывать при определении энергии, необходимой для перекачивания жидкости по трубам. Вязкость масел имеет большое значение для расчетов смазки машин. Вязкость расплавленного стекла определяет процесс его выработки. По вязкости во многих случаях

судят о готовности и качестве продуктов или полупродуктов. В медицине при установлении диагноза больного часто определяют вязкость его крови, так как при многих заболеваниях она становится выше или ниже нормальной.

Рассмотрим значение пределов прочности некоторых жидкостей при комнатной температуре, полученных экспериментально (табл. 2). Вообще говоря, экспериментальные данные обнаруживают очень большой разброс, не позволяющий усмотреть различий в прочности разных жидкостей. Поэтому в таблице приводятся наивысшие цифры, как наименее осложненные влиянием чистоты стенок сосуда и жидкости.

Таблица 2

Значение прочности некоторых жидкостей

Жидкость	Прочность, кГ/см³	Жидкость	Прочность, кГ/см³
Вода	280	Метиловый спирт	53,5
Бензол	157	Этиловый спирт	39
Этиловый эфир	72	Минеральное масло	7,8

Поскольку жидкость имеет квазикристаллическое строение, она при определенных условиях проявлять еще одно свойство, присущее твердому состоянию – хрупкость.

2. Тепловые свойства твердых тел и жидкостей

Объясним расширение твердых тел и жидкостей с энергетической точки зрения. Воспользуемся потенциальной кривой взаимодействия между частицами (рис. 13).

На потенциальной кривой можно отметить крайние расстояния, до которых доходит колеблющаяся частица при данной температуре T . Состоянию равновесия частицы соответствует середина этого отрезка T_1 . При увеличении температуры от T_1 до T_2 длина отрезка возрастает и, как видно из рис. 13, потенциальная энергия увеличивается от E_{p1} до E_{p2} . Так как потенциальная кривая асимметрична, то при этом среднее положение частицы перемещается из точки T_1 в точку T_2 . Следовательно, среднее расстояние между частицами увеличивается, т. е. происходит тепловое расширение.

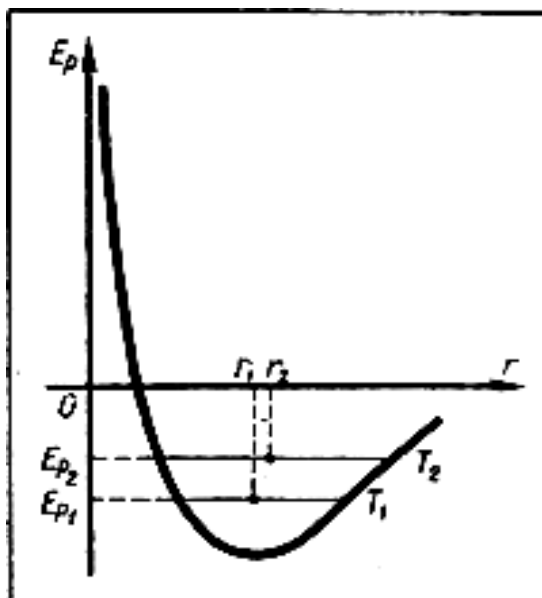


Рис. 13. Потенциальная кривая взаимодействия молекул

3. Определения электрических свойств твердых тел и жидкостей

К электрическим свойствам объектов, изучаемых с помощью физических методов относится удельное электросопротивление, электропроводность.

Удельное сопротивление проводящих материалов зависит от их физической природы и может меняться с изменением состава и структуры материала.

$\rho = \frac{RS}{l}$, где R – сопротивление проводника, S – сечение, l – длина проводника. Единицей удельного сопротивления является в системе СИ – Ом·м²/м.

Метод пригоден для сравнительного исследования различных проводящих материалов, при условии, что сравниваемые объекты имеют определенные размеры и формы.

Электропроводностью называют величину, обратную электрическому сопротивлению R . Единицей измерения электропроводности является Ом⁻¹ или сименс (См). Величину, обратную удельному сопротивлению (ρ), называют удельной электропроводностью $\chi = 1/\rho$.

Удельная электропроводность (См·см⁻¹) численно равна току (в А), проходящему через слой раствора с поперечным сечением, равным единице, под действием градиента потенциала 1 В на единицу длины.

4. Определения магнитных свойств твердых тел

Изучение магнитных свойств объектов основано на определении магнитной проницаемости, магнитной восприимчивости и магнитного насыщения.

Величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме, называется *относительной магнитной проницаемостью*.

Магнитная восприимчивость – безразмерная величина, характеризующая способность вещества намагничиваться в магнитном поле.

Вещества, которые, подобно железу, значительно усиливают внешнее магнитное поле, называют *ферромагнетиками*. У ферромагнетиков значения магнитной проницаемости достигают нескольких десятков, сотен и даже тысяч единиц.

Тщательно выполненные опыты с неферромагнитными веществами показали, что многие из них (литий, натрий, алюминий, эбонит, кислород и др.) создают слабое магнитное поле, по направлению совпадающее с внешним полем. Такие вещества называют *парамагнетиками*. Магнитная проницаемость даже наиболее сильных парамагнетиков немногим больше единицы: 1,00036 у платины и 1,0034 у жидкого кислорода.

Другая группа неферромагнитных веществ при помещении в магнитное поле создает небольшое по величине встречное магнитное поле и этим несколько ослабляет внешнее поле. Такие вещества называют *диамагнетиками*. К ним относятся, например, серебро, свинец, кварц. Уменьшение магнитного поля в диамагнетиках незначительно. Например, у одного из самых сильных диамагнетиков – висмута относительная магнитная проницаемость равна 0,999824, т. е. всего на две десятитысячных меньше единицы.

Магнитная восприимчивость вещества обуславливается его химическим составом, структурой и агрегатным состоянием. Метод позволяет изучать фазовое состояние металлов и сплавов и изменения, происходящие в них под влиянием внешних воздействий (температуры, давления и т. д.)

Она определяется в пара-, диа- и ферромагнетиков, что позволяет исследовать фазовое состояние этих веществ, его изменение под воздействием тепла, давления и т. д. Преимущество этого метода в

возможности исследования твердых, порошкообразных и жидких веществ. В основном применяется при исследовании металлов и сплавов.

Магнитное насыщение – состояние вещества, при котором его намагниченность достигает предельного значения. Величина магнитного насыщения – наиболее устойчивая магнитная характеристика, зависящая от химического состава ферромагнитных фаз в сплаве и их количества. Методы определения магнитного насыщения используют для исследования фазовых превращений в сплавах (сталях).

Как видно из характеристик физических методов, они могут быть использованы в судебной экспертизе, главным образом, при исследовании свойств металлов и сплавов. Кроме того, физические методы имеют большое значение при экспертном исследовании стекла.

Лекция 7. Природа света. Основы фотометрии

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Световой поток.
2. Точечные источники света.
3. Сила света и освещенность.
4. Законы освещенности.
5. Яркость источников и освещенных поверхностей.
6. Световые измерения и измерительные приборы.

Природа света занимала людей с давних времен. При этом представление о природе света менялось по мере того, как накапливались новые сведения и данные.

Все экспериментальные и теоретические данные, полученные в то время, указывали однозначно, что световые волны являются электромагнитными волнами. Например, светящиеся тела (например, Солнце) испускают электромагнитные (первичные) волны. Такая первичная волна, попадая на какое-нибудь тело, вызывает вынужденные колебания его электронов. Электроны становятся источниками вторичных электромагнитных волн. Все многообразие световых явлений, все видимые нами окраски и очертания предметов представляют собой суперпозицию (наложение) первичных и вторичных волн. Многие черты волновых явлений оказываются сходными для волновых процессов самой разнообразной природы. Получение новых экспериментальных данных в XX в. привело к выводу, что свет с волновыми свойствами обладает и корпускулярными.

В настоящее время квантовая теория объединяет волновые и корпускулярные представления о свете в одно целое, так же как она объединяет волновые и корпускулярные представления об электронах, атомах и других частицах.

1. Световой поток

Разнообразные действия света обусловлены в первую очередь наличием определенной энергии излучения (световой энергии). Непосредственное восприятие света обусловлено действием световой энергии, поглощенной чувствительными элементами глаза. В любом приемнике, способном реагировать на свет, например, в фотоэлементе, термоэлементе и фотопластинке, происходит такое же реагирование

на свет. Поэтому измерения света сводятся к измерению световой энергии или к измерению величин, с нею связанных.

Отдел оптики, изучающий методы и приемы измерения световой энергии, называется фотометрией.

Представим себе, что свет распространяется от какого-либо источника S (рис. 1). Выделим на пути его распространения небольшую площадку σ . Через эту площадку за время t пройдет некоторая энергия излучения ε . Чтобы измерить эту энергию, надо представить себе эту площадку в виде пленки, покрытой веществом, полностью поглощающим всю падающую на него энергию излучения, например сажей, и измерить поглощенную энергию по нагреванию этой пленки.

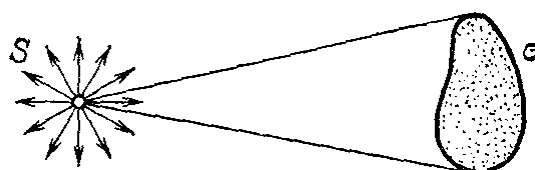


Рис. 1. Поток световой энергии, излучаемой источником S , проходит через площадку σ

Величина отношения
$$\Phi = \frac{\varepsilon}{t} \quad (1)$$

показывает, какая энергия ε протекает через площадку за единицу времени t , и называется *поток излучения (мощностью излучения) через площадку σ* .

Интенсивностью волны называется мощность, переносимая световой волной через единичную площадку.

Поток излучения оценивается в единицах мощности, т. е. в ваттах, а интенсивность излучения – в ваттах на квадратный метр.

Для восприятия и использования световой энергии важную роль играет глаз. В соответствии с этим наряду с энергетической оценкой света пользуются оценкой, основанной на непосредственном световом восприятии глаза. Поток излучения, оцениваемый по зрительному ощущению, называется *световым потоком*.

В световых измерениях используются две системы обозначений и две системы единиц; одна из них основана на энергетической оценке света, другая – на оценке света по зрительному ощущению.

Чувствительность глаза к свету разной длины волны (разного цвета) различна, поэтому энергетическая оценка света и оценка светового потока по зрительному ощущению могут существенно отличаться.

ся. Например, при одной и той же мощности излучения зрительное ощущение от лучей зеленого цвета будет примерно в 100 раз больше, чем от лучей красного или сине-фиолетового цвета. Поэтому для зрительной оценки световых потоков необходимо знать чувствительность глаза к свету различной длины волны или так называемую кривую относительной спектральной чувствительности глаза, изображенную на рис. 2. На кривой показана относительная чувствительность V_λ человеческого глаза в зависимости от длины волны λ . Приняв чувствительность глаза для длины волны ($\lambda = 555\text{ нм}$) (зеленый свет) за единицу, для более длинных и более коротких волн чувствительность быстро уменьшается, как и показано на кривой.

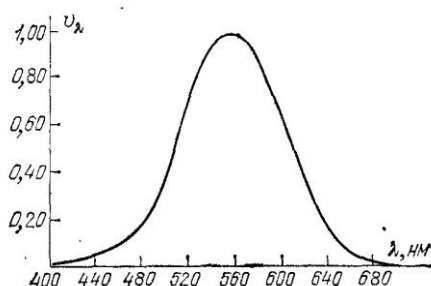


Рис. 2. Кривая относительной спектральной чувствительности глаза

Из рис. 54 для $\lambda = 510$ нм и для $\lambda = 610$ нм чувствительность будет равна 0,5 (т. е. уменьшается вдвое); для $\lambda = 470$ нм (голубой) и $\lambda = 650$ нм (оранжево-красный) чувствительность составит около 0,1; для $\lambda = 430$ нм (сине-фиолетовый) и $\lambda = 675$ нм (красный) — примерно 0,01 и т. д.

Такие кривые чувствительности глаза различных людей отличаются. Особенно такое отличие наблюдается в области малых чувствительностей. Кривая, приведенная на рис. 2, получена на основании многочисленных измерений; она характеризует чувствительность среднего нормального глаза и утверждена Международным комитетом по стандартам.

2. Точечные источники света

Различные тела становятся видимыми, когда от них исходит свет и попадает в глаза. Одни тела излучают свет в окружающее пространство и их видно независимо от того, светло или темно вокруг. Такие тела называются *источниками света*.

Большинство же тел мы видим только тогда, когда они освещены источниками света.

Источники света бывают естественные и искусственные. Естественным источником света является Солнце, Луна, звезды.

Искусственные источники света – это источники света, которые являются продуктом деятельности (костры, спички, свечи, керосиновые и электрические лампы).

Все названные источники света называются *тепловыми источниками света*, так как, испускают свет в нагретом состоянии.

В настоящее время широко используются в технике и быту другие виды источников света, в которых используется свечение газов под действием проходящих через них электрических токов. Температура газа в таких лампах при свечении почти не меняется, поэтому их называют иногда источниками «холодного света». Они значительно экономичнее электрических ламп накаливания. В некоторых из них можно получить свет, одинаковый по своему составу с солнечным светом. Такие лампы «дневного света» сейчас используются во многих производствах, они, в частности, служат источником света на подземных станциях метро.

При рассмотрении вопросов, связанных с определением световых величин, особенно просто решаются в том случае, когда источник излучает свет равномерно во всех направлениях. Например, таким источником является раскаленный металлический шарик. Такой шарик посылает свет равномерно во все стороны; световой поток от него распределен равномерно по всем направлениям. При таком распространении света действие источника на какой-либо приемник света будет зависеть только от расстояния между приемником и центром светящегося шарика и не будет зависеть от направления радиуса, проведенного к приемнику из центра шарика.

Если действие света изучается на расстоянии, намного превосходящем радиус светящегося шарика, то размерами последнего можно пренебречь. Тогда считают, что излучение света происходит как бы из одной точки – центра светящегося шара. В таких случаях источник света называется *точечным источником*.

Точечным источником света называется источник, излучающий свет по всем направлениям равномерно и размерами которого по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие, можно пренебречь.

На практике всегда имеют дело с протяженными телами, в том числе и с протяженными источниками света. Каждый из таких источников рассматривается как совокупность светящихся точек. Рассматриваемые протяженные источники света принимают за точечные, если соотношения между его размерами и теми расстояниями от источника света, на которых исследуется его действие, можно пренебречь. Чем меньше размеры светящегося тела по сравнению с расстоянием, на котором оценивается его действие, тем с меньшей погрешностью его можно принять за светящуюся точку. Для всех практических задач наилучшим образцом точечных источников являются звезды; хотя они имеют огромные размеры, расстояния от них до Земли во много раз превосходят эти размеры. Необходимо помнить, что прообразом точечного источника является равномерно светящийся шарик. Поэтому источник света, посылающий свет неравномерно в разные стороны, не является точечным, хотя бы он был и очень маленьким по сравнению с расстоянием до точки наблюдения.

Рассмотрим более подробно, что понимается под равномерным излучением света во все стороны. Воспользуемся представлением о телесном угле Ω , который равен отношению площади поверхности σ , вырезанной на сфере конусом с вершиной в точке S , к квадрату радиуса r (рис. 3).

$$\Omega = \frac{\sigma_0}{r^2} \quad (2)$$

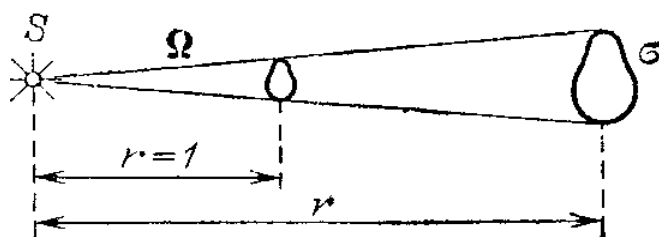


Рис. 3. Телесный угол Ω

Телесный угол не зависит от радиуса, так как с ростом r вырезаемая конусом поверхность σ увеличивается пропорционально r^2 . Если $r = 1$, то $\Omega = \sigma$, т. е. Ω численно равен σ , т. е. телесный угол измеряется поверхностью, вырезанной конусом на сфере единичного радиуса.

Единицей телесного угла являетсястерадиан (стерадиан (ср) – пространственный радиан – телесный угол, которому на сфере единичного радиуса соответствует поверхность с площадью, равной единице.

Телесный угол, охватывающий все пространство вокруг источника, равен 4π ср, ибо площадь полной поверхности сферы единичного радиуса есть 4π . *Полное излучение какого-либо источника распределяется в телесном угле 4π ср. Излучение называется равномерным или изотропным, если в одинаковые телесные углы, выделенные по любому направлению, излучается одинаковая мощность.* Конечно, чем меньше телесные углы, в которых производятся сравнения мощности, излучаемой источником, тем с большей точностью проверяется равномерность излучения.

Точечным источником является источник, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до места наблюдения и который посылает световой поток равномерно во все стороны.

3. Сила света и освещенность

Полный световой поток характеризует излучение, которое распространяется от источника по всем направлениям. Для практических целей важнее знать не полный световой поток, а тот поток, который идет по определенному направлению или падает на определенную площадку. Например, автомобилисту важно получить достаточно большой световой поток в сравнительно узком телесном угле, внутри которого находится небольшой участок шоссе. Для работающего за письменным столом важен тот поток, который освещает стол или даже часть стола, тетрадь или книгу, т. е. поток, приходящийся на некоторую площадь. Для этого вводят два понятия: *сила света (I) – характеристика источника света и освещенность (E) – характеристика действия света на поверхность.*

Силой света называют световой поток, рассчитанный на телесный угол, равный стерadianу, т. е. отношение светового потока Φ , заключенного внутри телесного угла Ω , к этому углу:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены силы света различных типовых источников света.

Освещенность – световой поток, рассчитанный на единицу площади, т. е. отношение светового потока Φ , падающего на площадь σ , к площади:

$$E = \frac{\Phi}{\sigma} \quad (4)$$

Сила света типовых источников

Источник	Примерная сила света, кд
Свеча	1
Современная (2006 г.) лампа накаливания	100
Обычный светодиод	0,005...3
Сверхъяркий светодиод	25...500
Сверхъяркий светодиод с коллиматором	1500
Современная (2006 г.) люминесцентная лампа	100
Солнце	$3 \cdot 10^{27}$

Формулы (3) и (4) определяют среднюю силу света и среднюю освещенность. Чем равномернее поток или чем меньше телесный угол (Ω) и площадь (σ), на которую падает световой поток, тем средняя сила света и средняя освещенность будут ближе к истинным.

С помощью источника, посылающего определенный световой поток, можно получить разнообразную силу света и разнообразную освещенность. Если направить весь поток или большую его часть внутрь малого телесного угла, то в направлении, выделенном этим углом, можно получить очень большую силу света. Например, в прожекторах удается сосредоточить большую часть потока, посылаемого электрической дугой, в очень малом телесном угле и получить в соответствующем направлении огромную силу света. Той же цели достигают с помощью автомобильных фар. Если сконцентрировать с помощью отражателей или линз световой поток от какого-либо источника на небольшой площади, то можно достигнуть большой освещенности. Например, сильно освещают объект, рассматриваемый в микроскоп.

Из формулы (3) световой поток Φ равен произведению силы света I на телесный угол Ω , в котором он распространяется:

$$\Phi = I \cdot \Omega, \quad (5)$$

Рассмотрим частные случаи. Если телесный угол $\Omega = 0$, т. е. лучи строго параллельны, то световой поток также равен нулю. Это означает, что строго параллельный пучок световых лучей не несет никакой энергии, т. е. не имеет физического смысла, — ни в одном реальном опыте не может быть осуществлен строго параллельный пучок. Это — чисто геометрическое понятие. Параллельными пучками лучей очень

широко пользуются в оптике, потому что небольшие отступления от параллельности световых лучей, имеющие с энергетической точки зрения принципиальное значение, в вопросах, связанных с прохождением световых лучей через оптические системы, практически не играют никакой роли. Например, углы, под которыми лучи от удаленной звезды попадают в наш глаз или телескоп, настолько малы, что они даже не могут быть измерены существующими методами; практически эти лучи не отличаются от параллельных. Однако эти углы все же не равны нулю, и именно благодаря этому мы и видим звезду. Световые пучки с очень острой направленностью, т. е. с очень малой расходимостью световых лучей, получают при помощи лазеров. Однако и в этом случае углы между лучами имеют конечное значение.

Единица силы света в системе световых единиц принята за исходную величину. Эта единица имеет условный характер: в качестве единицы силы света принята сила света некоторого эталонного источника. Таким источником, дающим силу света $I = 1$, вначале условились считать пламя свечи, изготовленной строго стандартным образом. Этот эталонный источник оказался мало удобным, потому что даваемая им сила света несколько изменяется по мере образования «нагара» и еще зависит от температуры и влажности воздуха. Для установления эталона силы света было предложено много других источников, в частности эталонные электрические лампы накаливания, образцы которых хранятся в крупных государственных измерительных лабораториях и контролируются взаимными сравнениями.

Единица силы света называется канделой (кд) — от латинского слова *candela*, что означает свеча. *Кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего излучение частоты 540–1012 Гц (длина волны в вакууме 555 нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.* Кандела является одной из основных единиц Международной системы единиц (СИ). Эталоны в виде электрических ламп не являются достаточно постоянными и в случае их порчи не могут быть точно воспроизведены. Поэтому международным соглашением введен новый эталон, который можно точно воспроизвести. Он представляет собой специально устроенный сосуд, в котором расплавляется химически чистая платина; в платину вставлена тугоплавкая узкая трубочка, раскаляемая до

температуры платины. Свет испускается внутренней полостью трубочки через ее открытый конец. При затвердевании чистой платины температура ее имеет строго определенное значение, равное 2042 К. Сила света, излучаемого при этой температуре в направлении оси трубочки с поверхности, равной $1/60 \pi \text{ см}^2$, будет строго определенной. Эта сила света равна одной канделе.

За единицу светового потока принят люмен (обозначается лм). Люмен есть световой поток, испускаемый точечным источником, сила света которого равна 1 кд, внутри единичного телесного угла (т. е. угла, равного 1 ср). Для излучения, соответствующего максимуму спектральной чувствительности глаза ($\lambda = 555 \text{ нм}$), световой поток равен 683 люменам, если энергетическая сила света равна 1 Вт/ср.

За единицу освещенности принимается освещенность такой поверхности, на 1 м^2 которой падает световой поток 1 лм, равномерно распределенный по площадке. Эта единица освещенности называется люкс (лк). Освещенность 1 лк получается на поверхности сферы радиуса 1 м, если в центре сферы помещен точечный источник, сила света которого равна 1 кд.

4. Законы освещенности

Определим связь освещенности с силой света. Формулы (3) и (4) показывают, как величины E и I связаны между собой.

Пусть точечный источник S освещает небольшую площадку σ , расположенную на расстоянии R от источника (рис. 4).

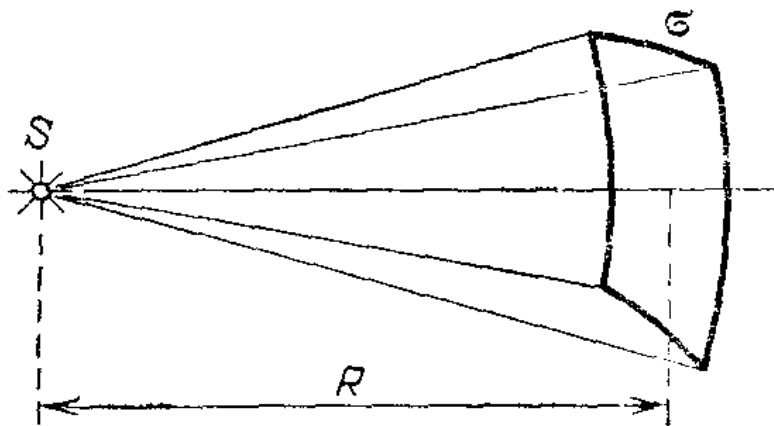


Рис. 4. Освещенность площадки σ , перпендикулярной к оси светового потока

Построим телесный угол Ω , вершина которого лежит в точке S и который опирается на края площадки σ . Телесный угол равен $\Omega = \frac{\sigma}{R^2}$.

Поток, посылаемый источником в этот телесный угол, обозначим через Φ . Тогда сила света $I = \frac{\Phi}{\Omega} = \Phi \frac{R^2}{\sigma}$. Освещенность $E = \frac{\Phi}{\sigma}$, тогда $I = E \cdot R^2$.

Отсюда $E = \frac{I}{R^2}$ т. е. освещенность площадки равна силе света, деленной на квадрат расстояния до точечного источника.

Освещенность пропорциональна силе света и обратно пропорциональна квадрату расстояния до точечного источника (первый закон освещенности).

Закон выполняется вполне строго для точечных источников света. Сравнивая освещенности площадок, расположенных на разных расстояниях R_1 и R_2 от точечного источника, найдем

$$E_1 = \frac{I}{R_1^2} \text{ и } E_2 = \frac{I}{R_2^2} \text{ и т. д. или}$$

$$E_1/E_2 = R_2^2/R_1^2, \quad (6)$$

т. е. освещенность обратно пропорциональна квадрату расстояния от площадки до точечного источника. Это так называемый закон обратных квадратов.

Если бы площадка σ была расположена не перпендикулярно к оси потока, а повернута на угол α , то она имела бы размеры $\sigma = \sigma_0/\cos \alpha$ (рис. 5), где σ_0 – площадка, пересекающая тот же телесный угол перпендикулярно к оси пучка, так что $\Omega = \sigma_0/R^2$.

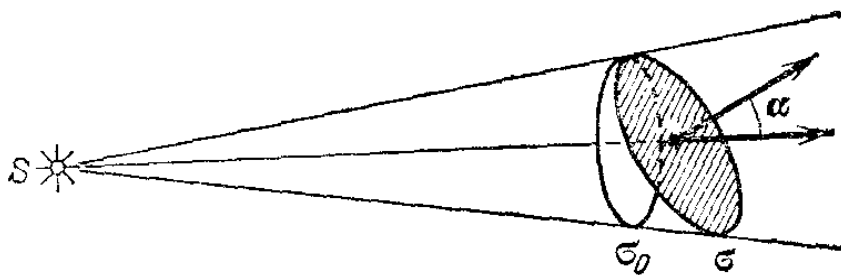


Рис. 5. Зависимость освещенности площадки σ от угла падения светового потока

Предположим, что площадки σ и σ_0 настолько малы и столь удалены от источника, что для всех точек этих площадок расстояние до источника может считаться одинаковым (R) и лучи во всех точках составляют с перпендикуляром к площадке σ один и тот же угол α (угол

падения), образуемый перпендикуляром к площадке с направлением светового потока.

В таком случае освещенность площадки σ равна:

$$E = \frac{\Phi}{\sigma} = \frac{\Phi \cos \alpha}{\sigma_0} = \frac{\Phi \cos \alpha}{\Omega R^2} = \frac{I \cdot \Omega \cdot \cos \alpha}{\Omega \cdot R^2} = \frac{I \cos \alpha}{R^2}. \quad (7)$$

Освещенность, создаваемая точечным источником на некоторой площадке, равна силе света, умноженной на косинус угла падения света на площадку и деленной на квадрат расстояния до источника. *Освещённость поверхности пропорциональна косинусу угла падения лучей (второй закон освещённости).*

Закон обратных квадратов соблюдается вполне строго для точечных источников. Если размеры источника не очень малы по сравнению с расстоянием до освещаемой поверхности, то соотношение (6) не будет верно и освещенность убывает медленнее, чем по закону I/R^2 . Если размеры светящейся поверхности велики по сравнению с R , то освещенность практически не меняется при изменении R . Чем меньше размеры источника d по сравнению с R , тем лучше выполняется закон обратных квадратов. При соотношении $\frac{d}{R} \leq \frac{1}{10}$ расчеты изменения освещенности по формуле (6) дают вполне хорошее согласие с наблюдением. Закон обратных квадратов можно считать практически выполняющимся, если размеры источника не превышают 0,1 расстояния до освещаемой поверхности.

Приведем значения освещенности для некоторых типичных случаев (табл. 2).

Таблица 2

Освещенность (в люксах) в некоторых типичных случаях

Освещенность под прямыми солнечными лучами в полдень (средние широты)	100 000
Освещенность при киносъемке в ателье	10 000
Освещенность на открытом месте в пасмурный день	1000
Освещенность в светлой комнате не очень далеко от окна	100
Освещенность на рабочем столе для тонких работ	100–200
Освещенность необходимая для чтения	30–50
Освещенность на экране кинотеатра	20–80
Освещенность от полной Луны	0,2
Освещенность от ночного неба в безлунную ночь	0,0003

С открытием лазеров, обладающих высокой интенсивностью, появилась возможность создавать значительно большие освещенности, правда, в течение очень малых промежутков времени.

5. Яркость источников и освещенных поверхностей

Источники света, которые были рассмотрены, являлись точечными. В реальности источники света обычно протяженные, т. е. если рассматривать их с заданного расстояния, то можно различить их форму и размеры.

Для характеристики протяженных источников даже в том простейшем случае, когда они представляют собой равномерно светящиеся шарики, — недостаточно одной величиной — силы света. Представим себе два светящихся шарика, испускающих свет равномерно во все стороны и имеющих одинаковую силу света, но разный диаметр. Освещенность, создаваемая каждым из этих шариков на одинаковом расстоянии от их центра, будет одинакова. Однако по своему виду эти шарики будут представлять сильно различающиеся источники света: маленький шарик оказывается более ярким, чем большой. Это происходит вследствие того, что при одинаковой силе света излучающая поверхность одного шарика больше, чем второго, и сила света, испускаемого с единицы площади источника, в том и другом случаях различна. Когда рассматривается какой-либо источник света, имеет значение не площадь самой излучающей поверхности, а размеры видимой поверхности, т. е. проекции излучающей поверхности на плоскость, перпендикулярную к направлению наблюдения (рис. 6).

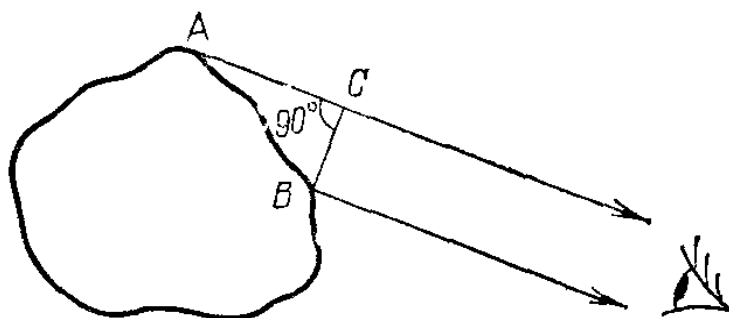


Рис. 6. Соотношение между действительной величиной (AB) и поверхностью, излучающей поверхности и видимой по данному направлению (BC)

Для характеристики свойств протяженного источника света нужно знать силу света, рассчитанную на единицу площади видимой поверхности источника.

Эта световая величина называется *яркостью* источника, которую обозначим буквой L . Если источник имеет силу света I и площадь видимой светящейся поверхности его есть σ , то яркость этого источника равна

$$L = \frac{I}{\sigma}. \quad (8)$$

Пользуясь формулой (3), имеем также

$$L = \frac{\Phi}{\Omega \sigma}, \quad (9)$$

т. е. получаем, что *яркость источника равна световому потоку, испускаемому с единицы площади видимой поверхности источника внутри единичного телесного угла.*

Яркость зависит от площади поверхности источника. Например, различные участки пламени свечи, лампы и т. п. имеют сильно различающиеся яркости. Кроме того, яркость зависит от величины телесного угла, т. е. от направления, в котором происходит излучение источника, так как сила света многих источников зависит от направления. Например, электрическая дуга по некоторым направлениям совсем не посылает света (рис. 7). Яркость является характеристикой излучения *различных участков поверхности* источника в заданном направлении. Одновременно яркость имеет большое значение, потому что это – та световая величина, на которую непосредственно реагирует глаз.

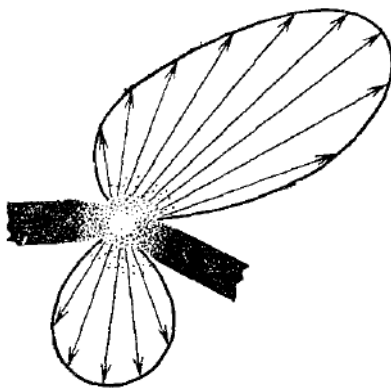


Рис. 7. Яркость электрической дуги в зависимости от направления излучения

Единицей яркости является *кандела на квадратный метр*. Эта яркость, которой обладает светящаяся площадка, дающая с каждого квадратного метра силу света, равную 1 кд в направлении, перпендикулярном к площадке.

Характеристики яркости различных светящихся тел приведены в табл. 3.

Таблица 3

Яркость некоторых источников света (в кд/м²)

Яркость Солнца	150000
Яркость капилляра ртутной дуги сверхвысокого давления	120000–150000
Яркость кратера угольной дуги	15000
Яркость металлического волоска лампы накаливания	150–200
Яркость пламени керосиновой лампы	1,5
Яркость пламени стеариновой свечи	0,5
Яркость ночного безлунного неба	10^{-8}
Наименьшая различимая глазом яркость	10^{-10}

Источники света с большой яркостью (свыше $1,6 \times 10^5$ кд/м²) вызывают болезненное ощущение в глазу. Для предохранения глаз от яркого света источников применяют различные приспособления. Например, колба лампочки с нитью накаливания делают из матового или молочного стекла.

Экраны кинотеатров и аудиторий, окрашенные потолки, стены, декорации и т. д. представляют собой диффузно отражающие поверхности (рис. 8).

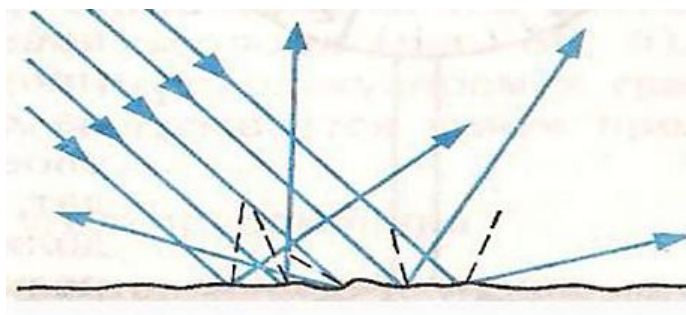


Рис. 8. Диффузное отражение

Диффузное отражение – это отражение светового потока, падающего на поверхность, при котором отражение происходит под углом, отличающимся от падающего.

Диффузным отражение становится в том случае, если неровности поверхности имеют порядок длины волны (или превышают её) и расположены беспорядочно. Такие поверхности при освещении представляют собой протяженные источники с большими поверхностями и с умеренной яркостью.

Яркость такой освещенной поверхности будет пропорциональна силе света по формуле (8), следовательно, пропорциональна ее освещенности. Чем больше освещенность, тем больше будет и поток,

отраженный этой поверхностью, следовательно, и яркость освещенной поверхности. Значения яркости некоторых освещенных поверхностей (табл. 4), с которой часто приходится встречаться в жизни.

Таблица 4

Яркость некоторых освещенных поверхностей (в кд/м²)

Яркость экрана в кинотеатре	От 5 до 20
Яркость листа белой бумаги при освещенности, достаточной для письма (0–50 лк)	От 10 до 15
Яркость снега под прямыми лучами Солнца	3000
Яркость поверхности Луны	2500

6. Световые измерения и измерительные приборы

Измерение световых величин может производиться непосредственно с помощью глаза (визуальные субъективные методы) или с помощью фотоэлемента, или термостолбика (объективные методы).

Приборы, служащие для измерения световых величин, называются фотометрами.

Измерения, проводимые с помощью глаз (визуально), основаны на свойстве глаз хорошо устанавливать равенство яркостей двух смежных поверхностей. Однако с помощью глаза трудно оценить, во сколько раз яркость одной поверхности больше яркости второй. Поэтому во всех визуальных фотометрах роль глаза сводится к установлению равенства яркостей двух смежных площадок, освещаемых сравниваемыми источниками. Сравнимые поверхности делаются диффузно отражающими, равенство их яркостей соответствует равенству освещенностей. Установив равенство освещенностей обеих площадок, и зная, во сколько раз ослаблен свет одного из источников, можно количественно сравнить силы света обоих источников. Во всех фотометрах должны быть два смежных световых поля, которые освещены только разными источниками света. Сравнимые поля могут иметь различную форму. В основном это два смежных полукруга (рис. 9 а) или два концентрических круга (рис. 9 б). При измерении оба сравниваемых поля необходимо освещать каждое своим источником под одним и тем же углом. При этом необходимо расположить глаза так, чтобы оба поля оказались под одинаковыми углами зрения.

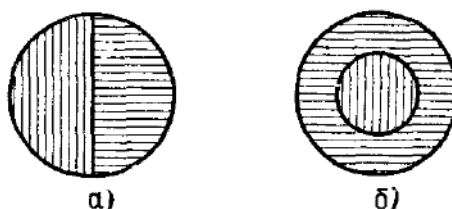


Рис. 9. Форма сравниваемых полей в фотометре

На рис. 10 показано устройство одного из простейших фотометров. Простой фотометр был предложен немецким физиком и химиком Робертом Бунзеном (1811–1899). Свет от сравниваемых источников S_1 и S_2 падает на белые грани призмы ABC , помещенной внутри зачерненной трубки. Глаз наблюдателя рассматривает призму по направлению CO .

В фотометре световое поле представляет собой экран из белой бумаги, в середине которого небольшая часть поверхности промаслена и благодаря этому просвечивает. Масляное пятно должно иметь резкие края. Два источника света помещаются по обе стороны от экрана и путем ослабления одного из них добиваются, чтобы масляное пятно и остальная часть экрана сделались одинаково яркими.

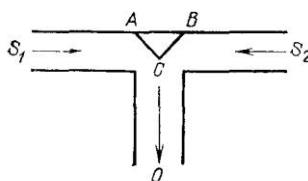


Рис. 10. Устройство простейшего фотометра

На этом принципе построены более совершенные фотометры. Чтобы получить одинаковую освещенность обеих площадок фотометра, изменяют расстояния сравниваемых источников от фотометра.

Необходимым условием является применение закона обратных квадратов, т. е. освещенность площадки пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату его расстояния от площадки.

Из равенства освещенности обеих площадок фотометра получаем: $\frac{I_1}{R_1^2} = \frac{I_2}{R_2^2}$, где I_1 и I_2 — силы света, а R_1 и R_2 — расстояния от источников до фотометра. Измерив R_1 и R_2 , можно определить, во сколько раз сила света одного источника больше или меньше силы света другого. К недостатку этого метода можно отнести небольшие границы при-

менения, связанные с практическими возможностями изменения расстояния R_1 и R_2 .

Другой способ ослабления светового потока от одного из источников состоит в том, что на пути потока вводится поглощающее тело. В качестве поглощающего тела используются два скользящих друг относительно друга клина, сделанных из материала, поглощающего свет (рис. 11). Передвигая эти клинья, изменяют толщину поглощающего слоя, из-за чего меняется степень поглощения светового потока. Применяя этот способ, перед работой необходимо проводить градуирование ослабителя, т. е. установить, насколько меняется поглощение при смещении клина на определенное расстояние.

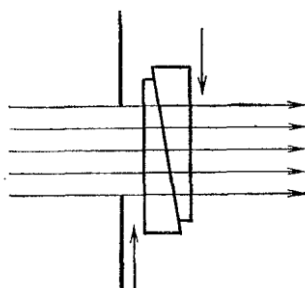


Рис. 11. Устройство для ослабления светового потока

Существуют фотометры, приспособленные для непосредственного измерения освещенности, такие фотометры называются *люксметрами*.

Главное воспринимающее свет устройство в фотометрах – фотоэлемент. Под действием света фотоэлемент дает электрический ток, причем его величина прямо пропорциональна освещенности, если вся поверхность фотоэлемента равномерно освещена. Измерив ток, протекающий через гальванометр, соединенный с фотоэлементом, можно определить освещенность поверхности.

На рис. 12 представлен схематически люксметр и внешний вид современного люксметра.

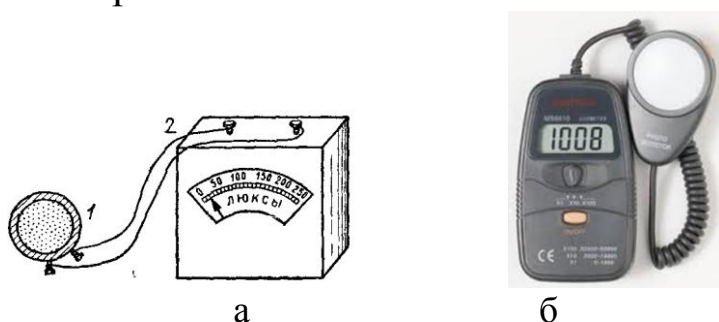


Рис. 12. а – схема люксметра: 1–фотоэлемент; 2 – гальванометр со шкалой, градуированной в люксах; б – внешний вид современного люксметра

Для измерения освещенности с помощью этого прибора достаточно положить фотоэлемент на поверхность, освещенность которой хотят определить, и сделать отсчет по шкале. Фотоэлектрические люксметры очень удобны в работе и позволяют быстро и без утомления проводить измерения (рис. 12 б).

Часто фотоэлемент и гальванометр заключают в общий футляр. Такие люксметры применяются для определения освещенности фотографируемого объекта и, следовательно, для правильного выбора времени экспозиции. Они называются экспонометрами (рис. 13).

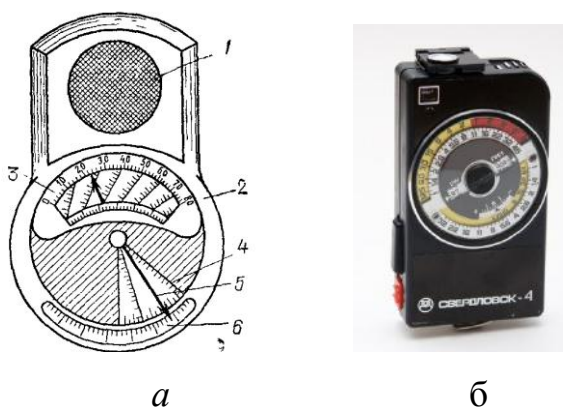


*Рис. 13. а – простейший экспонометр;
б – внешний вид современного экспонометра*

Шкала гальванометра, проградуированная в продолжительностях экспозиции, нанесена на полуокружности вращающегося кольца 3. На секторе 4, вращающемся вместе с кольцом 3, нанесены деления, соответствующие чувствительности применяемых фотоматериалов. Указатель 5 устанавливается на деление неподвижной шкалы 6, соответствующее диаметру применяемой при съемке диафрагмы; кольцо 3 вращается до совпадения с указателем 5 нужного деления на секторе 6. Тогда стрелка гальванометра указывает экспозицию, нужную для съемки с выбранной диафрагмой при данных фотоматериалах.

Лекция 8. Геометрическая оптика

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Прямолинейное распространение света и световые лучи.
2. Законы отражения и преломления света.
3. Показатель преломления.
4. Полное отражение.

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и законы его отражения от зеркальных поверхностей на основе представления о световом луче.

Одним из основных положений геометрической оптики является положение о прямолинейности распространения света.

1. Прямолинейное распространение света и световые лучи

В однородной среде свет распространяется вдоль прямых линий. Например, если поместить между глазом и каким-нибудь небольшим источником света непрозрачный предмет, то источник света делается невидимым. Объясняется это тем, что в *однородной* среде (например, в воздухе) *свет распространяется по прямым линиям*. Прямолинейность распространения света представляет собой опытный факт, установленный ещё в глубокой древности. Закон о прямолинейности распространения света излагается уже в сочинении Евклида (300 лет до нашей эры), но, возможно, он был известен гораздо раньше.

Образование тени объясняется также прямолинейностью распространения света в однородной среде (рис. 1).

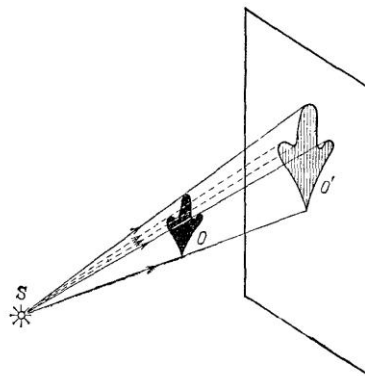


Рис. 1. Образование тени

S очень маленький по размеру источник света, а O — тело, преграждающее путь падающему на него от S свету. Так как свет распро-

страняется прямолинейно, то он задерживается телом O , в результате за этим телом образуется конус тени. Каждая точка внутри этого конуса не получает света от источника света S . Поэтому на экране, помещённом под прямым углом к оси такого конуса, и получается хорошо очерченная тень тела O' .

При освещении предмета точечным источником получается резкая тень, форма которой подобна форме некоторого сечения предмета, параллельного плоскости экрана; размеры же тени определяются взаимным расположением источника, предмета и экрана в полном соответствии с проецированием при помощи прямых линий.

Наблюдающиеся иногда нерезкие тени (полутени) объясняются не отступлением направления распространения света от прямолинейности, а конечными размерами источника света (рис. 2).

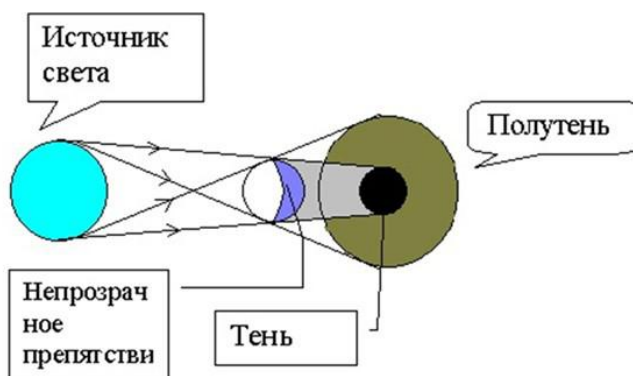


Рис. 2. Образование тени и полутени

Всем известен способ, применяемый столярами, проверки «по лучу» прямолинейности кромки отстроганной доски.

Если размеры источника света велики по сравнению с расстоянием от него до препятствий, то свет от каждой точки тела дает отдельный конус тени позади препятствия. Свет совершенно не попадает лишь в пространство, общее всем этим конусам тени.

На рис. 3 показано сечение конусов тени, образованных за телом M .

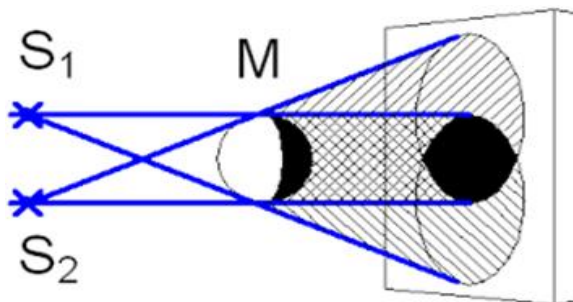


Рис. 3. Непрозрачное тело, освещаемое двумя светящимися точками, даёт тень и полутень

В пространство, где свет не попадает ни от одной из точек светящихся тел S , увидим тень. Каждая точка пространства, окружающего конус, получает свет только от некоторых точек источников S_1 и S_2 , от других не получает, и видна полутень, окружающую тень.

Образование тени при падении лучей от источника света на непрозрачный предмет объясняет нам такие явления, как затмение Солнца и Луны (рис. 4).

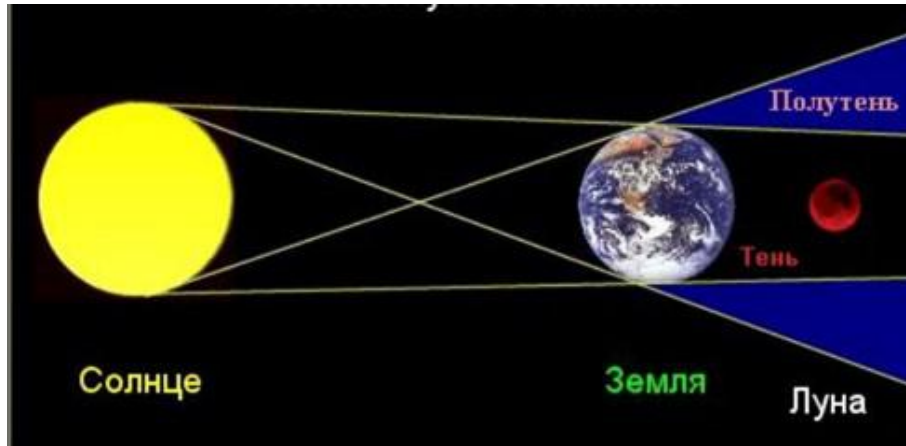


Рис. 4. Лунное затмение

Прямолинейностью распространения света объясняется возможность получения изображений с помощью малого отверстия. Положим, что A представляет собой светящийся предмет, помещенный перед малым отверстием в стенке камеры (рис. 5). Так как свет распространяется прямолинейно, то от каждой точки предмета A через отверстие будет проходить свет, который на стенке камеры образует небольшое пятнышко. Совокупность таких пятнышек, полученных от разных точек, образует на стенке камеры изображение B предмета, которое по отношению к предмету будет перевернутым.

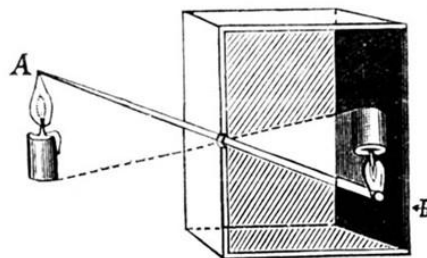


Рис. 5. Получение изображения с помощью малого отверстия

Если в затемненной комнате поставить внутри темного ящика с несколькими отверстиями (размеры отверстий еще очень велики по сравнению с длиной световой волны) яркую лампочку с маленькой нитью, то путь выходящего света отразится в запыленном воздухе в виде расходящихся в разные стороны узких пучков (рис. 6). Отметив

на стене ящика положение лампы, без труда можно заметить, что пучки эти пересекаются в том месте, где находится нить лампы. *Световым лучом называется то направление, по которому распространяется свет.* Так как светящаяся точка испускает свет по всем направлениям, то любая прямая, проведенная из этой точки, представляет световой луч. *Называем лучом геометрическую линию, указывающую направление распространения света, а не сами световые пучки.*

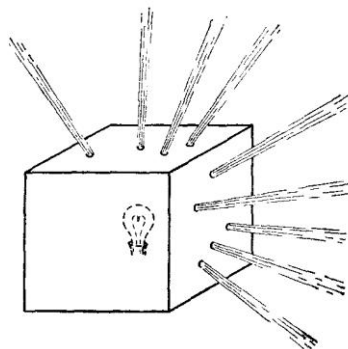


Рис. 6. Пучки, выделенные из сферической световой волны

Конечно, чем уже световой пучок, тем легче и точнее с его помощью отыскать направление распространения света, т. е. определить световой луч. Однако нельзя осуществить бесконечно узкий световой пучок. Уменьшая размеры отверстия, ограничивающего пучок, можем уменьшить ширину пучка лишь до известных пределов. Дальнейшее уменьшение отверстия не только не приводит к уменьшению сечения пучка, а, наоборот, ведет, как показывает опыт, к расширению его.

Для световых волн это явление можно наблюдать, получая изображение с помощью малого отверстия (так называемая «дырочная камера»). Наблюдения показывают, что закон прямолинейного распространения света соблюдается только при известных условиях.

Соответствующий опыт изображен на рис. 7. На матовом стекле (или фотопластинке), прикрывающем заднюю стенку «дырочной камеры», получается перевернутое изображение расположенного перед ней ярко освещенного объекта (например, нить лампы накаливания). Изображение хорошо воспроизводит форму предмета и не зависит от формы отверстия, если отверстие достаточно мало.



Рис. 7. Изображение предмета в «дырочной камере»

От каждой точки источника через отверстие проходит узкий световой пучок. Этот пучок дает на экране небольшое пятнышко, воспроизводящее форму отверстия. Свет от всего источника в целом дает на экране картину, нарисованную такими светлыми пятнышками, накладывающимися друг на друга. Если размер отверстия таков, что отдельные пятнышки превосходят детали картины, то она получится размытой, плохо передающей объект. Но при достаточно малых размерах отверстия размеры пятнышек будут меньше деталей картины, и изображение получится вполне удовлетворительное (рис. 8) Эту камеру называют камерой-обскурой (рис. 9). (Это свойство используется при фотографировании. Размер отверстия (диафрагма) определяет резкость снимка: чем больше отверстие, тем более размытыми получаются предметы вне фокуса (на заднем плане).

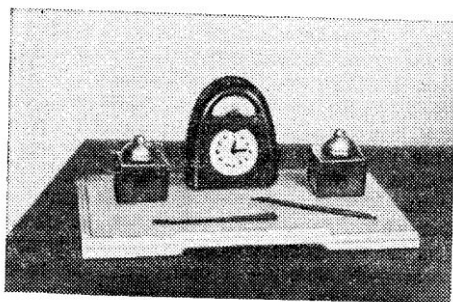


Рис. 8. Фотография, полученная с помощью дырочной фотокамеры



Рис. 9. Камера-обскура

На рис. 10 изображена схема действия «дырочной камеры» и вид изображений, полученных при разных размерах отверстия. Улучшение изображения при уменьшении размеров отверстия наблюдается лишь до известного предела. При дальнейшем уменьшении отверстия резкость картины начинает ухудшаться (рис. 10 г). При очень малых отверстиях изображение совсем теряет сходство с источником. Этот опыт показывает, что светлые пятнышки, которые рисуют отдельные точки источника, при малых размерах отверстия расширяются настолько, что превосходят детали картины, которая размывается тем

больше, чем меньше отверстие. Но так как эти пятнышки есть следы световых пучков, вырезаемых отверстием, то опыт обнаруживает расширение светового пучка при чрезмерном уменьшении отверстия. Нельзя физически выделить сколь угодно узкий пучок. Необходимо ограничиться выделением по возможности узких световых пучков конечной ширины и заменить их затем линиями, представляющими как бы оси этих пучков. Таким образом, световые лучи являются геометрическим понятием.

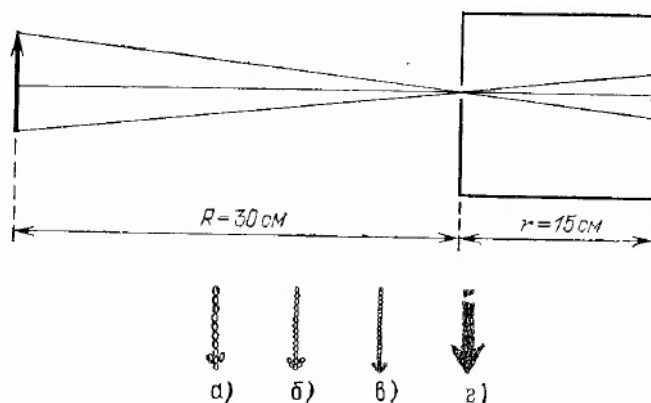


Рис. 10. Фотография, полученная «дырочной камерой». Действия дырочной камеры (вверху) и изображения источника света при разных размерах отверстий (внизу) – а) диаметр отверстия около 3 мм; б) около 1 мм; в) около 0,5 мм; г) около 0,03 мм

Метод оптики лучей или, как ее называют, геометрической, или лучевой, оптики является приближенным приемом решения, совершенно достаточным для разбора определенного круга вопросов. Поэтому одна из задач изучения оптики состоит в приобретении умения правильно использовать метод лучей и устанавливать границы его применения.

2. Законы отражения и преломления света

Большинство видимых тел не являются источниками света и видимы только в том случае, если на них попадает свет от какого-либо источника. Но видеть предметы можно только тогда, когда в глаз попадают лучи света. Приходим к выводу, что освещенные тела отражают свет. Наблюдают рассеянное (диффузное) отражение и зеркальное. При рассеянном отражении от предмета лучи распространяются по в разных направлениях, вследствие чего предмет мы видим со всех сторон (рис. 11). Диффузно отражающую поверхность можно представить в виде элементарных плоскостей, различно расположенных и пересекающихся под различными углами.

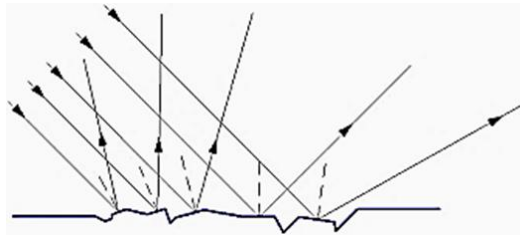


Рис. 11. Рассеянное (диффузное) отражение света от неровной поверхности

Если падающий на тело параллельный пучок лучей света отражается в одном определенном направлении, то в этом случае говорят о зеркальном отражении (рис. 12). Зеркально отражают свет, например, тщательно отполированные металлы.

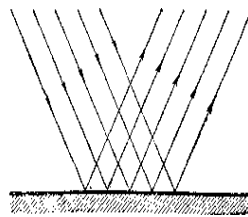


Рис. 12. Отражение света от зеркальной поверхности

Благодаря рассеянному свету, хотя и слабому, видим отовсюду очень хорошие зеркала, которые должны были бы отражать свет только по одному направлению и поэтому быть заметными только по одному определенному направлению. Рассеянный свет возникает в этом случае из-за мелких дефектов поверхности, царапин, пылинок и т. д. Для того чтобы имело место зеркальное отражение или преломление, поверхность тела должна быть достаточно гладкой (не матовой), а его внутренняя структура — достаточно однородной (не мутной). Это означает, что неровности поверхности, равно как и неоднородности внутреннего строения, должны быть достаточно малы. Выражение «достаточно мало» или «достаточно велико» означает малое или большое по сравнению с какой-то другой физической величиной, имеющей значение для изучаемого явления. В данном случае такой величиной является длина световой волны. Ограничимся указанием, что длина световой волны зависит от окраски светового пучка и имеет значение от 400 нм (для фиолетового цвета) до 760 нм (для красного цвета). Это означает, что для того чтобы поверхность была оптически гладкой, а тело оптически однородным, необходимо, чтобы неровности и неоднородности были значительно меньше микрометра.

Рассмотрим случай, когда поверхность тела плоская. Примером плоской поверхности может служить граница раздела воздуха и какой-нибудь жидкости в широком сосуде. Соответствующая полировка

твердых тел также позволяет получать весьма плоские поверхности, среди которых металлические поверхности выделяются своей способностью отражать много света. Из стекла легко можно сделать плоские пластинки, которые затем покрываются слоем металла, в результате чего получаются обычные зеркала.

Рассмотрим простой опыт. Направим, например, узкий пучок лучей на поверхность воды в большом сосуде (рис. 13). Получается, что часть света отразится от поверхности воды, другая часть пройдет из воздуха в воду. На опыте видно, что вошедший в воду луч не является простым продолжением луча, падающего на границу раздела, а испытывает преломление.

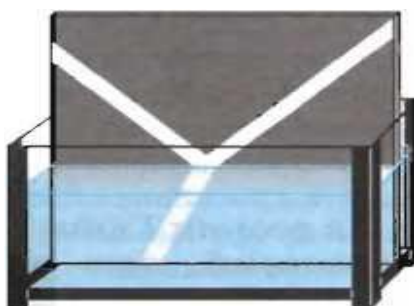


Рис. 13. Преломление и отражение света при падении луча на поверхность воды

Рассматривая данное явление, обратим внимание, во-первых, на направления отраженного и преломленного лучей и, во – вторых, доля отраженной световой энергии и энергии, прошедшей из первой среды во вторую.

Отраженный и преломленный лучи. Направим на поверхность зеркала луч света к центру O . Отразившись от поверхности, он пойдет симметрично относительно перпендикуляра NO в точке падения (рис. 14). Этот результат повторяется для любого угла падения. Установленный результат можно формулировать в виде следующего закона отражения света: *луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр к отражающей поверхности лежат в одной плоскости.*

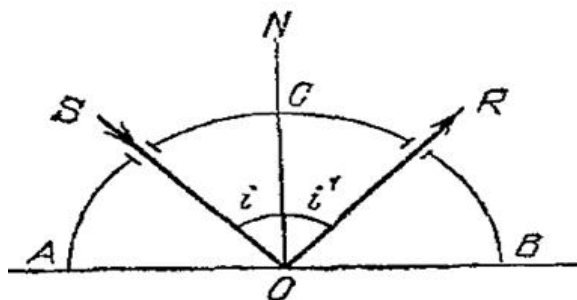


Рис. 14. Измерение угла отражения в одной плоскости, причем угол отражения луча равен углу падения

Таким образом, отражение света происходит по следующим законам:

Отраженный луч лежит в той же плоскости, в которой лежат падающий луч и перпендикуляр к отражающей поверхности, восставленный в точке падения луча.

Угол отражения равен углу падения.

Если падающий луч идет по направлению RO , то, строя ход отраженного луча согласно сформулированным выше законам отражения, найдем, что отраженный луч пойдет по OS . Следовательно, *падающий и отражённый лучи света взаимнообратимы.*

На границе двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, т. е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, также меняя при этом, как правило, направление распространения. Это явление называется преломлением света. Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. Например, установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если посмотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону (рис. 15).



Рис. 15. Наблюдение преломления

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред – преломлением света (рис. 16).

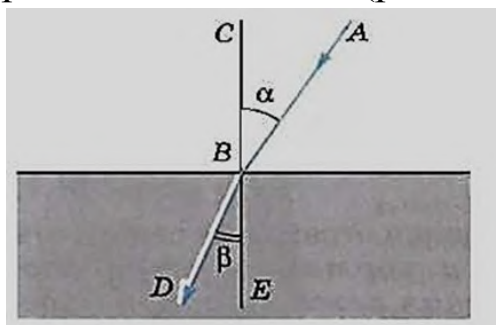


Рис. 16. Преломление света

Измерение угла, образуемого преломленным лучом с перпендикуляром к поверхности раздела (угла преломления), можно проделать тем же способом, какой мы использовали при измерении угла отражения.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча AB , преломленного луча DB и перпендикуляра CE к поверхности раздела сред, восстановленного в точке падения.

Угол α называется углом падения, а угол β – углом преломления. Точные измерения угла падения α и угла преломления β приводят к следующему закону преломления: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр к поверхности раздела лежат в одной плоскости. Угол падения и угол преломления связаны соотношением

$$\sin \alpha / \sin \beta = n, \quad (1)$$

где показатель преломления n есть постоянная величина, не зависящая от угла падения и определяющаяся оптическими свойствами граничащих сред, которая называется *относительным показателем преломления второй среды относительно первой*.

Преломление света происходит по следующим законам:

1. Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред.

Первые попытки найти закон преломления были сделаны известным александрийским астрономом Клавдием Птолемеом (умер около 168 г.) почти два тысячелетия назад. Однако точность измерений в то время была еще недостаточно высока, и Птолемей пришел к выводу, что отношение углов падения и преломления при заданных средах остается постоянным. Заметим, что для получения правильной зависимости между углом падения и углом преломления нужно измерять эти углы с точностью до нескольких минут; это особенно существенно при небольших углах падения и преломления. При грубых измерениях при небольших углах вместо постоянства отношения синусов углов легко прийти к неправильному выводу о постоянстве отношения самих углов, как и случилось с Птолемеом. В правильной форме закон преломления был установлен только спустя полторы ты-

сячи лет после Птолемея голландским физиком Виллебрордом Снеллиусом (1591–1626) и, по-видимому, независимо от него французским физиком и математиком Рене Декартом (1596–1650).

2. Количество *отраженной световой энергии*. Изображение нашего лица в хорошем зеркале всегда более светлое, чем, например, в поверхности воды озера или колодца. Это связано с тем, что не вся световая энергия, падающая на границу раздела двух сред, отражается от нее: часть света проникает через границу раздела во вторую среду и проходит через нее насквозь или частично поглощается в ней. Доля отраженной световой энергии зависит от оптических свойств, граничащих между собой сред и от угла падения. Если свет падает на стеклянную пластинку перпендикулярно к ее поверхности (угол падения равен нулю), то отражается всего только около 5 % световой энергии, а 95 % проходит через границу раздела. При увеличении угла падения доля отраженной энергии возрастает.

Таблица 1

Доля отраженной энергии при различных углах падения света на поверхность стекла

Угол падения	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	89°	90°
Доля отраженной энергии (в %)	4,7	4,7	4,7	4,9	5,3	6,6	9,8	18	39	100
Доля прошедшей-энергии (в %)	95,3	95,3	95,3	95,1	94,7	93,4	90,2	82	61	0

Закон преломления света был установлен опытным путем в XVII в. Выведем его с помощью принципа Гюйгенса (рис. 17).

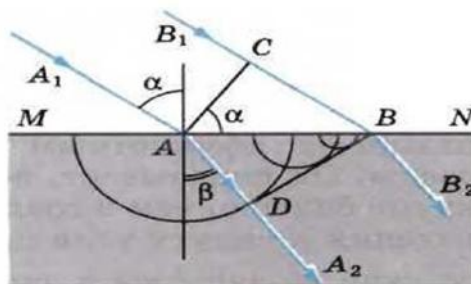


Рис. 17. К объяснению преломления на основании принципа Гюйгенса

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано различием в скоростях распространения света в той и другой среде. Обозначим скорость волны в первой среде через V_1 , а во второй через V_2 . Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, из воздуха в воду) падает плоская световая волна. Обозначим через AC

фронт волны в тот момент, когда волна достигнет точки A . Луч B_1B достигнет границы раздела двух сред спустя время Δt : $t = \frac{CB}{V_1}$.

Когда волна достигнет точки B , вторичная волна во второй среде от источника, находящегося в точке A , уже будет иметь вид полусферы радиусом $AD = V_2 \cdot \Delta t$.

Фронт преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем фронтам вторичных волн во второй среде, источники которых находятся на границе раздела сред. В данном случае это плоскость BD . Она является огибающей вторичных волн. Угол падения α луча A_1A равен углу CAB в треугольнике ABC (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Следовательно,

$$CB = V_1 \cdot \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (2)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD . Поэтому

$$AD = V_2 \cdot \Delta t = AB \cdot \sin \beta. \quad (3)$$

Разделив почленно уравнение (2) на уравнение (3), получим

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} = n,$$

где n – постоянная величина, не зависящая от угла падения.

3. Показатель преломления

Из принципа Гюйгенса не только следует закон преломления, но с помощью этого принципа раскрывается физический смысл показателя преломления. Он равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{V_1}{V_2}. \quad (4)$$

Показатель преломления зависит от оптических свойств и той среды, из которой луч падает, и той среды, в которую он проникает.

Показатель преломления, полученный в том случае, когда свет из вакуума падает на какую-либо среду, называется *абсолютным показателем преломления данной среды*. Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в среде, и равен

$$n = \frac{c}{v}. \quad (5)$$

Если угол преломления β меньше угла падения α , то по уравнению (1) скорость света во второй среде меньше, чем в первой, т. е. $V_1 > V_2$.

Пользуясь формулой (5), можно выразить относительный показатель преломления через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред.

Действительно, так как $n_1 = \frac{c}{v_1}$ и $n_2 = \frac{c}{v_2}$, где c – скорость света в вакууме, то

$$n = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть *оптически менее плотной средой*.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физических свойств и состояния среды, т. е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от длины волны света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого меньше, чем для фиолетового. Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывают, для какого света приведено данное значение и при каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от приведенных факторов можно пренебречь.

Значения показателей преломления для некоторых веществ относительно воздуха приведены ниже в таблице (данные относятся к желтому свету).

Таблица 2

**Значения показателей преломления для некоторых веществ
относительно воздуха**

Вещество	Показатель преломления относительно воздуха
Вода (при 20 °С)	1,33
Кедровое масло (при 20 °С)	1,52
Сероуглерод (при 20 °С)	1,63
Лед	1,31
Каменная соль	1,54
Кварц	1,76
Рубин	2,42

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух – твердое тело или воздух – жидкость, а не через границу вакуум – среда. Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтого света равен примерно $n_1 \sim 1,000292$. Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \quad (7)$$

4. Полное отражение

Рассмотрим подробнее случай перехода света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную.

Пусть на границу MN стекло – воздух из стекла падает расходящийся пучок света. Определим его тремя лучами – двумя крайними I и III и осевым II (рис. 18 а). У границы часть пучка отразится в стекло, часть перейдет в воздух. Будем постепенно увеличивать угол падения. Мы заметим, что по мере возрастания угла падения яркость отраженного пучка будет возрастать, а преломленного уменьшаться. При некотором угле падения луч I будет скользить по поверхности раздела (рис. 18 б). При увеличении угла падения то же произойдет и с осевым лучом – II и, наконец, с лучом III . При дальнейшем увеличении угла падения луча III преломленного пучка уже не будет, весь падающий пучок отразится в стекло (рис. 18 в). Такое явление называется *полным отражением*.

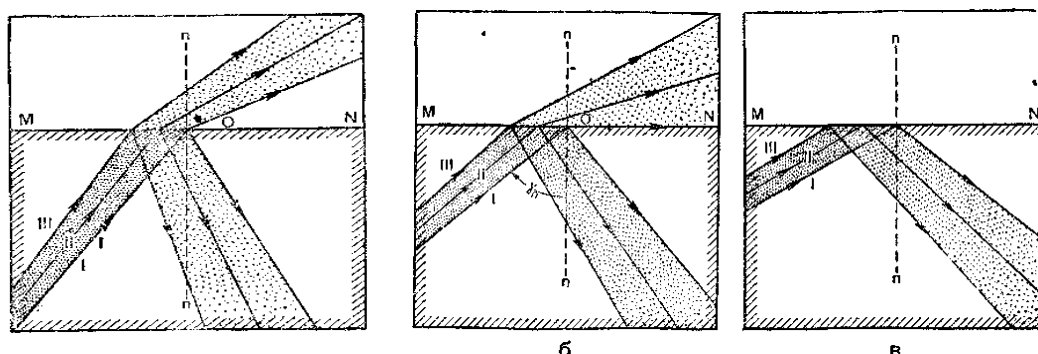


Рис. 18. Переход света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (на границе стекло – воздух), а) расходящийся пучок лучей света выходит из стекла в воздух; б) луч 1 скользит по поверхности раздела стекло – воздух; в) весь падающий пучок лучей света отражается в стекло

Наименьший угол падения, при котором наступает полное отражение, называется предельным углом полного отражения.

Полное отражение наблюдается при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную в том случае, если все лучи заданного пучка падают под углом, большим предельного.

Предельному углу падения γ_0 соответствует угол преломления, равный 90° . Пусть показатель преломления стекла относительно воздуха – n , тогда на основании закона преломления света и свойства обратимости луча можно написать: $\frac{\sin \gamma_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$ или $\sin \gamma_0 = \frac{1}{n}$.

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения γ_0 для воды ($n = 1,33$) равно $48^\circ 35'$, для стекла ($n = 1,5$) принимает значение $41^\circ 51'$, а для алмаза ($n = 2,42$) составляет $24^\circ 40'$. Во всех случаях второй средой является воздух.

Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Нальем в стакан воду и поднимем его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды, если рассматривать ее снизу сквозь стенку, кажется блестящей, словно посеребренной вследствие полного отражения света. Полное внутреннее отражение находит себе применение в устройстве стеклянных поворотных и оборачивающих призм, действие которых понятно из рис. 19. Предельный угол для призмы составляет $35\text{--}40^\circ$ в зависимости от показателя преломления данного сорта стекла; поэтому применение таких призм не встречает затруднений в отношении подбора углов входа и выхода световых лучей. Поворотные призмы с успехом выполняют функции зеркал и выгодны тем, что их отражающие свойства остаются неизменными, тогда как металлические зеркала тускнеют с течением времени из-за окисления металла. Оборачивающая призма проще по устройству эквивалентной ей поворотной системы зеркал (применяется в биноклях). Поворотные призмы применяются, в частности, в перископах.

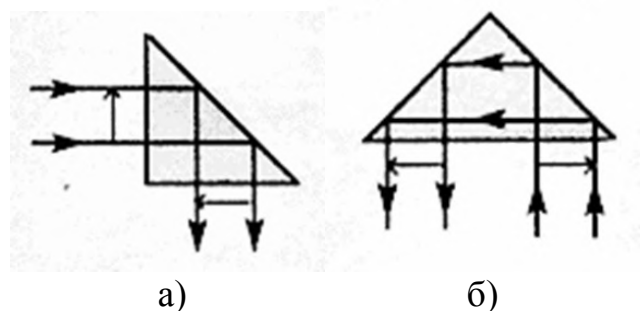


Рис. 19. Ход лучей в стеклянной поворотной призме (а), оборачивающей призме (б)

Явление полного отражения света используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон – *световодов*.

Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления (рис. 20).

За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути. Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передается какой-нибудь элемент изображения (рис. 21). Жгуты из волокон используются, например, в медицине для исследования внутренних органов.

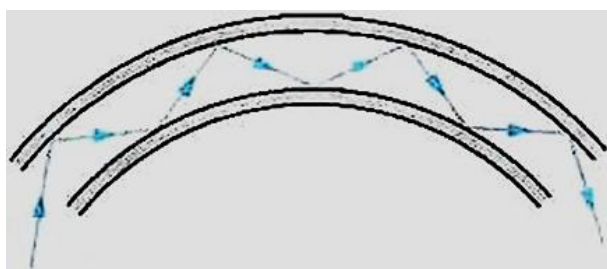


Рис. 20. Схема полного отражения в световоде

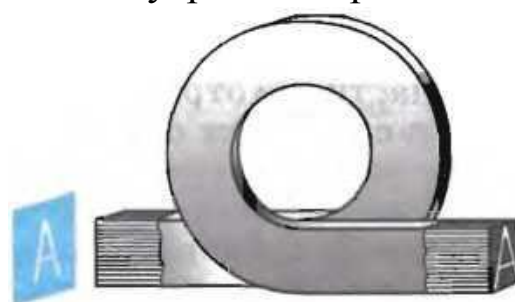


Рис. 21. Передача элемента изображения по волокну

Энергия, переносимая волной, следовательно, и передаваемый объем информации пропорциональны четвертой степени частоты. Частота же световых волн в 10^5 – 10^6 раз больше частоты радиоволн, поэтому с помощью световых волн можно передавать большой объем информации. В последнее время волоконная оптика широко используется для быстрой передачи компьютерных сигналов. По волоконному кабелю передается модулированное лазерное излучение.

Полное отражение света показывает, какие богатые возможности для объяснения явлений распространения света заключены в законе преломления. Вначале полное отражение представляло собой лишь любопытное явление. Сейчас оно привело к революции в способах передачи информации.

Лекция 9. Волновая оптика

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Интерференция света.
2. Дифракция света.
3. Дисперсия света. Цвет тел.
4. Поляризация света.

Ответ на вопрос о природе световых волн был получен на основании длинного ряда наблюдений над особенностями световых явлений. При этом представление о природе света менялось по мере того, как накапливались новые сведения и данные.

Волновые представления о природе света развивались еще в XVII в. Х. Гюйгенсом и поддерживались на протяжении XVIII в. Л. Эйлером, М. В. Ломоносовым и В. Франклином.

1. Интерференция света

Многие неоднократно любовались красивыми переливами цветов на поверхности весенних луж. Люди замечали, что такие же цветные полосы появляются на реке вблизи судов, когда на воде возникают пятна нефти или масла. Во всех этих явлениях обращает на себя внимание прихотливое расположение цветных полос и особенно их переливы, т. е. смена цветов при повороте головы наблюдателя. Явление сходно с игрой цветов на мыльных пузырях и, действительно, тождественно ему по своей физической природе.

Разнообразие цветов в описанных картинах связано с тем, что мы ведем наблюдение в белом свете. Поставим на пути света какое-нибудь цветное стекло, и мы убедимся, что вместо цветных полос будут наблюдаться полосы одного цвета, большей или меньшей яркости, разделенные темными промежутками. Форма и расположение полос при этом не изменяются. Если мы применим зеленое стекло, то полосы, имевшие при освещении белым светом зеленый тон, останутся практически неизменными, а красные полосы сделаются черными. Явление станет еще более отчетливым, если в качестве одноцветного (монохроматического) света воспользоваться пламенем горелки, в которое введен кусочек асбеста, смоченный раствором поваренной соли. Пламя окрашивается в желтый цвет благодаря излучению паров натрия, входящего в состав соли; цвет этот весьма однороден. Наблю-

даемая картина в этом свете будет состоять из ярко-желтых полос, постепенно переходящих в черные. Таким образом, картина состоит из чередования светлых полос, посылающих много света в глаз наблюдателя (максимумы), и темных полос, от которых к наблюдателю совсем не идет свет (минимумы).

В рассмотренных опытах имеем дело с явлениями, которые получили название интерференции волн – наложение двух волн ведет к перераспределению энергии, т. е. к образованию областей максимумов и минимумов энергии. Здесь проявилась способность света к интерференции, т. е. обнаружился волновой характер световых явлений. Это обстоятельство, при котором максимум для разных цветов приходится на различные места, показывает, что различным цветам соответствуют различные длины волн.

При интерференции волн происходит взаимное наложение двух волн или более волн с усилением и ослаблением колебаний.

Рассмотрим, что произойдет, если в некоторую точку пространства будут приходить волны *одинаковой длины*. Понаблюдаем это явление на примере волн, распространяющихся по поверхности воды. Будем непрерывно создавать волны на поверхности воды в двух каких-нибудь ее точках (рис. 1).

В результате получится картина, изображённая на рис. 1. Для получения интерференционной картины волн необходима их согласованность, т. е. чтобы при одинаковой длине волны выходили из центров колебания в одинаковых фазах, или, если они при возникновении сдвинуты по фазе (например, возникали в противоположных фазах), то сдвиг фаз со временем не должен меняться. Такие *волны* называются *когерентными*, т. е. волны, которые отличаются сдвигом фаз.

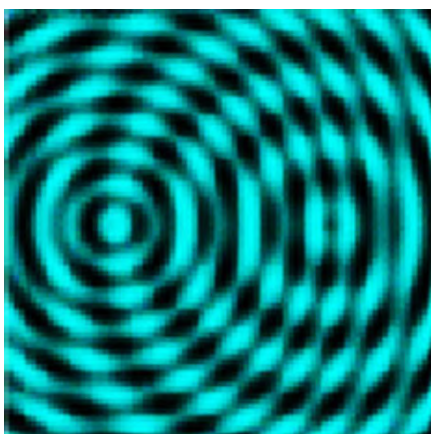


Рис. 1. Интерференция волн на воде

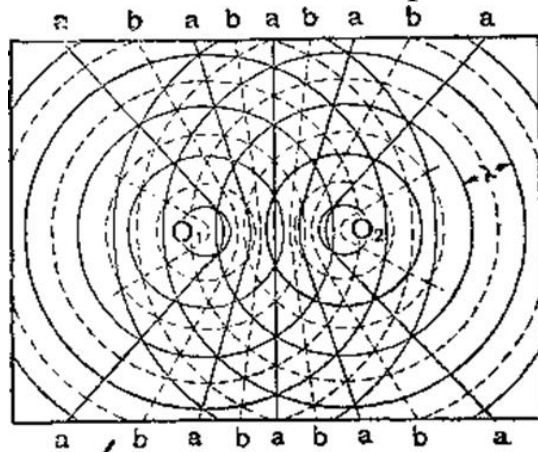


Рис. 2. Картина наложения когерентных волн

На рис. 2 показана картина наложения двух систем когерентных механических волн. Сплошными окружностями обозначены гребни волн, а пунктирными – впадины. Точки, где встречаются волны обеих систем в одинаковых фазах, впадина с патиной и гребень с гребнем, – точки усиленных колебаний (максимумы), расположены на сплошных линиях aa . Точки же ослабленных колебаний (минимумы), в которых встречается впадина одной волны с гребнем другой, расположены вдоль пунктирных линий bb .

При наличии когерентности волн картина чередования максимумов и минимумов будет устойчивой. В самом деле, если в данный момент в какой-либо точке встречаются гребень с гребнем, то через полпериода там же встретятся впадина с впадиной, а еще через полпериода опять гребень с гребнем и т. д., т. е. в данной точке все время будет максимум колебаний.

Сопоставляя построенную картину наложения когерентных волн с фотографией наложения волн на поверхности воды в описанном выше опыте, мы видим и на фотографии чередование максимумов и минимумов.

Такое чередование максимумов и минимумов амплитуд колебаний называется *интерференционной картиной*.

Явление наложения волн, образующее интерференционную картину, называется интерференцией волн.

Для решения вопроса о том, в каких фазах встретятся в данной точке интерферирующие волны, нужно учесть разность хода этих волн. Пусть нас интересует результат наложения волн в точке M (рис. 3), находящейся на расстоянии r_1 от первого источника волн S_1 и на расстоянии r_2 от второго источника S_2 . Расстояние $r_2 - r_1$ называется *разностью хода волн*. Если источники волн колебались в одинаковых фазах, то при разности хода, равной целому числу длин волн или чётному числу полуволен, в точку M волны будут приходить в одинаковых фазах и при сложении их в точке M возникает усиление колебаний. Если же разность хода окажется равной нечётному числу полуволен, то волны от S_1 и S_2 придут в эту точку в противоположных фазах и в ней произойдёт *ослабление колебаний*.

Это положение легко проверить на построенной интерференционной картине.

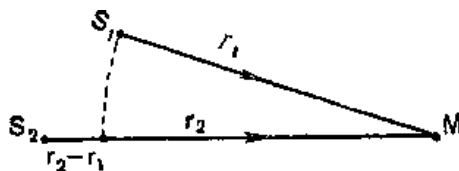


Рис. 3. Разность хода двух волн

Для этого достаточно сосчитать число волн соответствующей системы, укладывающихся на расстояниях между интересующими нас точками максимумов и минимумов и центрами колебаний. Мы увидим, что максимумы будут в тех точках, которые или находятся на одинаковых расстояниях от обоих центров, или в точках, где разность хода соответствует четному числу полуволен

$$\Delta d = \pm 2k \frac{\lambda}{2},$$

где Δd – разность хода двух волн, $k = 0, 1, 2, \dots$, λ – длина волн, а минимумы – нечётному числу

$$\Delta d = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где Δd – разность хода двух волн, $k = 0, 1, 2, \dots$, λ – длина волн

Длина волны λ – расстояние, проходимое за время одного полного колебания. В системе СИ длина волны измеряется в метрах.

$$\begin{aligned} [\lambda] &= 1 \text{ м}, \\ 1 \text{ нм} &= 10^{-9} \text{ м}, \\ 1 \text{ мкм} &= 10^{-6} \text{ м}, \\ 1 \text{ \AA} &= 10^{-10} \text{ м}. \end{aligned}$$

Явление интерференции волн присуще не только волнам на поверхности воды, но и всем видам волн: звуковым, электромагнитным и другим. Если свет обладает волновыми свойствами, то наложение двух пучков света может привести не только к усилению, но и к ослаблению света. Это значит, что совместное действие двух световых пучков может привести к возникновению темноты, или свет плюс свет может дать темноту. Опыт это подтверждает. Получить систему когерентных световых волн можно, если пучок света, исходящий от источника, каким-либо способом расчленишь на два пучка и затем оба эти пучка свести вместе, при этом световые пучки проходят различные пути; этим создается разность хода, и при наложении пучки интерферируют.

Существуют разные способы, позволяющие осуществить указанные условия.

В одном из опытов французского физика Френеля пучок света от точечного источника разделяется на два пучка при помощи двух зеркал (рис. 4).

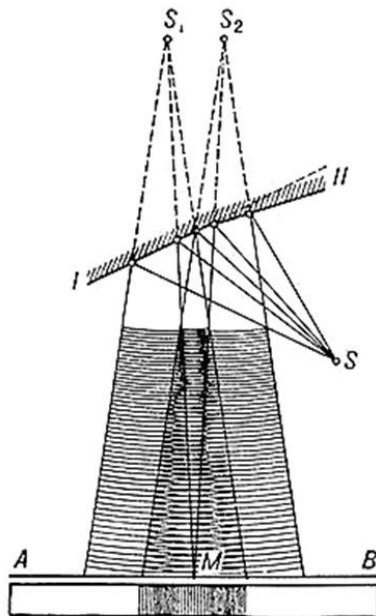


Рис. 4. Интерференция света при помощи зеркал Френеля, поставленных друг к другу под углом, близким 180°

На рисунке показан путь лучей от источника S к экрану AB . К экрану от источника S приходят световые волны, идущие по двум путям разной длины и поэтому запаздывающие относительно друг друга. Волны, идущие от S и отражающиеся зеркалами I и II , представляют собой две системы когерентных волн, как бы исходящих от источника S_1 и S_2 , которые являются мнимыми изображениями S в зеркалах I и II .

Эти обе системы волн налагаются друг на друга и интерферируют. На экране AB в точках, находящихся в области пересечения лучей, наблюдается чередование светлых и темных полос.

Расщепление светового пучка на два пучка с последующим наложением друг на друга имеет место и при освещении лучами света тонких пленок. Очень легко наблюдать, например, интерференцию света при отражении его от тонкой мыльной пленки.

Получив на проволочной рамке мыльную пленку и осветив ее красным светом от источника, при помощи собирающей линзы спроецируем нашу пленку на экран. На экране изображение пленки вначале кажется равномерно освещенным. Но по мере утончения

пленки вследствие стекания воды (сначала в верхних, а затем в других ее частях появляются чередующиеся горизонтальные темные и красные полосы (рис. 5). При дальнейшем утончении пленки наблюдаемая картина меняется: на месте темных полос появляются красные и наоборот. Аналогичные картины наблюдались бы и при освещении мыльной пленки любым однородным светом. Такие же картины наблюдались бы при освещении пленок других веществ, например нефтяных пленок на поверхности воды.

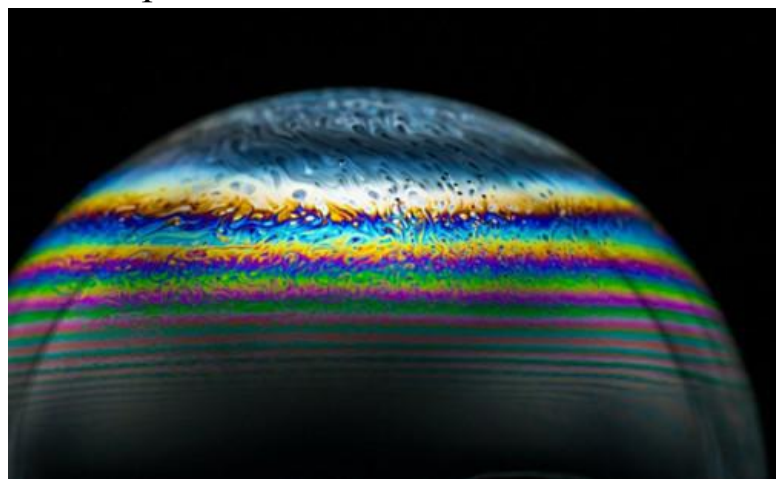


Рис. 5. Интерференционные полосы, происходящие в мыльной плёнке

Рисунок 6 поясняет явления, происходящие в мыльной пленке при освещении ее однородным светом. Заштрихованная полоса PP представляет поперечное сечение какого-либо участка мыльной пленки. На пленку падает пучок параллельных лучей SS однородного света. Отразившись от верхней и нижней граней (в точках A, B и A', B') и приобретя при этом разность хода, лучи при наложении в направлениях AE и $A'E'$ интерферируют между собой. Если их собрать линзой, то на экране получим ряд светлых полос, разделенных темными промежутками. При освещении пленки белым светом интерференционная картина получается разноцветной. Это есть следствие сложности белого света, в состав которого входят волны различной длины, образующие при интерференции максимумы или минимумы света в различных местах.

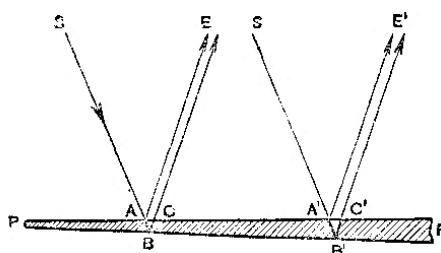


Рис. 6. Объяснение получения интерференционных полос в мыльной плёнке

Наличие чередующихся темных и светлых полос в случае монохроматического света и чередующихся сплошных спектров в случае белого света указывает на волновые свойства света.

Применения интерференции очень важны и обширны.

Существуют специальные приборы – интерферометры, действие которых основано на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: точное измерение длин световых волн, показателя преломления газов и других веществ. Имеются интерферометры специального назначения.

Остановимся на двух применениях интерференции.

Проверка качества обработки поверхностей. С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до $1/10$ длины волны, т. е. с точностью до 10^{-6} см. Для этого нужно создать тонкую клиновидную прослойку воздуха между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластиной. Тогда неровности поверхности размером до 10^{-6} см вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней грани.

Просветление оптики. Объективы фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и различные другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стекол – линз, призм и др. Проходя через такие устройства, свет отражается от многих поверхностей. Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10, а в перископах подводных лодок доходит до 40. При падении света перпендикулярно поверхности доля отраженной от нее энергии составляет 5–9 % от всей энергии.

Поэтому сквозь прибор часто проходит всего 10–20 % поступающего в него света. В результате этого освещенность изображения получается слабой. Кроме того, ухудшается качество изображения. Часть светового пучка после многократного отражения от внутренних поверхностей все же проходит через оптический прибор, но рассеивается и уже не участвует в создании четкого изображения. На фотографических изображениях по этой причине образуется «вуаль». Для устранения этих неприятных последствий отражения света от поверхностей оптических стекол надо уменьшить долю отражаемой энергии света. Получаемое с помощью прибора изображение становится при

этом ярче, просветляется. Отсюда и происходит термин *просветление оптики*.

Просветление оптики основано на явлении интерференции. На поверхность оптического стекла, например линзы, наносят тонкую пленку с показателем преломления n_a , меньшим показателя преломления стекла n_c . Для простоты рассмотрим случай нормального падения света на пленку.

Для упрощения понимания на рисунке показан ход луча, падающего на поверхность раздела под небольшим углом α , однако все вычисления делаем для $\alpha = 0$ (рис. 7).

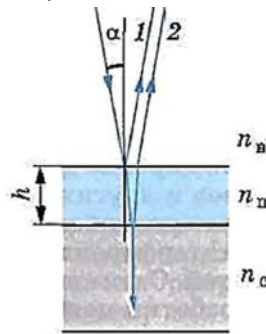


Рис. 7. Ход луча на границах воздух – пленка – стекло

Разность хода световых волн 1 и 2, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки, равна удвоенной толщине пленки $2h$. Длина волны λ_n в пленке меньше длины волны λ в вакууме в n_n раз:

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n_n}$$

Для того чтобы волны 1 и 2 ослабляли друг друга, разность хода должна быть равна половине длины волны в пленке:

$$2h = \frac{\lambda_n}{2} = \frac{\lambda}{2n_n}. \quad (1)$$

Если амплитуды обеих отраженных волн одинаковы или очень близки друг к другу, то гашение света будет полным. Чтобы добиться этого, подбирают соответствующим образом показатель преломления пленки, так как интенсивность отраженного света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

На линзу при обычных условиях падает белый свет. Выражение (1) показывает, что требуемая толщина пленки зависит от длины волны. Поэтому осуществить гашение отраженных волн всех частот невозможно. Толщину пленки подбирают так, чтобы добиться полного

гашения при нормальном падении для длин волн средней части спектра (зеленый цвет, $\lambda_3 \sim 5,5 \cdot 10^{-5}$ см). Она должна быть равна четверти длины волны в пленке:

$$h = \frac{\lambda_3}{4n_n}.$$

Отражение света для крайних участков спектра – красного и фиолетового – будет несколько меньшим. Поэтому объектив с просветленной оптикой в отраженном свете имеет сиреневый оттенок.

Сейчас даже простые дешевые фотоаппараты снабжены просветленной оптикой. Гашение света светом не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, гашение волн друг другом в данной области пространства означает, что световая энергия сюда просто не поступает. Гашение отраженных волн у объективов с просветленной оптикой приводит к тому, что весь свет проходит сквозь объектив.

2. Дифракция света

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света.

Дифракция – огибание волнами краев препятствий – присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь большие размеры, чем размеры пучка.

В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 8). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия *B* и *C* на небольшом расстоянии друг от друга.

Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие *A* в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соот-

ветствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия *A* возбуждала в отверстиях *B* и *C* когерентные колебания.

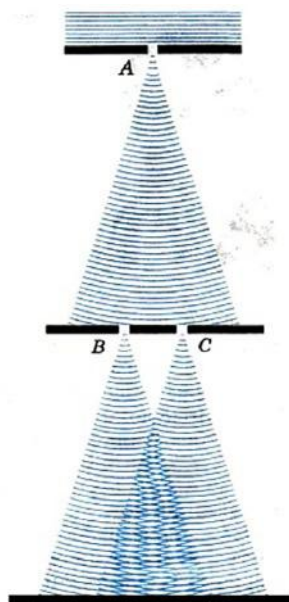


Рис. 8. Опыт Юнга

Вследствие дифракции от отверстий *B* и *C* выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Так впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, и очень точно.

Исследование дифракции было завершено в работах О. Френеля. Френель исследовал различные случаи дифракции на опыте и разработал количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля *каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причем все вторичные источники когерентны (принцип Гюйгенса – Френеля)*.

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света замкнутой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников,

расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

Такие расчеты позволили понять, как свет от точечного источника S , испускающего сферические волны, достигает произвольной точки B пространства (рис. 9).

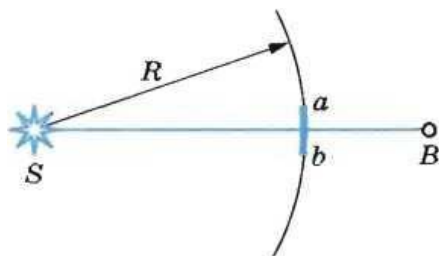


Рис. 9.

Если рассмотреть вторичные источники на сферической волновой поверхности радиусом R , то результат интерференции вторичных волн от этих источников в точке B оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте ab посылали свет в точку B . Вторичные волны, испущенные источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Все происходит так, как если бы свет распространялся вдоль прямой SB , т. е. прямолинейно. На основе этой теории Френель доказал прямолинейность распространения света и рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях. Расчеты, сделанные Френелем, полностью были подтверждены экспериментом. Так как длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчетливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо не располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размерами в несколько сантиметров и даже метров.

На рисунке 10 a – $в$ схематично показаны дифракционные картины от различных препятствий: a – от тонкой проволоочки; $б$ – от круглого отверстия; $в$ – от круглого экрана.

Вместо тени от проволоочки видны светлые и темные полосы; в центре дифракционной картины от отверстия появляется темное пятно, окруженное светлыми и темными кольцами.

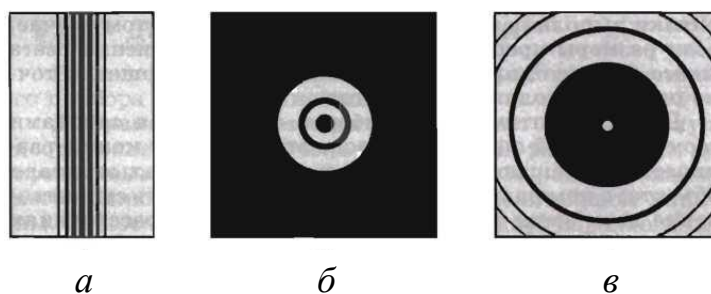


Рис. 10. Дифракционные картины от различных препятствий: а – от тонкой проволоочки; б – от круглого отверстия; в – от круглого экрана

Изменяя диаметр отверстия, можно в центре дифракционной картины получить и светлое пятно, окруженное темными и светлыми кольцами; в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными концентрическими кольцами.

Любопытный случай произошел на заседании Французской академии наук в 1818 г. Один из ученых, присутствовавших на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу. Так, при определенных размерах отверстия и определенных расстояниях от отверстия до источника света и экрана в центре светлого пятна должно находиться темное пятнышко. А за маленьким непрозрачным диском, наоборот, должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление ученых, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле!

Как уже говорилось в предыдущей лекции, общие положения геометрической оптики являются приближенными. Это теория неспособна объяснить, например, явления интерференции и дифракции света. Более общей и более точной теорией является волновая оптика. Согласно ей, закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света *много больше длины световой волны*. Но совершенно точно они не выполняются никогда.

3. Дисперсия света. Цвет тел

Окружающие нас тела имеют различную окраску. Вопрос о причине различной окраски тел естественно занимал ум человека уже давно. Очень большое количество наблюдений, и чисто житейских, и научных, было в распоряжении исследователей, но вплоть до работ Ньютона (начавшихся около 1666 г.) в этом вопросе царила полная неопределенность. Считалось, что цвет есть свойство самого тела, хотя внимательное наблюдение обнаруживало, что в зависимости от времени дня или условий освещения нередко наблюдается очень значительное изменение в цвете тел.

Существовало мнение, что различные цвета получаются как «смесь» света и темноты, т. е. смешивались два существенно различных понятия – цвет и освещенность. С незапамятных времен наблюдались превосходные (радужные) цвета радуги и даже было известно, что образование радуги связано с освещением дождевых капель. Так, французский физик Рене Декарт (1596–1650) наблюдал искусственную радугу на водяной пыли фонтанов и производил опыты по получению радуги со стеклянными шарами, наполненными водой.

В 1637 г. Декарт объяснил форму и угловые размеры радуги на небесном своде, но причины цветов радуги и их последовательности ему оставались неясными.

Точно так же игра цветов в граненых алмазах и даже в стеклянных призмах была хорошо известна. На Востоке, в частности в Китае, украшения в виде стеклянных призм, дающих радужные блики, принадлежали к числу излюбленнейших. Европейцы неоднократно описывали эти китайские игрушки. Однако никто не сопоставлял между собой эти многочисленные и разнообразные явления, и связь между великолепными красками радуги, играющей на небе, и цветом тел была открыта только в замечательных исследованиях Ньютона.

Из опыта известно, что пучок света, проходя через треугольную призму, отклоняется к грани, лежащей против преломляющего угла призмы (рис. 11).

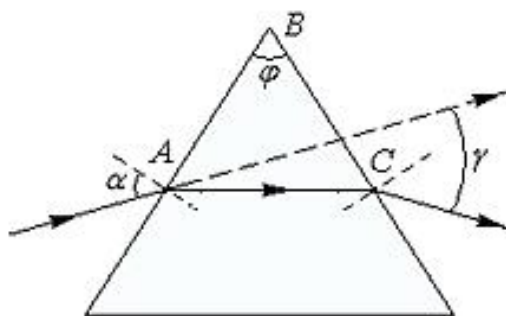


Рис. 11. Преломление в призме

Если это будет пучок белого света, то после прохождения через призму он не только отклоняется, но и разлагается на цветные пучки. Это явление, называемое дисперсией света, было впервые изучено Исааком Ньютоном в 1666 г. в серии замечательных опытов (рис. 12).

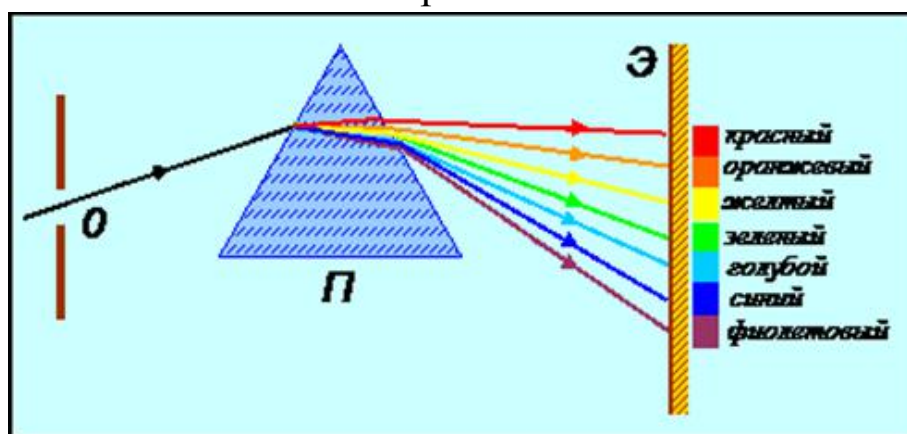


Рис. 12. Опыт Ньютона по разложению света

Источником света в опытах Ньютона служило небольшое круглое отверстие в ставне окна, освещаемого лучами Солнца. Когда перед отверстием устанавливалась призма P , то на стене вместо круглого пятна появлялась окрашенная полоска, названная Ньютоном спектром. В таком спектре оказалось семь главных цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый, постепенно переходящих один в другой. Каждый цвет занимает в спектре пространство различного размера. Наибольшее отклонение имеет фиолетовая полоса, наименьшее – красная.

Следующий опыт состоял в том, что из широкого пучка цветных лучей, полученных с помощью призмы P_1 экраном C с небольшим отверстием выделялись узкие пучки определённой цветности (рис. 13) и направлялись на вторую призму. Вторая призма, отклоняя лучи, не изменяет цвета этих лучей. Такие лучи называются *простыми* или *монокроматическими* (одноцветными).

Согласно волновой теории, цвет луча света определяется его длиной волны, или частотой колебаний. Наибольшую длину волны имеет красный цвет, наименьшую – фиолетовый.

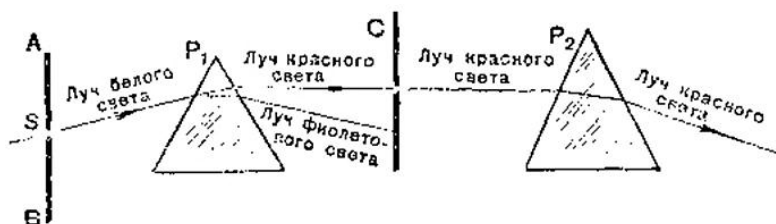


Рис. 13. Опыт Ньютона

Собирая линзой вышедшие из призмы цветные пучки лучей, Ньютон получил на белом экране вместо окрашенной полосы белое изображение отверстия (рис. 14).

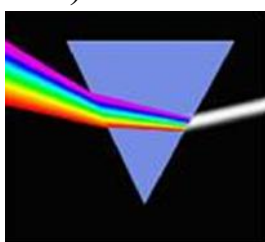


Рис. 14. Опыт Ньютона по сложению монохроматических лучей

Варьируя описанные опыты, можно подобрать весьма большое количество сочетаний дополнительных цветов (некоторые из них приведены в табл. 1).

Таблица 1

Дополнительные цвета

Выделенная часть спектра	красная	оранжевая	желтая	желто-зеленая	зеленая	голубовато-зеленая
Цвет смеси оставшихся лучей	голубовато-зеленый	голубой	синий	фиолетовый	пурпурный	красный

Дополнительные цвета можно получать и при помощи соответственным образом подобранных цветных стекол.

Из всех этих опытов Ньютон сделал следующие выводы:

1. Белый свет является сложным светом, состоящим из цветных лучей.

2. Для лучей света различной цветности показатели преломления данного вещества различны; вследствие этого при отклонении призмой пучок белого света разлагается в спектр.

3. При соединении цветных лучей спектра вновь образуется белый свет.

Явление дисперсии света наблюдается не только при прохождении света через призму, но и в других случаях преломления света. Преломление солнечного света в водных каплях, образующихся в атмосфере, сопровождается разложением его на цветные лучи (рис. 15); этим объясняется образование радуги. Преломление света в водяных капельках или ледяных кристалликах, плавающих в атмосфере, сопровождается благодаря дисперсии в воде или льде разложением солнечного света. Рассчитывая направление преломления лучей в случае сферических водяных капель, мы получаем картину распределения цветных дуг, точно соответствующую наблюдаемым в радуге. Аналогично, рассмотрение преломления света в кристалликах льда позволяет объяснить явления кругов вокруг Солнца и Луны в морозное время года, образование так называемых ложных солнц, столбов и т. д.



Рис. 15. Радуга

Подобно тому, как звуки мы располагаем в один непрерывный ряд по возрастающей частоте колебаний, мы и все световые лучи можем себе представить расположенными в один ряд по возрастающей частоте колебаний, т. е. по убывающей длине волны.

В процессе преломления в призме из пучка белого света выделяется множество цветных пучков, и каждому из них соответствует некоторая узкая область длин волн, заключённых в интервале между 400–800 миллимикрон (табл. 2).

Таблица 2

Соответствие цветных лучей и их длин волн

Спектральная область	Длина волны (в ммк)
Красных лучей	760–640
Оранжевых и жёлтых лучей	640–580
Зелёных лучей	580–495
Голубых и синих лучей	495–440
Фиолетовых лучей	440–400

Показатель преломления вещества зависит от длины световой волны.

Это является причиной дисперсии света. *Дисперсия* – зависимость показателя преломления света от длины волны. На рисунке 16 показан график зависимости показателя преломления от длины волны для стекла (1), кварца (2) и флюорита (3).

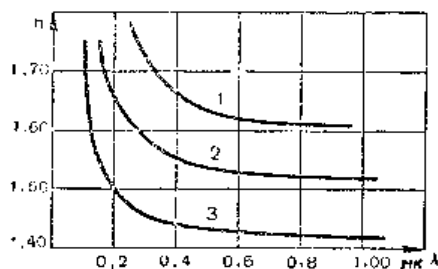


Рис. 16. График зависимости показателя преломления от длины волны

Далеко не всякому цвету соответствует единственное значение длины волны. Многие цвета прозрачных тел получаются в результате смешения тех монохроматических лучей, которые проходят сквозь эти тела. Цвета таких тел зависят от состава падающего на них света.

Белый свет получается в результате наложения монохроматических лучей всех длин волн видимого света. Если из белого света каким-либо способом удалить часть монохроматических лучей, то он станет цветным, причем его окраска будет зависеть от состава оставшихся монохроматических лучей.

Цвет прозрачного тела определяется теми лучами, которые оно пропускает, поэтому цвет такого тела может меняться при изменении состава падающего на него света.

Для определения, наложением каких монохроматических лучей образуется цвет прозрачного тела, его помещают между призмой и экраном, на котором наблюдают спектр белого света. Тогда будет видно, что тело часть лучей поглощает, а смесь оставшихся в спектре лучей и определяет его цвет.

Цвета непрозрачных тел определяются смесью тех лучей, которые они отражают, поэтому их цвет зависит как от самих тел, так и от состава падающего на них света.

Чтобы определить, смесью каких лучей определяется цвет такого тела, на него следует направить спектр белого света. Те участки спектра, в которых тело кажется черным, оно поглощает. Если на это тело

направить такой свет, в котором частично отсутствуют отражаемые телом лучи, то его цвет изменится.

Этим объясняется, почему при искусственном освещении многие материалы имеют не такой цвет, как при дневном свете. Некоторые цветные стекла поглощают почти все лучи, кроме узкого пучка цветных лучей с близкими длинами волн, например красных.

Такие стекла называются светофильтрами (рис. 17). Они применяются для получения света, близкого к монохроматическому.



Рис. 17. Светофильтры

Если красный светофильтр осветить, например желтыми лучами, то он будет казаться черным, так как желтые лучи он полностью поглощает. Тело, отражающее все цвета спектра белого света в одинаковой степени, при дневном свете будет казаться белым.

Если тело сильно поглощает все цвета спектра белого света, то оно кажется черным (сажа или черный бархат).

При смешении двух красок получается цвет, определяемый смесью лучей, отражаемых обеими красками. Он не соответствует цвету, получаемому от наложения световых лучей цвета красок.

4. Поляризация света

Явления интерференции и дифракции доказывают, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Выясним, каких волн — продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам. В то время световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и проникающем внутрь всех тел. Такие волны, казалось, не могли быть поперечными, так как поперечные волны в соответствии с воззрениями того времени могут существовать только в твердом теле. Но как могут тела двигаться в твердом эфире, не встречая сопротивления? Ведь эфир не должен препятствовать движению тел. В противном случае не выполнялся бы закон инерции.

Однако постепенно накапливалось все больше и больше экспериментальных фактов, которые никак не удавалось истолковать, считая световые волны продольными.

Это опыт с кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зеленой окраски). Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее граней была параллельна оси кристалла. Если направить перпендикулярно на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластинки вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 18). Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Но это не так. Световая волна проявила новые свои свойства.

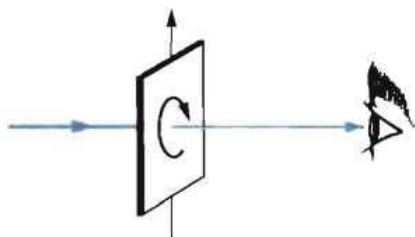
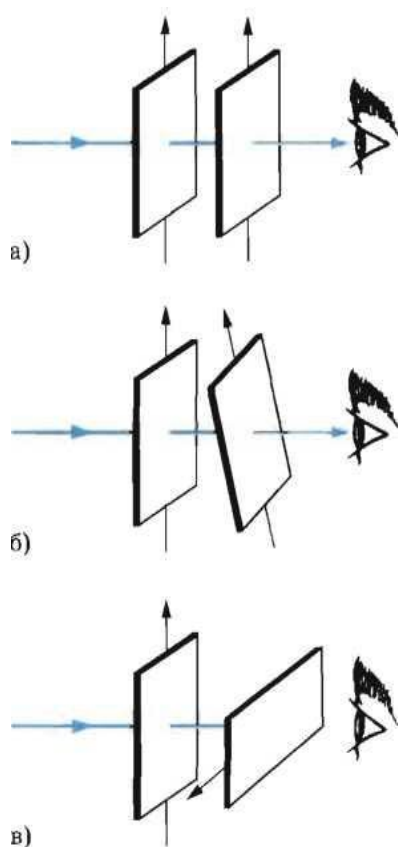


Рис. 18. Объяснение поляризации



Эти новые свойства проявляются, если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 18 а), параллельный первому. При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 18 б), то обнаружится удивительное явление — гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 18 в). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

Из описанных выше опытов следуют два вывода:

1) световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность не менялась);

2) волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча интенсивность прошедшего света изменяется).

Продольные волны обладают полной симметрией по отношению к направлению распространения (колебания происходят вдоль этого направления, и оно является осью симметрии волны). Поэтому объяснить опыт с вращением второй пластинки, считая световую волну продольной, невозможно.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения.

1. *Свет – поперечная волна.* В падающем от обычного источника пучке световых волн происходят колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн (рис. 18).

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной. Волны, например, на поверхности воды такой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Световой поток, в котором колебания происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн, называется естественным светом. Такое название оправданно, так как в обычных условиях источники света излучают такой поток. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, потому что падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

2. *Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, происходящими в одной определенной плоскости* (плоскость P на рисунке 19). Такой свет называется *поляризованным* или, точнее, *плоскополяризованным* в отличие от естественного света, который может быть назван также неполяризованным.

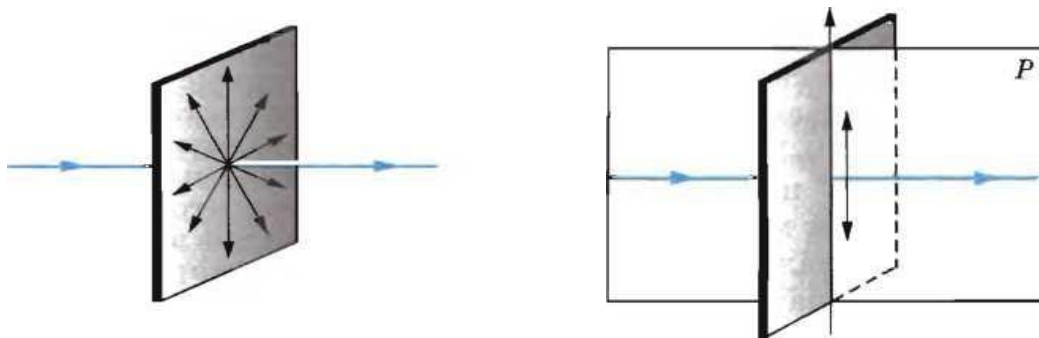


Рис. 19. Направление распространения света
естественного и поляризованного

Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещенных кристаллах (угол между их осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от 90° , то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые *поляроиды*. Поляроид представляет собой тонкую (0,1 мм) пленку кристаллов герпатита, нанесенную на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно провести те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно получать большие поверхности, поляризующие свет. К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттенок, который они придают белому свету.

Прямыми опытами доказано, что световая волна является поперечной. В поляризованной световой волне колебания происходят в строго определенном – поперечном направлении.

Поляризованный свет широко используется при исследовании объектов в судебной экспертизе. Особенно при исследовании природы волокон.

Лекция 10. Применение отражения и преломления света для получения изображения

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Источник света и его изображение.
2. Получение и построение изображения в зеркалах.
3. Получение изображения в линзах. Виды линз.
4. Построение изображений в линзах.

Рассмотрим отражение лучей от зеркал различных типов и преломление световых лучей в линзах.

1. Источник света и его изображение

Из повседневной жизни знаем, что, рассматривая какой-либо объект, являющийся источником света, можем составить представление о месте положения этого объекта. Для решения подобных задач достаточно проследить путь двух каких-либо лучей, исходящих из данного элемента светящегося объекта: точка их пересечения определит положение точечного источника света или, если источник света протяженный, того или иного небольшого элемента источника.

Во всех тех случаях, когда некоторая точка S' является точкой пересечения и последующего расхождения световых лучей, глаз (а также любой другой приемник, способный реагировать на воздействие света) будет воспринимать эти лучи так, как если бы в точке S' действительно находился источник света.

Точки, в которых собираются световые лучи, исходящие из реального источника света, называются *изображениями этого источника*. Положение изображения можно найти, построив ход каких-либо двух проходящих через него лучей. Изображения точечных источников существенно отличаются от действительных точечных источников тем, что из них лучи расходятся в ограниченном телесном угле, тогда как из реального точечного источника – равномерно во все стороны (на рис. 1 точки S и S'). Поэтому изображение, в отличие от точечного источника, можно видеть не из любого положения.

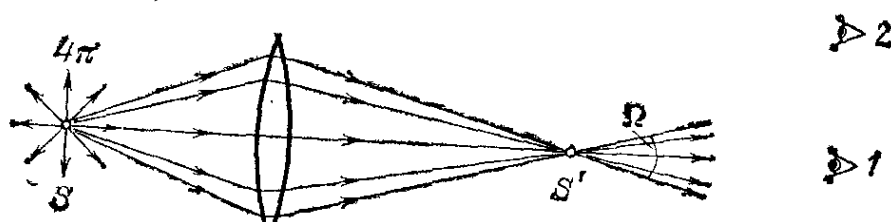


Рис. 1. Реальный точечный источник S можно видеть из любого положения

Изображение S' можно видеть только внутри ограниченного телесного угла Ω (положение 1). В положении 2 изображение не дает невидимого различия, но при решении вопроса об освещенности и яркости изображения это различие существенно. Получение изображений светящихся точек, а также протяженных предметов является центральной задачей всей геометрической оптики. Применяя законы отражения и преломления, рассмотрим вопросы образования изображений.

2. Получение и построение изображения в зеркалах

Рассмотрим отражение световых лучей от плоского зеркала. Плоским зеркалом называют плоскую поверхность, зеркально отражающую свет.

Отражение света от плоского зеркала представляет собой наиболее простой случай образования мнимых изображений.

На рис. 2 показано изображение точечного источника в плоском зеркале. Пусть пучок лучей от точечного источника S падает на плоское зеркало. Проследим за двумя произвольными лучами SA и SB , имеющими вершину в точке S . Каждый из них отразится по закону отражения, и угол каждого из них с нормалью останется после отражения неизменным. Останется неизменным и угол между лучами после отражения. Этот угол между отраженными лучами можно изобразить на рисунке, продолжив отраженные лучи назад, за плоскость зеркала, что показано на чертеже штриховыми линиями. Точка пересечения S' продолжения лучей за зеркалом будет лежать на той же нормали к зеркалу, что и точка S , и на том же расстоянии от плоскости зеркала, в чем легко убедиться из равенства треугольников SAO и $S'AO$ или SBO и $S'BO$.

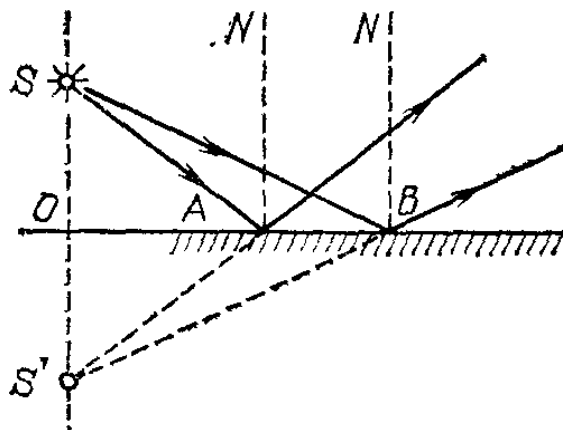


Рис. 2. Образование мнимого изображения точки в плоском зеркале

Рассмотренные лучи SA и SB были совершенно произвольными, поэтому результаты отражения от плоского зеркала можно распространить на весь световой пучок. При отражении от плоского зеркала пучок световых лучей, исходящих из одной точки, превращается в световой пучок, в котором продолжения всех световых лучей снова пересекаются в одной и той же точке. В результате наблюдателю, помещенному на пути отраженных лучей, они будут казаться пересекающимися в точке S' , и эта точка будет мнимым изображением точки S . Изображение будет мнимым: никаких лучей в точке S' за зеркалом нет, но точка S' является вершиной пучка лучей, повернутого после отражения от зеркала.

В плоском зеркале получается мнимое изображение точки S , расположенное симметрично ей относительно зеркала в точке S' .

Рассмотрим изображение протяженного объекта в плоском зеркале (рис. 3).

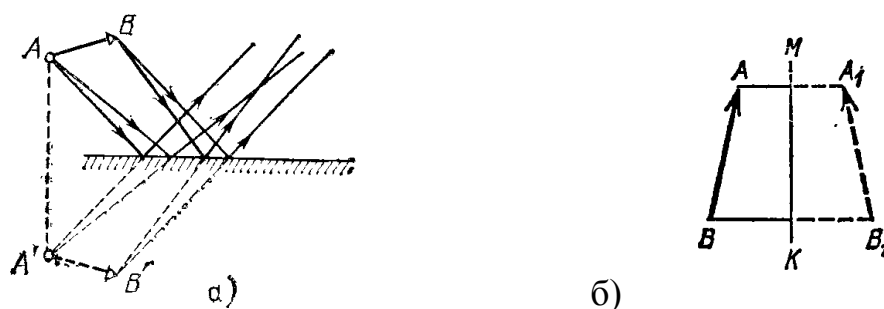


Рис. 3. Образование мнимого изображения прямолинейного отрезка в плоском зеркале

Пусть перед зеркалом находится прямолинейный светящийся отрезок AB (рис. 3 а). Выполним построение точек A' и B' также как и для одной точки S' (см. рис. 2) и, соединяя их прямой, мы получим изображение всех точек отрезка. Точно так же можно построить изображение любого предмета в плоском зеркале. Для этого достаточно построить точки, симметричные точкам предмета. При этом изображение предмета в плоском зеркале равно размерам предмета, поставленного перед зеркалом, и расположено относительно зеркала симметрично предмету. Левая и правая стороны у изображения в зеркале меняются местами. Такое изображение принято называть *зеркальным*.

Изображение в плоском зеркале получается мнимое (находится на пересечении продолжений лучей), прямое (не перевернутое), равное.

Перед плоским зеркалом KM находится предмет, изображенный стрелкой BA (рис. 3 б). Положение изображения этого предмета в зеркале можно найти следующим образом. Опустив из крайних точек предмета перпендикуляры на зеркало и продолжив их за зеркало на расстояние, равное их длине до зеркала, получим изображение стрелки BA в зеркале. Это изображение будет мнимое и в натуральную величину.

Поверхность зеркала может быть не только гладкой и плоской, но и гладкой, и изогнутой.

Рассмотрим отражение световых лучей от такого зеркала. Зеркала, поверхность которых составляет часть поверхности шара, называют *сферическими* (рис. 4).



Рис. 4. Сферические зеркала

Сферические зеркала бывают вогнутыми (рис. 5 а) и выпуклыми (рис. 5 б).

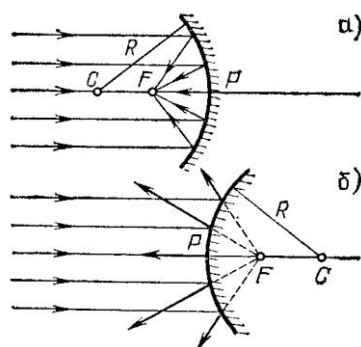


Рис. 5. Фокусы сферических зеркал: а – вогнутое зеркало;
б – выпуклое зеркало

Центр шаровой поверхности C называется *оптическим центром зеркала* (рис. 5 а, б); а вершина зеркала P – *полюсом зеркала*.

Прямую, проходящую через оптический центр зеркала C и его вершину P , называют *главной оптической осью зеркала*, а любую другую прямую, проходящую через точку C и поверхность зеркала, называют *побочной оптической осью зеркала*.

Когда луч света идет по какой-либо оптической оси, то угол его падения на поверхность зеркала равен нулю, поэтому такой луч после отражения идет по той же оптической оси в обратную сторону.

Если на вогнутое зеркало падает пучок лучей, параллельных его главной оптической оси, то после отражения от зеркала эти лучи проходят через точку F , лежащую на главной оптической оси (рис. 5 а), которую называют *главным фокусом* зеркала. После отражения от выпуклого зеркала такие лучи идут расходящимся пучком (рис. 5 б), но так, что их продолжения тоже сходятся в одной точке F (за зеркалом) – главном фокусе зеркала.

Вогнутые зеркала являются *собирающими*. Главный фокус у них *действительный*.

Выпуклые зеркала – *рассеивающие*, главный фокус у них *мнимый*.

Расстояние от главного фокуса до вершины зеркала PF называют *главным фокусным расстоянием* F .

Когда лучи падают на зеркало параллельно одной из его побочных оптических осей, например AC (рис. 6), то после отражения от зеркала они собираются в одной точке на этой же оси – в фокусе зеркала. Если побочные оси составляют небольшой угол с главной оптической осью, то все фокусы зеркала располагаются в фокальной плоскости KM , проходящей через главный фокус F перпендикулярно главной оптической оси.

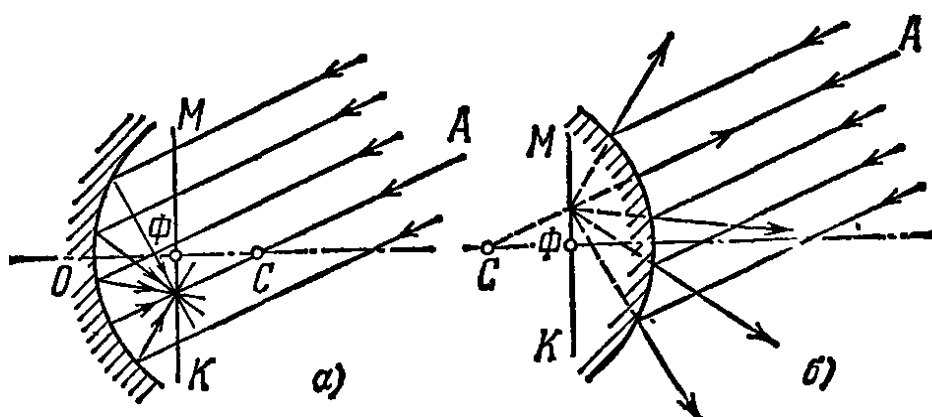


Рис. 6. Ход лучей в сферических зеркалах а – вогнутое, б – выпуклое

Построим изображения в сферическом вогнутом зеркале при различных положениях точечного источника на оси зеркала:

- а) источник между центром и бесконечностью;
- б) в центре;

- в) между центром и фокусом;
- г) между фокусом и зеркалом.

Положение изображения при приближении источника света из бесконечности к вогнутому зеркалу будет меняться. Если источник света находится в бесконечности от центра зеркала, то его изображение будет находиться перед фокусом зеркала (рис. 7 а).

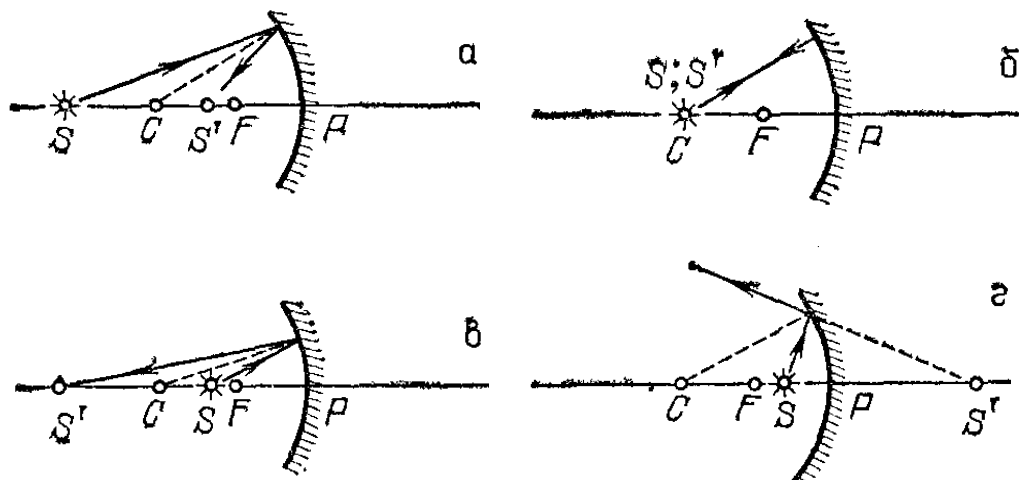


Рис. 7. Образование изображения в вогнутом сферическом зеркале при различных положениях точечного источника на оси зеркала

Если источник находится в центре зеркала, то его изображение переместится из фокуса в центр зеркала, т. е. положения источника и изображения совпадут (рис. 7 б).

При перемещении источника света от центра к фокусу его изображение удаляется от центра зеркала (рис. 7 в).

При помещении источника света в фокус его изображение уходит в бесконечность, т. е. точечный источник в фокусе зеркала дает пучок параллельных лучей (на рис. не показано).

Если источник света находится между фокусом зеркала и его полюсом, то отраженные лучи не будут иметь общей вершины с вогнутой стороны зеркала и нигде не пересекут главной оси зеркала (рис. 7 г). Только их продолжения за зеркалом (показанные на рисунке штриховыми линиями) будут иметь общую вершину S' . Это значит, что изображение в данном случае будет мнимым. Для отыскания его положения достаточно продолжить за зеркало направление любого отраженного луча; место его пересечения с главной осью даст положение изображения.

Рассмотрим изображения, даваемые выпуклым сферическим зеркалом. Построение изображения для точки, расположенной на конечном расстоянии от зеркала, выполнено на рис. 8.

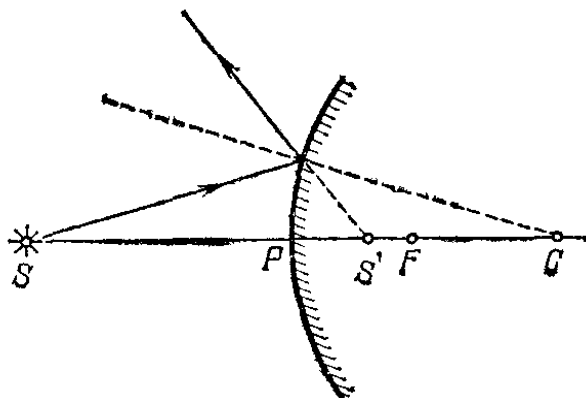


Рис. 8. Построение мнимого изображения в выпуклом сферическом зеркале

Выпуклое зеркало всегда дает мнимое изображение.

Источник света не всегда представляет собой светящуюся точку, находящуюся на главной оптической оси зеркала. Рассмотрим изображение в сферическом зеркале протяженных объектов, расположенных вблизи их главной оси. Одна точка протяженного предмета лежит на главной оптической оси, а остальные вне оси. Построение сводится к изображению этих отдельных точек протяженного предмета. Рассмотрим изображение в сферическом вогнутом зеркале (рис. 9).

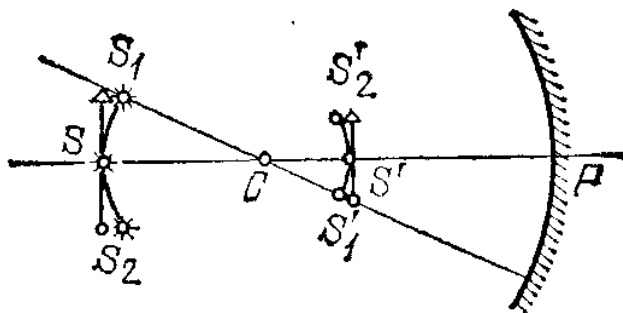


Рис. 9. Построение изображения протяженного объекта в сферическом вогнутом зеркале

Точечный источник света находится на дуге S_1SS_2 в точке S_1 на некотором расстоянии от главной оси зеркала. Проведем через него побочную оптическую ось. По отношению к отражению в сферическом зеркале точка S_1 вполне равноправна с точкой S , лежащей на главной оси зеркала на том же расстоянии от его центра C . Узкий пучок лучей вблизи оси S_1C после отражения соберется снова в одной точке S'_1 — изображении точки S_1 . Любая точка дуги S_1SS_2 с центром в

точке C изобразится точкой, лежащей на дуге $S'_1S'S'_2$ с центром также в C . Другими словами, дуга $S'_1S'S'_2$ является изображением дуги S_1SS_2 .

Четкое изображение протяженных объектов получается только при условии, что эти объекты (их крайние точки) видны из оптического центра зеркала под малым углом к главной оси. При несоблюдении этого условия изображение получается расплывчатым и искаженным.

Рассмотрим размер изображения, получающегося в сферическом зеркале. Размер изображения, даваемого сферическим зеркалом, в отличие от случая плоского зеркала, будет меняться в зависимости от положения объекта по отношению к фокусу зеркала (рис. 10).

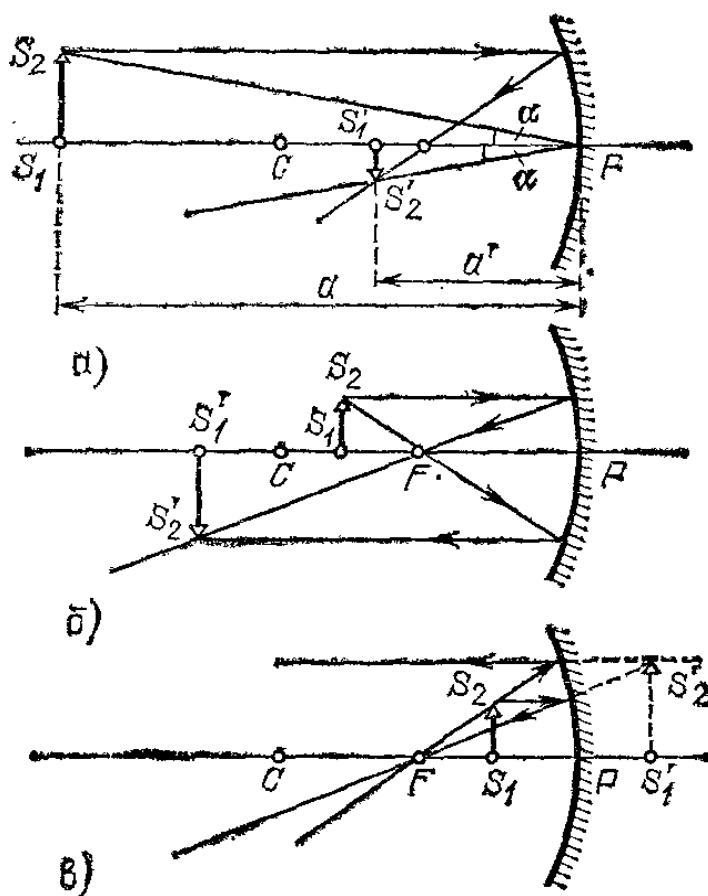


Рис. 10. Изображения протяженных объектов в вогнутом сферическом зеркале

Объект расположен: а — за центром зеркала (изображение действительное, обратное и уменьшенное); б — между центром и фокусом (изображение действительное, обратное и увеличенное); в — ближе фокуса (изображение мнимое, прямое и увеличенное).

Если объект находится дальше фокуса вогнутого зеркала, то его изображение получается уменьшенным. Если объект находится меж-

ду зеркалом и фокусом, то изображение получается мнимым и увеличенным. Отношение линейных размеров изображения $S'_1S'_2 = y'$ к линейным размерам предмета $S_1S_2 = y$ называется *линейным*, или *поперечным*, *увеличением*:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{S'_1S'_2}{S_1S_2}.$$

Из подобия треугольников находим $S'_1P'S'_2$ и S_1PS_2 (рис. 10 а).

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}$$

Легко убедиться, что равенство справедливо и в других случаях получения изображения при помощи сферических зеркал (рис. 10 б и в).

Наряду с линейным увеличением рассмотрим угловое увеличение сферического зеркала. *Угловым увеличением* γ называется отношение тангенсов углов a' и a , составляемых лучом, выходящим из зеркала, и лучом, падающим на зеркало, с оптической осью, т. е. $\gamma = \frac{\operatorname{tg} a'}{\operatorname{tg} a}$; $\gamma = \frac{1}{\beta}$.

Угловое увеличение есть величина, обратная линейному увеличению, т. е. чем больше линейное увеличение (больше размеры изображения), тем меньше угловое увеличение, т. е. тем менее широки пучки световых лучей, образующих изображение. Это обстоятельство имеет важное значение для понимания вопроса о яркости изображения.

3. Получение изображения в линзах. Виды линз

Закон преломления света устанавливает, как меняется направление светового луча при переходе света из одной среды в другую. В лекции по геометрической оптике был рассмотрен простейший случай преломления света на плоской границе раздела двух сред. В практических применениях очень большое значение имеет преломление света на сферической границе раздела. Основная деталь оптических приборов – *линза* – представляет собой обычно стеклянное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями; в частном случае одна из поверхностей линзы может быть плоскостью, которую можно рассматривать как сферическую поверхность бесконечно большого радиуса.

Различные линзы отличаются одна от другой расположением центров образующих их сферических поверхностей, их радиусами и

показателями преломления вещества, из которого сделаны линзы. На рис. 11 представлены шесть основных типов линз. Линзы, утолщающиеся от краев к середине, называются *выпуклыми* (рис. 11 а – двояковыпуклая; б – плосковыпуклая; в – вогнуто-выпуклая). Линзы, которые к середине тоньше, называются *вогнутыми* (рис. 11 г – двояковогнутая; д – плоско-вогнутая; е – выпукло-вогнутая).

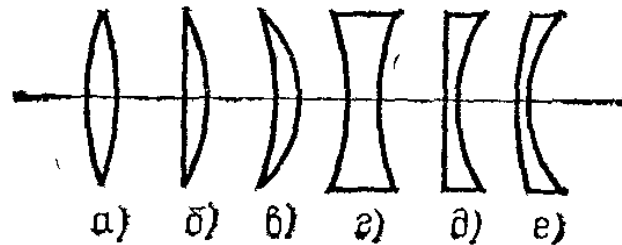


Рис. 11. Различные типы линз

Линзы могут быть изготовлены не только из стекла, а из любого прозрачного вещества. В некоторых приборах, например, применяются линзы из кварца, каменной соли и др. Заметим, что и поверхности линз могут быть также более сложной формы, например, цилиндрические, параболические и т. д. Однако такие линзы применяются сравнительно редко. В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением линз со сферическими поверхностями.

Рассмотрим линзу, ограниченную двумя сферическими преломляющими поверхностями PO_1Q и PO_2Q (рис. 12). Центр первой преломляющей поверхности PO_1Q лежит в точке C_1 , центр второй поверхности PO_2Q – в точке C_2 . На рис. 12 изображена линза, имеющая заметную толщину O_1O_2 . В действительности предполагается, что рассматриваемые линзы очень тонки, т. е. расстояние O_1O_2 очень мало по сравнению с O_1C_1 или O_2C_2 . В таком случае точки O_1 и O_2 можно считать практически сливающимися в одной точке O . Эта точка O называется оптическим центром линзы. C_1 и C_2 – центры ограничивающих линзу сферических поверхностей. Такие линзы называют *тонкими линзами*. В дальнейшем всегда будет подразумеваться именно тонкая линза.

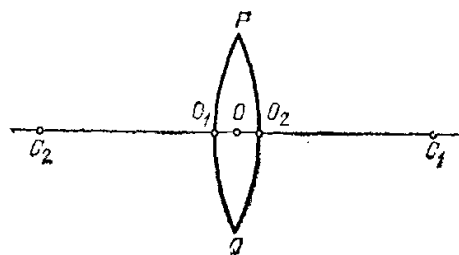


Рис. 12. Тонкая линза

Всякая прямая, проходящая через оптический центр, называется оптической осью линзы. Та из осей, которая проходит через центры обеих преломляющих поверхностей линзы, называется главной оптической осью, остальные — *побочными осями*.

Для лучей, идущих вдоль оптической оси, участки обеих поверхностей линзы можно считать параллельными, а толщину линзы считаем весьма малой. При прохождении же через плоскопараллельную пластинку световой луч претерпевает параллельное смещение, но смещением луча в очень тонкой пластинке можно пренебречь.

Если на линзу падает световой луч не вдоль одной из ее оптических осей, а по какому-либо другому направлению, то луч, испытав преломление сначала на первой ограничивающей линзу поверхности, потом на второй, отклонится от первоначального направления.

Если направить на линзу слева пучок лучей, параллельный главной оптической оси (рис. 13), преломятся и пройдут через некоторую точку F' , лежащую на главной оптической оси, справа от линзы на расстоянии f' от оптического центра O . Размеры пучка лучей являются малыми по сравнению с размерами O_1C_1 и O_2C_2 . Если в точке F' расположить белый экран $З$, то место пересечения лучей изобразится в виде яркого пятнышка.

Точка F' на главной оптической оси, где пересекаются после преломления в линзе лучи, параллельные главной оптической оси, называется *главным фокусом*, а расстояние $f' = OF'$ — *фокусным расстоянием линзы*.

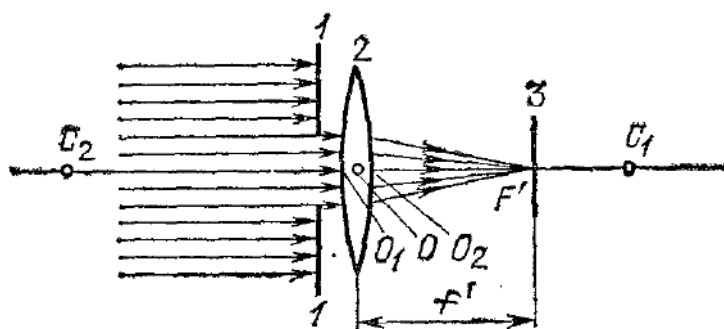


Рис. 13. Главный фокус линзы

Фокусное расстояние зависит от показателя преломления вещества, из которого сделана линза, и от радиусов кривизны ее преломляющих поверхностей.

Параллельный пучок лучей на рис. 14, а падает на линзу слева направо. Рассмотрим такой же пучок лучей, идущих в обратном на-

правлении, т. е. справа налево. Пучок лучей, параллельных главной оси, соберется снова в одной точке F – втором фокусе линзы (рис. 14 б) на расстоянии f от ее оптического центра. $f = f'$, т. е. оба фокуса лежат симметрично по обе стороны линзы. Фокус F называется обычно *передним фокусом*, фокус F' – *задним фокусом*. Расстояние f называется *передним фокусным расстоянием*, а расстояние f' – *задним фокусным расстоянием*.

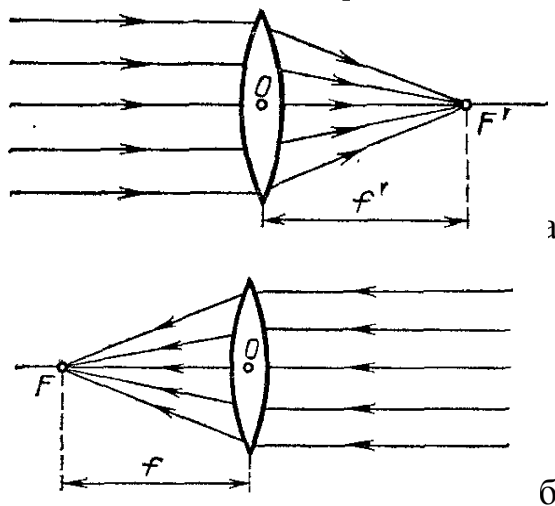


Рис. 14. Фокусы линзы

Рассмотрим действительный и мнимый фокус. Если параллельные лучи после преломления в линзе сходятся, действительно пересекаясь в некоторой точке, лежащей по другую сторону линзы, то линза называется *собирающей* или *положительной* (рис. 15 а). Если же параллельные лучи после преломления в линзе становятся расходящимися (рис. 15 б), то линза называется *рассеивающей* или *отрицательной*. В случае рассеивающей линзы в фокусе пересекаются не преломленные лучи, а их воображаемые продолжения; при этом фокус лежит с той же стороны от линзы, с которой падает на линзу параллельный пучок лучей. Фокусы в этом случае называются *мнимыми* (рис. 15 б).

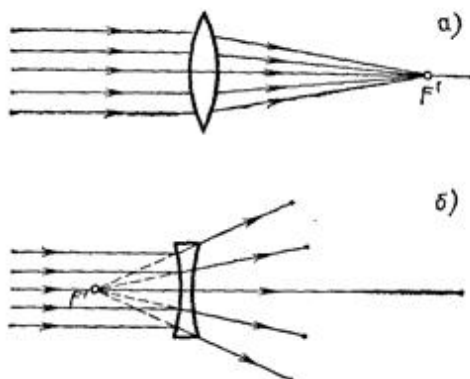


Рис. 15. Действительный фокус – а и мнимый фокус линз – б

На рис. 16 даны условные обозначения тонких линз: а – собирающая линза; б – рассеивающая линза.

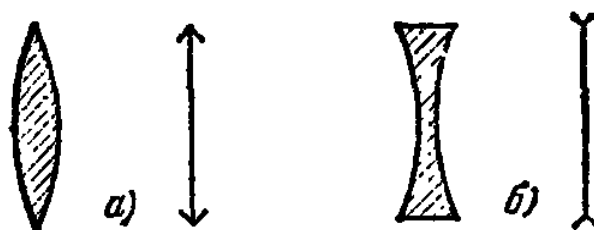


Рис. 16. Условные обозначения тонких линз

Лучи, которые параллельны любой оптической оси линзы, направленные на линзу, собираются после преломления в одной точке – фокусе, который не лежит на главной оптической оси.

Все множество различных фокусов у линзы расположены в фокальной плоскости KM . Фокальной называют плоскость, которая перпендикулярна главной оптической оси линзы и проходит через ее главный фокус. Каждая линза имеет две фокальные плоскости.

У собирающей линзы фокальные плоскости действительные (рис. 17 а), а у рассеивающей – мнимые (рис. 17 б).

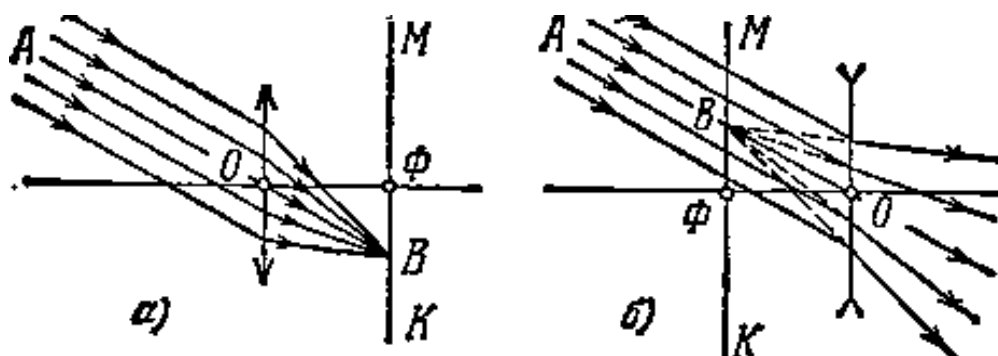


Рис. 17. Фокальные плоскости линз

Обычно материал линзы преломляет сильнее, чем окружающая среда (например, стеклянная линза в воздухе). Тогда собирающими линзами являются линзы, утолщающиеся от краев к середине (рис. 11 а, б, в). Рассеивающими линзами являются линзы, становящиеся тоньше к середине (рис. 11, г, д, е).

Если материал линзы преломляет слабее, чем окружающая среда, т. е. относительный показатель преломления $n < 1$, то, наоборот, линзы а, б, в (рис. 11) будут рассеивающими, а линзы г, д, е – собирающими. Такие линзы можно получить, например, образовав в воде двумя часовыми стеклами, склеенными воском, воздушную полость соответствующей формы (рис. 18).

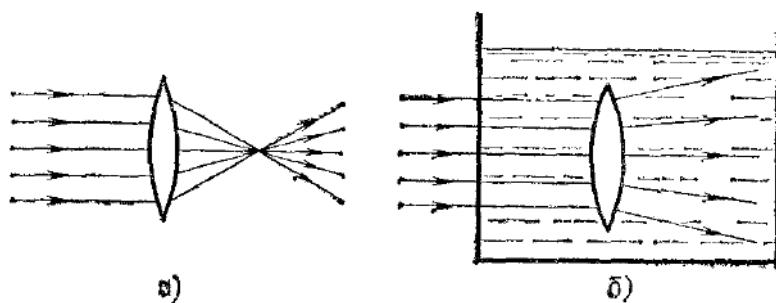


Рис. 18. Двояковыпуклые линзы: а – стеклянная в воздухе – собирающая;
б – воздушная в воде – рассеивающая

Для характеристики оптических свойств различных линз часто пользуются величиной, обратной фокусному расстоянию линзы f . Величина $D = 1/f$ называется *оптической силой линзы*. Чем короче фокусное расстояние, тем сильнее преломляет линза и тем больше D . D может служить характеристикой преломляющей способности линзы. В СИ за единицу оптической силы линзы принимается оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м; такая единица называется *диоптрией (дптр)*. Оптическая сила всякой линзы (в диоптриях) равна единице, деленной на фокусное расстояние (в метрах). Для собирающих (положительных) линз оптическая сила положительна; для рассеивающих (отрицательных) линз – отрицательна. Так, например, рассеивающая линза с фокусным расстоянием $f = 20$ см имеет оптическую силу $D = -1/0,20 = -5$ дптр. Эти обозначения хорошо известны тем, кто пользуется очками.

4. Построение изображения в линзах

Линзы создают действительные и мнимые источники света так же, как зеркала.

Рассмотрим изображение светящихся точек, находящихся на различных расстояниях от линзы.

Пусть точечный источник света находится в точке S на главной оптической оси линзы (рис. 19). Изображение этого точечного источника S' в зависимости от вида линзы и положения источника относительно нее может находиться как справа, так и слева от линзы. Если изображение лежит справа от линзы, значит, что оно образовано сходящимся пучком лучей (рис. 19 а), т. е. лучей, которые действительно проходят через точку S' . Изображение будет действительным. Оно может быть получено на экране, фотопластинке и т. п.

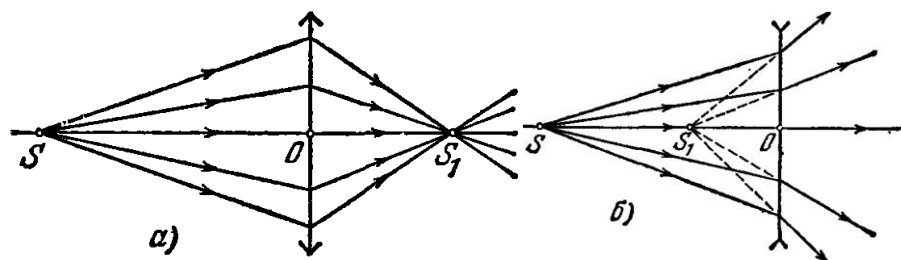


Рис. 19. Источник и действительное изображение лежат с разных сторон от линзы (а); мнимое изображение находится с той же стороны от линзы, что и источник (б)

Предположим, что изображение лежит слева от линзы, т. е. на одной стороне от источника. Это означает, что пучок лучей, расходящихся от источника, после преломления в линзе становится еще более расходящимся, и в точке S' пересекаются лишь воображаемые продолжения преломленных лучей (рис. 19 б). Изображение в этом случае будет мнимым.

Укоренившийся в оптике термин «мнимое изображение» может привести к некоторым недоразумениям. В действительности ничего «мнимого» в этом случае, конечно, нет. Особенностью мнимых изображений является то, что их нельзя получить непосредственно на экране, фотопластинке и т. п.

Если поместить в точке S' (рис. 20 б) очень маленький экран, не мешающий попаданию основной части лучей на линзу, то на экране не будет светящейся точки. Однако расходящийся пучок лучей, воображаемые продолжения которых пересекаются в мнимом изображении, сам по себе не имеет ничего «мнимого». Этот пучок можно превратить в сходящийся пучок, если на пути его поставить надлежащим образом выбранную собирающую линзу. Тогда на экране или фотопластинке мы будем иметь реальное изображение S'' светящейся точки S (рис. 20), которое в то же время можно рассматривать как изображение «мнимой точки» S' . Роль подобной собирающей линзы выполняет также глаз человека; на светочувствительной оболочке глаза – сетчатке – собираются расходящиеся от источников света лучи. Пучок расходящихся лучей, исходя ли они от реального точечного источника S или от его мнимого изображения S' , может быть собран оптической системой глаза в одну точку на сетчатке. В повседневной жизни наблюдатель приобретает привычку автоматически восстанавливать ход лучей, давших изображение на сетчатке, и определять ме-

стоположение источника. Когда в глаз попадает расходящийся пучок лучей (с вершиной в S'), изображенный на рис. 20, то, «восстанавливая» место, откуда вышли эти лучи, мы видим в точке S' источник, хотя в действительности в данной точке источника нет. Этот-то воображаемый источник мы и называем «мнимым» изображением точки S .

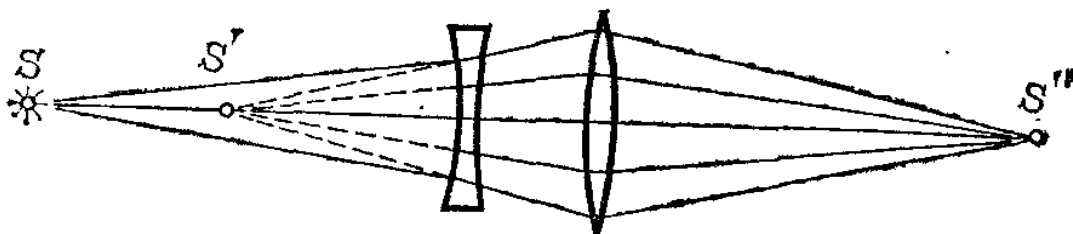


Рис. 20. Превращение расходящегося пучка лучей в сходящийся с помощью вспомогательной собирающей линзы

Построим три случая изображение светящейся точки, расположенной на главной оптической оси линзы, создаваемое линзой.

1. Светящаяся точка S находится за главным фокусом линзы F (рис. 21).

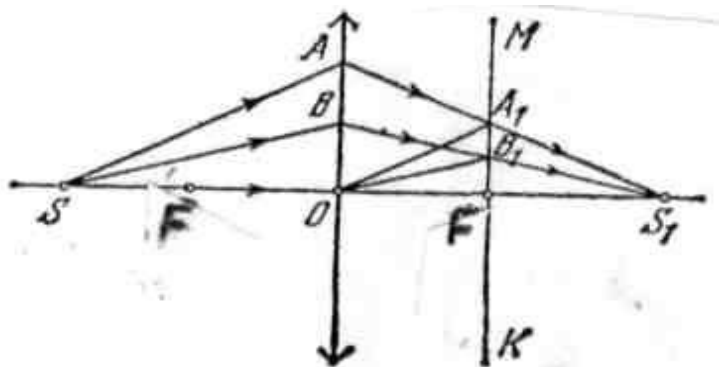


Рис. 21. Точка S находится за главным фокусом F

Так как в точке S_1 сходятся все лучи после преломления в линзе, то для определения положения точки S_1 достаточно установить, где пересекутся два таких луча. Прямая FO является главной оптической осью, собирающей линзы, KM – фокальная плоскость этой линзы. Луч, идущий из точки S вдоль главной оптической оси, проходит линзу, не преломляясь, поэтому изображение точки S будет находиться на главной оптической оси FO . Чтобы узнать, где именно будет изображение точки S , найдем ход произвольного луча SA после линзы. Для этого из точки O проведем побочную оптическую ось, параллельную лучу SA . Она пересечет фокальную плоскость KM в некоторой точке A_1 . Прямая, проведенная через точки A и A_1 , устанавливает ход луча

SA после преломления в линзе. Продолжив прямую AA_1 до пересечения с главной оптической осью, получим точку S_1 , которая и определяет положение изображения точки S , создаваемого линзой. Ясно, что любой другой луч SB после преломления в линзе тоже пройдет через точку S_1 (рис. 21); побочная оптическая ось OB_1 параллельна лучу SB .

2. Точка S находится между главным фокусом и оптическим центром линзы (рис. 22). Изображение точки S будет находиться где-то на главной оптической оси. Выделим **ПРОИЗВОЛЬНЫЙ** луч SA , падающий на линзу. Проведем побочную оптическую ось OA_1 , параллельную SA , и затем – прямую AA_1 до пересечения с главной оптической осью в точке S_1 . Точка S_1 – мнимое изображение точки S .

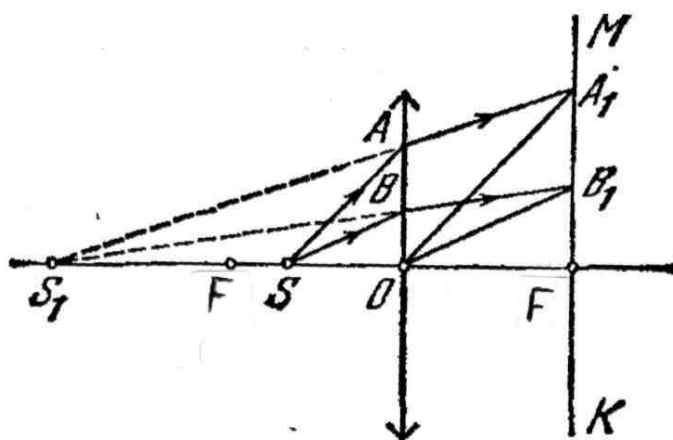


Рис. 22. Точка S находится между главным фокусом и оптическим центром линзы

3. Светящаяся точка находится на главной оптической оси рассеивающей линзы (рис. 23).

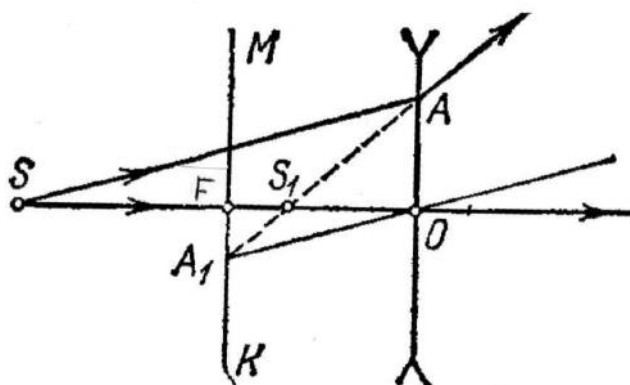


Рис. 23. Точка S находится на главной оптической оси рассеивающей линзы

При построении изображения светящаяся точка S должна быть на главной оптической оси линзы. Выделим произвольный луч SA и проведем параллельную ему побочную ось OA_1 . Точка пересечения прямой AA_1 с главной оптической осью и определит положение мни-

мого изображения S_1 . Изображение действительного точечного источника света в рассеивающей линзе всегда получается мнимое.

При построении изображения светящейся точки S положение изображения S_1 определяется положением точки S относительно линзы. Точки S и S_1 называют *сопряженными точками* линзы. Выведем формулу сопряженных точек линзы, позволяющую находить положение изображения точки S_1 с помощью вычислений.

Пусть на главной оптической оси собирающей линзы с оптическим центром O и фокусами OS_1 и F_2 находится светящаяся точка S (рис. 24), изображение которой является точка S_1 .

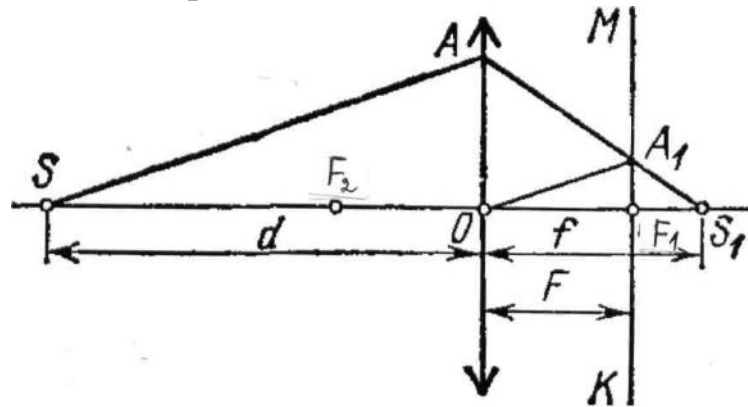


Рис. 24. Изображение светящейся точки S в точке S_1

KM — фокальная плоскость линзы, а $OA_1 \parallel SA$. Расстояние от светящейся точки S до оптического центра O будет d ($OS = d$), расстояние от изображения S до оптического центра O — f ($OS_1 = f$) и главное фокусное расстояние — F ($OF_1 = f$). Из подобия треугольников $SA S_1$ и $OA_1 S_1$ имеем

$$\frac{SS_1}{OS_1} = \frac{AS_1}{A_1S_1} \text{ или } \frac{d+f}{f} = \frac{AS_1}{A_1S_1}. \quad (1)$$

Из подобия треугольников $OA S_1$ и $F_1 A_1 S_1$ можно написать

$$\frac{OS_1}{F_1 S_1} = \frac{AS_1}{A_1 S_1} \text{ или } \frac{f}{f-F} = \frac{AS_1}{A_1 S_1}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что правые части уравнения равны, значит, равны и левые

$$\frac{d+f}{f} = \frac{f}{f-F}.$$

Отсюда

$$f \times F + d \cdot F = d \times f.$$

Разделив равенство на $d \cdot f \cdot F$, можно получить формулу сопряженных точек линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \quad \text{или}$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D.$$

От перемены местами значений d и f формула не изменяется. Это означает, что *светящаяся точка и ее изображение в линзе переместимы*, т. е. если светящуюся точку поместить, где было ее изображение, то изображение получится там, где была светящаяся точка. Точки S и S_1 называют *сопряженными*.

Формулы применимы как к собирающим, так и к рассеивающим линзам. При расчетах числовые значения действительных величин всегда подставляются со знаком плюс, а мнимых — со знаком минус. Например, для рассеивающей линзы на место F или D ставится число со знаком минус. Отрицательный ответ, полученный в результате вычислений, показывает, что соответствующая ему величина мнимая.

Построение изображения светящейся точки, расположенной на побочной оптической оси линзы

Когда светящаяся точка S находится на побочной оптической оси линзы, то линза создает ее изображение на той же оси. Построим это изображение.

1. Точка S находится за фокальной плоскостью собирающей линзы (рис. 25).

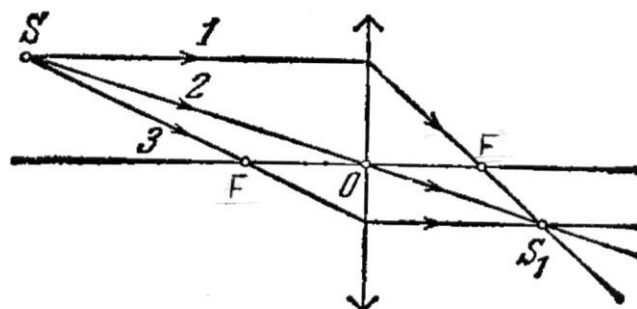


Рис. 25. Точка S находится за фокальной плоскостью собирающей линзы

Луч 1 из точки S проводится параллельно главной оптической оси. После преломления в линзе он идет через главный фокус. Луч 2 проводится вдоль побочной оси, т. е. через оптический центр линзы. Этот луч проходит линзу, не преломляясь. Луч проводится через

главный фокус Φ . После преломления в линзе он идет параллельно главной оптической оси. Точка пересечения этих лучей после преломления в линзе S_1 и определяет положение действительного изображения точки S .

2. Точка S расположена между фокальной плоскостью собирающей линзы и самой линзой (рис. 26). В этом случае из точки S можно провести три таких же луча, как и в первом случае. Точка пересечения двух любых из них S_1 определяет положение мнимого изображения точки S .

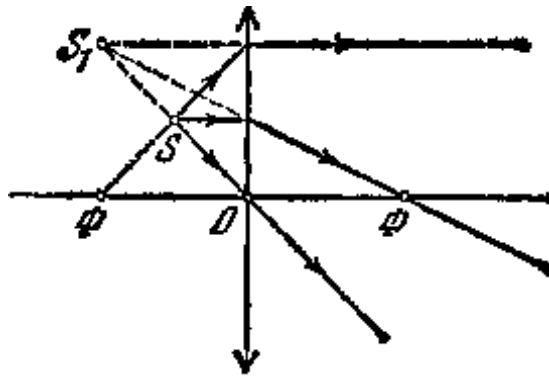


Рис. 26. Точка S расположена между фокальной плоскостью собирающей линзы и самой линзой

3. Точка S находится на побочной оси рассеивающей линзы (рис. 27). После преломления в линзе продолжение луча 1 должно проходить через фокус, который находится с той стороны линзы, где точка S . Луч 3 нужно проводить так, чтобы его продолжение проходило через фокус с другой стороны линзы, тогда после преломления в линзе луч пойдет параллельно главной оптической оси. Изображение действительной светящейся точки S , создаваемое рассеивающей линзой, всегда мнимое.

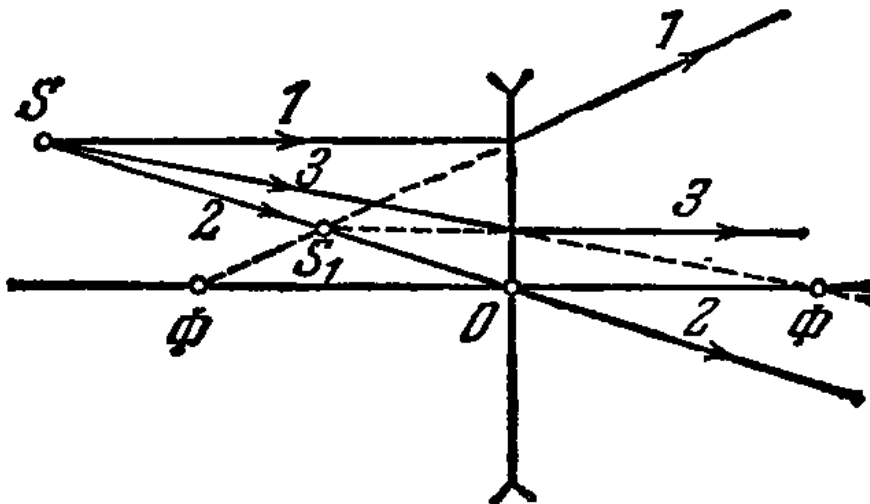


Рис. 27. Точка S находится на побочной оси рассеивающей линзы

Построение изображений предмета, создаваемых линзой

Приведем примеры типичных случаев построения изображений предмета AB , создаваемых линзой (рис. 28 а–е).

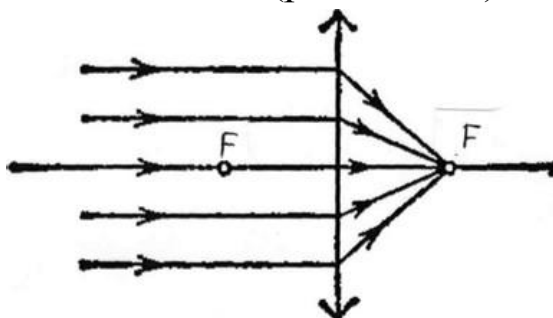


Рис. 28 а. Предмет находится на бесконечно большом расстоянии от линзы ($d \rightarrow \infty$)

Перед линзой расположен предмет, который условно изображен стрелкой, перпендикулярной главной оптической оси линзы. Изображение этого предмета, создаваемое линзой, является совокупностью изображений отдельных его точек, поэтому для построения изображения предмета достаточно найти, где будут находиться изображения его крайних точек.

Сначала строят изображение точки A , затем – точки B . Полученные таким способом точки A_1 и B_1 соединяют прямой $A_1 B_1$, которая и является изображением предмета AB .

Светящийся предмет находится на бесконечно большом расстоянии от линзы ($d \rightarrow \infty$), а его изображение получается в виде светящейся точки в главном фокусе линзы (рис. 28 а).

Предмет находится на расстоянии d от линзы, которое больше фокусного расстояния ($d > 2F$). Предмет и его изображение находятся по разные стороны линзы, а расстояние от линзы до изображения f оказывается больше F , но меньше $2F$ ($F < f < 2F$). Изображение получается действительное, перевернутое и уменьшенное (рис. 28 б).

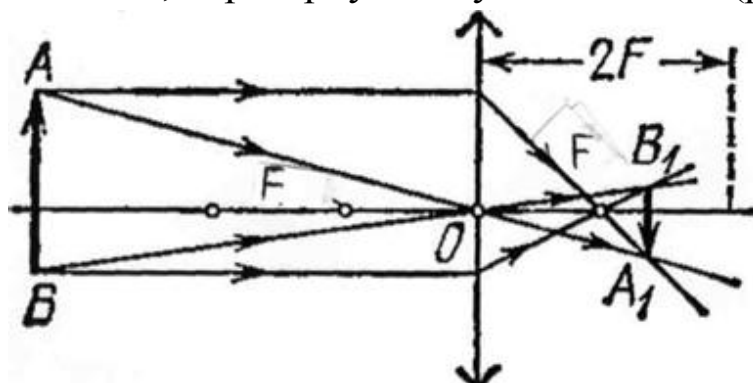


Рис. 28 б. Расстояние от предмета до линзы d больше $2F$

Расстояние от предмета d от линзы равно двойному фокусному расстоянию ($d = 2F$) (рис. 28 в). Предмет и его изображение находятся по разные стороны линзы, а расстояние от линзы до изображения $f = d = 2F$. Изображение – действительное, перевернутое и в натуральную величину.

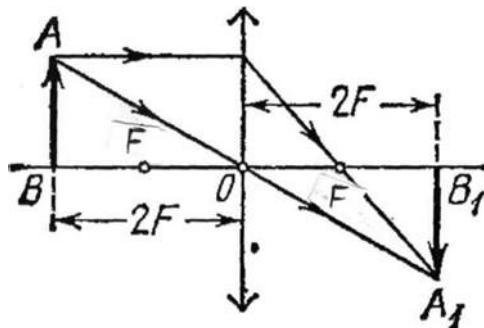


Рис. 28 в. Расстояние от предмета до линзы d равно $2F$

Предмет находится между фокусом и двойным фокусным расстоянием ($F < d < 2F$) (рис. 28 г). Предмет и его изображение находятся по разные стороны линзы, а расстояние от линзы до изображения $f > 2F$. Изображение получается действительное, перевернутое и увеличенное.

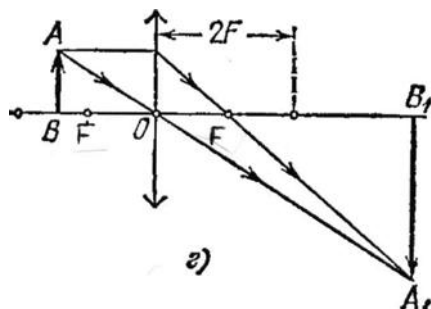


Рис. 28 г. Расстояние от предмета до линзы d больше F , но меньше $2F$

Предмет находится в главном фокусе линзы, т. е. $d = F$ (рис. 28 д). Лучи от каждой точки предмета после преломления в линзе идут параллельным пучком. Изображение бесконечно большое и на бесконечно большом расстоянии от линзы, что равносильно отсутствию изображения.

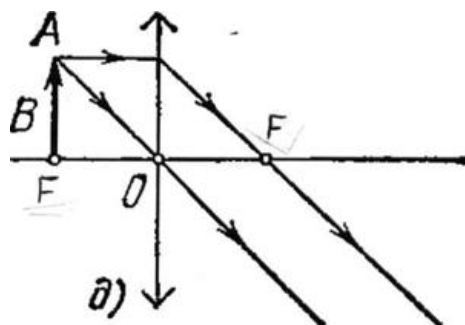


Рис. 28 д. Предмет находится в главном фокусе линзы

Расстояние от предмета до линзы d меньше главного фокусного расстояния ($d < F$) (рис. 28 е). Предмет и его изображение находятся по одну сторону линзы, а расстояние от линзы до изображения $f > d$. Изображение – мнимое, прямое и увеличенное.

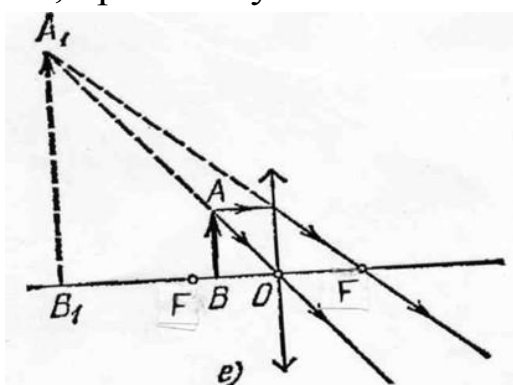


Рис. 28 е. Расстояние от предмета до линзы d меньше главного фокусного расстояния F

Построение изображения предмета, создаваемого рассеивающей линзой, показано на рис. 29.

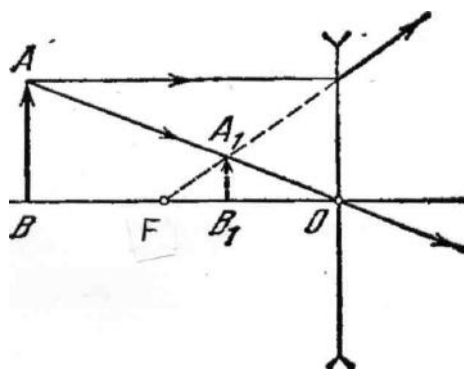


Рис. 29. Построение изображения предмета, создаваемого рассеивающей линзой

Рассеивающая линза всегда дает мнимое, уменьшенное и прямое изображение предмета, которое находится между главным фокусом и линзой. Расстояние от этого изображения до линзы f всегда меньше расстояния от предмета до линзы d . В этом случае предмет и его изображение тоже всегда движутся в одном направлении, а когда предмет соприкасается с линзой, его изображение совпадает с ними и имеет натуральную величину.

Линейное увеличение, полученное с помощью линзы

Линейным увеличением Γ называют отношение высоты (ширины) изображения предмета к истинной высоте (ширине) самого предмета. **Если высоту предмета обозначить через h , а высоту изображения через H , то**

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$

Увеличение Γ связано с расстояниями от линзы до предмета d и до его изображения f . На рис. 30 показаны положения предмета AB и его изображения A_1B_2 относительно линзы. Из подобия $\triangle AOB$ и $\triangle A_1OB_1$ следует, что

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{OB_1}{OB}.$$

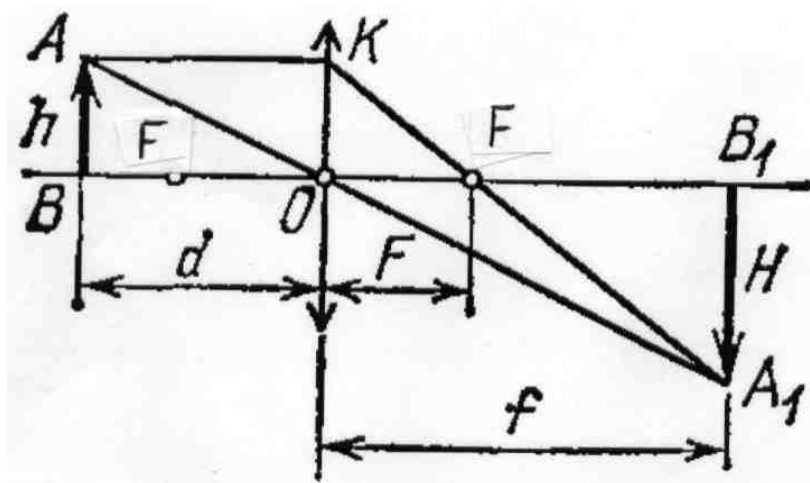


Рис. 30. Линейное увеличение линз

Так как $A_1B_1 = H$, $AB = h$, $OB = f$ и $OB_1 = d$, то

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{d} \text{ или } \Gamma = \frac{f}{d}.$$

Собирающая линза дает увеличение только в тех случаях, когда изображение оказывается дальше от линзы, чем предмет.

Лекция 11. Оптические приборы и их погрешности

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. *Оптические системы.*
 - 1.1. *Главные плоскости и главные точки оптической системы.*
 - 1.2. *Построение изображений в оптической системе.*
 - 1.3. *Недостатки оптических систем.*
2. *Оптические приборы.*
 - 2.1. *Проекционные оптические приборы.*
 - 2.2. *Фотографический аппарат.*
3. *Глаз как оптическая система.*
4. *Оптические приборы, вооружающие глаз.*
 - 4.1. *Луна.*
 - 4.2. *Микроскоп.*
 - 4.3. *Зрительные трубы.*
 - 4.4. *Телескопы.*
5. *Разрешающая способность оптических приборов.*
6. *Дифракционные решетки.*

1. Оптические системы

Простейшую оптическую систему представляет тонкая линза. Простые тонкие линзы применяются главным образом в виде стекол для очков. Общеизвестно применение линзы в качестве увеличительного стекла (лупы). Действие многих оптических приборов – проекционного фонаря, фотоаппарата и др. – может быть схематически уподоблено действию тонких линз. Тонкая линза дает хорошее изображение только в том случае, когда можно ограничиться узким одноцветным пучком, идущим от источника вдоль главной оптической оси или под небольшим углом к ней. В большинстве практических задач, где эти условия не выполняются, изображение, даваемое тонкой линзой, довольно несовершенно. Поэтому обычно прибегают к построению более сложных оптических систем, соединяя несколько более простых тонких линз в единую оптическую систему.

1.1. Главные плоскости и главные точки оптической системы

Рассмотрим сложную оптическую систему, расположив несколько линз одну за другой так, чтобы их главные оптические оси совпадали (рис. 1) и образовали одну общую главную оптическую ось, проходящую через центры всех поверхностей, ограничивающих отдельные линзы. Направим на систему пучок параллельных лучей, соблюдая условие, чтобы диаметр этого пучка был достаточно мал. По выходе из системы пучок собирается в одной точке F' , которую, так же как и в случае тонкой линзы, назовем задним фокусом системы. Направив параллельный пучок на систему с противоположной стороны, найдем передний фокус системы F .

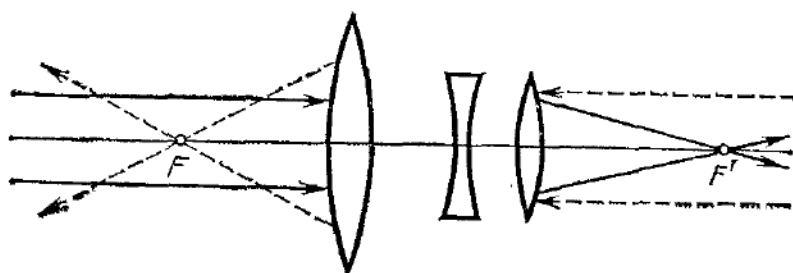


Рис. 1. Фокусы оптической системы

В случае тонкой линзы все построения можно сделать, не рассматривая хода лучей в линзе и ограничившись изображением линзы в виде главной плоскости. Если рассматривать оптическую систему, состоящую из двух тонких линз, то придется использовать не одну главную плоскость, а совокупность двух, главных плоскостей. Эти плоскости перпендикулярны к оптической оси системы и пересекают ее в двух главных точках H и H' . Отметив на оси положение главных фокусов, будем иметь полную характеристику оптической системы (рис. 2).

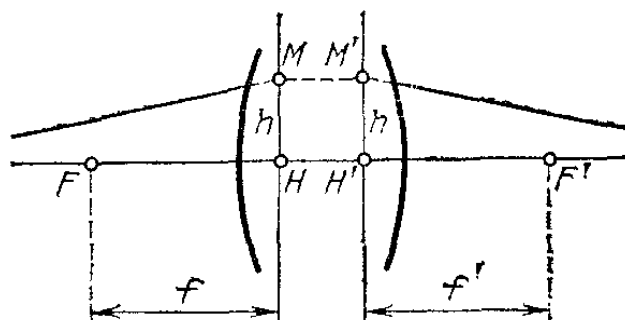


Рис. 2. Главные плоскости оптической системы

Две главные плоскости системы заменяют единую главную плоскость тонкой линзы: переход от системы к тонкой линзе означает

сближение двух главных плоскостей до слияния, так что главные точки H и H' сближаются и совпадают с оптическим центром линзы.

Это обстоятельство находится в соответствии с их основным свойством: луч, входящий в систему, пересекает первую главную плоскость на той же высоте h , на какой выходящий из системы луч пересекает вторую главную плоскость (рис. 2).

С помощью главных плоскостей решается и вопрос о фокусных расстояниях системы. Фокусными расстояниями оптической системы называются расстояния от главных точек до соответствующих им фокусов.

Если обозначим F и H – передний фокус и соответственно переднюю главную точку, F' и H' – задний фокус и соответственно заднюю главную точку, то $f' = H'F'$ есть заднее фокусное расстояние системы, а $f = HF$ – ее переднее фокусное расстояние.

Если по обе стороны системы находится одна и та же среда (например, воздух), так что в ней расположены передний и задний фокусы, то $f = f'$, как и для тонкой линзы.

1.2. Построение изображений в оптической системе

Зная положение главных и фокальных плоскостей системы, мы можем построить изображение в системе, совершенно не интересуясь ее конкретными свойствами – числом преломляющих поверхностей, их положением и кривизной и т. д. Для построения достаточно провести какие-нибудь два луча из числа тех, построение которых может быть выполнено без затруднений. Ход этих лучей изображен на (рис. 3).

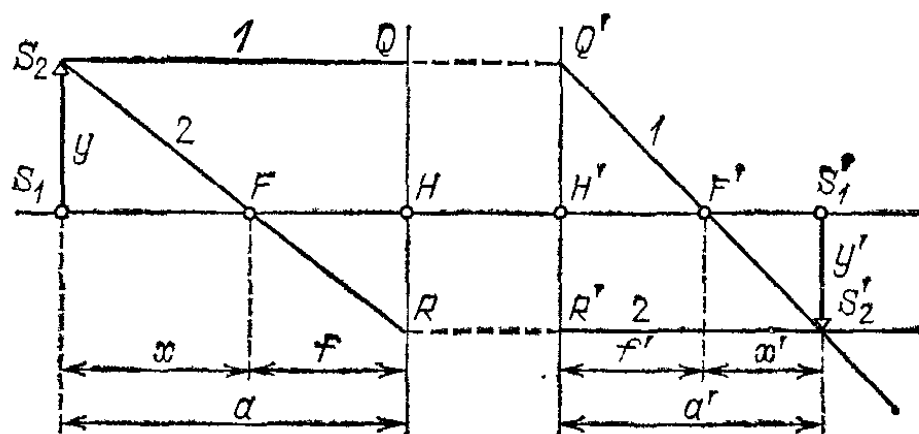


Рис. 3. Построение изображения в оптической системе

Луч 1 падает на систему параллельно главной оси; если этот луч пересекает переднюю главную плоскость в точке Q , то по свойству

главных плоскостей он пересечет заднюю главную плоскость в точке Q' на той же высоте над осью и пройдет, выйдя из системы через задний фокус F' .

Луч 2 проходит через передний фокус и пересекает главную плоскость в точке R ; он пройдет на той же высоте ($R'H' = RH$) через заднюю главную плоскость и выйдет из системы параллельно главной оси.

1.3. Недостатки оптических систем

Изображение, полученное с помощью оптических систем, обладает некоторыми погрешностями. Погрешности оптических систем называют *абберациями*.

Рассмотрим некоторые абберации (рис. 4).

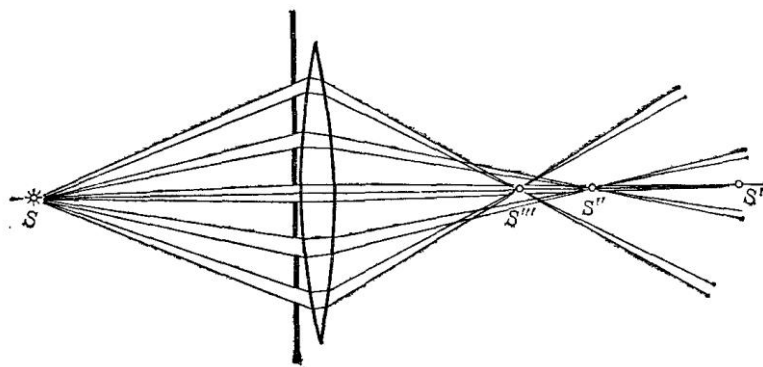


Рис. 4. Возникновение сферической абберации

Лучи, проходящие через отдельные зоны линзы, расположенные на разных расстояниях от главной оптической оси, дают изображения точки S в разных точках S' , S'' , S''' , лежащие на разных расстояниях от линзы. В результате линза большого диаметра дает изображение точечного источника не в виде точки, а в виде расплывчатого светлого пятнышка.

Эта погрешность оптических систем называется *сферической абберацией* (рис. 5).



Рис. 5. Сферическая абберация

Один из способов устранения сферической aberrации – это ограничение ширины пучка, т. е. диафрагмирование линзы. Однако при этом уменьшается и энергия светового пучка, что не всегда желательно.

Второй способ устранения сферической aberrации основан на том, что собирающие и рассеивающие линзы имеют противоположную сферическую aberrацию (рис. 6).

Пример: пропустим луч света через собирающую линзу (рис. 6 а). Чем дальше от главной оптической оси линзы выходит луч, тем сильнее он преломляется и тем ближе к линзе находится точка его пересечения с осью, и наоборот, чем ближе к главной оптической оси линзы выходит луч, тем меньше он преломится и тем дальше от линзы находится точка его пересечения с осью. Если пропустить луч света через рассеивающую линзу (рис. 6 б), то происходит также. Заставив свет после собирающей линзы пройти через рассеивающую линзу, увеличим фокусное расстояние. Это увеличение будет менее значительным для центральных лучей, чем для лучей периферических (рис. 7).

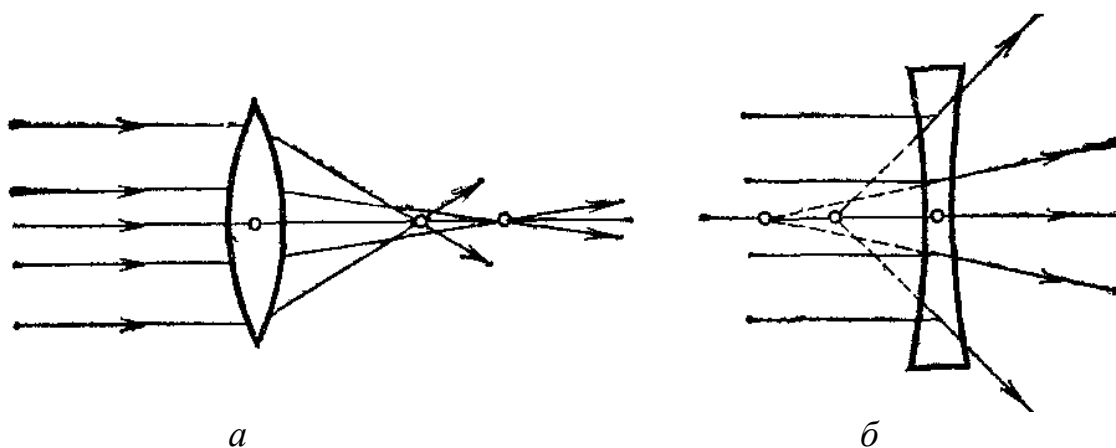


Рис. 6. Сферическая aberrация: а – в собирающей линзе;
б – в рассеивающей линзе

Рассеивающая линза благодаря своей сферической aberrации выравнивает различие фокусных расстояний центральных и периферических лучей, обусловленное сферической aberrацией собирающей линзы. Правильно рассчитав комбинацию собирающей и рассеивающей линз, мы можем столь полно осуществить это выравнивание, что сферическая aberrация системы из двух линз будет практически сведена к нулю (рис. 7 а). Обычно обе простые линзы, сферические aberrации которых взаимно компенсируют друг друга, склеиваются (рис. 7 б).

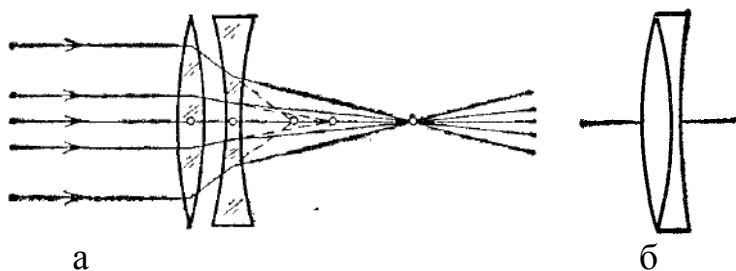


Рис. 7. Исправление сферической аберрации: а – путем комбинирования собирающей и рассеивающей линз; б – склеенный астрономический объектив, исправленный на сферическую аберрацию

Сложную линзу или систему, у которой устранена сферическая аберрация, называют *апланатом*.

Погрешность оптических систем, называемая *астигматизмом*, проявляется в тех случаях, когда желают получить изображение точки, находящейся на значительном расстоянии от главной оси системы, точнее, при использовании световых пучков, составляющих значительный угол с главной осью (косые пучки). Даже наилучшее изображение точки, не лежащей на главной оси линзы, представляет собой не точку, а две взаимно перпендикулярные и находящиеся в разных местах линии (рис. 8).

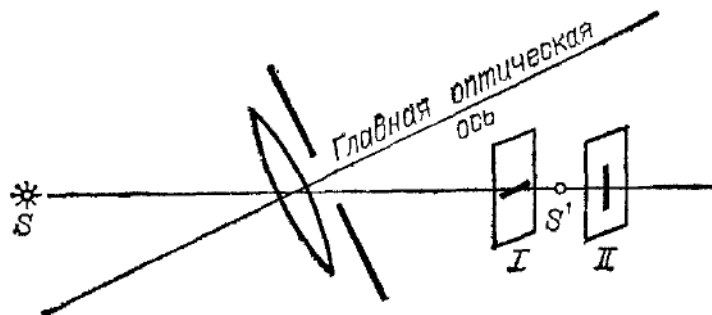


Рис. 8. Астигматизм линзы

Астигматизм остается даже при использовании узких световых пучков, а также может сохраняться в системах, освобожденных от сферической аберрации.

Для исправления астигматизма приходится строить сложные оптические системы, состоящие из нескольких частей, подобранных специальным образом так, чтобы они взаимно компенсировали астигматизм, обусловленный каждой из них. Современные фотографические объективы, исправленные в отношении астигматизма, дают хорошее изображение при углах до 50–70°.

Системы с исправленным астигматизмом называются *анастигматами*.

При использовании белого света (содержащего лучи всех цветов) изображение, даваемое линзой, оказывается обычно окрашенным (окаймленным цветными кружками и т. п.). Описанное явление носит название *хроматической aberrации* (рис. 9).

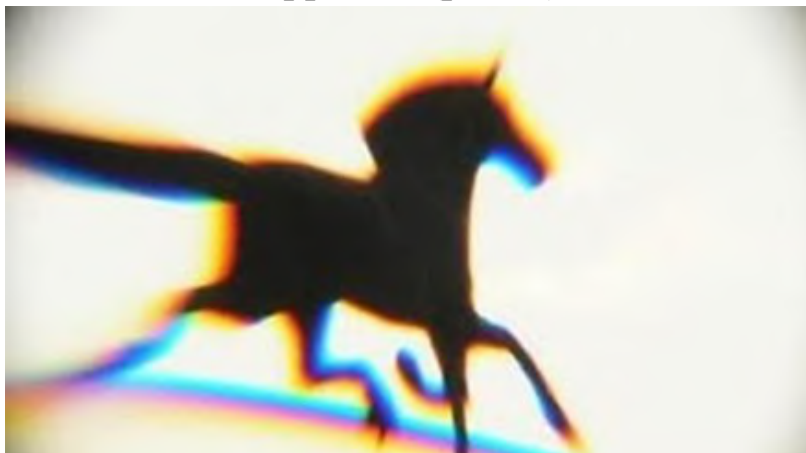


Рис. 9. Хроматическая aberrация

Эта погрешность возникает вследствие того, что показатель преломления зависит от длины волны света (дисперсия). Из-за этого и фокусное расстояние линзы, которое зависит от показателя преломления, будет различным для лучей различного цвета. В результате изображения точки S для лучей различного цвета будут находиться на разных расстояниях от линзы. Изображение точки S в синих лучах S'_c не совпадает с изображением в красных лучах S'_k (рис. 10).

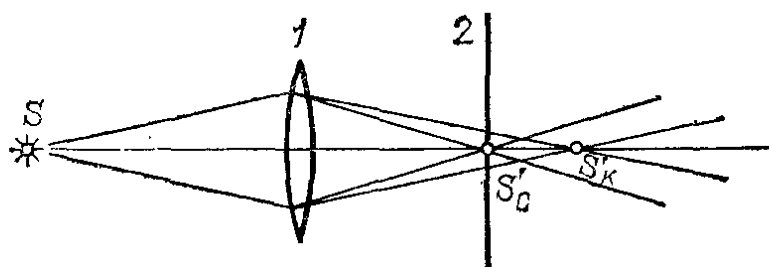


Рис. 10. Хроматическая aberrация

К двояковыпуклой линзе из стекла с малой дисперсией приклеивается соответствующим образом рассчитанная рассеивающая линза из стекла с большой дисперсией (рис. 11). Добавочная линза удлиняет фокусные расстояния первой линзы, причем фокусное расстояние синих лучей, сильнее преломляемых, увеличивается в большей степени, чем фокусное расстояние красных лучей, слабее преломляемых.

Соединившись в одном месте, изображения разных цветов дадут практически белую точку, т. е. хроматическая aberrация будет устранена.

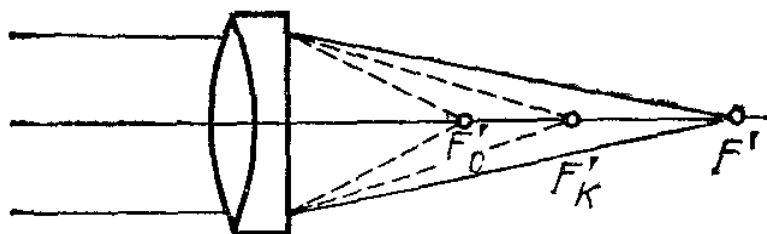


Рис. 11. Исправление хроматической аберрации

Линзу или оптическую систему, у которых этот недостаток устранен для двух цветов, называют *ахроматическими*, а в случае совпадения изображений для трех цветов систему называют *апохроматом*.

Реальные линзы создают искажения и других типов, с которыми приходится бороться. Так, светящаяся точка, расположенная не на оптической оси и посылающая широкий пучок, дает изображение в виде светящегося пятнышка с хвостиком, похожее на запятую. Это искажение носит название *комы* (рис. 12).



Рис. 12. Кома

Различное увеличение в центре и на периферии приводит к искажению формы изображения, называемому *абберацией дисторсии*. Для борьбы со всеми этими искажениями приходится простые одиночные линзы заменять сложными оптическими системами (рис. 13).

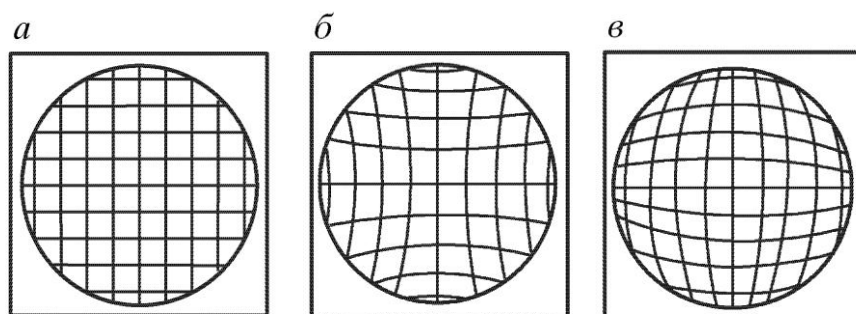


Рис. 13. Абберация дисторсии

Квадратная сетка (рис. 13 а) может в линзе изображаться так, как это показано на рис. 13 б (подушкообразная дисторсия) или на рис. 13 в (бочкообразная дисторсия).

Иллюстрацией дисторсии в фотографии служит рис. 14.



Рис. 14. Дисторсия

Для борьбы этими искажениями приходится простые одиночные линзы заменять сложными оптическими системами. Объективы, исправленные на дисторсию, используются, например, для аэрофото-съемки.

Тщательное изучение погрешностей оптических систем позволяет найти пути для уменьшения их влияния, и в современных оптических приборах эти погрешности настолько уменьшены, что незначительно сказываются на качестве изображения.

2. Оптические приборы

Законы образования изображений в оптических системах служат основой для построения разнообразных оптических приборов. Основной частью всякого оптического прибора является некоторая оптическая система. В одних оптических приборах изображение получается на экране, который должен быть установлен в плоскости изображения, другие приборы предназначены для работы совместно с глазом. В последнем случае прибор и глаз представляют как бы единую оптическую систему и изображение получается на сетчатой оболочке глаза.

Рассмотрим действие оптических приборов на основе законов геометрической оптики. Однако для решения некоторых вопросов представление о световых лучах оказывается недостаточно точным, и приходится учитывать волновые свойства света.

2.1. Проекционные приборы

Рассмотрим проекционные приборы, которые дают на экране действительное, увеличенное и обратное изображение картины или

предмета. Такое изображение может рассматриваться со сравнительно большого расстояния и благодаря этому может быть видно одновременно большому числу людей.

На рис. 15 изображена схема проекционного аппарата, предназначенного для демонстрации прозрачных объектов, например рисунков и фотографических изображений на стекле (диапозитивы), фильмов и т. п. Такие аппараты называются диаскопами (диа – прозрачный). Освещение объекта 1 производится ярким источником света 2 с помощью системы линз 3, называемой конденсором. Иногда за источником устанавливается вогнутое зеркало 4, в центре которого находится источник. Это зеркало, направляя обратно в систему свет, падающий на заднюю стенку фонаря, увеличивает освещенность объекта. Объект помещается вблизи фокальной плоскости объектива 5, который дает изображение на экране 6.

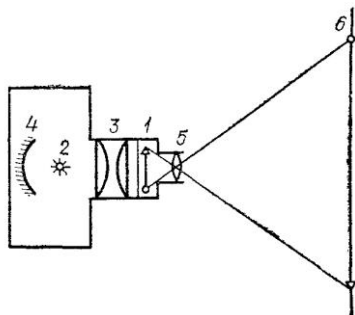


Рис. 15. Схема проекционного аппарата для демонстрации прозрачных объектов: 1 – объект; 2 – источник света; 3 – конденсор; 4 – вогнутое зеркало; 5 – объектив; 6 – экран

Для того чтобы освещенность объекта была достаточно высокой и притом равномерной, важную роль играет правильный подбор конденсора.

Для демонстрации на экране непрозрачных предметов, например чертежей и рисунков, выполненных на бумаге, их сильно освещают сбоку с помощью ламп и зеркал и проецируют с помощью светосильного объектива. Схема такого прибора, называемого *эпископом* или *эпипроектором*, изображена на рис. 16. Источник 1 с помощью вогнутого зеркала 2 освещает объект 3, лучи от каждой точки S объекта поворачиваются плоским зеркалом 4 и направляются в объектив 5, который дает изображение на экране 6.

Часто применяют приборы, имеющие двойную систему для проецирования как прозрачных, так и непрозрачных предметов. Такие приборы называются *эпидиаскопами*.

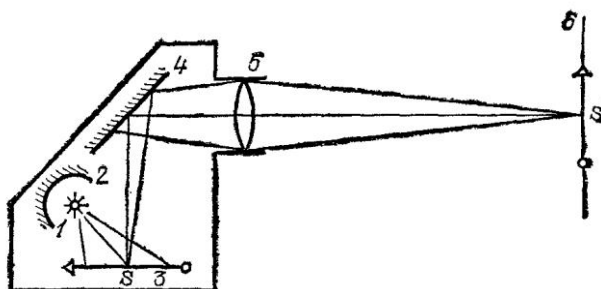


Рис. 16. Проекционный аппарат для демонстрации непрозрачных объектов: 1 – источник света; 2 – вогнутое зеркало; 3 – объект; 4 – плоское зеркало; 5 – объектив; 6 – экран

2.2. Фотографический аппарат

Рассмотрим простейшую схему получения изображения в фотоаппарате.

Схема простейшего фотоаппарата изображена на рис. 17. Фотоаппарат состоит из объектива 1 и ящика 2 со светонепроницаемыми стенками, называемого камерой. Объектив помещается в передней стенке камеры. Объектив помещается в передней стенке камеры, а у задней стенки помещают чувствительную к свету фотографическую пластинку 3.

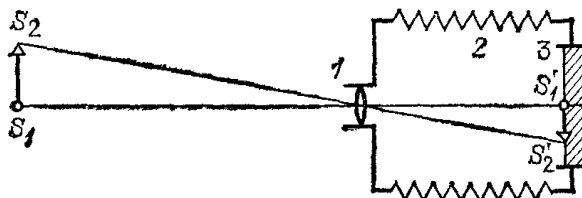


Рис. 17. Схема фотоаппарата: 1 – объектив; 2 – камера; 3 – фотопластинка

Последняя находится в светонепроницаемой коробочке – кассете – с выдвижной крышкой, которая открывается только перед съемкой. При фотографировании предмет, как правило, находится на расстоянии, гораздо большем фокусного расстояния объектива. Вследствие этого на пластинке получается обратное уменьшенное, действительное изображение $S'_1 S'_2$ предмета $S_1 S_2$.

Для того чтобы получить отчетливое изображение фотографируемого предмета, несколько передвигают объектив относительно задней стенки камеры. С этой целью в некоторых аппаратах первых конструкций боковые стенки камеры делали в форме гармоник; при этом вся камера сжималась или растягивалась. В современных аппаратах наводка на резкость осуществляется путем передвижения объектива в его тубусе. Промежуток времени, необходимый для освеще-

ния пластинки (выдержка), зависит от чувствительности пластинки и от условий освещения фотографируемого предмета. Под действием света в светочувствительном слое фотопластинки образуется невидимое глазом скрытое изображение. Для выявления этого изображения освещенная фотопластинка подвергается специальной обработке.

В зависимости от назначения применяют весьма разнообразные конструкции фотоаппаратов. Наиболее ответственной частью фотоаппарата является фотообъектив. Фотообъективы, сочетающие большую светосилу и большой угол зрения с высоким качеством изображения, состоят обычно из нескольких линз и представляют довольно сложную конструкцию (рис. 18). На оправе объектива гравятся характеризующие его величины. Обычно применяемые фотообъективы имеют относительное отверстие от 1:7,0 до 1:2,5 при поле зрения 50–60°. Существуют и еще более светосильные объективы (с относительным отверстием 1:1,00–1:0,85).

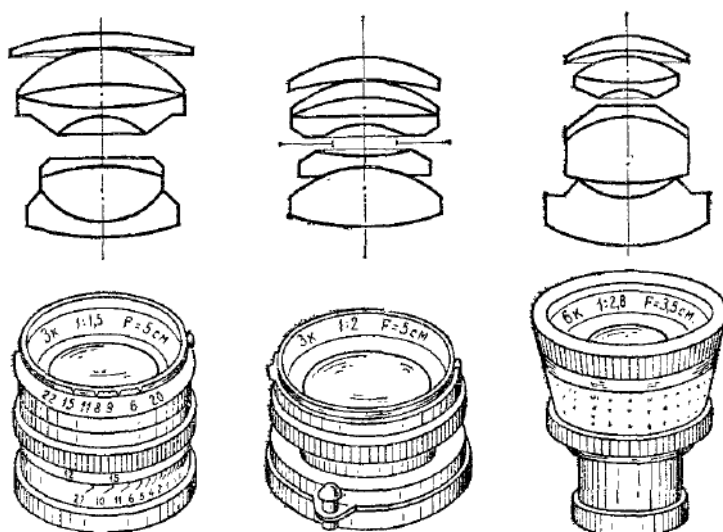


Рис. 18. Объективы фотоаппарата (схемы и внешний вид)

Для того чтобы регулировать световой поток, поступающий в фотоаппарат, объектив снабжается диафрагмой, диаметр которой можно изменять и таким образом менять относительное отверстие.

3. Глаз как оптическая система

Для расширения возможностей визуального наблюдения применяются различные оптические приборы. Поскольку при этом изображения, получаемые в оптическом приборе, рассматриваются глазом, то требования, предъявляемые к этим изображениям, зависят от свойств человеческого глаза. Поэтому сначала рассмотрим строение глаза как оптической системы.

Глаз человека имеет приблизительно шарообразную форму; диаметр его (в среднем) 2,5 см (рис. 19); глаз окружен снаружи тремя оболочками. Внешняя твердая и прочная оболочка 1, называемая склерой или белковой оболочкой, защищает внутренность глаза от механических повреждений. Склера на передней части глаза прозрачна и называется роговой оболочкой или роговицей 2; на всей остальной части глаза она непрозрачна, имеет белый цвет и называется белком. С внутренней стороны к склере примыкает сосудистая оболочка 3, состоящая из сложного сплетения кровеносных сосудов, питающих глаз. Эта вторая оболочка в передней части глаза переходит в радужную оболочку, окрашенную у разных людей в различный цвет. Радужная оболочка имеет в середине отверстие, называющееся зрачком 4. Радужная оболочка способна деформироваться и таким образом менять диаметр зрачка. Изменение это происходит рефлекторно (без участия знания) в зависимости от количества света, попадающего в глаз; при ярком освещении диаметр зрачка равен 2 мм, при слабом освещении доходит до 8 мм. На внутренней поверхности сосудистой оболочки расположена сетчатая оболочка, или сетчатка 6. Она покрывает все дно глаза, кроме его передней части.

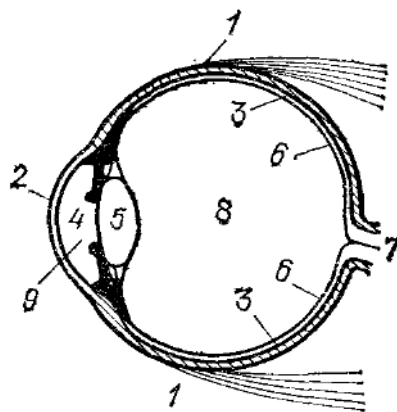


Рис. 19. Схематический разрез глаза человека: 1 – белковая оболочка, 2 – роговая оболочка, 3 – сосудистая оболочка, 4 – зрачок, 5 – хрусталик, 6 – сетчатая оболочка, 7 – нерв, 8 – стекловидное тело, 9 – передняя камера

Сзади через оболочку входит зрительный нерв 7, соединяющий глаз с мозгом. Сетчатка состоит в основном из разветвлений волокон зрительного нерва и их окончаний и образует светочувствительную поверхность глаза. Промежуток между роговой и радужной оболочками называется передней камерой 9; он заполнен камерной влагой. Внутри глаза, непосредственно за зрачком, расположен хрусталик 5,

представляющий собой прозрачное упругое тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы. Кривизна поверхностей хрусталика может меняться в результате действия облегающей его со всех сторон мышцы. Посредством изменения кривизны поверхностей хрусталика достигается приведение изображения предметов, лежащих на различных расстояниях, точно на поверхность чувствительного слоя сетчатки; этот процесс называется аккомодацией. Вся полость глаза за хрусталиком заполнена прозрачной студенистой жидкостью, образующей стекловидное тело 8.

Способность глаза к аккомодации обеспечивает возможность получения на сетчатке резких изображений предметов, находящихся на различных расстояниях. «Нормальный» глаз в спокойном состоянии, т. е. без какого-либо усилия аккомодации, дает на сетчатке отчетливое изображение удаленных предметов (например, звезд). С помощью мышечного усилия, увеличивающего кривизну хрусталика и, следовательно, уменьшающего его фокусное расстояние, глаз осуществляет наводку на нужное расстояние.

Наименьшее расстояние, на котором нормальный глаз может отчетливо видеть предметы, меняется в зависимости от возраста от 10 см (возраст до 20 лет) до 22 см (возраст около 40 лет). В более пожилом возрасте способность глаза к аккомодации еще уменьшается: наименьшее расстояние доходит до 30 см и более – возрастная дальность зрения.

Далеко не у всех людей глаз дает четкое изображение на сетчатке. Нередко задний фокус глаза в спокойном состоянии находится не на самой сетчатке (как у нормального глаза), а с той или другой стороны от нее. Если фокус глаза в спокойном состоянии лежит внутри глаза перед сетчаткой (рис. 20 а), то глаз называется близоруким. Такой глаз не может отчетливо видеть отдаленные предметы, так как напряжение мышц при аккомодации еще сильнее отдаляет фокус от сетчатки. Для исправления близорукости глаза должны быть снабжены очками с рассеивающими линзами (рис. 20 б).

В дальнозорком глазе фокус при спокойном состоянии глаза находится за сетчаткой (рис. 20 в). Дальнозоркий глаз преломляет слабее нормального. Для того чтобы видеть даже весьма удаленные предметы, дальнозоркий глаз должен делать усилие; для видения

близко лежащих предметов аккомодационная способность глаза уже недостаточна. Поэтому для исправления дальнозоркости употребляются очки с собирающими линзами (рис. 20 г), приводящие фокус глаза в спокойном состоянии на сетчатку.

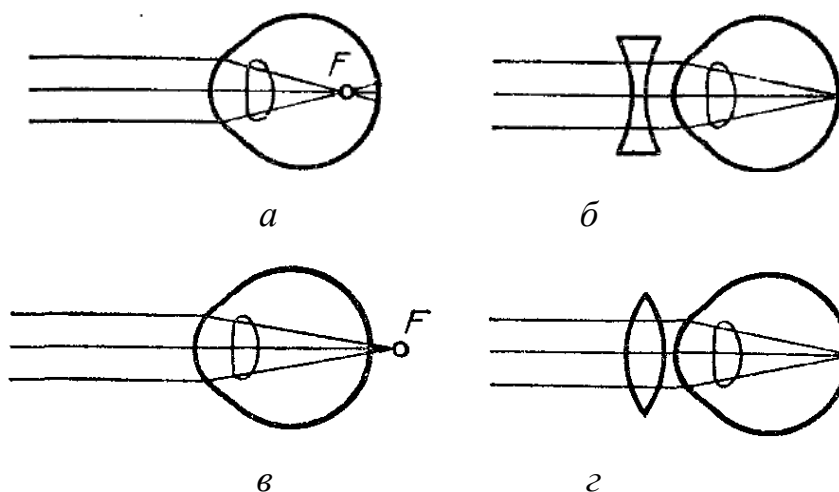


Рис. 20. Близорукость глаза а исправляется с помощью рассеивающей линзы б; дальнозоркость в – с помощью собирающей линзы г

Аккомодация глаза не безгранична. С помощью кольцевой мышцы оптическая сила глаза может увеличиваться не больше чем на 12 диоптрий. При долгом рассматривании близких предметов глаз устает, а кольцевая мышца начинает расслабляться и изображение предмета расплывается.

Наименьшее расстояние, на котором глаз может ясно видеть предметы без напряжения, называют *расстоянием наилучшего зрения* (D). Принято считать, что для людей с нормальным зрением $D = 25$ см. Именно на таком расстоянии от глаз человек держит книгу при чтении, если нет дальнозоркости или близорукости.

Глаза человека позволяют хорошо видеть предметы не только при дневном освещении. Способность глаза приспосабливаться к различной степени раздражения окончаний светочувствительного нерва на сетчатке глаза, т. е. к различной степени яркости наблюдаемых предметов, называют адаптацией (лат. «адаптация» – прилаживание). Существенное значение для человека имеет его способность с помощью зрения определять положения предметов в пространстве относительно друг друга и оценивать расстояние до предмета. Рассмотрим оптические приборы, применяемые для наблюдения за далекими и близкими предметами.

4. Оптические приборы, вооружающие глаз

Хотя глаз и не представляет собой тонкую линзу, в нем можно все же найти точку, через которую лучи проходят практически без преломления, т. е. точку, играющую роль оптического центра. Оптический центр глаза находится внутри хрусталика вблизи задней поверхности его. Расстояние h от оптического центра до сетчатой оболочки, называемое глубиной глаза, составляет для нормального глаза 15 мм. Зная положение оптического центра, можно легко построить изображение какого-либо предмета на сетчатой оболочке глаза. Изображение всегда действительное, уменьшенное и обратное. Приближая предмет к глазу, мы увеличиваем угол зрения (рис. 21).

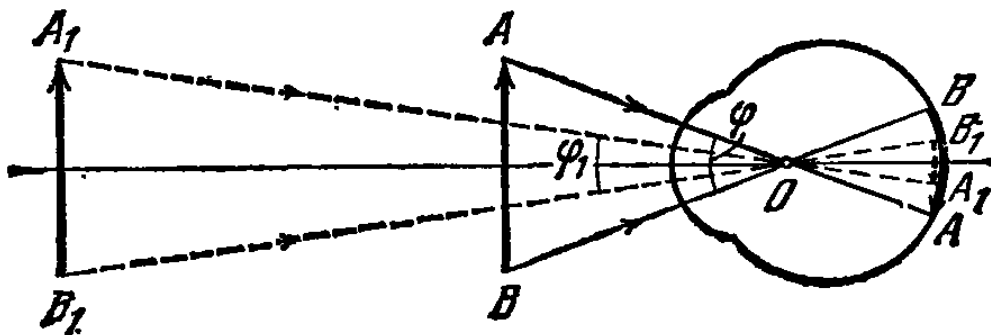


Рис. 21. Угол зрения

Углом зрения называют угол, составленный прямыми, проведенными из оптического центра глаза к крайним точкам предмета.

Угол зрения φ при рассматривании предмета AB больше угла зрения φ_1 для предмета A_1B_1 . При большем угле зрения изображение покрывает значительное количество окончаний светочувствительного нерва на сетчатке, поэтому человек различает много деталей в рассматриваемом предмете. Величина изображения (угла зрения) зависит от размеров рассматриваемого предмета и от расстояния до него.

Когда рассматриваемый предмет AB удаляется от глаза, то его изображение A_1B_1 на сетчатке уменьшается по сравнению с изображением AB , так как уменьшается и угол зрения.

Благодаря увеличению угла зрения при использовании оптического прибора размер изображения предмета на сетчатке увеличивается по сравнению с изображением в невооруженном глазе и, следовательно, возрастает способность распознавания деталей.

По своему назначению оптические приборы, вооружающие глаз, можно разбить на следующие две большие группы.

1. Приборы, служащие для рассматривания очень мелких предметов (лупа, микроскоп). Эти приборы как бы «увеличивают» рассматриваемые предметы.

2. Приборы, предназначенные для рассматривания удаленных объектов (зрительная труба, бинокль, телескоп и т. п.). Эти приборы как бы «приближают» рассматриваемые предметы.

4.1. Лупа

Простейшим прибором для вооружения глаза, позволяющим увеличить угол зрения, является лупа. В качестве лупы применяются собирающие линзы с фокусным расстоянием от 10 до 100 мм.

Получается мнимое, прямое, увеличенное изображение (рис. 22).

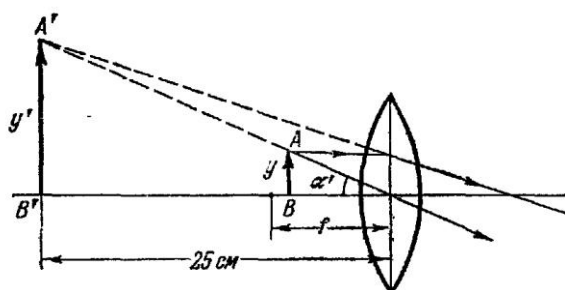


Рис. 22. Ход лучей при рассматривании небольшого предмета через лупу

Лупа помещается перед глазом, по возможности ближе к нему, а рассматриваемый предмет – на расстоянии, немного меньшем фокусного расстояния лупы.

Предмет AB на расстоянии наилучшего зрения виден под углом α (рис. 23). Если этот угол очень мал, то детали предмета трудно различить. Для увеличения угла зрения можно приблизить предмет к глазу в положение A_1B_1 . В этом положении предмет будет рассматриваться под углом зрения α_1 большим α . Однако и в этом случае можно не различить деталей предмета вследствие того, что предмет находится слишком близко к глазу (за пределами аккомодации глаза).

Если мы поместим между предметом AB и глазом лупу так, чтобы даваемое ею изображение предмета оказалось в положении A_1B_1 (это будет тогда, когда предмет будет между фокусом лупы и её оптическим центром), то предмет будет рассматриваться под тем же увеличенным углом зрения α на расстоянии наилучшего зрения.

Найдем увеличение лупы. Предположим, что предмет, имеющий длину l (рис. 24 а), находится от глаза на расстоянии наилучшего видения D . Тогда угол зрения равен:

$$\varphi = \frac{l}{D} .$$

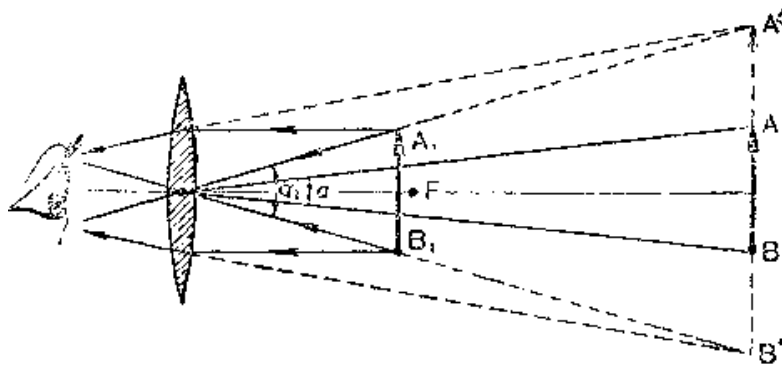


Рис. 23. Изображение предмета в лупе

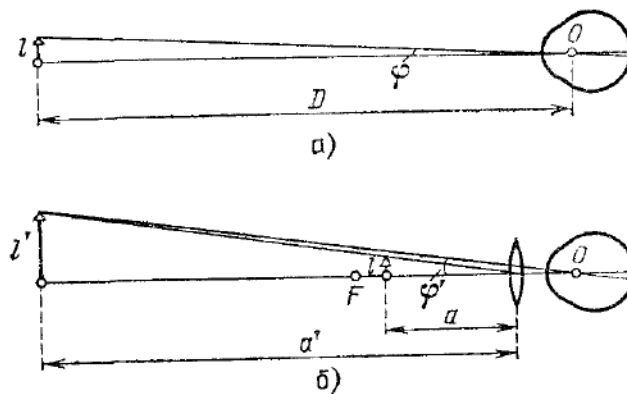


Рис. 24. Рассматривание небольшого предмета невооруженным глазом а и через лупу б

Поместим тот же предмет (рис. 24 б) вблизи фокуса F лупы и будем рассматривать его через лупу.

$$\varphi' = \frac{l'}{a'} ,$$

Мы увидим изображение предмета длины l' под углом зрения φ' , причем, где a' – расстояние от лупы до изображения (расстоянием от лупы до оптического центра глаза пренебрегаем).

По формуле увеличения линзы имеем следующее соотношение:

$$\frac{l'}{l} = \frac{a'}{a} \text{ или } \frac{l'}{a'} = \frac{l}{a} .$$

Так как $\varphi = \frac{l}{a}$, то и $\varphi = \frac{l'}{a'}$.

Отсюда для увеличения лупы находим:

$$N = \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{D}{a} .$$

Так как предмет находится возле фокуса, то $a \approx f$. Таким образом, полагая расстояние наилучшего видения $D = 250$ мм, для увеличения лупы получаем приближенно следующую формулу: $N = 250 / f$, где f должно быть выражено в миллиметрах; например, при $f = 50$ мм лупа имеет пятикратное увеличение. Лупы различного вида широко применяются при мелкой и точной работе, при измерениях и т. п. Кажется бы, что с помощью лупы можно получать очень большие увеличения, надо только уменьшать ее фокусное расстояние. Например, при фокусном расстоянии 0,25 мм увеличение лупы равно 1000. Однако пользование лупами с очень малым фокусным расстоянием, следовательно, и с малым диаметром практически невозможно. Поэтому лупы с увеличением более 40 не применяются.

4.2. Микроскоп

Для получения больших увеличений применяется микроскоп. Оптическая система микроскопа состоит из основных двух частей: объектива (обращенного к объекту) и окуляра (обращенного к глазу). Схема хода лучей в микроскопе показан на рис. 25, причем объектив и окуляр заменены на рисунке простыми линзами, так как конструкция микроскопа более сложная.

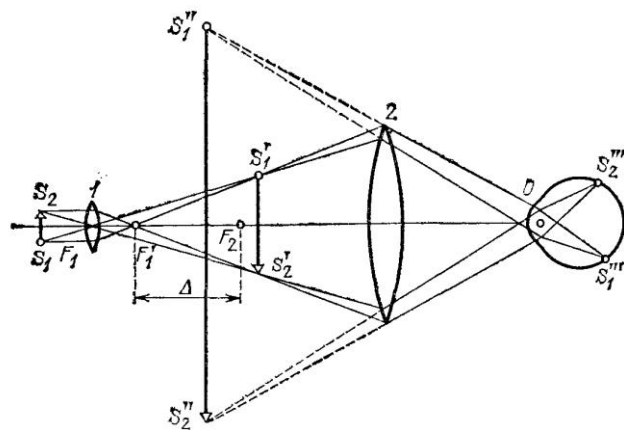


Рис. 25. Схема хода лучей в микроскопе

Как и лупа, микроскоп дает возможность рассматривать изображение предмета под большим углом, чем это возможно для невооруженного глаза. Небольшой предмет S_1S_2 помещается перед объективом 1 микроскопа на расстоянии, немного большем фокусного расстояния объектива; его действительное изображение $S'_1S'_2$ находится вблизи переднего фокуса F_2 окуляра 2 – между окуляром и его передним фокусом. Это изображение рассматривается глазом через окуляр,

как через лупу; на сетчатке глаза образуется изображение $S_1'''S_2'''$, которое воспринимается глазом как исходящее от мнимого увеличенного изображения $S_1''S_2''$. Δ – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра – называется оптической длиной тубуса микроскопа; от нее зависит увеличение микроскопа. $S_1'S_2'$ находится в передней фокальной плоскости окуляра, т. е. изображение $S_1''S_2''$ лежит в бесконечности; при этом глаз находится в ненапряженном состоянии.

Как и в случае лупы, увеличением микроскопа называется отношение длины изображения какого-либо отрезка, получаемого на сетчатой оболочке глаза при помощи микроскопа, к длине изображения того же отрезка на сетчатке при рассматривании его невооруженным глазом.

Действие микроскопа эквивалентно действию лупы с фокусным расстоянием f , равным фокусному расстоянию всего микроскопа. Формула для увеличения микроскопа $N = 250 / f$.

Фокусное расстояние микроскопа как системы из двух линз может быть сделано значительно меньше, чем фокусное расстояние объектива или окуляра в отдельности. В соответствии с этим увеличение микроскопа значительно больше увеличения, даваемого объективом или окуляром. Общее увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива и увеличения окуляра. Поэтому нередко применяют микроскопы с увеличением около 1000 и даже больше.

4.3. Зрительные трубы

Оптический прибор, предназначенный для рассматривания глазом весьма удаленных предметов, представляет собой зрительную трубу. Как и микроскоп, она состоит из объектива и окуляра; и тот и другой являются более или менее сложными оптическими системами, хотя и не столь сложными, как в случае микроскопа. Будем их схематически представлять тонкими линзами. В зрительных трубах объектив и окуляр располагаются так, что задний фокус объектива F_1 почти совпадает с передним фокусом окуляра F_2 (рис. 26).

Если передний фокус окуляра совпадает с задним фокусом объектива, то при рассматривании удаленного предмета из окуляра выйдут пучки параллельных лучей, что удобно для наблюдения нормальным глазом в спокойном состоянии (без аккомодации).

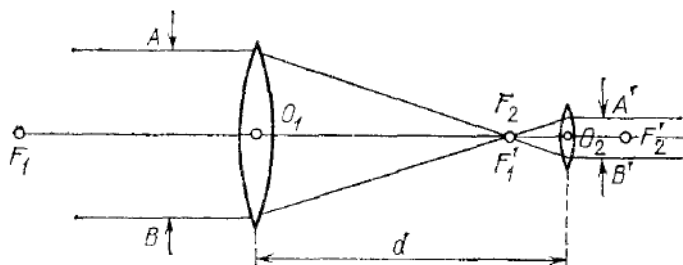


Рис. 26. Расположение объектива и окуляра в зрительной трубе

Но если зрение наблюдателя несколько отличается от нормального, то окуляр передвигают, устанавливая его «по глазам». Путем передвижения окуляра производится также «наводка» зрительной трубы при рассматривании предметов, расположенных на различных не очень больших расстояниях от наблюдателя.

Объектив зрительной трубы должен быть всегда собирающей системой, окуляр же может быть как собирающей, так и рассеивающей системой. Зрительная труба с собирающим (положительным) окуляром называется *трубой Кеплера* (рис. 27 а), труба с рассеивающим (отрицательным) окуляром – *трубой Галилея* (рис. 27 б).

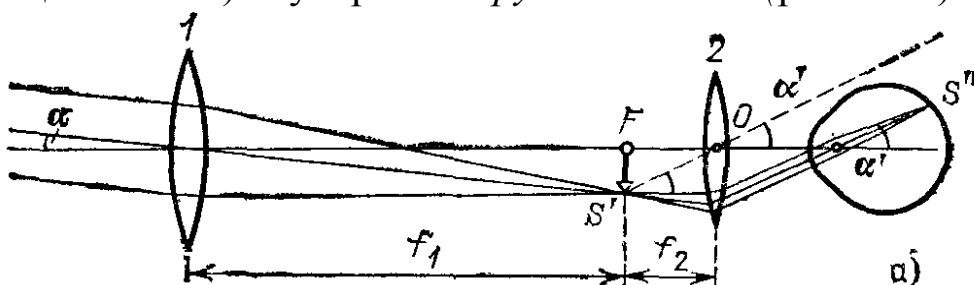


Рис. 27 а. Ход лучей в зрительной трубе Кеплера

В трубе Кеплера объектив 1 зрительной трубы дает действительное обратное уменьшенное изображение удаленного предмета в своей фокальной плоскости FS' . Расходящийся пучок лучей из точки S' падает на окуляр 2; так как эти лучи идут из точки S' в фокальной плоскости окуляра, то из него выходит пучок, параллельный побочной оптической оси $S'O$ окуляра под углом α' к главной оси. Попадая в глаз, лучи эти сходятся на его сетчатке и дают действительное изображение источника.

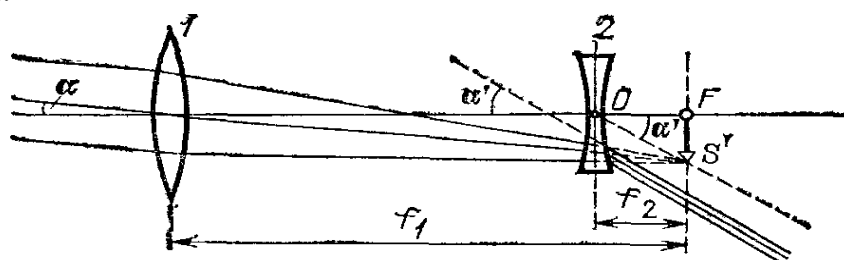


Рис. 27 б. Ход лучей в зрительной трубе Галилея

Труба Галилея, нередко применяемая в обычном театральном бинокле, дает прямое изображение предмета, труба Кеплера – перевернутое. Вследствие этого, если труба Кеплера должна служить для земных наблюдений, ее снабжают оборачивающей системой (дополнительной линзой или системой призм), в результате чего изображение становится прямым. Бинокли большого увеличения (полевые бинокли) делаются из двух труб Кеплера. Системой, оборачивающей изображение в этом приборе, являются две призмы полного отражения (две оборотные призмы).

Одновременно эти призмы позволяют укоротить длину труб и увеличить расстояние между центрами объективов по сравнению с расстоянием между зрачками глаз. Большое расстояние между объективами увеличивает стереоскопический эффект.

Увеличение зрительной трубы равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра. Разнообразные виды зрительных труб применяются в качестве биноклей, используются в геодезических и в оптических приборах и т. д.

4.4. Телескопы

Исключительное значение имеют зрительные трубы (телескопы) в астрономии. Уже Галилей, первый применивший зрительную трубу для наблюдения небесных тел, сделал ряд важных открытий, хотя его телескоп обладал увеличением всего в 30 раз и давал весьма плохое качество изображения. Современные телескопы имеют огромные размеры и представляют собой сложные сооружения. Наряду с телескопами, построенными по типу зрительной трубы – рефракторами, весьма важное значение в астрономии имеют зеркальные (отражательные) телескопы, или рефлекторы (рис. 28).

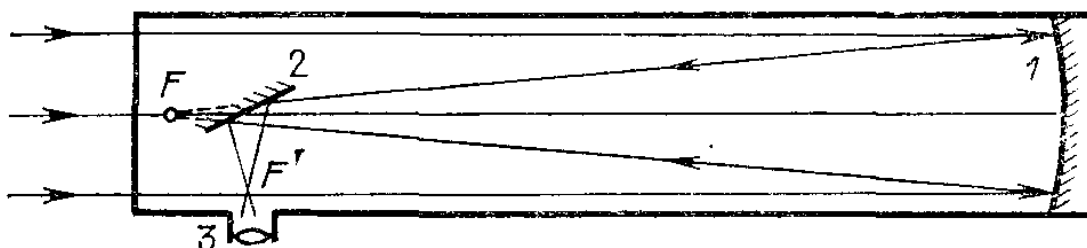


Рис. 28. Схема зеркального телескопа

На сферическое зеркало 1 рефлектора падает свет от какого-нибудь отдаленного светила. Так как свет от небесных источников

идет практически параллельным пучком, то изображение светила получается в фокальной плоскости зеркала. Это будет действительное, обратное и уменьшенное изображение небесного тела. Для того чтобы было удобно рассматривать это изображение, вблизи фокуса установлено небольшое плоское зеркало 2, которое поворачивает световые лучи в сторону. Изображение, даваемое сферическим зеркалом, рассматривают в окуляр 3, как в лупу. Труба телескопа служит для защиты зеркала от постороннего света.

Разрешающая способность телескопа во много раз превышает разрешающую способность глаза. Возможности наблюдения, которые дает каждый телескоп, определяются диаметром его отверстия. Поэтому с давних времен научно-техническая мысль направлена на отыскание способов изготовления больших зеркал и объективов.

Зеркальный телескоп, рефлектор, обладают по сравнению с рефрактором тем преимуществом, что они не имеют хроматической аберрации. Изготовить зеркало также легче, чем объектив: требования к однородности стекла, идущего для изготовления зеркала, предъявляются менее строгие, так как свет через него не проходит — оно является всего лишь основанием, на которое наносится отражающий слой. По этим причинам самый большой из существующих сейчас телескопов является зеркальным, его диаметр равен 6 м. Таким образом, и рефлекторы и рефракторы имеют свои достоинства и недостатки.

Очень удачная и остроумная конструкция телескопа была предложена в 1941 г. советским ученым Д. Д. Максутовым.

В телескопе Максутова объектив представляет собой сочетание положительного мениска и зеркала. Положительный мениск может быть очень хорошо исправлен в отношении хроматической аберрации, но обладает при этом сферической аберрацией. Последняя компенсируется благодаря тому, что в систему входит сферическое зеркало, дающее равную по величине и противоположную по знаку сферическую аберрацию. Так как зеркало не обладает хроматической аберрацией, то получается система, не имеющая практически ни сферической, ни хроматической аберрации.

Параллельный пучок лучей в телескопе Максутова (рис. 29), пройдя через мениск 1 и отразившись в вогнутом зеркале 2, дает в фокусе F изображение, не искаженное ни хроматической, ни сфериче-

ской аберрациями. Для удобства наблюдения пучок лучей поворачивается плоским зеркалом 3. Изображение в F' рассматривается с помощью окуляра 4.

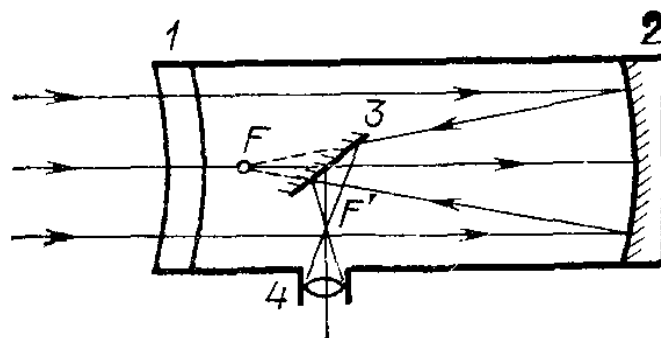


Рис. 29. Схема телескопа Максутова

5. Разрешающая способность оптических приборов

До сих пор подразумевали, что изображением светящейся точки в оптическом приборе (например, в линзе) является также точка. Между тем, это неверно, даже если все аберрации устранены. В самом деле, линза вырезает из фронта волны определенный участок, и возникающее благодаря этому дифракционное изображение точки имеет сложный характер: в центре наблюдается главный максимум, вокруг которого чередуются светлые и темные кольца, переходящие друг в друга и постепенно сливающиеся с окружающим темным фоном (рис. 30).

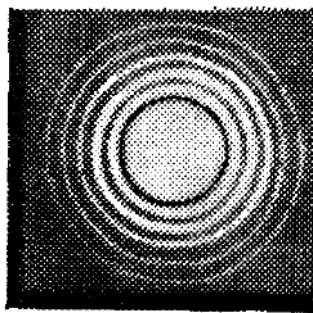


Рис. 30. Изображение светящегося диска (например, планеты), полученное с помощью телескопа (дифракционная картина)

Следует ожидать, что при получении изображения с помощью оптической системы мы всегда будем иметь дифракционную картину. Чем больше диаметр объектива, дающего изображение, тем мельче эта дифракционная картина, т. е. тем теснее располагаются дифракционные кольца (рис. 31).

Увеличение, достигаемое с помощью оптической системы, ведет к возможности рассматривать части предмета под большим углом зрения и, следовательно, различать более мелкие детали.

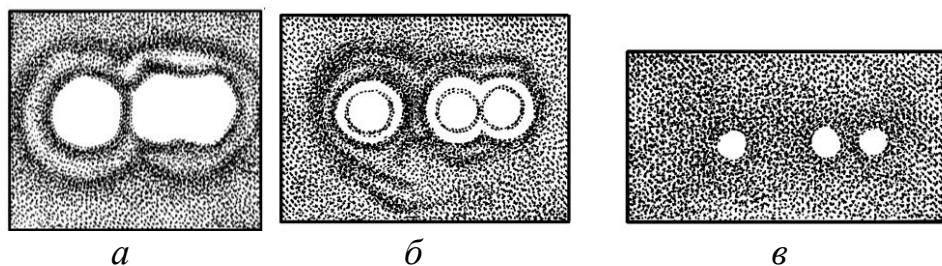


Рис. 31. Уменьшение дифракционных искажений изображений по мере увеличения диаметра объектива

Микроскоп позволяет различать отдельные детали объекта, которые для невооруженного глаза или при наблюдении с простой лупой сливаются в точку, т. е. микроскоп лучше, чем лупа, разрешает тонкую структуру объекта. Однако осуществляя большие увеличения, мы можем повысить *разрешающую способность микроскопа* (наименьшее расстояние между двумя точками, которые различимы в микроскопе) лишь до известного предела. Это связано с тем фактом, что наши представления о свете как о лучах уже оказываются слишком грубыми, становится необходимым учитывать волновые свойства света. Сказанное относится не только к микроскопу, но и к другим оптическим приборам. Волновая природа света накладывает определенный предел на разрешающую способность всех оптических систем, в частности и микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчетливые изображения мелких или удаленных предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения получаются размытыми.

Если две точки объекта находятся одна от другой на расстоянии, меньшем некоторого предела, то мы не сможем их «разрешить»: их изображения всегда будут сливаться между собой, каким бы большим увеличением ни обладал микроскоп.

Предельная разрешающая способность достигается при возможно более всестороннем освещении объекта. Вследствие этого в современных микроскопах для освещения объекта применяются специальные конденсоры, дающие широкие пучки лучей. Предельная разрешающая способность достигается при увеличении микроскопа, равном около 1000.

Дифракция также налагает предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и темных колец.

Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга, и глаз не может различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива.

Этот пример показывает, что с дифракцией приходится считаться всегда и при любых препятствиях. Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики.

6. Дифракционные решетки

Оптическими приборами называют приборы, элементами которых являются не только линзы, зеркала, призмы, но дифракционные решетки. Устройство этих приборов основано на явлении дифракции.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками. Решетки делают либо из прозрачного твердого вещества, либо из металлического зеркала. В обоих случаях на поверхности алмазным резцом наносятся штрихи, параллельные друг другу. Там, где прошел резец, получается шероховатая поверхность, рассеивающая лучи, а промежутки между штрихами остаются прозрачными или гладко отполированными, т. е. играют роль щелей. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов в решетке доходит до ста тысяч. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решетки, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Наилучшими качествами обладают так называемые отражательные решетки (решетки, сделанные на зеркале). Они представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его.

Важной характеристикой решетки является *постоянная решетки* или *период* d – сумма ширины щели и промежутка, т. е. расстояние от начала одной щели до начала следующей щели (рис. 32 а). Обычно период дифракционной решетки порядка 10 мкм.

Пусть на решетку падает пучок параллельных монохроматических лучей с длиной волны λ , перпендикулярных плоскости решетки (рис. 32 б). Дифракция приведет к распространению световых волн с другой стороны решетки по всем направлениям, а интерференция обес-

печит усиление этих волн только по определенным направлениям и на экране получится ряд узких и ярких линий. Найдем эти направления.

На рис. 32 б показаны лучи, которые составляют угол φ_1 с перпендикуляром к решетке. Это направление выбрано так, чтобы в разности хода лучей от соседних щелей укладывалась одна длина волны. Все лучи, идущие в этом направлении, с помощью линзы собираются в точке M_1 , где на экране и получается светлая линия.

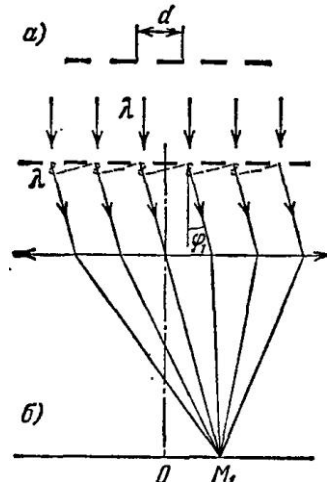


Рис. 32. Прохождение монохромных лучей через дифракционную решетку

Следующие линии получатся, когда в разности хода лучей от соседних щелей уложатся две длины волны (рис. 33 а), три длины волны и т. д. Таким образом, те направления, по которым идут лучи, создающие светлые полосы на экране, отличаются тем, что в разности хода лучей от соседних щелей всегда укладывается k длин волн λ , где k – целое число. На рис. 33 б AB – фронт волны ($AB \perp AC$); разность хода лучей AC равна $k\lambda$. Поскольку угол B в $\triangle ABC$ есть φ , а гипотенуза $BC = d$, то получаем формулу дифракционной решетки.

$$k\lambda = d \cdot \sin \varphi.$$

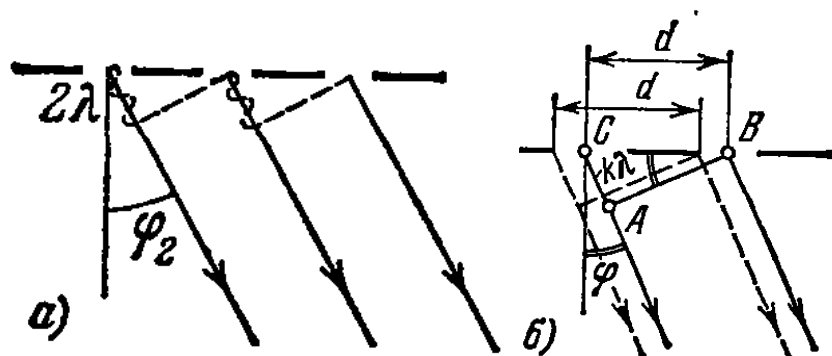


Рис. 33. Ход лучей от соседних щелей в дифракционной решетке

Формула дифракционной решетки справедлива и при $k = 0$, так как против центра решетки на экране тоже получается светлая полоса.

Каждую из светлых линий на экране называют *максимумом*, а соответствующее ей значение k – его *порядком*.

На рис. 34 показана картина на экране при освещении дифракционной решетки параллельными фиолетовыми лучами a , синими лучами b , одновременно синими и фиолетовыми лучами $в$.

Против центра решетки на экране (рис 34 а) виден самый яркий максимум нулевого порядка, по обе стороны от него на равных расстояниях видны менее яркие максимумы первого порядка, затем еще менее яркие максимумы второго порядка и так далее. Все эти максимумы расположены на равных расстояниях друг от друга.

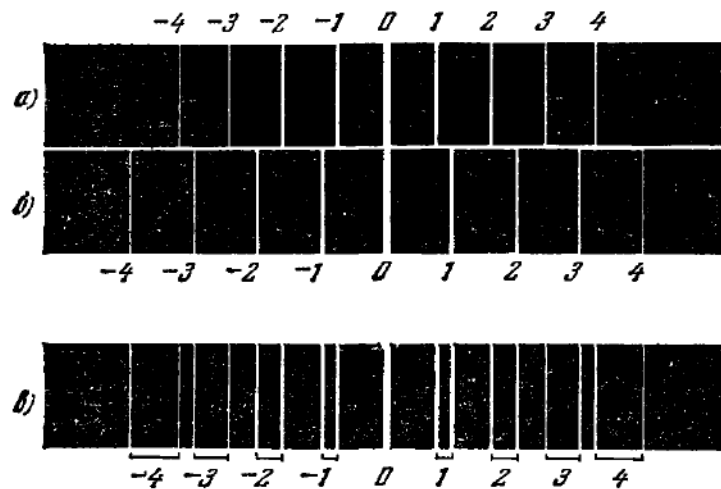


Рис. 34. Картина на экране при освещении дифракционной решетки светом с различной длиной волны

Если направить на эту решетку монохроматический свет с большей длиной волны, тогда максимумы расположатся реже (рис. 34 б), но нулевой максимум для обеих λ окажется на одном и том же месте экрана. Таким образом, положение нулевого максимума не зависит от λ , т. е. для всех длин волн получается на одном и том же месте экрана (рис. 34 а, б, в).

Для измерения длины световой волны с помощью дифракционной решетки нужно измерить лишь угол φ , так как d и k всегда известны. Поскольку угол можно измерить с большей степенью точности, то большая точность получается и при определении длины волны λ . При этом, чем меньше постоянная решетки d , тем точнее получается результат измерения λ .

Дифракционную решетку можно использовать для определения состава светового излучения, поскольку свет, соответствующий различным длинам волн, дает максимумы в разных местах экрана. Уве-

личение общего числа штрихов в решетке делает ширину максимумов на экране меньшей, что позволяет видеть на нем отдельно максимумы лучей при меньшей разности в их длинах волн. Это означает, что увеличение общего числа штрихов в решетке повышает ее разрешающую силу.

На рис. 34 в видно, что при одинаковой разности длин волн максимумы располагаются тем реже, чем больше их порядок k . Следовательно, большему k соответствует и большая разрешающая сила решетки, но меньшая видимость на экране.

Если на пути световых лучей поместить две одинаковые дифракционные скрещенные решетки, т. е. повернутые так, что их щели взаимно перпендикулярны, то можно получить картину, состоящую из отдельных светлых пятен (рис. 35).

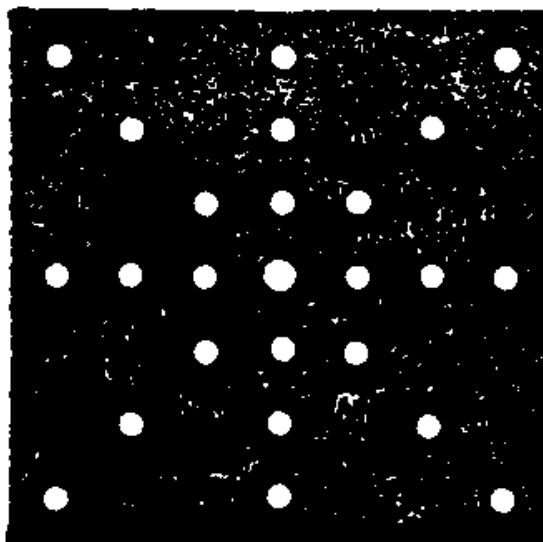


Рис. 35. Картина расположения пятен на экране после прохождения световых лучей через скрещенные дифракционные решетки

Анализируя расположение пятен на экране, можно определить расстояние между решетками и найти их периоды. Это позволяет узнать расположение атомов в кристаллической решетке многих твердых тел.

Лекция 12. Электромагнитные волны

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Понятие электромагнитных волн.
2. Шкала электромагнитных волн.
3. Способ исследования электромагнитных волн различной длины.
4. Получение и свойства электромагнитных волн различной длины.
 - 4.1. Радиоволны и видимые волны.
 - 4.2. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение.
 - 4.3. Рентгеновское излучение.
 - 4.4. Гамма-излучение.
5. Методы определения скорости света.
 - 5.1. Первые попытки определения скорости света.
 - 5.2. Определение скорости света Рёмером.
 - 5.3. Определение скорости света по методу вращающегося зеркала.

1. Понятие электромагнитных волн

Электромагнитная волна представляет собой распространение в пространстве с течением времени переменных электрических и магнитных полей.

Существование электромагнитных волн было доказано работами многих ученых.

Д. Максвелл разработал теорию электромагнитных явлений и показал, что в природе должны существовать электромагнитные волны.

Опыты Г. Герца, доказавшие существование электромагнитных волн и позволившие подтвердить заключение Максвелла о том, что эти волны распространяются с такой же скоростью, как и свет, послужили сильным доводом в пользу электромагнитной теории света. Были получены и изучены волны с различными длинами волн.

Выдающийся русский физик П. Н. Лебедев создал установку, позволившую ему получить и экспериментально исследовать волны длиной около 6 мм.

Исследования Г. Герца, А. С. Попова и П. Н. Лебедева подтвердили теорию Д. Максвелла и показали, что можно получать электромагнитное излучение с длиной волны от нескольких километров до 6 мм.

Наиболее короткие волны, длиной около 0,1 мм, с помощью искусственно сделанных вибраторов были получены Глаголевой-Аркадьевой в 1922 г. Однако из теории Максвелла следовало, что в

природе имеются значительно более короткие электромагнитные волны, создаваемые естественными вибраторами – атомами и молекулами, представляющие собой световое излучение.

К концу XIX столетия было известно электромагнитное излучение с длинами волн от нескольких километров до 6 мм и от 0,3 мм до 0,01 мкм (наиболее короткие ультрафиолетовые волны).

В 1895 г. немецкий физик В. Рентген (1845–1923 гг.) обнаружил новые лучи (впоследствии названные рентгеновскими лучами), оказавшиеся электромагнитными волнами, длина которых короче, чем ультрафиолетовых лучей.

Первоначально между самыми короткими ультрафиолетовыми волнами и самыми длинными рентгеновскими существовал незаполненный промежуток. Однако впоследствии были экспериментально получены электромагнитные волны, заполнившие как этот промежуток, так и промежуток между длинами волн от 6 мм до 0,3 мм.

Изучение радиоактивных явлений позволило обнаружить электромагнитное излучение, длины волн которого еще короче, чем рентгеновских лучей. Оно было названо гамма-лучами. Гамма-лучи имеют длины волн от 0,05 до 0,001 нм и короче.

В настоящее время весь широкий диапазон электромагнитных волн, начиная от длинных радиоволн и кончая наиболее короткими волнами, испускаемыми радиоактивными веществами, исследован на опыте. Так было доказано, что в природе существуют электромагнитные волны самых различных длин. В зависимости от длины они обладают различными свойствами: видимостью, цветностью, проникающей способностью и т. д.

2. Шкала электромагнитных волн

Исследования, производившиеся в самых разнообразных областях физики, позволили установить, что диапазон частот или длин электромагнитных волн чрезвычайно широк (рис. 1).

Принято выделять низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и гамма-излучение. Самое коротковолновое гамма-излучение испускают атомные ядра.

Принципиального различия между отдельными излучениями нет. Границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны. Все они представляют собой электромагнитные волны, порождаемые ускоренно движущимися заряженными частицами. Обнаруживаются электромагнитные волны в конечном счете по их действию на заряженные частицы. В вакууме излучение любой длины волны распространяется со скоростью 300000 км/с.

Однако по мере уменьшения длины волны количественные различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям. Излучения различной длины волны отличаются друг от друга и по способу их получения (излучение антенны, тепловое излучение, излучение при торможении быстрых электронов) и методам регистрации – по характеру взаимодействия с веществом.

Излучения различной длины волны очень сильно отличаются друг от друга по поглощению их веществом. Коротковолновые излучения (рентгеновские и особенно гамма-лучи) поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений. Но главное отличие между длинноволновыми и коротковолновыми излучениями в том, что коротковолновое излучение обнаруживает свойства частиц.



Рис. 1. Шкала электромагнитных волн

Для измерения длины волны у световых волн и волн, близких к оптическому диапазону (инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновских), применяются следующие единицы измерения:

1 мкм (микрометр) = 10^{-6} м; 1 нм (нанометр) = 10^{-9} м.

Множество явлений показало настолько тесную связь между оптическими и электромагнитными явлениями, что электромагнитная природа света превратилась из предположения в твердо установленный факт.

Видимый свет – это электромагнитные волны, лежащие в диапазоне длин волн от $\lambda_{\text{к}} = 7600 \text{ \AA} = 760 \text{ нм}$ (красный свет) до $\lambda_{\text{ф}} = 4000 \text{ \AA} = 400 \text{ нм}$ (фиолетовый свет).

Видимый свет по своей физической природе ничем не отличается от других электромагнитных волн – радиоволн, инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения.

Радиоволны охватывают диапазон от 106 м до 50 мкм; область длинных волн – более 1 км, средних – от 1 км до 100 м, коротких – от 100 м до 10 м и ультракоротких – менее 10 м.

Область ультракоротких радиоволн смыкается с участком инфракрасного излучения. Граница между ними чисто условная и определяется способом их получения: ультракороткие радиоволны получают с помощью особых генераторов (радиотехнические методы), а инфракрасные излучаются нагретыми телами.

За видимым участком спектра лежит ультрафиолетовое излучение с длиной волны от 400 до 10 нм. Ультрафиолетовое излучение получают с помощью тлеющего разряда обычно в парах ртути.

С коротковолновой границей ультрафиолетовой области смыкается участок, соответствующий рентгеновскому излучению. Оно охватывает диапазон длин волн от 10 до 0,01 нм. За ним идет область гамма-излучения с длинами волн менее 0,1 нм.

Области рентгеновских и гамма-излучений частично перекрываются, и различать эти волны можно не по свойствам, а по методу получения: рентгеновское излучение возникает в специальных трубках, а гамма-излучение испускается радиоактивными ядрами некоторых элементов.

3. Способ исследования электромагнитных волн различной длины

Так как свойства электромагнитных волн разной длины отличаются друг от друга, то необходимо изучить свойства этих волн. Для разделения волн различной длины обычно применяют какой-либо способ разложения сложного излучения в спектр. В случае видимого света для этой цели можно воспользоваться дифракционной решеткой или призмой.

С помощью призмы получим спектр на экране. Глазом по цвету можно различить волны различной длины. Но глаз воспринимает

только электромагнитные волны, длина которых лежит в пределах от 400 до 760 нм. Границы эти довольно неопределенны, и отдельные наблюдатели способны «видеть» волны и несколько более короткие (примерно до 370 нм) и несколько более длинные (около 800 нм). Найдем более общий способ обнаружения электромагнитных волн, независимый от нашего восприятия.

Распространяющаяся электромагнитная волна любой длины обладает энергией. При фиксации энергии волны прибором можно обнаружить и саму эту волну.

Для этого превратим электромагнитную энергию волны во внутреннюю энергию вещества. При возрастании внутренней энергии происходит нагревание тела, которое можно обнаружить при помощи чувствительных термометров, например термоэлементов.

Измерив нагревание термоэлемента, можно вычислить энергию, приходящуюся на соответствующую область спектра, т. е. исследовать распределение энергии по спектру. Такие энергетические измерения дают результаты, отличающиеся от выводов, сделанных глазом. Человеку, воспринимающему свет глазом, желтая или зеленая часть спектра света дугового фонаря кажется гораздо ярче, чем красная, тогда как термоэлемент обнаруживает в красной части большее нагревание. Причина лежит в особенностях глаза, чувствительность которого к разным цветам различна и который поэтому не дает правильных показаний относительно распределения энергии по спектру. Термоэлемент же является вполне «беспристрастным» прибором. Для всех длин волн он дает возможность судить о внутренней энергии, в которую переходит энергия света при поглощении.

4. Получение и свойства электромагнитных волн различной длины

4.1. Радиоволны и видимые волны

Радиоволны. При колебаниях, происходящих с частотами от 10^4 до 10^{12} Гц, возникают электромагнитные излучения, длины волн которых лежат в интервале от нескольких километров до нескольких миллиметров. Этот участок шкалы электромагнитных излучений относится к диапазону радиоволн. Радиоволны применяются для радиосвязи, телевидения, радиолокации.

Видимый свет. К видимому свету (или просто свету) относятся излучения с длиной волны примерно от $8 \cdot 10^{-7}$ до $4 \cdot 10^{-7}$ м, от красного до фиолетового света. Значение этого участка спектра электромагнитных излучений в жизни человека исключительно велико, так как почти все сведения об окружающем мире человек получает с помощью зрения.

Свет является обязательным условием для развития зеленых растений и, следовательно, необходимым условием для существования жизни на Земле.

4.2. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение

При проведении наблюдений за распределением энергии в спектре обнаруживается, что показания термоэлемента не обращаются в нуль, если он передвигается в ту область, где глаз ничего не видит, т. е., когда термоэлемент помещен за красной или фиолетовой границами спектра. Показания термоэлемента меняются при переходе в эти невидимые области спектра постепенно, хотя глаз в этом месте не обнаруживает никакого света.

Волны, имеющие большую длину, чем красные, принято называть *инфракрасными*. Они были открыты английским астрономом и физиком Джоном Гершелем в 1830 г. при исследовании распределения энергии в спектре с помощью очень чувствительного термометра.

Гершель поместил термометр с зачерненным шариком за красный край спектра и обнаружил повышение температуры. Шарик термометра нагревался излучением, не видимым глазом. Это излучение называли инфракрасными лучами.

Инфракрасное излучение испускают любые нагретые тела. Источниками инфракрасного излучения служат печи, батареи водяного отопления, электрические лампы накаливания, поэтому характерным свойством инфракрасных лучей является их тепловое действие. Обнаруживаются эти лучи легче всего по нагреванию тел, поглощающих инфракрасные лучи. Также инфракрасные лучи оказывают и химические действия. Например, возможно фотографировать ночью при помощи специальных фотопластинок, чувствительных к инфракрасным лучам.

Инфракрасную область спектра условно разбивают на близкую (760–2500 нм), среднюю (2500–5000 нм) и далекую (50–2000 мкм).

Инфракрасные лучи обладают специфическими свойствами, которые используются при решении экспертных задач:

1. Эти лучи обладают большей проникающей способностью, чем видимые лучи. Некоторые объекты, являющиеся непрозрачными для видимых лучей, прозрачны для ИК-излучения в ближней зоне.

2. Поглощение и отражение ИК-излучения различными веществами происходит по-другому, чем для видимого излучения. Данное обстоятельство используется для определения состава ряда веществ, в основном органического происхождения.

3. Инфракрасные лучи значительно меньше рассеиваются в атмосфере, чем видимые, что позволяет наблюдать за процессами в темноте и на больших расстояниях.

ИК-лучи в экспертных исследованиях применяются для контроля пищевых продуктов и алкогольных напитков, проверки подлинности лекарственных препаратов и контроля их качества.

Метод ИК-спектроскопии позволяет получить ценную информацию в судебной экспертизе при изучении нефтепродуктов, лакокрасочных материалов и покрытий, волокон, пластмассы и резины, материалов письма, взрывчатых веществ, клеящих веществ, наркотических веществ и др.

Ультрафиолетовое излучение. В 1801 г. немецкий физик Иоганн Риттер (1776–1810), исследуя спектр, открыл, что за его фиолетовым краем имеется также область, создаваемая не видимыми глазом лучами. Эти лучи воздействуют на некоторые химические соединения.

Не видимое глазом электромагнитное излучение с длиной волны меньше чем у фиолетового света (400 нм) и больше, чем длинноволновая часть рентгеновского излучения (10 нм), называют ультрафиолетовым излучением.

Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи подчиняются тем же законам оптики, что и видимые лучи. Однако по своим действиям на вещества они обнаруживают резкое различие.

В области ниже 200 нм УФ-излучение интенсивно поглощается всеми телами, в том числе и молекулами воздуха, поэтому в эксперт-

ной практике эта область не используется. Всю остальную ультрафиолетовую зону можно условно разбить на три области:

1. Длинноволновое УФ-излучение непосредственно примыкает к видимому и имеет интервал длин волн 400–315 нм. Следует отметить, что фотографическая оптика и оптика микроскопов «пропускает» этот интервал длин волн.

2. Средневолновое УФ-излучение находится в интервале от 315 до 280 нм. Оптические стекла, имеющие толщину более 6 мм, полностью поглощают эти лучи. Но они свободно проходят через оптику, изготовленную из кварца, органического стекла, увиолевого стекла.

3. Коротковолновое УФ-излучение находится в интервале от 280 до 200 нм. Эти лучи проходят через кварцевое и частично увиолевое стекло, но поглощаются органическим стеклом.

Для ультрафиолетовых лучей наиболее характерна их большая химическая и биологическая активность.

Ультрафиолетовые лучи используются в фотографии, для обнаружения скрытых надписей или стертого текста, так как многие вещества при поглощении ультрафиолетовых лучей начинают испускать видимый свет. Ультрафиолетовые лучи используются для изучения строения наружных электронных оболочек атомов.

Ультрафиолетовое излучение применяется в криминалистике для установления идентичности красителей, подлинности документов, для обнаружения нефтепродуктов, идентификационных препаратов, следов крови (при поглощении излучения) и т. п. Используется при обнаружении объектов на месте происшествия, в ультрафиолетовой микроскопии.

4.3. Рентгеновское излучение

Рентгеновские лучи были открыты в 1895 г. Способ их получения с особой наглядностью обнаруживает их электромагнитную природу. Немецкий физик Рентген обнаружил этот вид излучения случайно, при исследовании катодных лучей.

Наблюдение Рентгена состояло в следующем. Трубка для получения катодных лучей имела вид, подобный изображенному на рис. 2.

Газоразрядная трубка 1 для опытов с катодными лучами 2 прикрыта черным картонным чехлом 3; на фосфоресцирующем экране 4 наблюдается свечение.

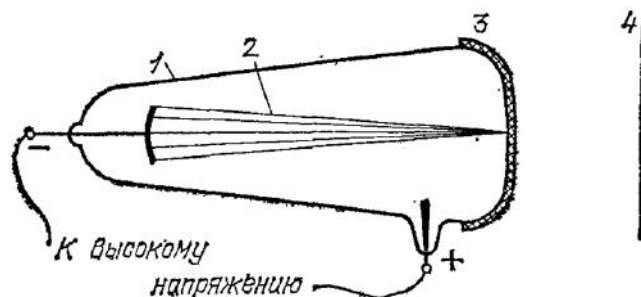


Рис. 2. К открытию лучей Рентгена

При пропускании разряда через такую трубку Рентген установил, что «агент», который он назвал «Х-лучами», проходит через тела, непрозрачные для обычного света: бумагу, дерево, эбонит, человеческое тело, слои металла. Рентген выяснил также, что материалы малой плотности, построенные из легких атомов, более прозрачны, чем материалы большей плотности. Пластика свинца задерживает «Х-лучи» гораздо сильнее, чем пластинка алюминия той же толщины; кости тела сильнее, чем мускулы. Поэтому, расположив между источником «Х-лучей» и экраном руку, мы увидим слабую тень руки, на которой резко выделяются более темные тени костей (рис. 3).

В этих опытах применялась, конечно, не фотографическая бумага, тогда еще неизвестная, а раствор хлористого серебра, также темнеющий под действием света.



Рис. 3. Рентгенограмма руки: А, В – осколки пули, С – кольцо на мизинце

Рентгеновские лучи способны вызывать химические процессы. При действии на фотографическую пластинку или бумагу они вызывают почернение; на этом основано фотографирование при помощи

рентгеновских лучей. Получаемые фотографии есть теньевые фотографии, детали которых соответствуют различию в способности рентгеновских лучей проходить через тела различной плотности.

На рентгенограмме лягушки хорошо видны кости скелета. Лапки приколоты к подставке металлическими булавками (рис. 4).

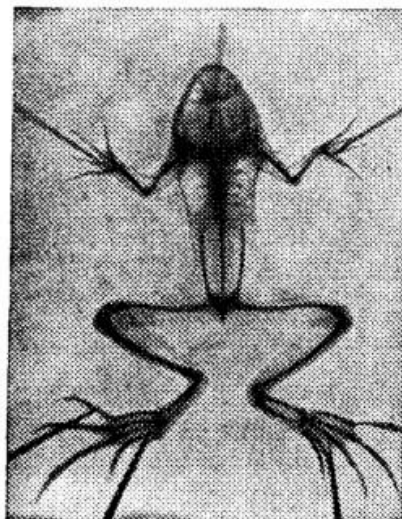


Рис. 4. Рентгенограмма лягушки

Эти особенности рентгеновских лучей имеют огромное практическое значение для применения их в медицине и технике, криминалистических исследованиях. При помощи рентгеновских лучей можно на фосфоресцирующем экране или на фотографической пластинке обнаруживать дефекты или изменения внутри предмета (дефекты внутри частей машины, изменения в организме и т. д.).

Название «X-лучи» (икс-лучи), т. е. неизвестные лучи, Рентген употреблял до самой смерти. Другие же ученые присвоили этим лучам имя Рентгена. Открыв «X-лучи», Рентген тщательными опытами выяснил условия их образования. Он установил, что эти лучи возникают в том месте трубки, где летящие электроны, составляющие катодный пучок, задерживаются, ударяясь о стенку трубки. Исходя из этого обстоятельства, Рентген сконструировал и построил специальную трубку, удобную для получения рентгеновских лучей. В своих существенных чертах конструкция трубки Рентгена сохранилась и до нашего времени.

На рис. 5 изображена современная рентгеновская трубка. Катодом служит толстая накаливаемая вольфрамовая нить, испускающая интенсивный поток электронов, которые ускоряются приложенным электрическим напряжением.

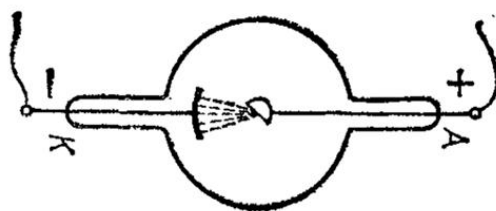


Рис. 5. Современная рентгеновская трубка; цепь накала катода не показана

Способ получения рентгеновских лучей ясно указывает, что образование их связано с остановкой (или торможением) быстро летящих электронов. Летящий электрон окружен электрическим и магнитным полями, ибо движущийся электрон представляет собой ток. Остановка (торможение) электрона означает изменение магнитного поля вокруг него, а изменение магнитного или электрического поля вызывает излучение электромагнитных волн. Эти электромагнитные волны и наблюдаются в виде рентгеновских лучей.

Волновая электромагнитная природа рентгеновского излучения полностью доказывается опытами по их дифракции.

Немецкий физик Макс Лауэ осуществил этот опыт, предложив в качестве дифракционной решетки использовать естественный кристалл.

Узкий пучок рентгеновских лучей, выделенный при помощи свинцовых диафрагм 2, 3 (рис. 6), падал на кристалл 4. На фотографической пластинке 5 получалось изображение следа пучка. При отсутствии кристалла изображение на пластинке представляло собой темное пятно – след пучка, пропущенного диафрагмами. Когда же на пути пучка помещался кристалл, то на пластинке получалась сложная картина (рис. 7), представляющая собой результат дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке.

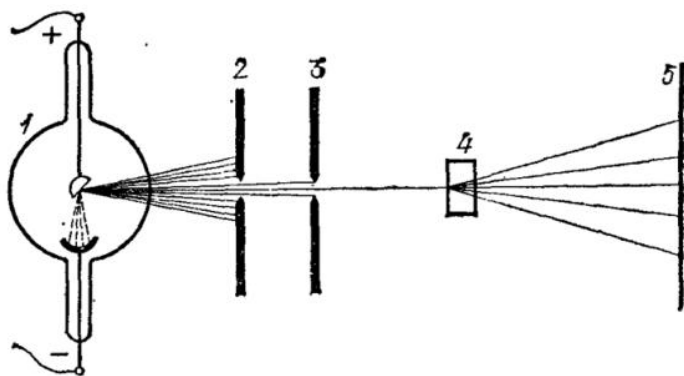


Рис. 6. Схема расположения в первых опытах по наблюдению дифракции рентгеновских лучей

Полученная картина не только дала прямое доказательство волновой природы рентгеновских лучей, но и позволила сделать важные заключения о строении кристаллов, которым определяется вид наблюдаемой дифракционной картины. В настоящее время применение рентгеновских лучей для изучения структуры кристаллов и других тел приобрело огромное практическое и научное значение.

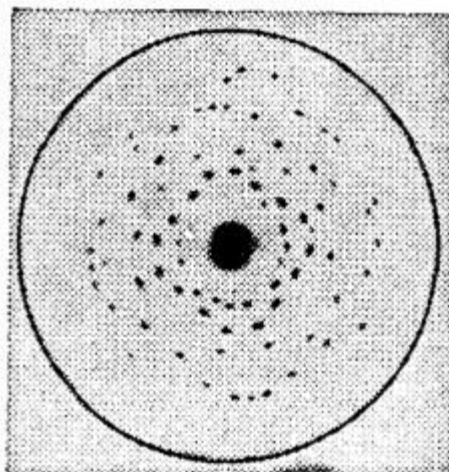


Рис. 7. Дифракции рентгеновских лучей в кристалле цинковой обманки

Применение методов рентгеновской спектрометрии, в частности рентгеновского флуоресцентного анализа, дает возможность определять качественный и количественный элементный состав неизвестных веществ и материалов, не уничтожая и не изменяя исходного объекта. Эта способность рентгеновского излучения широко используется в криминалистике.

4.4. Гамма-излучение

Короткие электромагнитные волны наблюдаются в излучении радиоактивных веществ (так называемое гамма-излучение), в космических лучах, а также при ударах очень быстрых электронов, разгоняемых ускорителями.

Опытами установлено, что гамма-излучение ядер не является самостоятельным видом радиоактивности. Гамма-излучение сопровождает процессы радиоактивных распадов. Рассмотрим, как ядро испускает излучение. Пусть материнское ядро, испустив γ -частицу, превращается в дочернее ядро, которое находится в возбужденном состоянии.

Переходя в нормальное или в менее возбужденное состояние, дочернее ядро испускает γ -квант; подобно тому как атом, переходя из

возбужденного состояния в нормальное, испускает квант оптического или рентгеновского излучения. Механизм испускания γ -излучения ядром такой же, как и механизм излучения фотонов атомом. Однако очень важное различие заключается в следующем: энергии γ -квантов оказываются большими, чем энергии оптических фотонов. Это связано с большими разностями в энергетических уровнях ядра по сравнению с разностью уровней электронных оболочек атома.

На большой проникающей способности γ -излучения основана гамма-дефектоскопия – метод обнаружения дефектов в изделиях путем просвечивания их γ -излучениями, применяемый в промышленности и строительстве (металлургия, судостроение, криминалистические исследования и т. д.). Различные местные повреждения в сварных швах, металлических отливках и других объектах обнаруживаются по различной интенсивности γ -излучения, прошедшего сквозь исследуемые тела. В зависимости от состава, толщины, плотности и других свойств просвечиваемого изделия будет изменяться интенсивность γ -излучения, достигшего приемника, поставленного за объектом. Таким методом определяют местоположение, размеры и форму дефектов (трещины, раковины, непроваренные швы и т. п.).

Коротковолновое излучение – гамма и рентгеновское – поглощается в определенной мере и оказывает воздействие на вещества, в которых происходит поглощение. Воздействие γ -излучения, а также других видов ионизирующих излучений на вещество определяется так называемой дозой излучения D .

Дозой излучения называется отношение энергии излучения к массе облучаемого вещества.

5. Методы определения скорости света

5.1. Первые попытки определения скорости света

Ученых с древних времен интересовал вопрос, с какой скоростью распространяется световая энергия. Еще Г. Галилей пытался определить скорость распространения света с помощью следующего простого опыта. Два наблюдателя A и B (рис. 8), находящихся на расстоянии друг от друга и снабженных одинаковыми хорошо выверенными часами, посылали друг другу световые сигналы.

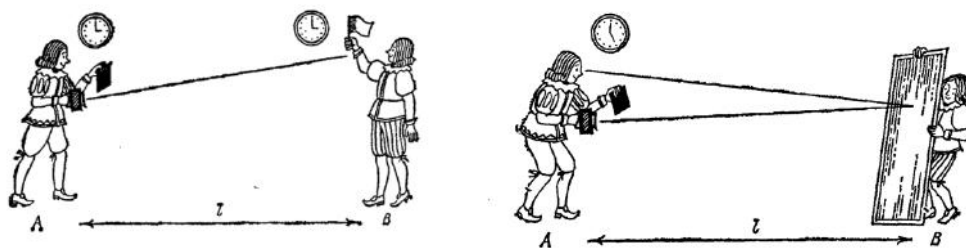


Рис. 8. Первые попытки определить скорость света

Если наблюдатель A в некоторый момент пошлет световой сигнал (например, быстро откроет заслонку фонаря), а наблюдатель B отметит по своим часам тот момент, когда он увидит этот сигнал, то можно будет определить время τ , за которое свет прошел данный путь l , и определить скорость света $c = \frac{l}{\tau}$.

Опыт значительно усовершенствовали и упростили, когда вместо второго наблюдателя поместили зеркало. Наблюдатель, открывающий фонарь, отмечал момент, когда световой сигнал, отразившийся от зеркала, вернется к нему, т. е. пройдет путь $2l$. Опыт Галилея как в первом, так и во втором вариантах не дал определенных результатов. Скорость же света оказалась настолько большой, что время прохождения светом сравнительно небольших расстояний, на которые можно было отдалить пункты A и B , было значительно меньше указанных ошибок. Для улучшения результатов надо было или весьма значительно увеличить расстояние l , или очень сильно повысить точность измерения небольших промежутков времени.

Оба эти усовершенствования впоследствии были внесены в проведение опытов и привели к благоприятным результатам.

5.2. Определение скорости света Рёмером

В методе датского астронома Олафа Рёмера, предложенном в 1675 г., были использованы огромные расстояния, с которыми приходится иметь дело астроному. Световым сигналом, посылавшимся из пункта A , служили затмения спутника Юпитера (например, моменты выхода этого спутника из тени Юпитера); наблюдатель на Земле регистрировал момент затмения (рис. 9).

Обращение ближайшего к Юпитеру спутника происходит за $13/4$ дня, т. е. затмения его следуют весьма часто одно за другим. Рёмер установил, что наблюдаются затмения не вполне регулярно.

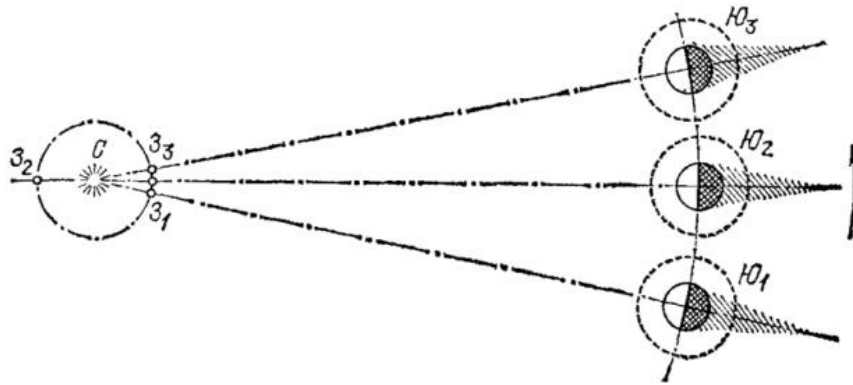


Рис. 9. К определению скорости света по Рёмеру: $Ю_1З_1$ – Земля $З_1$ находится между Юпитером $Ю_1$ и Солнцем $С$; $Ю_2З_2$ – Земля $З_2$ и Юпитер $Ю_2$ находятся по разные стороны Солнца; $Ю_3З_3$ – следующее взаимное расположение Земли $З_3$ и Юпитера $Ю_3$

Если, например, начиная с положения Земли $З_1$ (рис. 9), вычислить моменты ожидаемых затмений и произвести наблюдения при положении Земли примерно через $1/2$ года, то момент затмения оказывается запоздавшим против вычисленного почти на 16 мин. Те же вычисления дают правильный результат, если вновь провести наблюдения к моменту положения Земли $З_3$, т. е. еще примерно через $\frac{1}{2}$ года.

Период обращения Юпитера значительно (почти в 12 раз) больше периода обращения Земли. Поэтому положения $Ю_1$, $Ю_2$, $Ю_3$ разделены промежутками около полугода. Рёмер дал простое объяснение этим явлениям: надо учитывать время, необходимое для того, чтобы свет прошел добавочное расстояние, равное поперечнику земной орбиты. Рёмер нашел скорость света 215 000 км/с.

5.3. Определение скорости света по методу вращающегося зеркала

Французский физик Леон Фуко применил в 1862 г. точный способ определения времени прохождения света между двумя пунктами A и B , благодаря чему удалось надежно измерить скорость света, не прибегая к чрезмерно большим расстояниям между A и B . Световой сигнал, вышедший по направлению SA (рис. 10), отражался вращающимся зеркалом A к неподвижному зеркалу B . Это последнее делалось сферическим с очень большим радиусом кривизны R , так что центр его совпадал с зеркалом A . Благодаря такому устройству свет при любом положении зеркала A распространялся вдоль радиуса зеркала B , падал перпендикулярно на его поверхность и после отражения шел вновь по радиусу зеркала B , т. е. возвращался к зеркалу A . Однако

за время τ , в течение которого свет проходил путь от A до B и обратно (т. е. путь, равный $2R$), зеркало A успевало повернуться на небольшой угол α , и свет отражался по направлению AS' , B составляющему угол 2α с направлением SA .

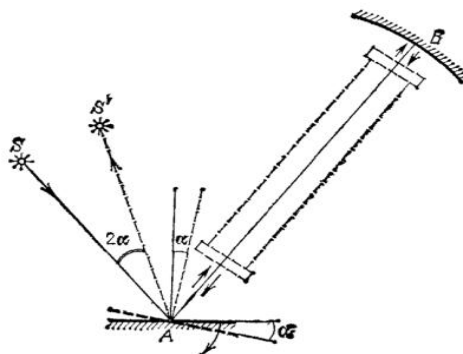


Рис. 10. К определению скорости света по методу вращающегося зеркала

Измерив угол 2α и зная угловую скорость вращения зеркала, можно определить время τ , а следовательно, и скорость света $c = 2R/\tau$. Среднее значение скорости света, полученное Фуко, равнялось 298 000 км/с. Вводя на пути света AB трубу с водой, Фуко смог непосредственно измерить скорость распространения света в воде и получил значение, в $4/3$ раза меньшее, чем в воздухе, в соответствии с представлениями Гюйгенса. Введя ряд усовершенствований в метод вращающегося зеркала, американский физик Альберт Майкельсон значительно повысил точность определения скорости света. По его определениям $c = 299\,796$ км/с.

За последние годы лабораторные методы определения скорости света существенно усовершенствованы. В их основу положены независимые измерения длины световой волны и ее частоты. Это позволило К. Ивенсону с сотрудниками в 1972 г. определить скорость света с точностью 0,2 м/с: $c = 299\,792\,456,2 \pm 0,2$ м/с. Эти результаты требуют дальнейшего подтверждения. В 1973 г. решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным для науки и техники, обобщившим все известные экспериментальные данные, скорость света в вакууме принято считать равной

$$c = 299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ м/с.}$$

Для всех практических расчетов принимают скорость света в вакууме равной 300 000 км/с.

Колоссальная с точки зрения наших земных масштабов скорость света не так уж велика в масштабах астрономических.

Лекция 13. Микроскопические методы исследования объектов судебной экспертизы

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Методы световой микроскопии.
 - 1.1. Оптический микроскоп.
 - 1.2. Использование световой микроскопии в экспертных исследованиях.
 - 1.3. Виды микроскопов, используемые в экспертных исследованиях.
2. Различные виды микроскопии, используемые в судебных экспертизах.
 - 2.1. Люминесцентная микроскопия.
 - 2.2. Ультрафиолетовая микроскопия.
 - 2.3. Инфракрасная микроскопия.
3. Методы электронной микроскопии.
 - 3.1. Просвечивающая электронная микроскопия.
 - 3.2. Растровая электронная микроскопия.

1. Методы световой микроскопии

1.1. Оптический микроскоп

Методами микроскопии в судебной экспертизе исследуется внешнее и внутреннее строение объектов экспертизы. Микроскопические методы универсальны и используются для выявления морфологических особенностей различных микрообъектов.

Методы микроскопии могут быть *качественными*, т. е. давать информацию об особенностях строения поверхности, о цвете и состоянии наблюдаемого объекта, или *количественными*, т. е. методами измерения размера микрочастиц, дефектов поверхности и др.

По принципу увеличения изображения, возможностям и целям использования выделяют следующие методы микроскопии:

- световая (оптическая) микроскопия;
- электронная микроскопия.

Детали размером менее примерно 0,1 мм невооруженным глазом нельзя различать. Для исследования таких объектов применяют увеличительные приборы, в частности микроскопы (рис. 1).

Волновая природа света накладывает определенный предел на тот минимальный размер деталей, который можно различить с помощью оптического микроскопа, т. е. на разрешающую способность микроскопа.

Разрешающая способность микроскопа – это наименьшее расстояние между двумя точками, различимыми в микроскопе.

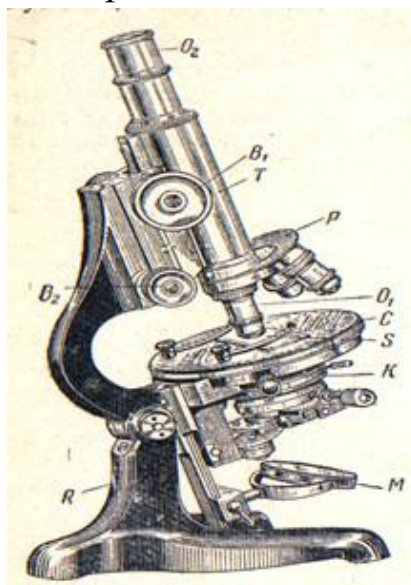


Рис. 1. Современный микроскоп

O₁ – объектив; O₂ – окуляр. Рассматриваемый объект находится на столике С и освещается снизу с помощью зеркала М и конденсора К. Оправы объектива и окуляра устанавливаются в металлической трубке – тубусе Т. Для установки на резкое изображение тубус поднимают или опускают с помощью винта кремальеры В₁ (грубая наводка) или микрометрического винта В₂ (точная наводка). Быстрая смена объективов с разным увеличением производится с помощью револьвера Р. Тубус и столик укреплены на массивном штативе R

Микроскоп (греч. *Micros* – малый, *skopeo* – смотрю) – это оптический прибор для наблюдения изображения предметов, не видимых невооруженным глазом.

По имеющимся сведениям, первый прибор типа микроскопа был создан в Нидерландах Захарием Янсеном примерно в 1590 г. Более совершенный микроскоп, в котором можно найти черты современного микроскопа, сконструировал в 1665 г. английский физик Роберт Гук.

Основная цель микроскопии – получение хорошего изображения, т. е. достижение оптимального увеличения, разрешения и контраста. Оптическая система микроскопа состоит из двух частей более или менее сложной конструкции: *объектива* (обращенного к объекту) и *окуляра* (обращенного к глазу).

Схема хода лучей в микроскопе показан на рис. 2, причем объектив и окуляр заменены на рисунке простыми линзами.

Микроскоп (как и лупа) дает возможность рассматривать изображение предмета под большим углом, чем это возможно для невоо-

руженного глаза. Наиболее благоприятные условия при работе с микроскопом осуществляются для нормального глаза в том случае, когда промежуточное изображение $S'_1S'_2$ находится в передней в передней фокальной плоскости окуляра, т. е. изображение $S''_1S''_2$ лежит в бесконечности; при этом глаз находится в ненапряженном состоянии.

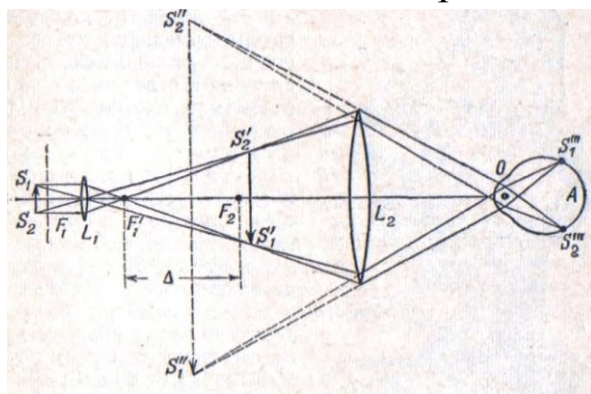


Рис. 2. Схема хода лучей в микроскопе

Увеличением микроскопа (как у лупы) называется отношение длины изображения какого-либо отрезка, получаемого на сетчатой оболочке глаза при помощи микроскопа, к длине изображения того же отрезка на сетчатке при рассматривании его невооруженным глазом. Математически увеличение есть отношение размеров изображения к размерам объекта.

Проходя через окуляр, свет меняет свое направление таким образом, что в глаз попадает конус света со значительно большим углом. Это вторичное увеличение, которое обычно выгравировано на окуляре.

Общее увеличение микроскопа есть результат умножения первичного увеличения объектива на вторичное увеличение окуляра.

1.2. Использование световой микроскопии в экспертных исследованиях

Световая микроскопия является первым этапом экспертного исследования внешних особенностей твердых объектов (с точки зрения физического состояния — это микрочастицы, свободнолежащие или образующие предметное изображение, сыпучие вещества, конгломераты, монокристаллы, изделия и их фрагменты).

В экспертной практике световые микроскопы используются:

— для предварительного исследования объектов, к которому, в частности, относятся подготовка объекта к последующему исследованию (разделение многокомпонентных веществ и многослойных мате-

риалов, извлечение микрочастиц с предмета носителя и др.), а также определение различных физических и химических свойств объектов;

- широко распространены световые микроскопы специального назначения (так называемые криминалистические микроскопы), которые приспособлены для решения конкретных экспертных задач. Например, с помощью сравнительного микроскопа для исследования пуль и гильз решается вопрос, из которого ружья производилась стрельба.

По характеру взаимодействия света с веществом световую микроскопию разделяют на микроскопию в проходящем, отраженном и поляризованном свете.

Исследования в отраженном свете проводят:

- по методу светлого поля;
- по методу темного поля.

При микроскопическом исследовании в отраженном свете лучи попадают на непрозрачный объект, через него не проходят, но отражаются.

По методу светлого поля объект освещают:

- сверху из самого микроскопа, при этом свет проходит через тубус и объектив, который одновременно выполняет и функцию конденсора. Отраженный от поверхности объекта свет попадает в глаз наблюдателя. Получают вертикально падающее освещение;

- сверху, используя боковое освещение объекта (осветитель вынесен за пределы микроскопа) с одной или нескольких сторон. Благодаря боковому освещению изображение становится более контрастным. Для получения вертикального освещения в осветительную систему необходимо ввести опак-иллюминатор.

Метод микроскопии в отраженном свете используют при исследовании непрозрачных объектов. Это широкий круг объектов судебной экспертизы: частицы изделия из металлов и сплавов, лакокрасочных покрытий, волокон, документов и любые другие непрозрачные частицы твердых веществ и материалов.

Выявленные признаки позволяют в некоторых случаях по результатам микроскопического исследования решать вопрос о тождестве объектов. Например, при исследовании лакокрасочных материалов и покрытий микроскопия в отраженном свете используется: для

установления количества слоев в покрытии, их последовательности и толщины, наличия включений, загрязнений, взаимного проникновения слоев, образования различного рода воздушных пор, пузырей, раковин и других дефектов технологического характера (рис. 3).

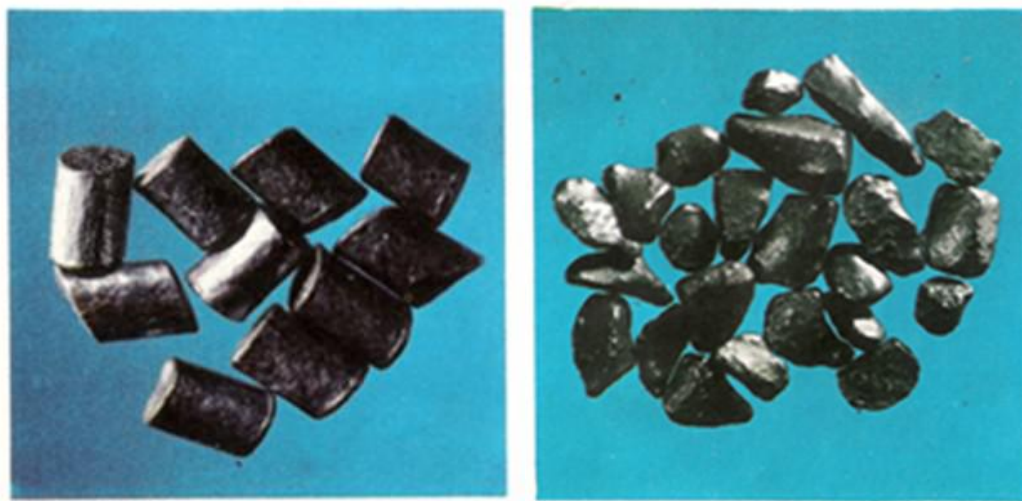


Рис. 3. Частицы пороха (оптический микроскоп)

Микроскопический метод в проходящем свете используется для исследования достаточно прозрачных (не поглощающих свет) объектов с включениями, которые выглядят темным пятном на светлом поле.

Методы исследования объектов в проходящем свете используются в судебной экспертизе при исследовании осколков стекол, ювелирных камней, объектов биологической природы.

Широко в настоящее время используется *поляризационная микроскопия* – это метод наблюдения в поляризованном свете для микроскопического исследования препаратов, включающих оптически анизотропные элементы (или целиком состоящих из таких элементов).

Оптические свойства анизотропных микрообъектов различны в различных направлениях и проявляются по-разному в зависимости от ориентации этих объектов относительно направления наблюдения и плоскости поляризации света, падающего на них. Это свойство света используется при исследовании объектов в поляризованном свете. Помещая образец на столик микроскопа и вращая образец, можно получить поляризованный отраженный свет и, таким образом, информацию о специфических особенностях исследуемого образца.

Наблюдение можно проводить как в проходящем, так и в отраженном поляризованном свете. Микроскопия в проходящем и отраженном поляризованном свете используется для исследования волокон, минералов, биологических объектов и др. (рис. 4).

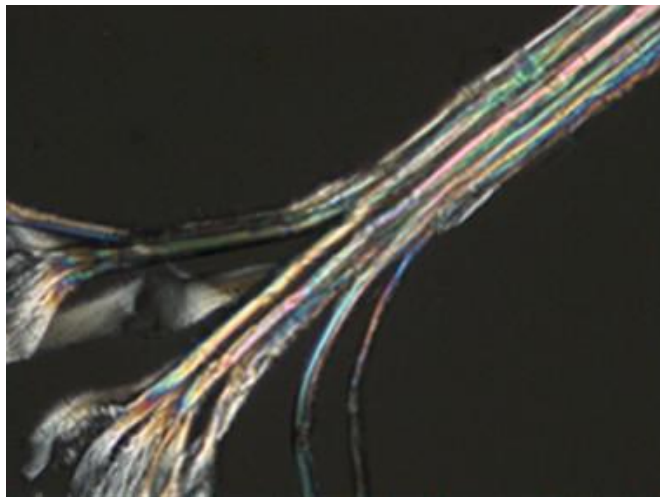


Рис. 4. Волокно в поляризованном отраженном свете

1.3. Виды микроскопов, используемые в экспертных исследованиях

Для проведения исследований методами световой микроскопии используют микроскопы различных систем и назначения.

Большинство микроскопов, используемых в экспертных исследованиях, являются стереоскопическими, в них можно наблюдать объемное изображение объектов за счет рассматривания его через два окуляра двумя глазами.

Экспертно-криминалистические лаборатории оснащены микроскопами типа МБС, МБР и сравнительными микроскопами типа МСК, реже – МИСАМ.

Одним из наиболее широко распространенных микроскопов, используемых экспертами в практической работе, является микроскоп биологический стереоскопический МБС-10. Микроскоп позволяет исследовать объекты как в отраженном свете, так и в проходящем в диапазоне увеличений от 3,6х до 100х. Микроскоп оборудован сменными окулярами кратности 6х, 12х, 8х, 14х, что позволяет изменять кратность в широком диапазоне (рис. 5).

При помощи микроскопов семейства МБС возможно и проведение измерения линейных размеров и площадей различных объектов. Для этого используются специальные окуляры со встроенной окулярной шкалой или окулярной сеткой. Получение количественной информации об исследуемых объектах значительно расширяет возможности данного микроскопа. Специальная фотонасадка дает возможность также фиксировать исследуемые объекты с помощью фотографирования.



Рис. 5. Микроскоп МБС-10

Данный микроскоп обычно используют при предварительном исследовании вещественных доказательств в целях получения необходимой информации об объектах: частях боеприпасов (пули, гильзы, дробь), порохе, следах выстрела и взрыва; при техническом исследовании документов исследуются структура бумаги, материалы штрихов (чернила, пасты шариковых ручек, карандашей, красок, фломастеров); при расследовании ДТП: для исследования различных видов стекла, полимерных материалов, тканей и волокон, следов крови и т. д.

Стереозэффект в биологических стереоскопических микроскопах типа МБС достигается с помощью специального объектива, состоящего из двух частей – собственно объектива и галилеевой системы.

Галилеева система служит для оперативного изменения увеличения микроскопа, а собственно объектив имеет такую конструкцию, которая позволяет рассматривать объекты под определенным углом, как бы «раздваивая» луч, создавая при этом два луча, каждый из которых направляется в «свой» глаз.

Биологические микроскопы – широкий класс микроскопов, работающих так же в проходящем свете и позволяющих вести исследование прозрачных объектов с различной кратностью.

Широкое распространение в экспертных исследованиях находят *микроскопы специального назначения* – это МСК (микроскоп сравнительный криминалистический). С их помощью можно проводить исследование объектов по линии разрыва, разлома, воссоздать целое по

частям и т. д. Сравнительные микроскопы МСК состоят из двух самостоятельных оптических систем и проекционной системы, которая передает изображение не только в тубус, но и на экран компьютера и на приспособление для фотосъемки. Так как данный микроскоп предполагает исследование двух объектов одновременно, то он имеет два предметных столика, на которые помещаются сравниваемые объекты. Объекты освещаются специальными осветителями и отраженный от них свет, попадая в объектив, проходит через галилееву систему и попадает на разделительную призму, благодаря которой появляется возможность одновременного наблюдения двух объектов (рис. 6).

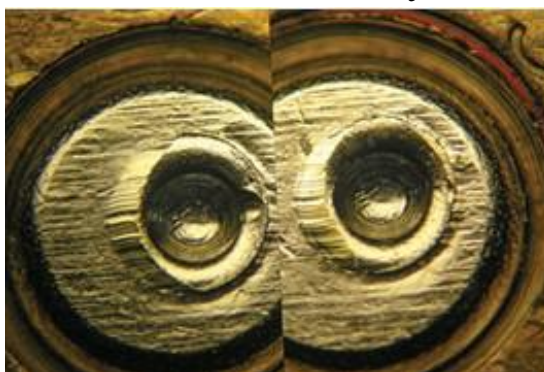


Рис. 6. Пули в сравнительном микроскопе

Микроскопы МСК-1 позволяют проводить исследования как в проходящем, так и в отраженном свете. Увеличение этих микроскопов превышает 1500х. Обычными исследованиями, проводимыми с их помощью, являются трасологические и баллистические.

Используя микроскопы сравнения, можно проводить идентификацию оружия по следам нареза на пулях. В этом случае наиболее целесообразно использовать микроскоп МСК-1, который позволяет проводить фоторазвертку на сравниваемом объекте.

Современные сравнительные микроскопы, оснащенные телекамерами и управляемые персональными компьютерами, позволяют получать комбинированное изображение сравниваемых объектов на телеэкране (телевизионная микроскопия), исследовать объекты в поляризованном свете, со светофильтрами, в инфракрасных или ультрафиолетовых лучах, дают возможность чисто электронным путем изменять масштаб, контрастность и яркость изображения.

Для ряда специальных исследований используют металлографические микроскопы. *Металлографические микроскопы* предназначены для исследования микроструктуры металлов и сплавов. В крими-

налистических исследованиях это часто служит надежным идентификационным признаком при проведении различных экспертиз (трасологических, судебно-технологических, баллистических). Такие микроскопы можно также использовать при технической экспертизе документов, например, при исследовании штрихов (определение их структуры), места пересечения штрихов, структуры тканей и т. д. Объективы таких микроскопов обладают, как правило, малыми фокусными расстояниями и, следовательно, большими увеличениями. Работу на металлографических микроскопах обычно следует вести методом светлого поля.

Современные микроскопы снабжены насадками для вывода увеличенного изображения объекта на экраны для его фотографирования. Микроскопы нового поколения снабжены телекамерами и персональными компьютерами, позволяющими выявлять признаки исследуемых объектов и проводить сравнительное исследование объектов по этим признакам с помощью специальных программ.

Световые микроскопы позволяют исследовать объекты при увеличении до 2000 крат. Изображение в данных микроскопах формируется с помощью световых лучей и характеризуется достаточно низким разрешением (0,2 мкм) и малой глубиной резкости, что не всегда позволяет выявить особенности тонкого строения объекта. Более информативными являются электронные микроскопы, в которых изображение формируется с помощью электронных пучков, благодаря чему достигается высокое разрешение и большое увеличение (рис. 7).



Рис. 7. Современный металлографический микроскоп Альтами MET 3М

Кроме оптических микроскопов широко применяются для ряда криминалистических исследований люминесцентные микроскопы, микроскопы для работы в инфракрасном свете.

2. Различные виды микроскопии, используемые в судебных экспертизах

Оптическую микроскопию разделяют по источнику света на люминесцентную микроскопию, микроскопию в ультрафиолетовом свете, микроскопию в инфракрасном свете.

2.1. Люминесцентная микроскопия

Люминесценция (лат. *lumen*, род. падеж *lumini* – свет и – *escent* – суффикс, означающий слабое действие) – нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения.

Впервые люминесценция была описана в XVIII в. Люминесцентный микроскоп освещает образец ультрафиолетовым или синим светом. Поглощая это излучение, образец испускает видимый свет люминесценции (рис. 8).



Рис. 8. Флюоресцентный стереомикроскоп Leica MZ 12,5

Исследование и фотографирование в ультрафиолетовых лучах позволяет выявить следы, в которых подозревается наличие крови, спермы, минеральных масел (например, оружейная смазка в области входных огнестрельных отверстий), отложение копоти, опаление одежды, порошинки, при исследовании стекол, химических ловушек, идентификационных меток и любых люминесцирующих микрочастиц объектов судебной экспертизы с целью их обнаружения и дифференциации.

2.2. Ультрафиолетовая микроскопия

Метод наблюдения в ультрафиолетовых (УФ) лучах делает возможным увеличение предельной разрешающей способности микроскопа, которое зависит от длины волны применяемого излучения (для используемых в микроскопии УФ-лучей 200–400 нм).

Главное преимущество метода заключается в том, что частицы многих веществ, прозрачные в видимом свете, сильно поглощают УФ-излучение определённых длин волн и, следовательно, легко различимы в УФ-изображениях.

Так как ультрафиолетовые лучи невидимы для человеческого глаза, то изображения в УФ-микроскопии регистрируют либо фотографически, либо с помощью электронно-оптического преобразователя или люминесцирующего экрана (рис. 9).

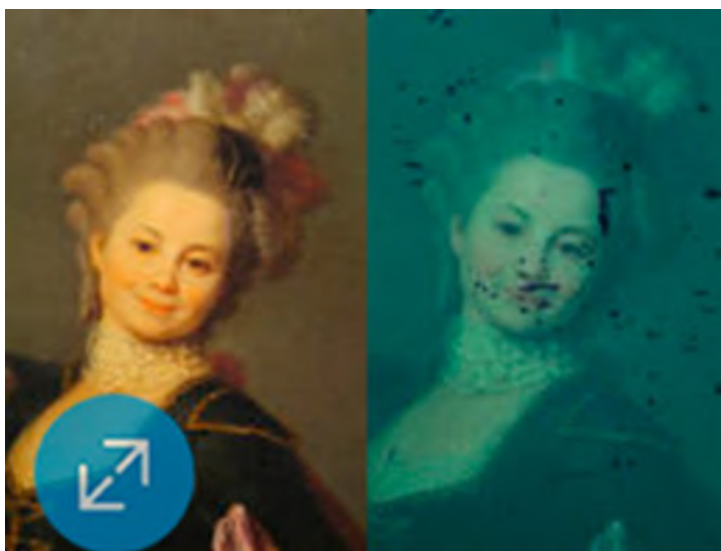


Рис. 9. Фотографии, сделанные при обычном освещении (слева) и в УФ-лучах (справа)

Снимок в УФ-свете показывает толщину пожелтевшего лака и многочисленные поздние записи, лежащие на лаке (светятся темными пятнами).

2.3. Инфракрасная микроскопия

Инфракрасная микроскопия (750–1200 нм) – метод исследования путём наблюдения образцов через микроскоп в инфракрасном свете. Метод наблюдения в инфракрасных (ИК) лучах также позволяет проводить исследование объектов за пределами видимой области света и получать дополнительную информацию об объектах: изучать внутреннюю структуру объектов, не прозрачных в видимом свете (кристаллы, минералы, некоторые стекла, следы выстрела; залитые, заклеенные тексты и др.). Метод предназначен для исследования образцов очень небольшого размера (порядка микрометров) и в очень малом количестве (от 0,01 до 100 мкг).

Первый коммерческий ИК-микроскоп появился в 1953 г.

По своей конструкции ИК-микроскоп напоминает обычный световой микроскоп: образец также размещается на предметном столике и наблюдается в бинокляр. При этом и видимый свет, наблюдаемый экспериментатором, и инфракрасный свет, регистрируемый детектором, проходят через одну общую оптическую систему, поэтому изображение в бинокляре отвечает участку, который анализируется в ИК-излучении.

Метод требует преобразования невидимого для глаза изображения в видимое с использованием фотографирования или с помощью электронно-оптического преобразователя.

3. Методы электронной микроскопии

Как отмечалось выше, разрешающая способность оптических микроскопов имеет свой предел, что связано с явлением дифракции. Увеличение оптического микроскопа можно доводить до 2000^x . Однако при исследовании весьма малых объектов или при изучении микроструктур иногда требуется получить информацию об объектах при большем увеличении. Такую информацию можно получить с помощью электронных микроскопов, где вместо световых лучей используется поток электронов, а в качестве фокусирующих линз применяются магнитные устройства.

Применение электронных микроскопов позволяет получить увеличение свыше 100 тыс. крат. Использование таких микроскопов весьма эффективно при исследовании надмолекулярных структур полимерных материалов, резин и других веществ, проведении судебно-биологических и других экспертиз.

Электронная микроскопия – это метод изучения структуры поверхности микрообъектов с помощью потока электронов, позволяющий исследовать объекты при увеличении порядка 10^6 и обладающий высокой разрешающей способностью. Движущийся электрон ведет себя как волна, причем его длина в 50 тыс. раз меньше длины волны света, следовательно, и объекты, которые можно наблюдать в потоке («лучах») электронов, могут быть значительно меньше.

Первый электронный микроскоп был построен в начале 1930-х годов. В нем вместо лучей света использовались быстрые электроны,

а вместо стеклянных линз — электромагнитные катушки или электронные линзы.

Электронные микроскопы представляют собой приборы, позволяющие с помощью пучка электронов и специального экрана получать изображение объектов, недоступных для наблюдения в обычном световом микроскопе.

Электронные микроскопы дают возможность увидеть отдельные коллоидные частицы, крупные макромолекулы (например, белков), вирусы, элементы кристаллической решетки и другие субмикроскопические объекты размером 10^{-7} – 10^{-5} см.

Практически на электронных микроскопах можно достигнуть разрешение около 2 Å (увеличение до 10^6).

По способу исследования объектов микроскопы можно разделить на следующие типы:

1. *Просвечивающие* микроскопы, в которых исследуемый объект просвечивается пучком электронов, создающим затем на экране или фотопластинке соответствующее изображение.

2. *Растровые электронные* микроскопы, в которых изображение создается электронами, отраженными исследуемой поверхностью, причем пучок электронов сканирует поверхность подобно лучу в телевизионном кинескопе. Современные растровые электронные микроскопы оснащены спектрометрами, позволяющими проводить рентгеноспектральный анализ элементного состава изучаемой микрочастицы.

В настоящее время наибольшее распространение получили электронные микроскопы просвечивающего типа, так как они обладают наибольшей разрешающей способностью и с их помощью можно всесторонне исследовать самые различные объекты. Эти микроскопы позволяют получать светлопольные, темнопольные и стереоснимки в широком диапазоне увеличений.

Метод используется для исследования деталей микроструктуры объектов, не видимых в световом микроскопе, т. е. лежащих за пределами разрешающей способности (мельче 0,1 мкм). Он позволяет выявлять внутреннюю структуру и морфологию поверхности различных объектов и проводить их сравнение при исследованиях по таким морфологическим признакам, как размер и форма микрочастиц (на поверхности или в следе) (рис 10).

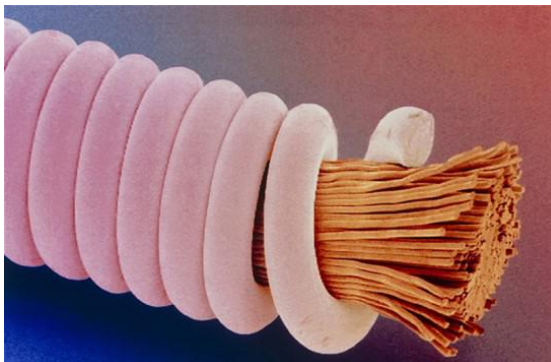


Рис. 10. Гитарная струна под электронным микроскопом *hard-life.ru* 800 × 516

3.1. Просвечивающая электронная микроскопия

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) используется для исследования объектов в проходящих электронных пучках. Исследования проводятся на просвечивающих электронных микроскопах, обладающих самой высокой разрешающей способностью по сравнению с другими типами электронных микроскопов (0,2–0,3 нм) и увеличивающих объект до 500 тыс. крат.

Метод ПЭМ позволяет исследовать объекты в виде тонких пленок или суспензий, поэтому для большинства объектов судебной экспертизы необходима предварительная пробоподготовка, часто приводящая к частичному повреждению или уничтожению объектов.

Применяя в исследованиях метод просвечивающей электронной микроскопии, используются следующие *методы подготовки объектов для анализа*:

- получение реплик с объекта (когда исследуется не сам объект, а слепок с его поверхности), как, например, в случае металлов или волокнистых материалов. Это не повреждающий объект метод пробоподготовки;
- утончение объектов (приготовление фольги из металлов и сплавов);
- разрушение объектов с извлечением из них исследуемого компонента (сажа из резины, загустители смазок);
- получение ультратонких срезов (волокнистые и лакокрасочные материалы).

С помощью ПЭМ в судебной экспертизе решаются следующие задачи:

- определение марки сажи в саженаполненных материалах (резины, тонеры);
- определение причины разрушения изделия из металла (по характеру излома);
- определение типа загустителя в смазках (исследование загустителей пластичных смазок используется в целях установления их родовой принадлежности);
- исследование волокон и волокнистых материалов и их красителей неорганической природы (установление формы, размеров частиц красителя и характера их распределения), эксплуатационных признаков;
- определение фазового состава кристаллических веществ;
- выявление особенностей технологии изготовления (термической обработки) ряда изделий из стекла.

3.2. Растровая электронная микроскопия

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) позволяет получать ценную информацию о морфологических особенностях поверхности твердых объектов. РЭМ основана на сканировании объекта исследования электронным пучком (зондом) предельно малого сечения (несколько ангстрем). При облучении зондом участка поверхности, размер которого определяется размером зонда, возникает достаточно интенсивный ответный сигнал (вторичные электроны) от этого участка, характеризующий особенности поверхности данного участка.

Для получения информации о достаточно большом участке поверхности проводят сканирование зондом по определенной программе, т. е. условно разбив эту поверхность на микроучастки и двигаясь по ней последовательно. Это позволяет облучать участки, по размеру соответствующие размеру зонда, и таким образом получать информацию об исследуемой поверхности.

По разрешающей способности (7–10 нм) и увеличению до 400 тыс. крат растровая электронная микроскопия уступает просвечивающей микроскопии, но при этом имеет ряд существенных преимуществ:

- большая глубина резкости при различных увеличениях;

- не требует предварительной пробоподготовки объектов, часто приводящей к их разрушению;
- благодаря большим размерам камеры для образцов можно исследовать не только микро-, но и макрообъекты.

С помощью растровой электронной микроскопии решаются следующие задачи: определение причины разрушения изделия из металла; определение состояния автомобильных ламп в момент их разрушения при дорожно-транспортном происшествии (ДТП); обнаружение и определение продуктов выстрела; определение вида волокнистого материала (текстильные волокна, древесина, волосы); установление общей родовой (групповой) принадлежности волокон (по выявлению особенностей морфологии их поверхности, наличию частиц отделочных препаратов, следов механического, температурного и эксплуатационного воздействия); установление последовательности выполнения записей (исследование пересекающихся штрихов на материалах письма); определение вида лакокрасочных покрытий (число и толщина слоев, форма частиц пигмента, вид грунта); установление общей родовой (групповой) принадлежности лакокрасочных покрытий (по изучению морфологии верхней и нижней поверхностей для выявления технологических и эксплуатационных признаков) (рис. 11).



Рис. 11. Снимок спермы, полученный в электронном микроскопе

Метод электронной микроскопии не лишен, конечно, недостатков. К ним следует отнести высокую стоимость электронных микроскопов. Работа на них достаточно сложная, т. к. наблюдаемый объект должен находиться в вакууме. Сложно и подготовительная пробоподготовка.

Однако все трудности и недостатки окупаются большой разрешающей способностью электронных микроскопов.

Лекция 14. Химические методы исследования объектов судебной экспертизы

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. *Правила по технике безопасности при работе в химической лаборатории.*
2. *Понятие растворов, растворителей, растворенных веществ, концентрации.*
3. *Классификация методов аналитической химии. Химические методы и использование их в криминалистике.*
 - 3.1. *Методы разделения и концентрирования и использование их в криминалистических исследованиях.*
 - 3.2. *Методы определения качественного состава соединений и их смесей и использование их в криминалистических исследованиях.*
 - 3.3. *Метод определения количественного состава соединений и их смесей и использование их в криминалистических исследованиях:*
 - 3.3.1. *Гравиметрический (весовой) метод.*
 - 3.3.2. *Титриметрический метод.*

1. Правила по технике безопасности при работе в химической лаборатории

При работе в химической лаборатории необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

1. Приступать к работе можно только после разрешения преподавателя.
2. При выполнении работы необходимо соблюдать условия проведения аналитической реакции и строго придерживаться количеств реактивов, указанных в учебнике. Необходимо внимательно читать надпись на этикетках, прежде чем взять необходимый реактив.
3. Все опыты, сопровождающиеся выделением ядовитых, летучих, неприятно пахнущих веществ (например, выпаривание, кипячение растворов кислот, а также растворов, содержащих галогены, аммиак, сероводород и т. п.), проводить только в вытяжном шкафу.
4. Реактивы нельзя пробовать на вкус, так как большинство из них ядовиты.
5. Нагревая жидкость в пробирке, необходимо держать пробирку так, чтобы отверстие было направлено в сторону от себя и работающих рядом товарищей. Наливая или нагревая жидкость, нельзя наклоняться над сосудом, так как возможно разбрызгивание или даже выброс раствора.

6. При определении запаха раствора легким движением руки направлять струю воздуха от сосуда к себе.

7. При разбавлении концентрированных кислот вливать кислоту в воду, а не наоборот.

8. При взбалтывании растворов в пробирках или колбах их нужно плотно закрывать пробками, запрещается закрывать пробирку пальцем.

9. Нельзя засасывать едкие и ядовитые жидкости в пипетки ртом, так как при этом возможны химические ожоги или отравления. Концентрированные щелочи, кислоты, ядовитые растворы, агрессивные жидкости набирают в пипетку с помощью резиновой груши.

10. В помещении лаборатории запрещается оставлять без присмотра зажженные горелки, плитки, водяные бани, держать вблизи горящих горелок эфир, спирт и другие воспламеняющиеся вещества.

11. Работу с легковоспламеняющимися веществами и горючими жидкостями следует проводить в вытяжном шкафу с приспущенными дверцами и при работающей вентиляции, при выключенных газовых горелках и электроприборах.

12. Отработанные горючие жидкости собирают в специальную герметично закрывающуюся тару и передают для уничтожения или регенерации.

13. Учащиеся должны изучить правила противопожарной безопасности и руководствоваться ими в своей работе.

14. В случае ожога лица, рук кислотой или щелочью необходимо оказать пострадавшему первую помощь: обмыть пораженное место большим количеством воды, а затем при ожоге кислотами обработать однопроцентным раствором гидрокарбоната натрия, а при ожоге щелочами обработать однопроцентным раствором уксусной кислоты. В обоих случаях после этого наложить повязку из бинта, смоченного этиловым спиртом. При попадании кислоты или щелочи в глаза необходимо промыть их большим количеством воды, а затем разбавленным раствором пищевой соды или однопроцентным раствором борной кислоты (при попадании щелочи).

15. Работу в лаборатории необходимо проводить в халате. На лабораторных столах не должны находиться сумки, пищевые продукты и другие посторонние предметы.

2. Понятие растворов, растворителей, растворенных веществ, концентрации

Часто в работе эксперту необходимо знать, что такое растворы, в каких единицах выражается их концентрация, как их готовить, хранить и т. п. Рассмотрим эти понятия.

В природе и технике растворы имеют огромное значение. Растения усваивают вещества в виде растворов. Усвоение пищи связано с переводом питательных веществ в раствор. Все природные воды являются растворами. Растворами являются важнейшие физиологические жидкости – кровь, лимфа и др. Многие химические реакции протекают в растворах.

Растворы – это однородные (гомогенные) системы, состоящие из двух и более компонентов (составных частей) и продуктов их взаимодействия.

Растворитель (лат. *solvere* – «ослабить») – жидкое, твердое или газообразное вещество, способное растворять другие твердые, жидкие или газообразные вещества, которые растворяются в определенном объеме растворителя при заданной температуре.

Растворенное вещество – вещество, которое растворяется в растворителе, образуя раствор.

Важной характеристикой любого раствора является его состав.

Существуют различные способы численного выражения состава растворов: массовая доля растворенного вещества, молярная концентрация и др.

Массовая доля растворенного вещества – это безразмерная физическая величина, равная отношению массы растворенного вещества к общей массе раствора, т. е.:

$$w_g = m_g / m,$$

где w_g – массовая доля растворенного вещества; m_g – масса растворенного вещества; m – общая масса раствора.

Массовую долю растворенного вещества w_g обычно выражают в долях единицы или в процентах. Например, массовая доля растворенного вещества – серной кислоты в воде равна 0,05 или 5 %. Это означает, что в растворе серной кислоты и воды массой 100 г содержится серная кислота массой 5 г.

Молярная концентрация или молярность – это величина, равная отношению количества растворенного вещества к объему раствора.

Раствор, в 1 л которого содержится 1 моль растворенного вещества, называется *молярным*.

Концентрацией раствора называется содержание растворенного вещества в определенной массе или определенном объеме растворителя или растворе.

Разбавленный раствор – раствор с низкой концентрацией растворенного соединения.

Концентрированный раствор – раствор с высокой концентрацией растворенного соединения.

Наиболее часто употребляемым способом концентрации как в криминалистике, так при приготовлении растворов для бытовых нужд является процентный. В фотографии все рецептуры проявляющих, фиксирующих и других растворов приведены в процентах, реже в граммах вещества на определенное количество растворителя. Что примерно то же самое.

Для выявления компонентов потожировых веществ, содержащихся в следах пальцев рук, используют 5 %-ный раствор нингидрина в ацетоне или 3 %-ный раствор азотнокислого серебра (AgNO_3) в воде, т. е. концентрации растворов приводят в процентах.

Процентное содержание растворенного вещества показывает число единиц массы вещества, содержащегося в 100 единицах массы раствора. Выражается в процентах, обозначается %.

Пятипроцентный раствор поваренной соли представляет собой раствор, в 100 г (кг, т) которого растворено 5 г (кг, т) соли NaCl . Заметим, что для процентного способа выражения концентрации абсолютно неважно, о растворе какого вещества идет речь.

В связи с тем, что в практике работы эксперта-криминалиста чаще всего используют массовую концентрацию, поэтому следует указать методику приготовления таких растворов.

Рассчитывается навеска, т. е. масса растворяемого вещества, затем производится расчет необходимого количества растворителя. Если таковым является вода, то необходимое количество ее в граммах численно равняется объему в миллилитрах, который отмеряется с помощью мерного цилиндра и переливается в колбу для растворения.

Затем в эту колбу постепенно добавляют растворяемое вещество при постоянном перемешивании до полного растворения. При необходимости воду перед растворением можно подогреть.

Когда растворяются несколько веществ, то этот процесс производится в порядке, указанном в рецепте. Новое вещество можно добавлять только тогда, когда предыдущее растворилось полностью (рис. 1).

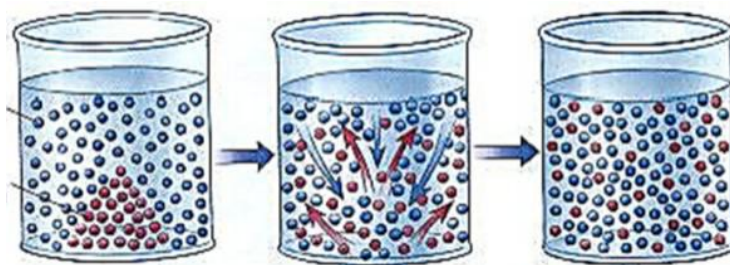


Рис. 1. Приготовление растворов определенной концентрации

3. Классификация методов аналитической химии.

Химические методы и использование их в криминалистике

Все специальные криминалистические методы делятся на две большие группы – собственно криминалистические (разработанные специально для целей выявления криминалистически значимых признаков вещественных доказательств) и заимствованные криминалистикой из других наук. Методы качественного анализа относятся ко второй группе: заимствованные из других наук.

Методы качественного анализа делятся на: химические, физико-химические и физические.

Физические методы основаны на изучении физических свойств анализируемого вещества.

К этим методам относятся спектральный, рентгеноструктурный, масс-спектрометрический, люминесцентный анализы и др.

В физико-химических методах течение реакции фиксируется измерением определенного физического свойства исследуемого раствора. К физико-химическим методам относятся фотометрический, электрохимический и хроматографический, рефрактометрический и потенциометрический анализы.

К химическим методам относятся методы, основанные на использовании химических свойств исследуемых веществ.

Химические методы можно разделить на две группы:

- 1) методы разделения и концентрирования;
- 2) методы обнаружения и определения качественного и количественного состава соединений и их смесей.

Рассматривая химические методы анализа, в основе которых лежит изменение энергии химической реакции, можно видеть, что в ходе реакции изменяются параметры, связанные с расходом исходных веществ или образованием продуктов реакции. Эти изменения экспериментатор может либо наблюдать непосредственно (визуально), например появление окраски или выпадение осадка, либо измерять такие величины, как расход реагента, массу образующегося продукта и т. д.

3.1. Методы разделения и концентрирования и использование их в криминалистических исследованиях

Методы разделения и концентрирования применяются для разделения сложных многокомпонентных смесей, выделения из смеси определяемого компонента и повышения концентрации анализируемого компонента в пробе. К *методам разделения* относятся: выделение и концентрирование осадение (соосаждение), экстракция, испарение (дисцилляция), озоление.

Разделение играет важную роль в анализе следовых количеств веществ.

Необходимость разделения и концентрирования при проведении экспертных исследований может быть обусловлена главным образом следующими факторами:

- концентрация определяемого компонента ниже предела обнаружения метода;
- исследуемая проба содержит компоненты, мешающие определению.

При разделении смеси вещества, входящие в состав этой смеси, отделяются друг от друга. При концентрировании вещества, присутствующего в малом количестве, собираются в меньший объем (абсолютное концентрирование), либо отделяются от макрокомпонента таким образом, что отношение концентрации микрокомпонента к концентрации макрокомпонента повышается (относительное концентрирование).

Для установления подлинности вин или соков методом тонкослойной хроматографии определяют наличие и состав органических кислот в них, предварительно отделив от сахаров, которые мешают определению. При исследовании лекарственных препаратов их активные компоненты предварительно выделяют из таблеток или порошков.

Способы разделения:

Выпаривание – выделение растворенных в жидкости твердых веществ способом ее превращения в пар;

Фильтрация – процесс разделения неоднородных (дисперсных) систем (например, суспензия, аэрозоль) при помощи пористых перегородок, пропускающих дисперсионную среду и задерживающих дисперсную твердую фазу.

Осаждение – один из наиболее распространенных методов разделения вещества. В процессе осаждения происходит образование новой фазы – осадка малорастворимого соединения (рис. 2).

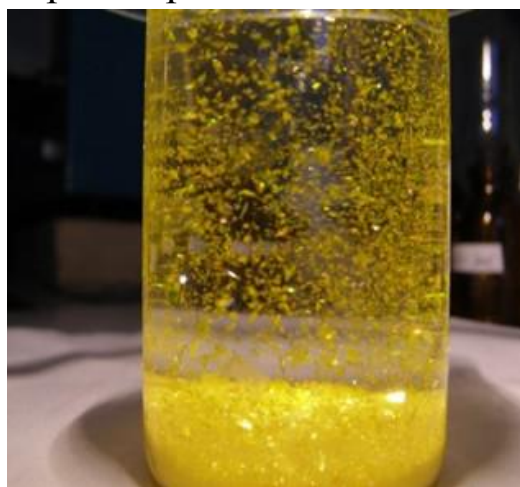


Рис. 2. Осаждение иодида свинца

Соосаждение – это распределение микрокомпонентов, вызванное выделением осадка (коллектора) в твердую фазу; оно представляет собой одновременный переход микро- и макрокомпонентов в формирующуюся фазу осадка. Применяют соосаждение как метод концентрирования.

Методы выделения и концентрирования осаждением используются в судебной экспертизе при исследовании следующих объектов: лакокрасочных покрытий, волокон, материалов письма, биологического материала, нефтепродуктов, пластмасс, фармацевтических и нарколологических препаратов.

Экстракция – процесс извлечения отдельных компонентов сложной смеси при помощи растворителя.

В основе экстракции лежит процесс избирательного извлечения одного или нескольких компонентов смеси жидких или твердых веществ с помощью органического растворителя, не смешивающегося с водой (рис. 3).



Рис. 3. Экстракция раствора

Аналитическое определение можно проводить непосредственно в экстракте после выпаривания, перегонки, кристаллизации.

Экстрагирование часто является первой стадией анализа. Оно может обеспечить достаточно полное разделение, хотя всегда существует опасность, что часть следового компонента может остаться в разделяемой смеси и таким образом будет утеряна.

Методы экстракции находят широкое применение при исследовании объектов судебной экспертизы как для предварительного исследования, так и для подготовки к последующему анализу. Методы экстракции используют при исследовании следующих объектов: материалы письма, бумага, лакокрасочные материалы (ЛКМ) и лакокрасочные покрытия (ЛКП), пороха, волокна, идентификационные метки, полимерные материалы, наркотики и лекарственные препараты, нефтепродукты и горюче-смазочные материалы, почвы и минералы.

Испарение – это процесс разделения и очистки веществ, при котором жидкое или твердое вещество при нагревании переходит в газообразное состояние (испаряется из смеси), а затем при охлаждении конденсируется, снова образуя жидкую или (иногда) твердую фазу (рис. 4).

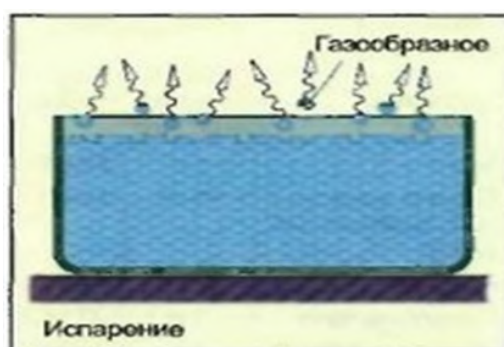


Рис. 4. Испарение

Выделяют следующие *методы испарения*:

- отгонка;
- фракционное испарение (дистилляция);
- возгонка (сублимация).

Отгонка, или простое выпаривание, – одноступенчатый процесс разделения и концентрирования веществ. Очень часто возникает необходимость в концентрировании раствора, полученного после той или иной стадии разделения, путем выпаривания растворителя.

Следовый компонент при экстракции почти всегда содержится в относительно большом объеме растворителя. При выпаривании удаляются вещества, которые находятся в форме готовых летучих соединений.

Выпаривание осуществляют в закрытой системе или в открытом сосуде. Выпаривание можно проводить разными способами, например, нагревая колбу с веществом снизу (часто используется нагревание на водяной бане) или сверху (под инфракрасной лампой).

Для выпаривания больших объемов растворителя удобно использовать роторный испаритель, с помощью которого можно упаривать растворы при низкой температуре за счет пониженного давления.

Дистилляция, или фракционное испарение, основана на разной летучести веществ.

Разделение и концентрирование компонентов смеси происходит за счет различия их точек кипения и испарения отдельных компонентов при разной температуре в разное время.

Возгонка (сублимация) – это перевод вещества из твердого состояния в газообразное и его последующее осаждение в твердой форме (минуя жидкую фазу) (рис. 5).



Рис. 5. Возгонка йода

В принципе возгоняться способны практически все вещества, однако в большинстве случаев этот процесс идет лишь при крайне низком давлении. Для сублимации микроколичеств веществ часто используют метод «холодного пальца», при котором следовый компонент конденсируется на охлажденном стержне, расположенном внутри закрытого сосуда непосредственно над обогреваемым образцом; при необходимости система вакуумируется.

Методы испарения используются в судебной экспертизе для подготовки к последующему анализу таких объектов, как лакокрасочные материалы (ЛКМ) и лакокрасочные покрытия (ЛКП), волокна, спиртосодержащие жидкости, наркотики и лекарственные препараты, нефтепродукты и горюче-смазочные материалы.

3.2. Методы определения качественного состава соединений и их смесей и использование их в криминалистических исследованиях

Химические методы основаны на аналитических реакциях, которые проводятся путем введения в исследуемый раствор определенных реактивов (реагентов), дающих с открываемым веществом (ионом) характерный продукт взаимодействия, отличный от исходных компонентов по каким-либо свойствам. Такие реакции называются *характерными*. Если реакции сопровождаются изменением окраски раствора, а также появлением окрашенного осадка или микрокристаллов, то их называют *цветными характерными реакциями*. Этот метод применяется экспертами-криминалистами, т. е. неспециалистами в области химии, так как данные реакции достаточно просты в исполнении, надежны, и для их проведения не требуется специального оборудования и знаний. Например, цветные реакции служат средством для создания контраста между следами папиллярных линий и промежутков между ними, по цветным реакциям можно определить наличие следов крови, пороха и т. д.

Характерные реакции проводят пробирочным, капельным и микрокристаллоскопическим методом, пирохимическим методом.

Сущность пробирочного метода состоит в том, что к пробе испытуемого вещества добавляют некоторое количество реактива и наблюдают результат взаимодействия. От всех остальных методов он отличается большим количеством (по массе или объему) реагирующих компонентов.

Капельные реакции характеризуются тем, что и проба, и реагент находятся в малом количестве, при этом проба может быть как в виде раствора, так и в сухом виде. Такие реакции проводятся на часовом стекле или предметном, имеющем в середине углубление в виде лунки.

Капельные реакции выполняют также на полосках фильтровальной бумаги. В основу этого метода положены капиллярно-адсорбционные свойства бумаги. Фильтровальная бумага сильно адсорбирует растворимые вещества, они концентрируются и поэтому чувствительность реакции повышается.

Исследуемый раствор и реактивы наносят в определенной последовательности в количестве от одной до двух, трех капель. Результат анализа устанавливают по окраске полученного пятна или по расположению и окраске концентрических колец, если в исследуемом растворе присутствовало несколько ионов, реагирующих с одним и тем же реактивом или с реактивом, добавленным специально (рис. 6).

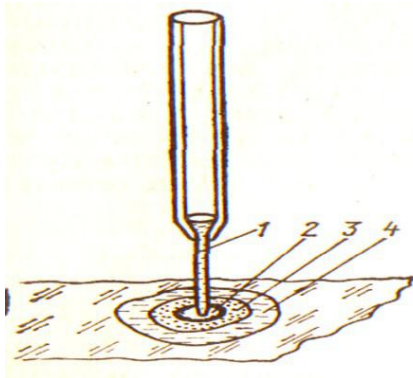


Рис. 6. Способ выполнения капельных реакций: 1 – реагент; 2 – цветное пятно; 3 – раствор; 4 – растворитель

Благодаря различной адсорбируемости разных ионов, они с одним и тем же реактивом образуют окрашенные зоны, располагающиеся на разных расстояниях от центра пятна. Ближе к центру располагаются менее растворимые, дальше от центра – более растворимые.

Применение капельных реакций позволяет сократить время анализа, так как при их выполнении не прибегают к длительным операциям (осаждение, центрифугирование и др.).

В качественном анализе используются также *пирохимические реакции*: окрашивание пламени в различные цвета летучими солями некоторых катионов.

Пирохимический метод анализа основан на нагревании и сплавлении анализируемых веществ. Например, пламя окрасится в желтый

цвет при внесении в него ионов натрия, если в состав полимеров входит хлор, то пламя будет зеленым.

Микрористаллоскопические реакции проводятся, как и при капельном анализе, но только на плоском предметном стекле. В результате этих реакций при взаимодействии между определяемым ионом и реактивом образуются кристаллы определенной, характерной для данного вещества формы. На применении этих качественных реакций основан микрористаллоскопический метод анализа. Например, можно определить наличие крови по образованию кристаллов в виде косых параллелограммов коричневого цвета. На выполнение микрористаллоскопических реакций затрачивается мало времени, они обладают высокой чувствительностью, хорошей наглядностью, позволяющей идентифицировать микроколичества исследуемого вещества. Эти реакции очень чувствительны, используя их, можно открывать десятые доли миллиграмма.

В экспертной практике искомые вещества приходится определять в присутствии других веществ, поэтому реагент должен взаимодействовать только с искомым веществом и не реагировать с другими.

О том, что реакция произошла, а в пробе имеется искомое вещество, судят по аналитическим признакам:

- выпадение осадка;
- выделение газов (пузырей);
- появление специфического запаха;
- изменение окраски и др.

Осадок может иметь определенный цвет, форму и т. п. Если производится микрористаллоскопическая реакция, то образовавшиеся кристаллы изучаются под микроскопом, они также имеют характерные для них внешние признаки, которые будут более выраженными, если используемые вещества имели малые концентрации.

Каждое вещество (ион) может быть обнаружено с помощью одной или нескольких характерных реакций, отличающихся чувствительностью.

Метод качественного анализа используется в судебно-экспертном исследовании для обнаружения потожировых следов, наркотических средств, взрывчатых веществ, лекарственных препаратов и при экспертном исследовании материалов документов (неорганических

пигментов, серебра, травящих веществ и др.), следов выстрела, порохов, лакокрасочных материалов, волокон, табачных изделий, бензинов, минералов, почв, бумаги, нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов, спиртосодержащих жидкостей (ССЖ).

3.3. Методы определения количественного состава соединений и их смесей и использование их в криминалистических исследованиях

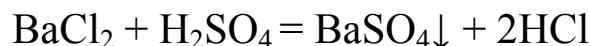
Задачей количественного анализа является определение количественного содержания отдельных составных частей в исследуемом веществе.

Химические методы количественного анализа базируются на законе постоянства состава, сохранения массы веществ, законе эквивалентов. Последний имеет важное значение для расчетов результатов количественного анализа. Химические методы количественного анализа включают *гравиметрические* и *титриметрические* методы.

3.3.1. Гравиметрический (весовой) метод

Если в основе метода лежит измерение массы одного из продуктов реакции, то такой метод называют гравиметрическим. Гравиметрический анализ основан на определении массы вещества, выделенного в чистом виде или в виде соединения известного состава и на законе сохранения массы веществ при химических превращениях.

Например, чтобы определить количество бария в его соединениях, ион Ba^{2+} осаждают при помощи разбавленной серной кислоты:



Осадок $BaSO_4$ фильтруют, промывают, прокаливают и точно взвешивают. По массе осадка $BaSO_4$ и его формуле вычисляют, сколько в нем содержится бария.

Это наиболее точный из химических методов анализа, его характеристики: предел обнаружения – 0,10 %; погрешность не превышает 0,001–0,005 %. Гравиметрический метод дает результаты высокой точности, но он очень трудоемок.

В гравиметрии используют реакции обмена, замещения, разложения и комплексообразования, а также электрохимические процессы.

В большинстве случаев при анализах применяют методы осаждения. В этих методах определяемый компонент выделяют в осадок в

виде очень мало растворимого соединения и определяют массу этого соединения. Перед тем, как определить массу выделенного соединения, его высушивают или прокаливают. При этом осажденное соединение иногда превращается в соединение другого состава.

Кроме методов осаждения, значительно реже применяют методы отгонки. Этими методами можно определять только летучие соединения или такие, которые превращаются в летучие в процессе анализа.

Методы гравиметрического анализа используются при экспертном исследовании объектов почвенного происхождения, спиртосодержащих жидкостей, нефтепродуктов и горюче-смазочных материалов.

3.3.2. Титриметрический метод

Если определяют объем затраченного реагента с точно известной концентрацией, то такой метод называют *титриметрическим*.

Титриметрический анализ основан на точном измерении объема реактива, затраченного на реакцию с определяемым компонентом. Реактив берется в виде раствора определенной концентрации – титрованный раствор.

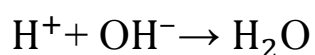
Момент, когда реактив будет прибавлен в количестве, эквивалентном содержанию определяемого вещества, т. е. момент окончания реакции, определяется различными способами.

При титровании приливают количество реактива, эквивалентное количеству исследуемого вещества. Зная объем и точную концентрацию раствора, пошедшего на реакцию с определяемым веществом, вычисляют количество определяемого вещества.

Титриметрический анализ дает менее точные результаты, чем гравиметрический (порог чувствительности – 0.5% погрешность – 0,5%), но важным его преимуществом является большая скорость выполнения анализа.

Титриметрические методы классифицируют по типам реакций, лежащих в их основе: кислотно-основные, окислительно-восстановительные (оксидометрии), комплексообразования и осаждения.

Кислотно-основные методы, в основе которых лежит реакция нейтрализации, в процессе которых образуются слабо диссоциированные молекулы воды.



Этим методом определяют количество кислот, оснований, а также некоторых солей.

Методы окисления – восстановления (оксидиметрии). Эти методы основаны на реакциях окисления – восстановления.

При помощи растворов окислителей определяют содержание веществ, являющихся восстановителями, и наоборот.

В основе их классификации лежит вид стандартного окислителя (KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, и др.) или восстановителя (FeSO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, NaHSO_3 и др.).

Методы осаждения и комплексообразования, основаны на осаждении ионов в виде труднорастворимых соединений и на связывании ионов в малодиссоциированный комплекс.

Различают следующие *способы титрования*:

1) прямое, когда при титровании происходит реакция между определяемым веществом и рабочим раствором;

2) обратное, когда к определяемому раствору добавляют заведомый избыток (но точно отмеренное количество) раствора известной концентрации и избыток этого реактива оттитровывают рабочим раствором;

3) титрование заместителя, когда рабочим раствором титруют продукт реакции определяемого вещества с каким-либо реактивом.

В экспертном исследовании методы титрометрического анализа используются при исследовании объектов почвенного происхождения, спиртосодержащих жидкостей.

Лекция 15. Физические и физико-химические методы исследования

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Понятие физических методов и их классификация.
2. Методы определения некоторых физических величин.
3. Физико-химические методы анализа.

1. Понятие физических методов и их классификация

Методы количественного анализа делятся на физические, физико-химические и химические методы анализа.

Химические методы исследования рассматривались ранее.

Физические методы основаны на изучении физических свойств анализируемого вещества.

К физическим методам анализа относятся спектральные (атомные и молекулярные) методы, рентгеновские (спектральные и структурные) методы, масс-спектральные и ядерно-физические.

В *физико-химических методах* течение реакции фиксируется измерением определенного физического свойства исследуемого раствора. К физико-химическим методам относятся фотометрический, электрохимический и хроматографический, рефрактометрический и потенциометрический, поляриметрический анализы.

Механические свойства, лежащие в основе физических методов

К методам определения механических свойств, используемых в экспертных исследованиях, относятся испытание на растяжение, на изгиб, определение твердости и микротвердости (рис. 1).

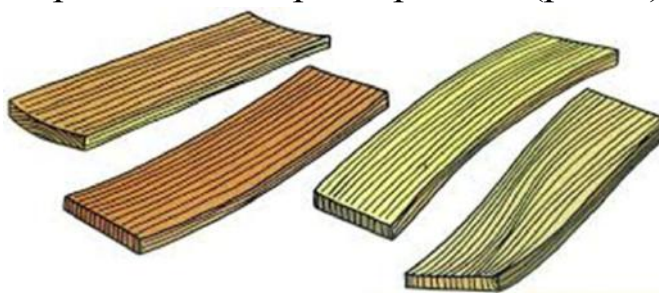


Рис. 1. Деформация тел

Испытание на растяжение. При испытании на растяжение определяется сопротивление материала пластической деформации, которое характеризуется определенной степенью пластичности материала (относительными удлинением и сужением).

Испытание на растяжение проводится при исследовании металлов, волокон и бумаги. При этом удается устанавливать соответствие технологии изготовления указанных материалов, ТУ и их эксплуатационные характеристики (рис. 2).

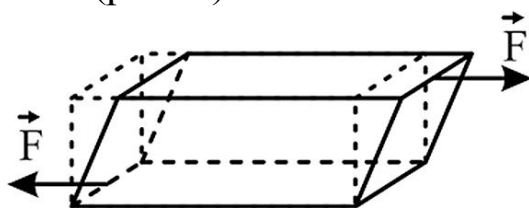


Рис. 2. Растяжение

Испытание на изгиб. При испытании на изгиб определяют предел прочности и условный предел текучести исследуемого объекта.

Испытания на изгиб используются при исследовании бумаги в целях установления эксплуатационных характеристик образцов бумаги и соответствия технологии их изготовления.

Определение твердости. Твердость характеризует способность материала сопротивляться проникновению в него другого тела. Величина твердости зависит от прочности связей, действующих в материале. Метод используется при исследовании изделий из металлов и сплавов, их эксплуатационных характеристик при решении различных задач исследования.

Определение микротвердости. При проведении испытаний на микротвердость оценивается сопротивление материала пластической деформации в микрообъеме.

Метод используется при исследовании изделий из металлов и сплавов, стекла. Результаты исследований выступают в качестве сравнительных признаков при установлении принадлежности части целому (рис. 3).



Рис. 3. Твердомеры

Тепловые свойства, лежащие в основе физических методов

В судебной экспертизе используются следующие тепловые свойства объектов: определение температур фазовых превращений, определение термо–ЭДС, определение теплопроводности, определение коэффициента линейного расширения.

Определение температур фазовых превращений. Температуры плавления или температуры кипения (точки испарения) вещества можно определить с помощью термометров, отмечая температуру, при которой происходит плавление или испарение (фазовые переходы) исследуемых веществ. Значения температур плавления и кипения позволяют оценивать чистоту вещества и являются одной из характеристик вещества при его идентификации.

Метод используется для сравнительного исследования различных материалов и веществ (например, сталей, цветных металлов, неизвестных веществ) по температурам фазовых переходов.

Определение термо–ЭДС. Метод заключается в измерении электродвижущей силы, которая возникает при нагревании спая, состоящего из образца (сплава) и металлического эталона, и зависит от состава и структуры исследуемого сплава. Метод применяется при исследовании металлов и сплавов (рис. 4).

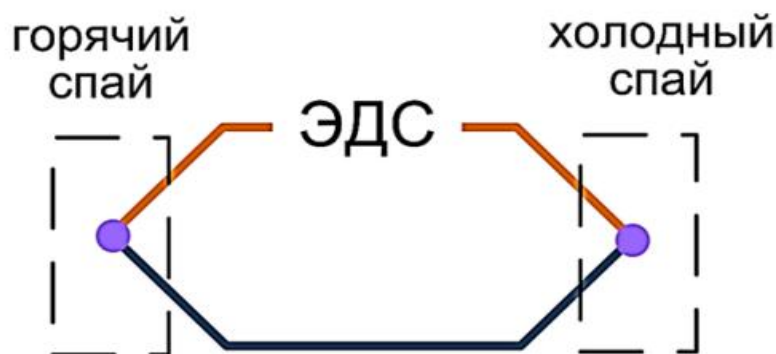


Рис. 4. Схема определения термо–ЭДС

Определение коэффициента линейного расширения. Метод используется для изучения превращений в металлах и сплавах путем наблюдения объемных изменений, происходящих при нагревании и охлаждении (дилатометрический метод). Коэффициенты линейного расширения определяются по результатам измерений удлинения образца при нагревании или охлаждении. Нарушение плавного изменения длины образца при изменении температуры свидетельствует о протекании в нем фазовых переходов.

Электрические свойства, лежащие в основе физических методов

К электрическим свойствам объектов, изучаемых с помощью физических методов, относятся *удельное сопротивление*, электропроводность.

Удельное сопротивление проводящих материалов зависит от их физической природы и может меняться с изменением состава и структуры материала. Метод пригоден для сравнительного исследования различных проводящих материалов, при условии, что сравниваемые объекты имеют определенные размеры и формы.

Электропроводностью называют величину, обратную электрическому сопротивлению R . Единицей измерения электропроводности является Ом^{-1} или сименс (См). Величину, обратную удельному сопротивлению (ρ), называют *удельной электропроводностью* $\chi = 1/\rho$. Удельная электропроводность ($\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$) численно равна току (в А), проходящему через слой раствора с поперечным сечением, равным единице, под действием градиента потенциала 1 В на единицу длины.

Магнитные свойства, лежащие в основе физических методов

Изучение магнитных свойств объектов основано на определении магнитной проницаемости, магнитного насыщения.

За величину *магнитной проницаемости* (μ) принимают отношение магнитных потоков в исследуемом веществе и в вакууме.

Магнитная восприимчивость (μ) – безразмерная величина, характеризующая способность вещества намагничиваться в магнитном поле.

Магнитная проницаемость вещества обуславливается его химическим составом, структурой и агрегатным состоянием. Метод позволяет изучать фазовое состояние металлов и сплавов и изменения, происходящие в них под влиянием внешних воздействий (температуры, давления и т. д.)

Магнитная проницаемость определяется в пара-, диа- и ферромагнетиков, что позволяет исследовать фазовое состояние этих веществ, его изменение под воздействием тепла, давления и т. д. Магнитная проницаемость для ферромагнетиков равна 1 ($\mu = 1$), для парамагнитных веществ больше 1 ($\mu > 1$), для диамагнетиков магнитная восприимчивость меньше 1 ($\mu < 1$).

Преимущество этого метода в возможности исследования твердых, порошкообразных и жидких веществ. В основном применяется при исследовании металлов и сплавов.

Магнитное насыщение – состояние вещества, при котором его намагниченность достигает предельного значения.

Величина магнитного насыщения – наиболее устойчивая магнитная характеристика, зависящая от химического состава ферромагнитных фаз в сплаве и их количества. Методы определения магнитного насыщения используют для исследования фазовых превращений в сплавах (сталях).

Как видно из характеристик физических методов, они могут быть использованы в судебной экспертизе, главным образом при исследовании свойств металлов и сплавов. Кроме того, физические методы имеют большое значение при экспертном исследовании стекла.

Спектральный анализ

Спектральный анализ – физический метод качественного и количественного определения атомного и молекулярного состава вещества, основанный на исследовании его спектров.

Возбуждаясь, атомы излучают энергию (или поглощают), которая может быть зафиксирована в виде спектра линий, причем для каждого элемента (например, металла) характерен свой, только ему одному присущий спектр.

Это свойство атомов используется в *спектроскопии* – раздел оптики, в котором исследуется зависимость интенсивности (или энергии) поглощения, испускания и рассеяния или иного преобразования света (излучаемого или поглощаемого возбужденными электронами, целыми молекулами или ее частями) от длины волны.

2. Методы определения некоторых физических величин

Определение массы

Измерение массы объекта является обязательным этапом экспертного исследования. Например, определение массы наркотического средства имеет определяющее значение для квалификации преступления.

Масса – одна из основных физических характеристик материи, являющаяся мерой ее инерционных свойств.

Измерение массы проводят с использованием весов – прибора для определения массы тел по действующей на них силы тяжести.

По принципу действия весы подразделяются на рычажные, электротензометрические (на основе преобразования деформации твердых тел в электрический сигнал), гидростатические, гидравлические (рис. 5).

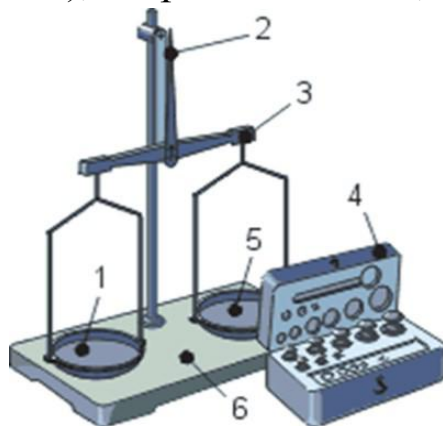


Рис. 5. Рычажные весы

По назначению весы подразделяются на: образцовые (для проверки гирь), лабораторные (аналитические, микроаналитические, пробирные и др.) и общего назначения.

Физическая величина – масса измеряется в системе СИ в кг.

Правила работы с аналитическими весами

1. Перед каждым взвешиванием проверять состояние весов. Аккуратно очистить пыль, проверить нулевую точку.

2. При обнаружении неисправности весов ни в коем случае не исправлять весы самому.

3. Не сдвигать весы с занимаемого ими места.

4. Не перегружать весы сверх предельной нагрузки.

5. Категорически запрещается взвешивать вещества непосредственно на чашке весов; взвешиваемое вещество помещают в бюкс, тигель, на часовое стекло.

6. Прибавлять или убавлять взвешиваемое вещество можно только вне футляра весов.

7. Нельзя взвешивать горячие или слишком холодные предметы. Взвешиваемые предметы должны иметь температуру весовой комнаты.

8. Все взвешивания данного анализа надо проводить на одних и тех же весах.

9. По окончании всех работ весы выключают и накрывают чехлом (рис. 6).



Рис. 6. Различные электронные весы

Определение плотности

Плотность тела – одна из основных физических характеристик тела (вещества), которая характеризует количественное содержание вещества (массу) в единице объема, является функцией его состава и зависит от структуры.

Плотность определяют: $\rho = m / v$,

где m – масса вещества; v – объем вещества.

Единицей измерения плотности в системе СИ: $[\rho] = 1 \text{ кг/м}^3$.

Плотность тела можно определить прямым способом (использував ареометр, пикнометр) или косвенным способом, вычислив по измеренным массе и объему (рис. 7).



Рис. 7. Ареометр

В некоторых случаях плотность ряда веществ можно использовать для определения концентрации растворов, особенно когда оба вещества – и растворимое, и растворитель – находятся в жидком состоянии.

В специальной литературе имеются таблицы, в которых помещены значения величин плотностей в зависимости от концентрации растворяемых веществ. По плотности можно определять марки бен-

зина, керосина, дизельного топлива и других веществ, находящихся в жидком состоянии. По плотности можно установить процентное содержание спирта в водке, коньяке и т. п., что дает возможность определить степень их разбавления и решить иные задачи.

Определение времени

Время – одна из основных физических величин.

Определяют время с помощью часов, секундомеров, метрономов, песочных весов.

Единицей времени в системе СИ является секунда.

Определение температуры

Определение температуры проводят с помощью термометров в которых запаяна рабочая жидкость – баллонов, ртуть, спирт, керосин и т. п., с различными пределами измерения.

Измерения температуры в криминалистических исследованиях не столь часто, как линейные размеры или масса.

Хотя в системе СИ единицей измерения температуры является Кельвин (К), в нашей стране используют градус Цельсия (С), который от Кельвина отличается на 273,15.

$$0^{\circ} \text{ С} = 273,15 \text{ К},$$

100° С – это 373,15 К и т. д.

3. Физико-химические методы анализа

В физико-химических методах течение реакции фиксируется измерением определенного физического свойства исследуемого раствора.

Многие физико-химические свойства растворов, такие как светопоглощение, угол вращения плоскости поляризации, электропроводность и другие, находятся в зависимости от концентрации вещества. Измеряя эти величины, мы можно определить количество вещества в анализируемом растворе.

Основными методами физико-химического анализа являются фотометрические, электрометрические, хроматографические, рефрактометрические, потенциметрические и другие методы.

Фотометрические методы

Фотометрические методы основаны на измерении поглощения, пропускания и рассеяния света определяемым раствором.

Для большинства фотометрических методов используют так называемые цветные реакции, т. е. химические реакции, сопровождающиеся изменением окраски раствора. Некоторые бесцветные или слабоокрашенные ионы могут при взаимодействии с другими ионами или органическими соединениями давать окрашенные соединения.

Например, ионы Fe^{3+} слабо окрашены, но при реакции с роданид-ионами SCN^- – они образуют темно-красные комплексные ионы.

Голубые ионы меди с молекулами аммиака образуют ярко-синие медно-аммиачные комплексные ионы.

Бесцветные ионы марганца Mn^{2+} можно окислить до ярко-малиновых ионов MnO_4^- .

Количество полученных окрашенных ионов (или молекул) эквивалентно количеству определяемых ионов. Поэтому цветные реакции легли в основу фотометрических определений. Если в результате реакции образуется труднорастворимое соединение, в малых количествах оно остается во взвешенном состоянии и образует суспензию. Степень мутности раствора будет прямо пропорциональна количеству определяемого вещества. Поэтому в методах фотометрии используют не только цветные реакции, но и реакции, проходящие с образованием труднорастворимых веществ.

Наблюдения можно вести визуально или с помощью различных физических приборов. Визуальные методы менее точны, чем определения с помощью физических приборов, так как точность визуального определения во многом зависит от способности глаза улавливать разницу в интенсивности окраски или степени мутности раствора.

Имеются различные фотометрические методы: спектрофотометрия, фотоэлектроколориметрия, колориметрия, нефелометрия, флюориметрия.

Спектрофотометрический метод используется в криминалистических исследованиях на анализе лекарственных препаратов, растительных наркотических средств, ЛКП, спиртных напитков.

Рассмотрим колориметрический, фотоэлектроколориметрический и нефелометрический методы анализа.

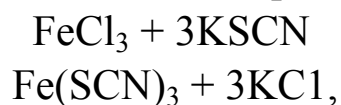
Спектрофотометрический метод и метод флюориметрический метод рассмотрим в последующих лекциях.

Колориметрия

Метод, основанный на определении содержания вещества по интенсивности окраски, называют *колориметрией*.

Используя колориметрические методы, определяют количество вещества по интенсивности окраски раствора, полученного в результате взаимодействия определяемого вещества с каким-либо реактивом. При колориметрических определениях сравнивают окраску испытуемого и стандартного растворов визуально или с помощью соответствующих приборов.

Например, при определении содержания железа используется реакция



приводящая к образованию раствора красного цвета (рис. 8).



Рис. 8. Стандартные растворы

Нефелометрия

Нефелометрия – визуальное определение содержания вещества по степени мутности раствора. Можно нефелометрическое определение проводить с помощью приборов. Тогда определяют концентрацию по интенсивности света, рассеянного взвешенными частицами суспензии и измеряемого фотоэлементом. Нефелометрия применяется для оценки загрязнения воздуха вредными примесями на производстве, определения содержания свинца и ртути (рис. 9).



Рис. 9. Современный нефелометр

Методы колориметрии и нефелометрии применяются для определения компонентов, входящих в состав анализируемого вещества в очень малых количествах. Точность этого метода ниже, чем гравиметрического или титриметрического. Определение таких количеств веществ обычными методами гравиметрии и титриметрии практически невозможно.

Фотоэлектроколориметрический метод является более объективным по сравнению с визуальной колориметрией и дает более точные результаты.

Фотоэлектроколориметрия – определение содержания вещества по поглощению окрашенным раствором света, пропущенного через светофильтр и измеряемого фотоэлементом.

Для определения применяются фотоэлектроколориметры (ФЭК) различных марок (внешний вид одного из ФЭКов приведен на рис. 10). Принцип устройства ФЭК следующий. Световой поток, проходя через окрашенную жидкость, частично поглощается. Остальная часть светового потока попадает на фотоэлемент, в котором возникает электрический ток, регистрирующийся с помощью амперметра. Чем больше концентрация раствора, тем больше его оптическая плотность и тем больше степень поглощения света, и, следовательно, тем меньше сила возникающего фототока.



Рис. 10. ФЭК 56М

Электрометрические методы

К этим методам относятся электрогравиметрический анализ, кондуктометрия, потенциометрия и полярография.

Электрометрические методы анализа основаны на измерении различных электрических характеристик вещества (изменение электропроводности, электрического потенциала, величины тока).

Электрогравиметрический метод применяется для определения металлов. Определяемый элемент осаждают путем электролиза на электроде, масса которого известна.

В полярографическом методе о количестве определяемого иона судят по характеру вольтамперной кривой (полярограмме), получаемой при электролизе исследуемого раствора с капельным ртутным катодом в особом приборе – полярографе. Этот метод отличается высокой чувствительностью.

Применяя полярографический метод, можно в одном и том же растворе качественно и количественно определять различные элементы, не прибегая к химическому разделению. Например, при анализе безалкогольных напитков количество сахара также определяют с помощью поляриметрии.

Электрохимические (электрометрические) методы используются при исследовании различных объектов КИВМИ, таких, как продукты выстрела, вещества почвенного происхождения, следовые количества металлов и сплавов.

Потенциометрические методы

Кондуктометрия и потенциметрия относятся к методам электротитриметрии. Кондуктометрический метод анализа основан на измерении удельной электропроводности анализируемого раствора.

Электропроводность разбавленных растворов электролитов зависит от числа ионов в растворе (т. е. от концентрации), числа элементарных зарядов, переносимых каждым ионом (т. е. от заряда иона), и от скорости движения одинаково заряженных ионов к катоду или аноду под действием электрического поля.

Окончание реакции при титровании устанавливают путем измерения электропроводности раствора, или потенциала электрода, погруженного в исследуемый раствор.

Потенциометрический метод применяется также для определения pH раствора. Определение pH основано на измерении электродвижущей силы системы, которая зависит от концентрации ионов водорода.

Концентрацию водородных ионов в растворе (pH) необходимо учитывать в самых разнообразных химических и биохимических процессах.

Водородный показатель имеет большое значение при работе с растворами, особенно в цветной фотографии, когда необходимо иметь точное значение показателя среды и отклонение от требуемого значения существенно сказывается на цветопередаче. При добавлении аммиака в раствор азотнокислого серебра улучшается качество проявления невидимых и слабовидимых потожировых следов рук и т. п.

О том, какова среда, можно судить и с помощью специальных веществ – индикаторов (фенолфталеина, метилоранжа и др.). Немного точнее определяется водородный показатель путем сравнения цвета индикаторной бумаги, опущенной в раствор, со стандартом в виде набора цветов, имеющимся на коробке набора.

Для более точных исследований следует воспользоваться специальным прибором – рН-метром (рис. 11).



Рис. 11. рН-метр

В экспертных подразделениях имеется универсальный прибор – иономер, с помощью которого можно определить потенциал любого иона. В иономере для этих целей служит дополнительная шкала, градуированная в значениях водородного показателя (от 1 до 14). С помощью подобных приборов можно получить точное значение величин водородного показателя. Данный метод можно с успехом использовать, например, в технико-криминалистической экспертизе документов для определения природы вещества, которым производилось травление текста. Потенциометрический метод (измерение рН) применяется при исследовании травящих веществ, почв, спиртосодержащих жидкостей.

Рефрактометрический метод

Рефрактометрия – физико-химический метод анализа, основанный на измерении показателя преломления луча света в исследуемом веществе.

В основе этого метода лежит явление *рефракции*, т. е. преломление световых лучей на границе раздела двух различных по своей природе оптических сред. При прохождении луча света из одной среды в другую на границе этих сред направление луча меняется, происходит преломление.

Показатель преломления зависит от ряда факторов:

- от природы вещества;
- от длины волны падающего света;
- от плотности раствора, но так как плотность раствора зависит от его концентрации, то показатель преломления раствора зависит от его концентрации;
- от температуры: при повышении температуры показатель преломления уменьшается, так как при этом уменьшается плотность вещества.

Каждое индивидуальное вещество характеризуется определенным значением показателя преломления.

Как уже было сказано, показатель преломления зависит также от концентрации раствора. Следовательно, для раствора одного и того же вещества при одинаковой температуре показатель преломления будет зависеть только от концентрации (рис. 12).



Рис. 12. Рефрактометр

Хроматографические методы

Хроматографические методы основаны на различиях в *адсорбируемости* вещества, в константах ионного обмена, в растворимости осадков и т. д. Хроматографический метод применяется в качественном и количественном анализе. Особенно широко применяется этот метод для разделения различных веществ или ионов.

Методы хроматографии будут рассмотрены более подробно в другой лекции.

Лекция 16. Методы определения элементного состава вещества объектов судебной экспертизы

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Основные теоретические положения спектроскопии.
2. Понятие электромагнитного спектра. Виды и классификация спектров.
3. Спектральные приборы. Принцип их работы, классификация.
4. Атомно-эмиссионный спектральный анализ.
5. Атомно-абсорбционный спектральный анализ.
6. Атомно-флуоресцентный спектральный анализ.
7. Рентгеновский спектральный анализ.

Элементный состав – это качественное и количественное содержание химических элементов в виде атомов или ионов в образце.

Для определения элементного состава объектов судебной экспертизы используют *методы атомной спектроскопии, рентгено-спектральный анализ*. Выбор метода зависит от задач, поставленных перед экспертом. Эти методы не являются взаимозаменяемыми, так как они отличаются по чувствительности на отдельные химические элементы, по воздействию на объект, по скорости проведения анализа. Возможно одновременное использование данных методов при исследовании одного объекта экспертизы.

Исследования, производившиеся в самых разнообразных областях физики, позволили установить, что диапазон частот или длин электромагнитных волн чрезвычайно широк (рис. 1).

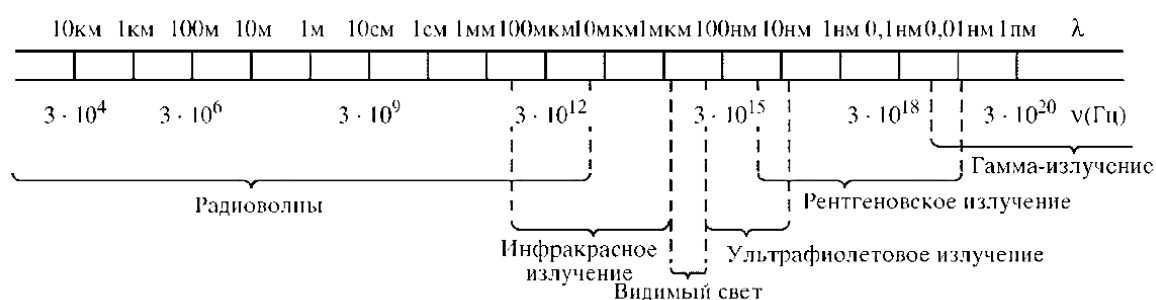


Рис. 1. Шкала электромагнитных волн

Исследования инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений помогли установить строение молекул и внешних электронных оболочек атомов, а исследование рентгеновского излучения позволило установить строение внутренних электронных оболочек атомов и величины положительных зарядов их ядер. Изучение гамма-лучей дало много ценных сведений об атомных ядрах и их строении.

1. Основные теоретические положения спектроскопии

Понятие спектроскопии было рассмотрено в предыдущей лекции. Рассмотрим основные теоретические положения спектроскопии.

Физическая основа спектрального анализа – спектроскопия атомов и молекул, его классифицируют по целям анализа и типам спектров.

Весь спектральный анализ делится на атомный и молекулярный спектральный анализ.

Атомный спектральный анализ определяет элементный состав образца по атомным (ионным) спектрам испускания и поглощения.

Молекулярный спектральный анализ используется для исследования молекулярного состава вещества по молекулярным спектрам поглощения, люминесценции и комбинационного рассеяния электромагнитного излучения.

Эмиссионный спектральный анализ производят по спектрам испускания квантов энергии атомов, ионов и молекул (оптические и рентгеновские спектры), возбужденным различными источниками электромагнитного излучения в диапазоне от γ -излучения до микроволнового.

Абсорбционный спектральный анализ осуществляют по спектрам поглощения электромагнитного излучения анализируемыми объектами (атомами, молекулами, ионами вещества, находящегося в различных агрегатных состояниях).

Спектры молекул содержат дополнительную информацию о веществе, в которой заложены данные не только об элементном составе вещества, но и о характере соединения между собой атомов в молекуле вещества.

Отличие молекулярной спектроскопии от атомной заключается в том, что в процессе получения спектров вещество не изменяется.

Типы энергий излучения, на которых основан спектральный анализ, перечислены в табл. 1.

Поскольку между электроном и ядром атома действует сила электрического притяжения, каждой определенной орбите электрона при его движении вокруг ядра должно соответствовать определенное значение энергии атома, равное сумме кинетической и потенциальной энергий электрона, движущегося в электрическом поле ядра.

Таблица 1

**Области энергий электромагнитного излучения, соответствующие
им методы анализа и процессы, лежащие в их основе, на которых
основан спектральный анализ**

Область (метод)	Характеристика энергии квантов		Процесс
	λ , м	другие величины	
Радиочастотная (ЯМР, ЭПР)	$10^1 - 10^{-1}$	$\nu - 10 \text{ МГц} - 1 \text{ ГГц}$	Изменение спинов ядер и электронов
Микроволновая	$10^{-1} - 10^{-3}$	$\bar{\nu} - 0,1 - 10 \text{ см}^{-1}$	Изменение вращательных состояний
Оптическая УФ видимая	$10^{-6} - 10^{-8}$	$\lambda = 400 - 200 \text{ нм}$ $\lambda = 750 - 400 \text{ нм}$	Изменение состояний валентных электронов
инфракрасная (ИК, КР)	$10^{-3} - 10^{-6}$	$\bar{\nu} - 10 - 13000 \text{ см}^{-1}$	Изменение колебательных состояний
Рентгеновская	$10^{-8} - 10^{-10}$	$E - 0,1 - 100 \text{ КэВ}$	Изменение состояний внутренних электронов
Гамма-излучение (ядерно- физические)	$10^{-10} - 10^{-13}$	$E - 0,01 - 10 \text{ МэВ}$	Ядерные реакции

По классической физике орбита электрона может быть любой. Если какое-либо внешнее воздействие изменит скорость движения электрона по орбите, то соответствующим образом изменится и сама орбита, причем это изменение будет определяться только внешним воздействием, т. е. орбита может быть любой.

По идее Н. Бора энергия атома не может иметь произвольного значения. Для каждого атома имеется ряд строго определенных (дискретных) значений энергии, которыми он может обладать. Когда энергия атома соответствует одному из этих значений, он находится в более или менее устойчивом состоянии. Никаких промежуточных значений энергии между этими дозволенными значениями у атома никогда не может быть.

В дальнейшем дозволенные значения энергии атома будем называть *энергетическими уровнями атома*.

Из всех возможных по классической физике орбит электрона в атоме допустимы только такие, которые соответствуют одному из дозволенных энергетических уровней атома. Такой набор дозволенных орбит электронов, согласующихся с устойчивым состоянием атома, получил название *квантования орбит*.

Бор не отказался от применения законов классической физики к атому, а лишь наложил на них ограничения, заключающиеся в квантовании орбит и трактовке устойчивости атома.

Из постулатов, предложенных Н. Бором, следует, что величина кванта есть разность двух дозволенных значений энергии атома. Когда электрон движется по ближайшей к ядру дозволенной орбите, атом находится в нормальном состоянии, являющемся наиболее устойчивым.

Нормальное состояние соответствует наинизшему возможному энергетическому уровню атома. В таком состоянии атом может находиться неопределенно долгое время, так как еще меньших значений у атома быть не может, следовательно, и электрон не может упасть на ядро. Когда электрон движется по какой-либо другой из дозволенных орбит, состояние атома называется *возбужденным* и является менее устойчивым, чем в предыдущем случае. Через некоторое время (порядка 10^{-8} с) атом самопроизвольно переходит из возбужденного состояния в нормальное, излучая при этом квант энергии.

$$\Delta E = h \cdot \nu = E_{\text{возб.}} - E_{\text{осн.}},$$

где $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с (квант действия Планка или постоянная Планка); ν – частота.

Частота – число колебаний в секунду (частота), при достижении электрического (или магнитного) поля своего максимального положительного значения.

Общая характеристика различных спектроскопических методов приведена в табл. 2.

Таблица 2

Взаимосвязь между видом возбуждения, длиной волны и энергией излучения для некоторых спектроскопических методов

Длина волны	Энергия, кДж	Название метода	Вид возбуждения
200–350 нм	600–340	Ультрафиолетовая (УФ) спектроскопия	Возбуждение валентных электронов
350–800 нм	340–150	Спектроскопия видимого света	Возбуждение валентных электронов
1–300 мкм	150–0,4	Инфракрасная (ИК) спектроскопия	Колебания молекул
см-м	$1 \cdot 10^{-6}$	Ядерный магнитный и парамагнитный резонансы (ЯМР и ЭПР)	Взаимодействие спинов ядер и электронов с внешним магнитным полем

Спектр поглощения получают путем графического изображения зависимости степени поглощения от частоты, волнового числа или длины волны излучения.

Возбуждаясь, под внешним воздействием электрон может переходить на любой из уровней и в предельном случае, может вообще оторваться от атома. При обратном переходе в нормальное состояние электрон может сразу переходить на нормальный ближайший уровень (с меньшей энергией), или этот переход происходит постепенно – скачками с одного уровня на другой.

Когда электрон с более высоких энергетических уровней переходит на более низкий, например, на первый от ядра атома, получаем ряд спектральных линий определенной длины волны и определенной частоты колебаний.

Спектральные линии, возникающие при переходе электрона на один и тот же энергетический уровень, составляют серии спектральных линий.

Схема перехода электрона атома водорода приведена на рис. 2 (Спектр серии Лаймана).

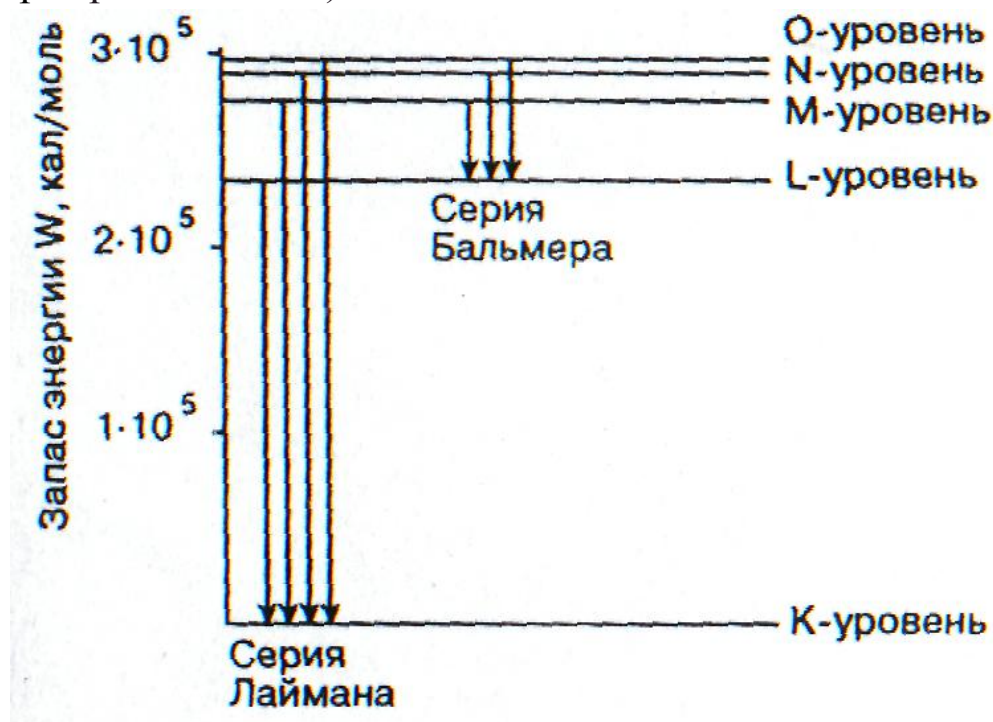


Рис. 2. Схема перехода электрона атома водорода

Серия начинается наиболее интенсивными спектральными линиями, соответствующими переходу электрона на данный уровень с наиболее близких уровней. Дальше линии становятся все ближе друг к другу и сливаются, в конце концов, в широкую полосу с резким окончанием, соответствующим переходу электрона на данный уровень из бесконечности.

Представленная серия спектральных линий водорода, называемая серией Лаймана, лежит в далекой ультрафиолетовой области спектра и обнаруживается только на фотопластинках.

Переход из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием кванта, или излучением света определенной длины. Каждому возможному переходу между уровнями энергии соответствует определенная спектральная линия, характеризующаяся в спектре определенной частотой ν или длиной волны λ перехода. Число спектральных линий в спектре определяется числом возможных электронных переходов в атоме.

2. Понятие электромагнитного спектра.

Виды и классификация спектров

Спектр – зависимость интенсивности (или энергии) поглощения, испускания и рассеяния или иного преобразования света (излучаемого или поглощаемого возбужденными электронами, целыми молекулами или ее частями) от длины волны.

Спектры образуются в результате взаимодействия электромагнитных волн с веществом. Спектры бывают *сплошные* (непрерывные) и *линейчатые* (полосатые). Исследование показало, что тип спектра определяется характером светящегося объекта.

Сплошные спектры получаются в результате свечения твердых или жидких тел. В пламени свечи светятся раскаленные частицы угля, в электрической лампочке накаливания – раскаленная металлическая нить. Такие же спектры дают и расплавленные металлы, а также светящиеся газы или пары, если они обладают значительной плотностью, т. е. находятся под очень высоким давлением. В частности, сплошной спектр Солнца представляет собой, по современным представлениям, свечение паров высокой плотности.

Линейчатые и полосатые спектры характерны для свечения газов или паров малой плотности. Линейчатые спектры испускаются светящимися атомами.

Многие газы состоят из отдельных атомов, например пары металлов и инертные газы – гелий, неон, аргон и др. Последние применяются при изготовлении используемых в быту неоновых, аргонных, криптоновых ламп.

Газы, состоящие из молекул, например, водород, кислород, пары йода и др., могут при возбуждении распадаться на атомы (диссоциировать). Такие атомарные газы дают линейчатые спектры. Но можно вызвать свечение и целых *молекул*, не разбивая их на атомы. В таком случае испускаются *полосатые* спектры.

Поскольку в молекулах каждое основное и возбужденное состояние электронов характеризуется рядом энергетических подуровней, спектры молекул являются, как правило, *полосатыми*, а спектры атомов (из-за отсутствия колебательных подуровней) – довольно простые, *линейчатые*.

В то же время при возбуждении многоатомных газов или паров нередко происходит частичная диссоциация на составляющие компоненты и наблюдается одновременно и линейчатый, и полосатый спектры. Свечение атомов и молекул в парах и газах можно вызвать нагреванием. Например, в пламени газовой горелки можно наблюдать полосы, соответствующие свечению молекулы циана, представляющей соединение углерода и азота (CN). Если в пламя внести крупинку поваренной соли (хлористого натрия, NaCl), то пламя окрашивается в интенсивный желтый цвет, и спектральный аппарат обнаруживает в желтой части спектра две близко расположенные линии, характерные для спектра паров натрия. Это означает, что в пламени горелки молекулы хлористого натрия распались на атомы натрия и хлора, свечение атомов натрия легко наблюдается, свечение же атомов хлора возбудить нелегко, и оно обычно слишком слабо. Гораздо чаще для возбуждения спектров атомов и молекул пользуются явлениями электрического разряда в газах. Светящийся газ при низком давлении заключается в трубку с электродами, через которую пропускают электрический ток. Если повышать давление светящегося пара или газа, то спектральные линии начинают расширяться, захватывая больший спектральный интервал. При очень больших давлениях (сотни и больше атмосфер) линейчатый спектр постепенно переходит в сплошной, характерный для сжатых газов (рис. 3).

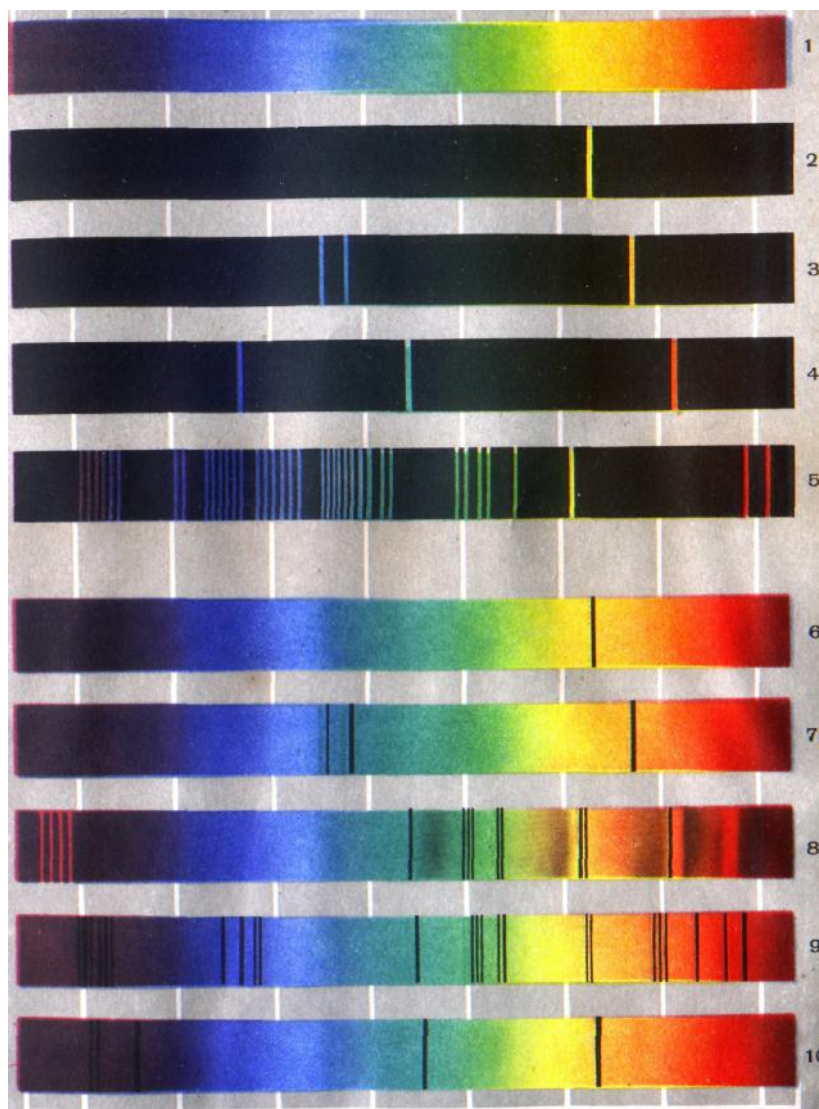


Рис. 3. Спектры испускания (1–5) и спектры поглощения (6–10):
 1 – сплошной; 2 – натрий; 3 – цезий; 4 – водород; 5 – кислород; 6 – натрий;
 7 – цезий; 8 – хлорофилл; 9 – солнечный; 10 – звездный

3. Спектральные приборы. Принцип их работы, классификация

Спектры поглощения и испускания электромагнитных волн регистрируются спектральными приборами.

Основными частями спектрального прибора (рис. 4) являются: входная щель S , освещаемая исследуемым излучением; объектив коллиматора O_1 (в фокальной плоскости которого расположена щель S); диспергирующее устройство D , работающее в параллельных пучках лучей; фокусирующий объектив O_2 , создающий в своей фокальной поверхности P монохроматические изображения входной щели, совокупность которых и образует спектр. В качестве диспергирующего элемента используют, как правило, либо призмы, либо дифракционные решетки.

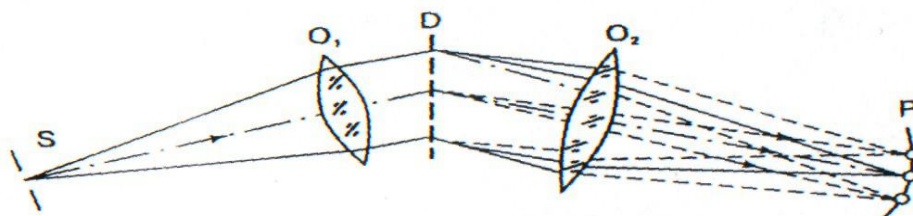


Рис. 4. Принципиальная оптическая схема спектрального прибора

Для получения спектра следует «возбудить» атомы, т. е. исследуемые пробы переводят в атомы. В практике атомно-эмиссионного спектрального анализа (АЭС) в качестве источников возбуждения атомов для получения спектров применяют пламя, электрические дуги постоянного и переменного тока, низко- и высоковольтную конденсированную искру, низковольтный импульсный разряд, различные формы тлеющего газового разряда и др.

Широко используются также различные виды высокочастотных разрядов – источник индуктивно связанной высокочастотной плазмы (ИСП), микроволновой разряд, лазеры и др.

Измерения интенсивности спектральных линий в атомном спектральном анализе могут осуществляться визуальным, фотографическим и фотоэлектрическим способами. В первом случае приемником излучения служит глаз, во втором – фотоэмульсия, в третьем – фотоэлемент или фотоэлектрический умножитель (ФЭУ), его используют чаще всего. Однако первые два способа имеют скорее историческое значение.

Все возрастающие требования к точности и скорости анализа обусловили внедрение в практику атомно-эмиссионного спектрального анализа фотоэлектрических способов регистрации и фотометрии спектров. Сущность этих методов заключается в том, что световой поток нужной аналитической линии отделяют от остального спектра пробы с помощью монохроматора и преобразуют в электрический сигнал.

Мерой интенсивности линии служит значение этого сигнала (сила тока или напряжение).

Из различных видов фотоэлектрических детекторов излучения, основанных на внутреннем и внешнем фотоэффекте (фотоэлементы, фотоумножители, фотосопротивления, фотодиоды и др.), для измере-

ний в УФ и видимой областях спектра наибольшее распространение получили фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и фотодиоды.

В настоящее время для получения спектров поглощения применяют, как правило, *двухлучевые спектрометры*. Пучки монохроматического излучения проходят параллельно через две кюветы (выполненные обычно из стекла или кварца), одна из которых заполнена исследуемым веществом, а другая – чистым растворителем. Оба луча проходят через эти кюветы и попадают в приемник, где сравниваются их интенсивности излучения.

Области применения наиболее важных спектроскопических методов:

- инфракрасная спектроскопия (ИК) – исследование функциональных групп, структурные исследования основной цепи молекулы;

- ультрафиолетовая (УФ) и видимая спектроскопия – исследование соединений с ненасыщенными связями или поляризуемыми группами.

Атомная спектроскопия основана на атомной эмиссии, когда происходит испускание энергии возбужденными атомами, и атомной абсорбции, когда происходит поглощение веществом энергии.

На основании этого выделяют *методы атомной спектроскопии*:

Эмиссионные методы – основаны на измерении излученной возбужденными атомами энергии;

Абсорбционные методы, в которых регистрируется поглощенная атомами энергия;

Атомно-флуоресцентный метод – метод элементного анализа, основанный по атомным спектрам флуоресценции.

Благодаря этому можно различить химические элементы между собой, что является основой качественного спектрального анализа.

Классификация методов атомной спектроскопии представлена в табл. 3.

Таблица 3

Классификация методов атомной спектроскопии

Метод	Диапазон электромагнитного излучения	Процесс	Способ		
			атомизации	возбуждения	регистрации
Атомно-эмиссионный (АЭС)	Оптический	Эмиссия (фотонов)	Высокотемпературный	Высокотемпературный	Электромагнитная
Атомно-флуоресцентный (АФС)	»	»	»	Электромагнитное излучение (УФ-вид.)	»
Атомно-абсорбционный (ААС)	»	Абсорбция (фотонов)	»	Не требуется	»
Рентгеноэмиссионный (РЭА)	Рентгеновский	Эмиссия (фотонов)	Не требуется	Поток электронов	»
Рентгенофлуоресцентный (РФА)	»	»	»	Электромагнитное излучение (рентг.)	»
Рентгеноабсорбционный (РАА)	»	Абсорбция (фотонов)	»	Не требуется	»
Рентгеновский фотозлектронный (РФЭС)	Регистрация электронного спектра с кинетической энергией электронов до 1500 эВ	Эмиссия (электронов)	»	Электромагнитное излучение (рентг.)	Электронная
Оже-электронный (ОЭС)		»	»	Поток электронов	»

4. Атомно-эмиссионный спектральный анализ

В атомно-эмиссионном спектральном анализе (ЭСА) для получения спектров, характеризующих атомный состав, исследуемого вещества отбирают пробу и вводят ее в источник излучения (атомизатор).

В атомизаторе твердые и жидкие пробы испаряются, соединения диссоциируют и свободные атомы (ионы) переходят на некоторое время в возбужденное состояние. Испускаемое ими излучение раскладывается в спектр и регистрируется (или наблюдается визуально) с помощью спектрального прибора.

Каждый химический элемент имеет свой характерный спектр испускания, распознаваемый по заранее изученным аналитическим линиям. Выявив такие линии в спектре исследуемого вещества и измерив их интенсивность, определяют качественный состав и количественное содержание компонентов химических элементов в исследуемой пробе.

Как было сказано выше, для получения спектра следует «возбудить» атомы, т. е. исследуемые пробы переводят в атомы или ионы, электроны которых находятся в возбужденном состоянии. Основные типы атомизаторов в АЭС представлены в табл. 4.

Основные типы атомизаторов в АЭС

Тип источника атомизации	T °C	Состояние пробы	C _{min} , % масс.	S _t
Пламя	1500–3000	Раствор	10 ⁻⁷ –10 ⁻²	0.01–0.05
Электрическая дуга	3000–7000	Твердая	10 ⁻⁴ –10 ⁻²	0.1–0.2
Электрическая искра	~10000–12000	Твердая	10 ⁻³ –10 ⁻¹	0.05–0.10
Индуктивно-связанная плазма (ИСП)	6000–10000	Раствор	10 ⁻⁸ –10 ⁻²	0.01–0.05

В зависимости от источника возбуждения выделяют следующие методы атомно-эмиссионной спектроскопии:

- эмиссионный спектральный анализ в дуге постоянного или переменного тока (ЭСА);
- эмиссионная фотометрия пламени;
- эмиссионный лазерный микроспектральный анализ (ЛМСА);
- спектроскопия с индуктивно–связанной плазмой (ИСП).

Эмиссионный спектральный анализ является одним из наиболее распространенных методов качественного и количественного элементного анализа минерального (неорганического) состава объектов и используется для изучения элементного состава самых различных веществ, материалов и изделий. Примеров успешного его применения достаточно, приведем лишь некоторые из них. ЭСА позволяет выявить, например, ничтожные следы металла, стершегося с поверхности пули при ее прохождении через преграду, следы пороховой копоти и другие следы, не обнаруживаемые иными низко чувствительными способами.

Данные абсолютного количественного содержания элементов позволяют установить марку сплава, из которого изготовлены самодельные боеприпасы, а также на основании имеющихся справочных данных определить завод-изготовитель дроби.

Качественный ЭСА изделий из стекла позволяет дифференцировать стекла различной марки.

ЭСА лакокрасочных материалов и покрытий по относительному количественному содержанию элементов позволяет различать отдельные марки лакокрасочных материалов.

ЭСА объектов почвенного происхождения по относительному количественному содержанию микроэлементов позволяет идентифицировать отдельные участки местности.

Для большинства элементов предел обнаружения ЭСА без предварительного концентрирования составляет 10^{-3} – 10^{-4} % (в отдельных случаях до 10^{-7} %), абсолютная чувствительность 10^{-11} – 10^{-12} г.

Производительность ЭСА выше производительности многих аналитических методов, так как на единичное определение затрачивается минимальное время – при использовании фотоэлектрического метода обработка с помощью ЭВМ спектра происходит за 1–2 минуты.

ЭСА является высокоинформативным методом, так как одновременно можно определять 10–20 и более имеющихся в объекте химических элементов.

К числу несомненных достоинств ЭСА следует также отнести чрезвычайно малое количество вещества, необходимого для проведения анализа, исчисляемого иногда сотыми долями грамма.

По характеру решаемых задач и реальным возможностям ЭСА исследуемые объекты можно разделить на три группы:

- вещества (преимущественно неорганического происхождения), имеющие вполне определенный, контролируемый ГОСТ или техническими условиями состав, например сплавы черных и цветных металлов, химические реактивы, фармацевтические препараты и др.;

- вещества (неорганического происхождения), элементный состав которых не контролируется, но характеризуется определенным постоянством, обусловленным способом производства, например, стекло, дробь, лакокрасочные материалы и т. д.;

- вещества (органического и неорганического происхождения), в состав которых входят несколько основных определяющих компонентов и большое число других элементов с широкими интервалами концентрации, например, почвы, стройматериалы, наркотические средства растительного происхождения, строительные лакокрасочные материалы, полимерные материалы, нефтепродукты и горюче-смазочные материалы, винно-водочные изделия и др.

При получении спектра для возбуждения электронов в атомном спектральном анализе используют различные источники энергии и соответственно различные способы введения в них образцов.

В эмиссионном атомном спектральном анализе широко используются электрические источники энергии. Исследуемое вещество в измельченном состоянии помещают в *электрическую дугу постоянного тока*. Данный метод позволяет определять одновременно десятки элементов, однако точность этого метода невелика из-за нестабильности получаемого разряда. Более стабильные условия создает электрическая дуга переменного тока.

В современных генераторах дуги переменного тока можно получать различные режимы возбуждения (низковольтную дугу, искру, высокочастотную искру, дугу переменного тока, импульсный разряд и т. д.). Такие источники энергии с различными режимами используют при определении металлов и трудновозбудимых элементов (углерод, галогены, газы, содержащиеся в металлах). Стабильность искрового разряда позволяет получать высокую воспроизводимость анализа.

В настоящее время все более широко используются в качестве источников возбуждения лазеры.

Применяемые в судебной экспертизе методы ЭСА в полной мере обеспечивают получение качественных и количественных характеристик элементного состава объектов.

В тех случаях, когда количество исследуемого вещества ничтожно мало и обычный химический анализ становится невозможным, затруднен в подобных случаях и эмиссионный спектральный анализ, проводится *лазерный микроспектральный анализ* (ЛМСА).

Для анализа достаточно испарить 10^{-6} – 10^{-8} г вещества, чтобы обнаружить содержание примесей на уровне 10^{-12} – 10^{-13} г. При этом надежно выявляют наличие в веществе до 60 химических элементов. Лазерный микроспектроанализатор состоит из спектрального аппарата с лазерным возбуждением атомного спектра пробы и оптического микроскопа, объединенных для удобства в одном приборе.

Используя микроскоп, фокусируют на исследуемое вещество мощный лазерный импульс. Вещество на облучаемом участке испаряется с образованием плазмы. Излучение плазмы фокусируют на входную щель спектрографа.

Метод ЛМСА для криминалистического исследования веществ, материалов и изделий дает возможность установления химического состава вещества на разных участках поверхности образца с затратой

минимального количества вещества. Так же, возможно исследование различных включений, входящих в состав объектов исследования. Подготовка образцов и отбор проб при ЛМСА производится проще, чем при спектральном анализе с другими источниками возбуждения. К важнейшим средствам повышения эффективности использования информации, полученной при анализе микрочастиц, относится автоматизация спектральных анализов объектов малой массы с последующей обработкой полученных данных на компьютерах. Автоматизация в значительной степени сокращает время проведения экспертиз и позволяет устранять ошибки субъективного характера.

Метод ЛМСА обладает рядом достоинств, главными из которых являются возможность исследования объектов предельно малых размеров (до 20 мкм), незначительное количество (до 1 мкг) образца, минимальное повреждение исследуемого объекта и возможность послойного анализа состава материала образца. Указанные особенности ЛМСА обуславливают перспективность его использования в экспертной практике.

Данным методом систематически исследуются следы выстрела, сплавы, стекло, лакокрасочные покрытия и др. Однако более сложным остается вопрос о применении количественного микроспектрального анализа при производстве экспертиз. При анализе реальных криминалистических объектов необходимо учитывать макронеравномерность распределения элементов в массе исследуемого вещества, в материале изделия. Данное обстоятельство часто существенно затрудняет интерпретацию результатов количественного анализа, полученных при помощи ЛМСА.

5. Атомно-абсорбционный спектральный анализ

Атомно-абсорбционный спектральный анализ (ААА), в отличие от эмиссионного, позволяет исследовать атомный состав вещества по спектрам поглощения энергии этим веществом.

Данный метод применяется для установления качественного и количественного элементного состава вещества.

Для проведения атомно-абсорбционного спектрального анализа пробу также испаряют в атолизаторе. В данном случае роль атолизатора состоит в *переводе* пробы в атомарное состояние, но *не в возбу-*

ждении атомов, а рабочий диапазон температур в ААС в целом существенно ниже, чем в АЭС.

Основные типы источников атомизации, применяемые в АЭС, – это пламенные и электротермические (непламенные) атомизаторы. При этом электромагнитные лучи от источника излучения, проходя через пар вещества, ослабляются, и по степени ослабления интенсивности линий определяемого элемента судят о его концентрации в исследуемой пробе. Количественные измерения в атомно-абсорбционном методе основаны на законе *Бугера–Ламберта–Бера*:

$$E = \varepsilon \times C \times l,$$

где E – поглощение, C – концентрация вещества в растворе, ε – коэффициент пропорциональности, зависящей от длины волны падающего света, природы растворенного вещества и температуры раствора, l – толщина поглощающего слоя.

Для получения данных элементного состава требуется предварительное построение градуированной кривой для каждого определяемого элемента. Погрешность определения составляет около 2 %, чувствительность (предел обнаружения) не менее 1 мкг/мл, в отдельных случаях до 0,005 мкг/мл.

Метод ААС – один из лучших способов определения металлов в пробах. Атомно-абсорбционным методом можно определять и некоторые неметаллы (B , Si , As , Se , Te).

Исследуемое вещество атомизируют, распыляя его раствор в пламя газовой горелки (разновидность фотометрии пламени) или испаряя сухой остаток раствора в электрической трубчатой печи при температурах до 3 000°C. Обычно через атомный пар пропускают линейчатое излучение, соответствующее атомному спектру определяемого элемента. При атомно-абсорбционных измерениях частота падающего света должна строго соответствовать резонансной частоте поглощения атомов. Поэтому источники непрерывного электромагнитного спектра здесь неприменимы.

В качестве источников в ААСА применяют специальные лампы с полым катодом, изготовленным из определяемого металла. Напряжение питания таких ламп достигает 400 В, сила тока до 100 мА. Лампы с полым катодом достаточно дороги, однако только при их использовании достигается абсолютная селективность.

Атомный абсорбционный спектральный анализ проводят на специальных спектрофотометрах. Методика его проведения по сравнению с другими методами значительно проще, для него характерна высокая точность определения не только малых, но и больших концентраций элементов в пробах. Атомный абсорбционный спектральный анализ целесообразно использовать для количественного определения особенно в тех случаях, когда анализируемые образцы сами по себе представляют жидкости или легко могут быть переведены в раствор.

Данный анализ обладает высокой чувствительностью, которая достигает 10^{-11} – 10^{-13} г. Эти малые концентрации вещества обнаруживаются в очень малых пробах, что открывает значительные возможности исследования малых количеств веществ и материалов. Вещество вводится в прибор в растворенном виде, оставшийся раствор сохраняется, что позволяет в случае необходимости повторить анализ. Продолжительность абсорбционного анализа меньше, чем эмиссионного. По чувствительности и точности метод атомного абсорбционного анализа значительно превосходит атомный эмиссионный спектральный анализ, но производительность его ниже.

Криминалистические задачи, решаемые методом атомно-абсорбционного спектрального анализа при проведении экспертиз:

- позволяет дифференцировать отдельные марки лакокрасочных материалов и проводить идентификацию нестандартного лакокрасочного покрытия по содержанию микропримесей в его частицах;
- увеличить пределы определения дистанции выстрела до 2 м и более;
- исследовать микроколичества стекла (1–2 мг).

Метод позволяет также решать задачи, связанные с установлением источника происхождения стекла, и выявлять более тонкие различия данных объектов, чем ЭСА.

Высокая чувствительность анализа, по которой он уступает только нейтронно-активационному, точность и простота метода атомной абсорбции сделали его перспективным для исследования криминалистических объектов, особенно микрообъектов веществ и материалов.

Применение данного анализа при исследовании микрообъектов ставит перед экспертом ряд сложных вопросов:

- необходимость предварительного выделения дифференцирующих признаков другими методами, так как атомный абсорбционный анализ проводится поэлементно и надо заранее знать, какие элементы подлежат определению;
- необходимость отбора системы представительных проб от микрообъекта, так как при высокой чувствительности анализа неоднородности вещества могут существенно сказываться на результатах;
- исключение из анализа элементов, которые могут быть связаны с неконтролируемыми примесями – загрязнениями сравниваемых объектов.

6. Атомно-флуоресцентный спектральный анализ

Атомно-флуоресцентный анализ (атомно-флуоресцентная спектрометрия) – метод количественного элементного анализа по атомным спектрам флуоресценции. Для получения спектров через атомный пар пробы пропускают излучение, частота которого совпадает с частотой флуоресценции определяемых атомов (резонансная флуоресценция).

Излучение от внешнего источника поглощается, в результате чего атомы возбуждаются, затем излучают свет, который регистрируется. Доля возбужденных атомов определяется в первую очередь не температурой атомизатора, а интенсивностью этого источника.

Растворы исследуемых веществ чаще всего атомизируют в пламени, реже – в электротермических анализаторах, нагреваемых током в графитовых тиглях и в печах; порошки – в тиглях и капсулах, помещенных в пламя. *Источниками возбуждения* служат интенсивные импульсные лампы с полым катодом, или безэлектродные радиочастотные лампы, или лазеры.

В последнее время лазеры практически вытеснили все остальные источники возбуждения. Сейчас метод АФС развивается почти исключительно в лазерном варианте (лазерная атомно-флуоресцентная спектроскопия, ЛАФС).

Использование лазеров позволило резко увеличить чувствительность метода. Главное достоинство метода АФС – высокая селективность (наивысшая среди методов оптической атомной спектроскопии), обусловленная исключительной простотой спектров атомной флуорес-

ценции и, в связи с этим отсутствием наложения спектральных линий различных элементов. Спектр флуоресценции регистрируют с помощью простых светосильных спектрофотометров. Спектральный диапазон флуоресценции – 300–600 нм. Интенсивность линий флуоресценции пропорциональна концентрации элементов в пробе.

Для градуировки прибора применяют стандартные образцы (СО) известного химического состава, соответствующего составу пробы.

Основные достоинства метода – высокая селективность и низкие концентрации (в растворах – 0,001 мг/л, в порошках – до 10^{-6} – 10^{-7} % для таких летучих элементов, как кадмий и серебро), большой интервал концентраций, в котором градуировочный график линейный (обычно 1–2 порядка величины концентрации, а с применением лазеров – до 5).

С помощью атомно-флуоресцентного анализа можно определить около 50 химических элементов в водах, почвах, растениях, горных породах, нефтяных и других продуктах.

7. Рентгеновский спектральный анализ

Рентгеновский спектр – это распределение интенсивности рентгеновского излучения, испущенного образцом РЭС (рентгено-эмиссионная спектоскопия), РФА (рентгено-флуоресцентная анализ) или прошедшего через образец РАА (рентгено-абсорбционный анализ), по энергиям (или длинам волн).

Как правило, рентгеновский спектр содержит небольшое число спектральных линий (эмиссионный спектр) или «скачков» поглощения (абсорбционный спектр).

Для возбуждения спектра в РЭА, РАА и РФА используют рентгеновскую трубку. *Спектр эмиссии*, получаемый с применением рентгеновской трубки – это сочетание непрерывного тормозного и характеристического излучений.

Обычно рентгеновские трубки комплектуют металлическим фильтром, позволяющим вырезать из спектра эмиссии трубки ту или иную его составляющую. В РЭА анализируемый образец помещают непосредственно на анод рентгеновской трубки. В результате бомбардировки электронами происходит эмиссия рентгеновского излучения с поверхности образца. Для возбуждения спектра в РАА и РФА ис-

пользуют первичное рентгеновское излучение, генерируемое рентгеновской трубкой. В РАА степень монохроматичности рентгеновского излучения должна быть выше.

Разновидностью РЭА является электроннозондовый рентгеноспектральный микроанализ (РСМА). В этом методе для возбуждения рентгеновского спектра используют моноэнергетический пучок электронов с энергией 10–30 кэВ и диаметром 1–2 мкм (анализ в «точке») или сканирующий электронный пучок – растр – размером от 10×10 до 500×500 мкм (анализ участка поверхности).

Поэтому РСМА является методом *локального анализа*. Источник возбуждения – электронная пушка. Электронная пушка состоит из авто – или термоэмиссионного катода и системы ускоряющих и фокусирующих электростатических или магнитных линз, работающих в условиях высокого вакуума.

Рентгеновский спектральный анализ (РСА) является очень чувствительным и точным методом локального анализа. Малый диаметр электронного зонда (около 1 мкм) позволяет определять состав вещества в объеме, равном нескольким кубическим микронам, т. е. состав практически пылевидных частиц. Метод РСА основан на изучении рентгеновских лучей, испускаемых атомами вещества, возбужденными потоками электронов высокой энергии.

Рассматриваемый метод является практически неразрушающим. Он всегда применяется совместно с растровым электронно-микроскопическим исследованием и позволяет устанавливать качественно и количественно химический состав исследуемых объектов с предельной чувствительностью до 0,1–0,01 % по массе.

Рентгеноспектральный анализ может быть реализован двумя основными способами:

1. На исследуемый объект направляется сфокусированный пучок электронов (анализ в «точке») или сканирующий электронный пучок (анализ участка поверхности), который, попадая на объект, вызывает в нем характеристическое рентгеновское излучение. Этот вид анализа получил название *электронного микрозондирования*.

2. На объект попадает рентгеновский луч, вызывающий вторичное рентгеновское излучение, почему метод и называется *рентгеновским флуоресцентным анализом*.

Особо следует остановиться на первой разновидности РСА, имеющей наибольшее распространение. С помощью микрозонда достигается возможность анализа малых площадей, что имеет важное значение при судебной экспертизе микрообъектов.

К достоинствам рентгеновского спектрального анализа относятся:

- возможность обнаружения и изучения очень малых количеств веществ;
- простота спектров, которые содержат небольшое число линий, вполне определенное для каждого исследуемого объекта;
- возможность успешного анализа редкоземельных элементов, металлов платиновой группы и т. д., с трудом разделяемых химическим путем;
- сохранность веществ при проведении анализа.

Применение методов рентгеновской спектрометрии, в частности рентгеновского флуоресцентного анализа, дает возможность определять качественный и количественный элементный состав неизвестных веществ и материалов, не уничтожая и не изменяя исходного объекта. Последний может затем исследован другими методами или использован в качестве эталона сравнения.

Прибор для рентгеновского флуоресцентного анализа состоит из рентгеновской трубки, кристалла анализатора или дифракционной решетки, разлагающих рентгеновское излучение в спектр, и детектора – счетчика ионизирующего излучения. Электронная бомбардировка приводит к появлению не только характеристического спектра элемента, но и достаточно интенсивного непрерывного излучения; флуоресцентное излучение содержит только линейчатый спектр.

Метод применяется для исследования различного рода материалов – металлов и сплавов, стекол, керамики, цементов, пластмасс, анализ минералов и др., а также для анализа почвы, пыли, донных отложений и др.

С помощью рентгеновского спектрального анализа можно получить ценные данные о составе локальных включений и топографии распределения химических элементов по поверхности объекта, но широкое использование его в экспертно-криминалистических подразделениях затруднено в связи со сложностью и высокой стоимостью.

Лекция 17. Методы определения состава и структуры объектов судебной экспертизы

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Молекулярный спектральный анализ. Основной закон светопоглощения.
2. Спектрофотометрия в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.
3. Инфракрасная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеивания.
4. Люминесцентный анализ.
5. Масс-спектрометрический метод.
6. Радиоспектроскопические методы.
7. Рентгенографические методы.

1. Молекулярный спектральный анализ.

Основной закон светопоглощения

Важный раздел экспертной криминалистической техники при исследовании веществ, материалов и изделий составляют методы и технические средства проведения молекулярного анализа – спектрофотометрия в ультрафиолетовой и видимой областях спектра (спектрофотометрический метод), инфракрасная спектрометрия, молекулярная масс-спектрометрия, спектральный люминесцентный анализ, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), анализ по спектрам комбинационного рассеяния, ядерный магнитный резонанс (ЯМР), хроматографические методы.

Методы молекулярного спектрального анализа основаны на пропорциональной зависимости между светопоглощением и концентрацией поглощающего вещества.

В молекулярном спектральном анализе используют избирательное поглощение света молекулами анализируемого вещества.

В результате поглощения излучения молекула поглощающего вещества переходит из основного состояния с минимальной энергией E_1 в более высокое энергетическое состояние E_2 . В частности, электронные переходы, вызванные поглощением строго определенных квантов световой энергии, характеризуются наличием строго определенных полос поглощения в электронных спектрах поглощаемых молекул (рис. 1).

В молекулярном спектральном анализе используют избирательное поглощение света молекулами анализируемого вещества.

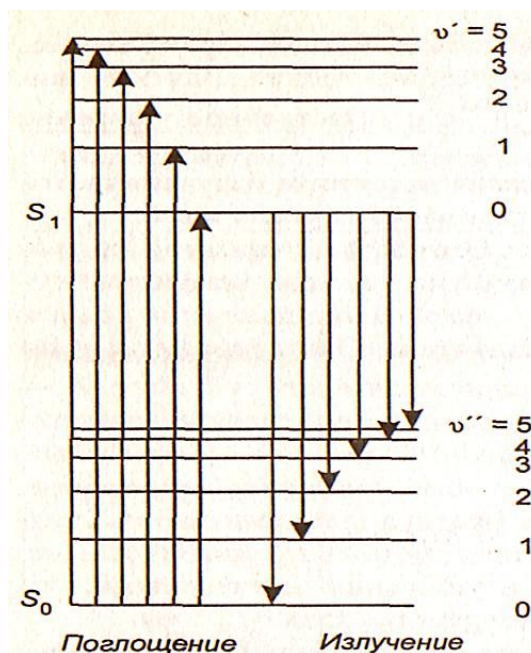


Рис. 1. Двухуровневая схема электронно-колебательных состояний и переходов между ними в гипотетической молекуле: S_0 и S_1 – основное и возбужденное состояния соответственно; 0, 1, 2 и т.д. колебательные подуровни

Характер и степень светопоглощения излучения зависят от природы вещества и его концентрации в растворе.

Согласно основному закону светопоглощения Бугера–Ламберта–Бера между ослаблением интенсивности излучения, концентрацией поглощающего вещества и толщиной слоя раствора существует количественная зависимость, выражающаяся уравнением:

$$I = I_0 10^{-\varepsilon LC},$$

где I_0 – интенсивность светового потока, падающего на раствор;

I – интенсивность светового потока, прошедшего через раствор;

L – толщина слоя раствора, поглощающего свет;

C – концентрация вещества в растворе;

ε – коэффициент пропорциональности, зависящей от длины волны падающего света, природы растворенного вещества и температуры раствора.

Или
$$E = \varepsilon \cdot C \cdot L,$$

где E – поглощение;

C – концентрация вещества в растворе;

ε – коэффициент пропорциональности, зависящей от длины волны падающего света, природы растворенного вещества и температуры раствора; L – толщина поглощающего слоя.

2. Спектрофотометрия в видимой и ультрафиолетовой областях спектра

Современные спектроскопические методы являются основными при установлении состава и строения вещества. Преимуществом спектроскопии является возможность проведения анализа за относительно короткий промежуток времени на небольшом количестве вещества.

Спектрофотометрический метод анализа, основанный на спектрально-избирательном поглощении монохроматического потока световой энергии при прохождении его через исследуемый раствор или твердое тело, более точен, чем традиционные фотокolorиметрические методы, и позволяет достигнуть более низких значений концентраций насыщения для индивидуальных соединений, что дает возможность работать при более низких концентрациях.

В отличие от фотокolorиметрии, спектрофотометрический метод применим для измерения светопоглощения в различных областях видимого спектра, а также в УФ и инфракрасной (ИК) областях спектра. Это значительно расширяет аналитические возможности метода.

Спектроскопия в УФ и видимом свете – это раздел оптики, в котором исследуется зависимость интенсивности поглощения электромагнитного излучения, прошедшего через анализируемое вещество, от длины волны (в ультрафиолетовой и видимой областях).

Все органические молекулы поглощают излучение в ультрафиолетовой области спектра. Поглощенная энергия вызывает перераспределение валентных электронов и оказывает существенное влияние на структуру и устойчивость молекулы.

При поглощении света молекулой в видимой и ультрафиолетовой областях изменяется энергия определенных электронов, что приводит к их переходу на более высокий энергетический уровень. Переход электрона из основного состояния S в возбужденное состояние S' сопровождается изменением колебательного и вращательного состояний (рис. 2).

Минимальные различия в энергетических состояниях колебательных и вращательных уровней одного и того же энергетического уровня приводят к возникновению тонкой структуры полос спектра.

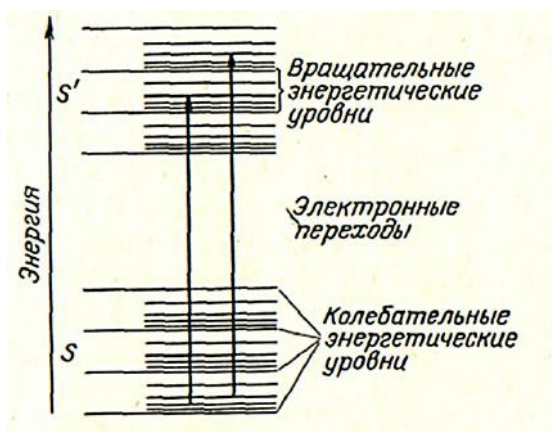


Рис. 2. Диаграмма энергетических уровней молекулы
(ось ординат – в условном масштабе)

Однако при обычных условиях из-за взаимодействия молекул друг с другом, с растворителем в центре поглощения наблюдаются только сравнительно широкие полосы поглощения.

Не существует никакого спектрального разрыва между ультрафиолетовой и видимой областями, различие делается по чисто физиологическим причинам. Спектроскопия в видимой и ультрафиолетовой области спектра основана на измерении электронных спектров поглощения в диапазоне длин волн 180–700 нм. Спектры поглощения в этой области отражают переходы связанных и несвязанных электронов в молекуле.

Поскольку, как правило, электроны в молекуле при комнатной температуре находятся на нижнем энергетическом уровне, спектры в этой области дают информацию об основном и первом возбужденном электронных состояниях молекулы.

Длина волны поглощенного света соответствует определенному переходу, поэтому пики на спектрах поглощения вещества обусловлены присутствием в нем характерных структур (рис. 3).

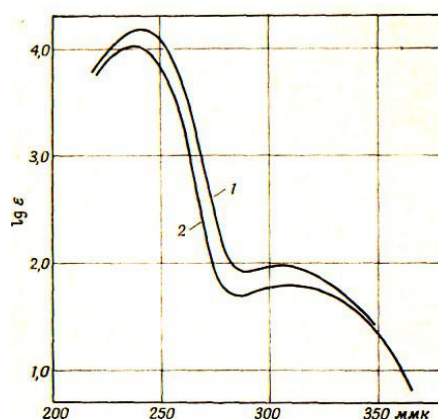


Рис. 3. Ультрафиолетовое поглощение: 1 – стероидное соединение (Δ4 –холестенон – 3); 2 – ациклического кетона (окись мезитила).

Для регистрации спектров поглощения используют спектрофотометры. В этих приборах индикатором служит фотоэлемент (преобразователь световой энергии в электрическую), ток в котором пропорционален интенсивности падающего на него света.

Определение концентрации вещества в растворе проводится в соответствии с основным законом поглощения света – законом Бугера–Ламберта–Бера.

Молекулярный спектральный анализ в УФ и видимой областях спектра используется для качественного и количественного анализа органических и неорганических соединений.

В экспертной практике метод молекулярной спектроскопии в видимой и УФ-области применим к таким объектам, как горюче-смазочные материалы, материалы документов, фармацевтические препараты, спиртные напитки, растительные наркотические средства, лакокрасочные покрытия, специальные маркирующие вещества.

Для исследования данных объектов достаточно микроколичеств вещества: единичное микроволокно, частица ЛКП размером 0,1–0,5 мм, единичный штрих, концентрация определяемого компонента до $10^{-5} - 10^{-6} \%$.

Данный метод не пригоден для определения природы неизвестного вещества в силу малой информативности получаемых спектров, которые в большинстве случаев состоят из одной или нескольких достаточно широких полос.

3. Инфракрасная спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеивания

Инфракрасная спектроскопия (ИК–спектроскопия) – раздел спектроскопии, изучающий спектры поглощения (и отражения) электромагнитных волн в ИК-области.

Для характеристики ИК-спектра вместо длины волны обычно используют волновые числа ν в см^{-1} . В этом случае границы ИК-области спектра простираются от 50 до 5000 см^{-1} .

Поглощаемая энергия в ИК-области обуславливает переходы между вращательными и колебательными уровнями молекул.

ИК–спектроскопию применяют для определения практически любой функциональной группы, строения молекул и для идентифика-

ции соединений. Когда электромагнитное излучение с волновыми числами от 5000 до 200 см^{-1} (инфракрасный свет, тепловое излучение) поглощается химическим соединением, происходят изменения колебательных и вращательных движений молекулы. Поглощенная энергия вызывает изменение длины связей и величины валентного угла молекулы при наличии в этой молекуле поляризованных связей.

В отличие от УФ-спектров, при образовании которых молекулы переходят в возбужденное, часто более активное состояние, ИК-спектры получают при более «мягком» возбуждении. В результате для них характерна тонкая структура с большим числом узких спектральных линий, характеризующих молекулу, чем в УФ-спектрах.

В ИК-спектроскопии, в отличие от других спектроскопических методов, при построении графика на оси ординат откладывают не степень поглощения, а степень пропускания в процентах.

Инфракрасная область спектра была открыта около 1800 г., применение ИК-спектроскопии для решения структурных и аналитических задач в органической химии пришло только в начале 40-х гг. XX в.

В это время были созданы автоматические регистрирующие приборы, которые применяли в работе над некоторыми важными проблемами военного времени, такими, как анализ авиационных топлив, синтетических резин и волокон, выяснение структуры пенициллина. Первый ИК-спектрометр был собран в Мичиганском университете в 1937 г. (США).

Вскоре появились относительно недорогие, но достаточно хорошие коммерческие приборы, производство которых сильно выросло после 1950 г., и в настоящее время вряд ли найдутся лаборатории, работающие с органическими веществами и не имеющие ИК-спектрометров.

Спектральный диапазон ИК-спектрометров составляет обычно 200–4000 см^{-1} (разрешение полос до 0,001 см^{-1}).

Качественный анализ на основе ИК – спектров возможен (в отличие от УФ-спектров) благодаря их высокой индивидуальности и существованию характеристических колебаний некоторых атомных групп, например, CH_3 , CN , NO_2 и др.

Колебательные спектры обладают высокой специфичностью и широко используются для идентификации веществ. Каждому веществу

ву присущ свойственный только ему набор полос и не существуют двух веществ, которые имели бы одинаковые колебательные спектры.

В настоящее время имеются атласы ИК-спектров для различных классов органических, элементоорганических и неорганических веществ, в которых указаны условия подготовки образцов и регистрации спектров, а также модели спектрометров.

Идентификация неизвестного вещества по его ИК-спектру заключается в сопоставлении его спектра с эталонным, приведенным в атласе ИК-спектров. Учитывая, что колебательные спектры, зарегистрированные на различных спектрометрах или в различных условиях, могут отличаться между собой, важнейшим условием сравнения спектров является стандартизация условий их регистрации. Информационно – поисковые системы, созданные на базе современной электронно-вычислительной техники, помогают отыскать нужный спектр в атласе ИК-спектров.

Совпадение спектральной кривой исследуемого вещества со спектральной кривой эталона свидетельствует об идентичности двух веществ. Отсутствие в спектре исследуемого вещества полос, наблюдаемых в спектре образца сравнения, однозначно указывает на то, что эти вещества различны.

При исследовании молекул органических веществ особое внимание уделяют области спектра $1300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$. В эту область попадают полосы, отвечающие колебаниям одинарных связей C–C, C–N, C–O, а также многие деформационные колебания. В результате сильного взаимодействия этих колебаний отнесение полос к отдельным связям невозможно, однако весь набор полос в этой области спектра является характеристикой ядерного остова (скелета) молекулы в целом. Эту область называют *областью отпечатков пальцев* (рис. 4). По колебательным спектрам в этой области можно идентифицировать даже изомеры.

По этим спектрам (область «отпечатков пальцев»), используемым для идентификации соединений, обычно проводят качественный анализ смесей органических соединений и индивидуальных веществ. Однако надежность такой идентификации при анализе смесей не очень велика. Многие функциональные группы характерны для раз-

ных веществ, и это приводит к перекрыванию полос поглощения, затрудняющему идентификацию.

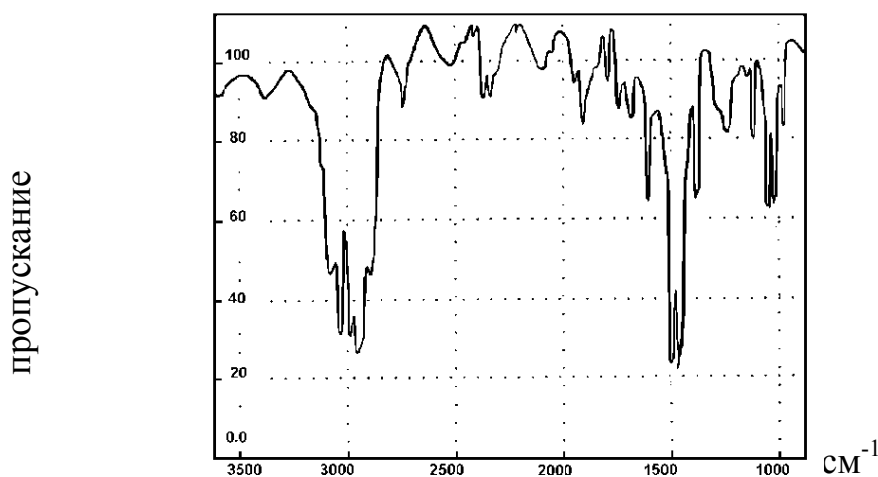


Рис. 4. ИК-спектр бензина

Количественный анализ по ИК-спектрам поглощения производится так же, как и в фотометрии в видимой или УФ-областях спектра: на основании закона Бугера–Ламберта–Бера.

Наиболее распространены для получения ИК-спектров двухлучевые спектрометры с дифракционным монохроматором. Прибор устроен так, что поглощение, общее для обоих каналов, не регистрируется в результате компенсации лучей. Наряду с простыми спектрометрами используются также регистрирующие автоматизированные ИК-спектрометры с компьютерным управлением. Применение компьютерной техники в современных приборах значительно упрощает проведение анализов в ИК-спектроскопии. В современной органической химии часто используют сочетание ИК-спектроскопии с различными хроматографическими методами.

В настоящее время все большее применение находят Фурье-спектрометры. Работа этих приборов основана на интерференционном принципе. Снятие спектра с помощью Фурье-спектрометра осуществляют в два приема: сначала регистрируют интерферограмму излучения, а затем после Фурье-преобразования интерферограммы вычисляют спектр.

ИК-Фурье-спектрометры незаменимы при обнаружении наркотических средств и отравляющих веществ в газообразных пробах, и для контроля пищевых продуктов и алкогольных напитков, проверки подлинности лекарственных препаратов и контроля их качества, и

при решении многих аналитических задач в судебной экспертизе и криминалистике.

Метод ИК-спектроскопии позволяет получить ценную информацию в судебной экспертизе при изучении таких веществ и материалов, как нефтепродукты, лакокрасочные материалы и покрытия, волокна, пластмассы и резины, материалы письма, взрывчатых веществ, клеящих веществ, наркотических средств и др.

Спектроскопия комбинационного рассеяния

Колебательные спектры регистрируют в форме инфракрасных спектров (ИК-спектров) или спектров комбинационного рассеивания (спектров КР (рамановских спектров)).

ИК-спектр представляет собой спектр поглощения в инфракрасной области электромагнитного излучения.

Спектр КР возникает при облучении вещества монохроматическим светом ультрафиолетового или видимого диапазона. Под воздействием монохроматического светового потока с частотой ν молекулы вещества поляризуются и рассеивают свет с частотой ν (релеевское рассеяние), а также с частотами $\nu \pm \nu_{01}$ (комбинационное рассеяние), где ν_{01} – частота нормальных колебаний молекулы.

Таким образом, колебательные частоты наблюдаются в виде комбинационных смещений частоты возбуждающего света ν в ультрафиолетовой или видимой области спектра. Частоты $\nu - \nu_{01}$ называют *стоксовыми*, а частоты $\nu + \nu_{01}$ – *антистоксовыми*. За рубежом спектроскопию комбинационного рассеяния называют *рамановской спектроскопией*.

Возникновение спектра КР можно представить следующим образом. Квант падающего излучения $h\nu$ взаимодействует с молекулой, находящейся в основном или возбужденном колебательном состоянии.

Если взаимодействие является упругим, то энергетическое состояние молекулы не меняется и частота рассеянного излучения будет такая же, как и падающего, т. е. ν . В спектре КР появляется релеевская полоса. В случае неупругого взаимодействия происходит обмен энергией между квантам излучения $h\nu$ и молекулой:

$$h\nu + E' = h \cdot \nu_{0r} + E''$$

где ν_{0r} – частота рассеянного фотона; E' и E'' – начальная и конечная колебательные энергии молекулы.

При этом возможны два варианта рассеивания падающего света.

Вариант 1. Молекула, находящаяся в основном колебательном состоянии, заимствует часть энергии падающего света и переходит на более высокий колебательный уровень ($E' < E''$). В результате падающий свет рассеивается при пониженной частоте ($\nu_{or} < \nu$) и в спектре КР появляется стоксова полоса.

Вариант 2. Обладающая более высокой колебательной энергией молекула при взаимодействии с фотоном $h\nu$ переходит на основной колебательный уровень ($E' > E''$), отдавая часть своей энергии. В этом случае падающий свет рассеивается при повышенной частоте ($\nu_{or} > \nu$) и в спектре КР возникает антистоксова полоса.

Энергия фотонов возбуждающего света $h\nu$ должна быть меньше энергии электронного возбуждения молекулы. В противном случае может возникнуть флуоресценция, перекрывающая спектр КР.

КР-спектры (романовские спектры) дополняют информацию, полученную с помощью инфракрасной спектроскопии, а также используются для изучения структуры молекул, позволяя получить полную информацию о структурно-групповом составе вещества.

Достоинство метода:

- возможность изучения органических и неорганических веществ в любых агрегатных состояниях, включая водные растворы;
- проведение анализа без разрушения объекта;

Ограничение метода состоит в невозможности анализа соединений, обладающих сильной флуоресценцией в видимой области спектра.

В настоящее время экспертные учреждения решают с помощью этого метода следующие задачи:

- установление состава многокомпонентных веществ (вещества неустановленной природы, лекарственные средства, полимерные материалы, материалы письма) при совместном использовании ИК- и КР-спектроскопии;
- определение вида ЛКМ (по составу минеральных компонентов и связующих);
- установление вида полимерной пленки в многослойных стеклах (триплекс) без предварительного разрушения;
- установление природы драгоценных камней.

4. Люминесцентный анализ

Особый интерес в криминалистической экспертизе представляет явление *люминесценции*, т. е. способность некоторых веществ к свечению под действием ультрафиолетового излучения без изменения температуры. Люминесценция наблюдается в видимой, УФ- и ИК-областях спектра. Люминесценция может происходить и под воздействием рентгеновского и гамма-излучений, под воздействием потока электронов (табл. 1).

В экспертной практике используется явление люминесценции, наблюдаемое только в видимой зоне электромагнитного спектра и крайне редко – в ближней инфракрасной зоне.

Таблица 1

Классификация методов люминесценции по способам возбуждения

Источник возбуждения	Вид люминесценции
Электромагнитное излучение УФ и видимого спектрального диапазона	Фотолюминесценция
Поток электронов (катодные лучи)	Катодолюминесценция
Поток ионов щелочных металлов в вакууме	Ионолюминесценция
Рентгеновское излучение	Рентгенолюминесценция
Радиоактивное излучение	Радиолюминесценция
Тепловая энергия	Термолюминесценция, или кандолюминесценция
Ультразвук	Сонолюминесценция
Механическое воздействие	Триболюминесценция
Энергия химических реакций	Хемилюминесценция

В экспертной практике используется явление люминесценции, наблюдаемое только в видимой зоне электромагнитного спектра и крайне редко – в ближней инфракрасной зоне.

Возбуждение люминесценции происходит излучениями всех рассмотренных зон. Однако длина волны люминесценции определяется природой самого вещества и не зависит от вида источника возбуждения.

Причиной люминесценции является какое-либо воздействие на данное вещество, приводящее к переходу его молекул в возбужденное состояние. Часть поглощенной при этом веществом энергии выделя-

ется затем в виде энергии люминесцентного свечения (эта часть, выраженная в процентах, называется *энергетическим выходом люминесценции*).

Закономерность люминесценции была обнаружена Стоксом: *свет люминесценции, всегда имеет большую длину волны, чем свет источника возбуждения люминесценции*.

Более точно закон Стокса гласит: *спектр люминесценции и его максимум сдвинуты в более длинноволновую область по сравнению со спектром источника возбуждения и его максимумом*.

Чем больше величина такого смещения, тем надежнее определение люминесцирующего вещества и тем легче визуально наблюдать объект исследования. Например, эксперту значительно проще фиксировать различия в цвете люминесценции штрихов, выполненных близкими по цвету красителями чернил или паст для шариковых ручек. Особенно это важно при их фотографировании.

Закон Стокса показывает, что из всех видов излучений, способных вызвать люминесценцию, в экспертной практике наиболее приемлемо УФ-излучение и частично коротковолновый видимый свет (фиолетовый и синий), хотя возможности последних ограничены.

Кроме рассмотренных свойств люминесценция имеет и иные закономерности. В частности, интенсивность люминесценции существенно зависит от концентрации люминесцирующего вещества. Так, с увеличением концентрации возрастает и выход люминесценции, но до определенных значений, при которых наблюдается резкое снижение энергетического выхода. Это свойство положено в основу количественного люминесцентного анализа веществ.

Количественный анализ основан на зависимости интенсивности люминесценции от количества люминесцирующего вещества (закон Бугера–Ламберта–Бера).

В зависимости от длительности свечения люминесценция делится на фосфоресценцию и флуоресценцию.

Фосфоресценция – это такой вид люминесценции, когда свечение происходит в течение достаточно длительного промежутка времени, после того как источник возбуждения отключен.

Флуоресценция – это кратковременное свечение после отключения источника возбуждения.

Главное достоинство метода люминесцентного анализа – низкий порог обнаружения вещества (менее 10–5 мкг/мл), что важно при определении следовых количеств элементов. Спектральный люминесцентный анализ относится к группе самых высокочувствительных методов анализа.

Спектры люминесценции образуются при облучении вещества ультрафиолетовым светом.

Данный метод в КИВМИ применяется для исследования горючесмазочных материалов, полициклических ароматических углеводородов в почвах, ядовитых веществ и ряда других. Метод пригоден и для дифференциации стекол разного происхождения.

5. Масс-спектрометрический метод

Масс-спектрометрия является сравнительно новым экспрессным и информативным методом для определения элементного, функционального, молекулярного и изотопного качественного и количественного состава вещества.

Существенное отличие масс-спектрометрии от других аналитических физико-химических методов состоит в том, что оптические, рентгеновские и некоторые другие методы детектируют излучение или поглощение энергии молекулами или атомами, а масс-спектрометрия непосредственно детектирует сами частицы вещества.

Масс-спектрометрия измеряет их массы, вернее отношение массы к заряду. Для этого используются законы движения заряженных частиц материи в магнитном или электрическом поле.

Масс-спектр – это просто рассортировка заряженных частиц по отношениям массы к заряду.

Масс-спектрометрические методы основаны на получении ионов (заряженных частиц) из нейтральных молекул изучаемого вещества, переведенного в газообразное состояние путем воздействия на них пучком электронов (электронным ударом) или химической ионизации, с последующим разделением образующихся ионов в магнитном и электрическом полях. При этом образуются в основном положительные ионы, которые могут распадаться на отдельные фрагменты. Регистрируемая зависимость ионных токов от массы отдельных ионов называется масс-спектром.

Принципиальная схема масс-спектрометра показана на рис. 5.



Рис. 5. Принципиальная схема масс – спектрометра

Такой анализ занимает всего 6–8 с, и прибор широко используется службами безопасности более чем в 50 странах (контроль в аэропортах, таможнях, тюрьмах и др.) в целях защиты важных объектов, предупреждения террористических актов, борьбы с распространением и торговлей наркотиками, в судебно-медицинской экспертизе. Пример спектра, полученного данным методом, показан на рис. 6.

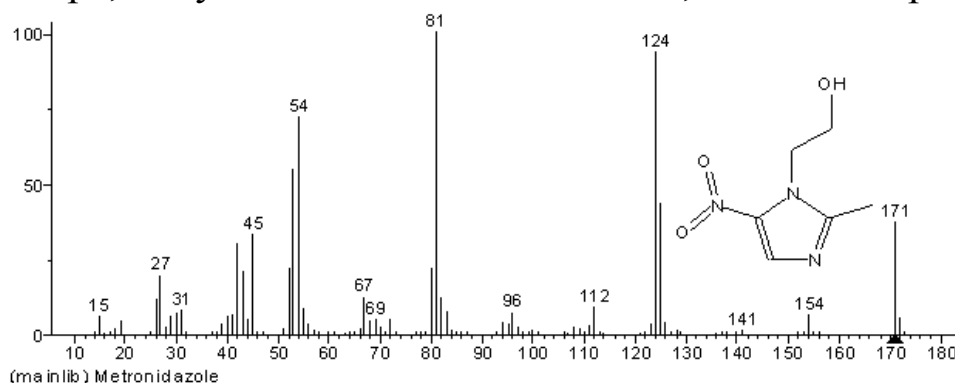


Рис. 6. Масс-спектр в режиме электронного удара для метронидазола из библиотеки масс-спектров NIST

Главным применением масс-спектрометрии в экологической аналитической химии является использование этого метода как детектора в газовой хроматографии или высокоэффективной жидкостной хроматографии (хромато-масс-спектрометрия).

Достоинства метода заключаются в следующем:

– высокая чувствительность – 1 нг в мкл (минимальным для анализа является количество вещества менее 20 мкг);

- возможность идентификации соединений и установления строения неизвестных веществ;
- возможность точного определения молекулярной массы;
- возможность определения элементного состава и брутто-формулы;
- масс-спектры многих веществ изучены достаточно подробно и представлены в специальных атласах, которые содержат порядка 200 тыс. масс-спектров.

Ограничения метода:

- исследуемое вещество должно быть летучим и термоустойчивым (например, полимерные материалы методом прямого ввода определить затруднительно);
- содержание компонента в смеси должно составлять не менее 1%;
- масс-спектры структурных изомеров некоторых классов не различимы (однако эти ограничения могут быть устранены, если масс-спектрометрическое исследование проводить после хроматографического разделения веществ);
- в процессе анализа образец разрушается (однако для проведения анализа необходимо весьма незначительные количества образца, поэтому это не является препятствием для применения метода).

В экспертной практике масс-спектрометрия может быть как основным, так и вспомогательным методом исследования.

Данный метод используется для решения следующих экспертных задач: идентификация индивидуальных веществ в смесях и их количественный состав, обнаружение следов наркотических, сильнодействующих, ядовитых веществ и лекарственных средств и др.; обнаружение и определение природы микроколичеств лекарственных средств снотворного действия.

6. Радиоспектроскопические методы

Для определения молекулярного состава исследуемых веществ используются и радиоспектроскопические методы (методы ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)), основанные на взаимодействии вещества с магнитным полем.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопия) используется для изучения положения атомов в молекуле. Радиоволны пропускают через образец вещества, находящегося между полюсами магнита. Поглощающая способность вещества указывает на положение атома внутри молекулы. Такая информация представлена на рисунке, называемым спектром ядерного магнитного резонанса (ЯМР) (рис. 7).



Рис. 7. Спектр ядерного магнитного резонанса этанола ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)

С помощью ЯМР могут быть решены следующие задачи:

- установление состава соединений (определение или подтверждение структуры, функциональной принадлежности);
- анализ сложных смесей (качественный или количественный анализ, комплексообразование, изомеризация);
- определение скоростей динамических процессов (конформационные превращения, обменные взаимодействия).

Изменения резонансной частоты при переходе некоторых ядер из одного химического окружения в другое могут быть значительными. Это открывает многообещающие возможности для изучения тончайших деталей поведения молекул и выведения ЯМР на уровень информативности рентгеноструктурного анализа (расстояние, углы) и даже выше (определение природы химической связи).

При проведении экспертных исследований ЯМР может с успехом использоваться для анализа состава жидких смесей, например сложных углеводородных смесей нефтепродуктов. Сравнительная простота и универсальность спектров ЯМР обеспечивают возможность применения этого метода для исследования широкого круга объектов.

Достоинством ЯМР-спектроскопии являются:

- возможность определения без предварительного разделения компонентов качественного и количественного состава сложных смесей (по одному спектру без предварительной градуировки);

- исследование образца без изменения или разрушения при анализе.

Ограничения в применении метода:

- низкая чувствительность (по сравнению, например, с хромато-масс-спектрометрией);
- сложность и высокая стоимость аппаратуры.

В экспертной практике метод ЯМР используется при исследовании веществ неустановленной природы и любых веществ и материалов на основе органических соединений для установления:

- классификационной категории веществ и материалов (по составу и структуре содержащихся соединений);
- количественное содержание компонентов.

Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР – спектроскопия)

При внесении парамагнитного вещества (парамагнитными называются вещества, у которых магнитная проницаемость несколько больше чем магнитная проницаемость вакуума) в переменное магнитное поле с определенной частотой колебания наблюдается дисперсия магнитной проницаемости (т. е. зависимость магнитной проницаемости от частоты колебания внешнего магнитного поля) и поглощение энергии внешнего поля. При этом поглощение носит резонансный характер. Отыскать резонансные условия и получить спектры ЭПР можно, изменяя частоту излучения или напряженность магнитного поля (рис. 8).

Метод ЭПР используют для получения информации о процессах окисления – восстановления, комплексообразования, а также для определения электронного и геометрического строения соединений, когда наблюдаемые парамагнитные частицы являются непосредственно объектами исследования.

Одно из достоинств метода ЭПР – исключительно высокая чувствительность к небольшим количествам парамагнитного вещества. Благодаря высокой информативности при установлении состава парамагнитных продуктов различных превращений, низкому пределу обнаружения веществ, содержащих неспаренные электроны, быстрой скорости проведения измерений спектроскопия ЭПР находит все более широкое практическое применение, как в научных исследованиях, так и в оперативном технологическом контроле качества продукции.

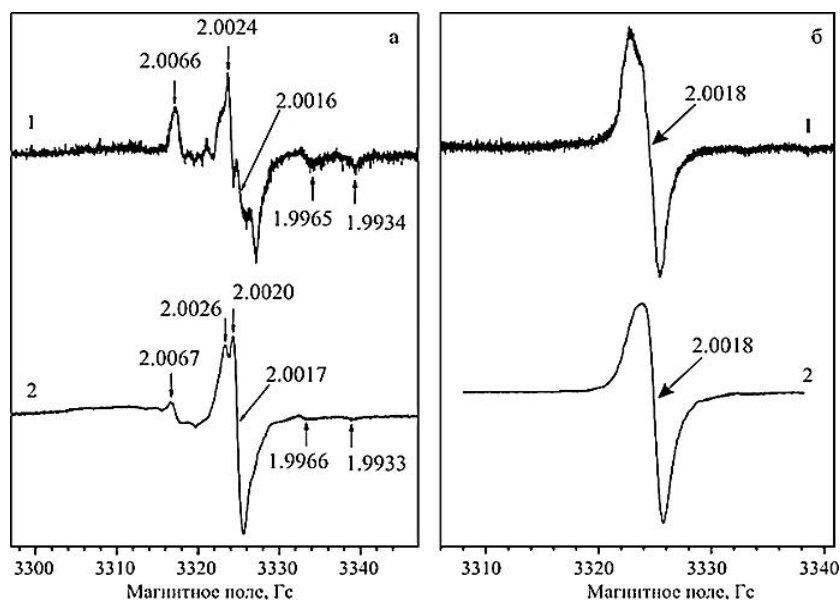


Рис. 8. Типичные спектры ЭПР двух акцессорных цирконов (а, б) различной степени радиационного повреждения в исходном состоянии (1) и после облучения электронами

Методом ЭПР можно исследовать как молекулярный, так и элементный состав вещества.

В экспертной практике метод ЭПР при исследовании изделий из стекла позволяет обнаружить в нем парамагнитные центры – примеси железа, по типу концентрации которых возможна дифференциация стекол по партиям. Метод достаточно широко применяется в экспертизе строительных материалов (бетона, цемента, штукатурки), при исследовании почв, позволяет дифференцировать полимерные материалы, нефтепродукты, определение давности выстрела из охотничьих ружей (по содержанию оксида азота в канале ствола, определяемому с помощью специального парамагнитного индикатора).

7. Рентгенографические методы

Рентгенографические методы включают рентгенофазовый, рентгеноструктурный анализы.

Рентгенографические методы используются для исследования кристаллических структур, фазового состава и его изменения, состояния деформированных или подвергнутых другим воздействиям материалов.

Рентгенографический анализ заключается в получении и исследовании дифракционной картины, возникающей при отражении рентгеновских лучей от атомных плоскостей кристалла (рис. 9).

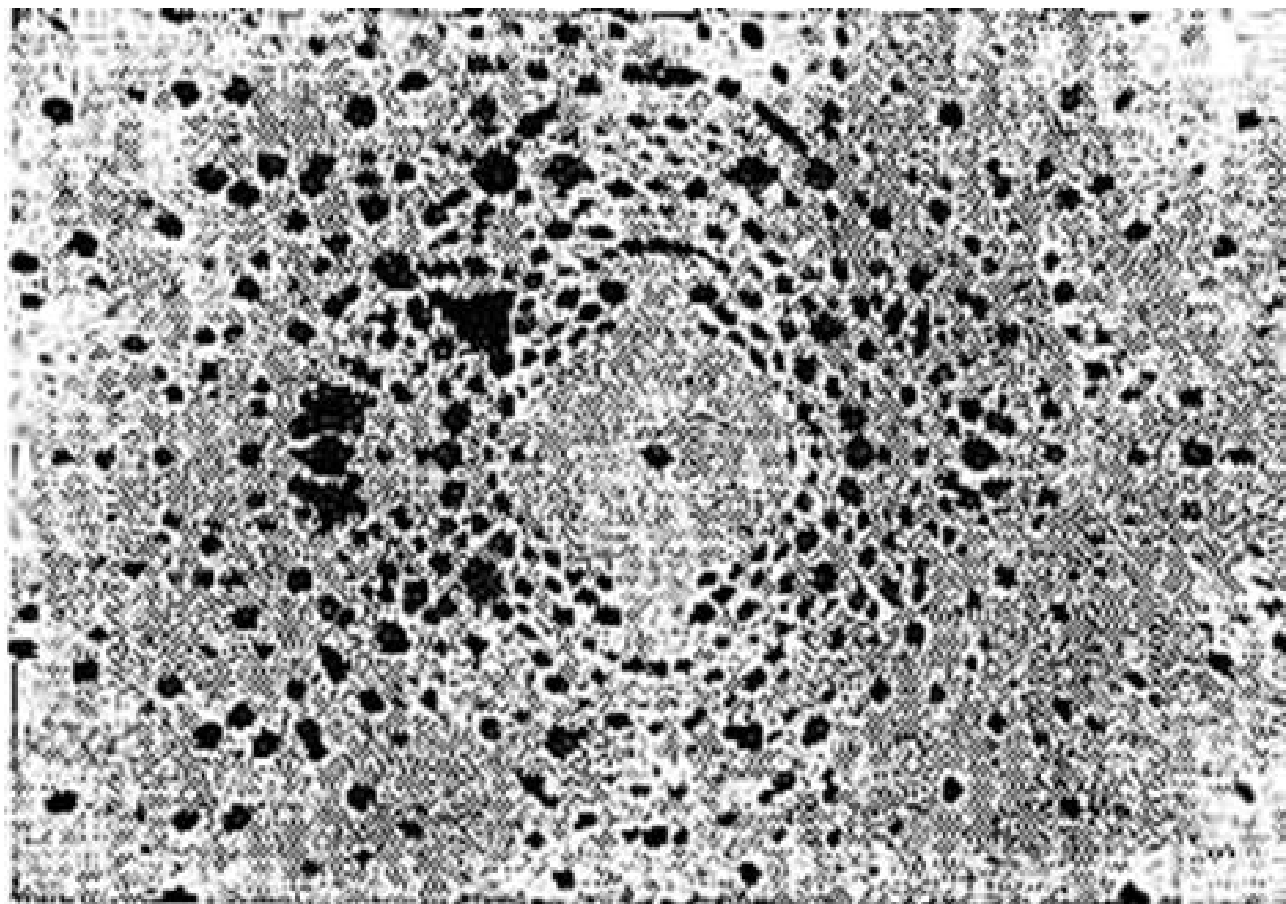


Рис. 9. Дифракционная картина

Методы рентгенографического анализа основаны на неповторимости расположения атомов и ионов в кристаллических структурах веществ, которые отражаются в соответствующих рентгенометрических данных.

Рентгенофазовый анализ используется для установления качественного и количественного фазового состава всех объектов, имеющих кристаллическую структуру.

Под фазовым составом понимают качественное или количественное содержание определенных фаз в данном объекте (см. лекцию № 5).

Рентгеноструктурный анализ позволяет определять ориентацию и размеры кристаллов, их атомное и ионное строение, изучать изменения, происшедшие в материалах под влиянием давления, температуры, влажности.

Достоинства рентгенографических методов:

- методы относятся к неразрушающим;
- позволяют исследовать монокристаллы и поликристаллические вещества (в том числе и сложных смесей с содержанием компонента не менее 3–5 % мол.).

Рентгенографические методы применяют в экспертной практике для решения следующих задач по установлению:

1. Классификационной категории объектов судебной экспертизы:
 - кристаллических веществ неустановленной природы;
 - лакокрасочных материалов (определяется фазовый состав наполнителей, пигментов, сиккативов);
 - взрывчатых веществ (как правило, неорганической природы);
 - синтетических наркотических и лекарственных средств (определяется фазовый состав наполнителей и активных веществ);
 - бумаги (определяется фазовый состав содержащихся в ней минеральных веществ: каолинит, тальк, слюда и др.);
 - металлов и сплавов;
 - ювелирных камней;
 - почвы (определяется минералогический состав);
 - строительных материалов;
 - парфюмерно-косметических изделий.
2. Источника происхождения.
3. Способа изготовления.
4. Причины пожара, взрыва, автотранспортного происшествия по разрушениям материалов.

Лекция 18. Хроматографические методы исследования

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Сорбция и десорбция.
2. Некоторые понятия хроматографии.
3. Классификация хроматографических методов и их применение в экспертных исследованиях.
4. Тонкослойная хроматография.

Сегодня невозможно представить аналитику без хроматографии, и, наоборот, во многих отраслях, особенно в органической химии, аналитические возможности на 70–80 % представлены именно хроматографическими методами.

Понятие о том, что такое хроматография, в настоящее время существенно расширилось. Традиционное понятие о хроматографии гласит: *хроматография* – физический метод анализа и исследования веществ и их смесей, основанный на разделении компонентов за счет распределения их при перемещении через слой неподвижной фазы потоком подвижной фазы.

Хроматография – этот метод разделения компонентов смеси, основанный на различии в равновесном распределении их между двумя несмешивающимися фазами. Одна из фаз – неподвижная, а другая – подвижная. Компоненты образца движутся по колонке, когда они находятся в подвижной фазе и остаются на месте, когда находятся в неподвижной фазе.

1. Сорбция и десорбция

В основе хроматографических процессов лежат явления сорбции и десорбции. Многократное повторение сорбции и десорбции при перемещении исследуемого вещества через слой неподвижной фазы приводит к разделению компонентов.

Сорбцией называют поглощение газов, паров и растворенных веществ твердыми и жидкими поглотителями.

В повседневной жизни заметить это явление удастся разве только при сорбции окрашенных веществ на бесцветном растворителе, например при крашении тканей. Но с обратным процессом – *десорбцией*, т. е. *отдачей сорбированного вещества* – мы встречаемся сплошь и рядом.

Например, ткань при стирке линяет, так как вода окрашивается плохо сорбировавшейся краской. Известно, что нельзя хранить в открытом виде в холодильнике одновременно мороженое, копченую рыбу, апельсины и сыр – все продукты взаимно приобретают несвойственные им запахи.

По явлению десорбции можно судить о том, что какое-то вещество было ранее сорбировано. Во всех других случаях мы не видим самой сорбции, а видим изменение окружающей среды. Например, если всыпать в стакан с водой, слегка подкрашенной синими чернилами, несколько таблеток активированного угля, мы увидим, что окраска исчезнет. Что случилось с красителем? Вероятно, он поглотился углем, из которого сделаны таблетки, но это только предположение, так как окраску можно уничтожить и химически, всыпав в стакан порошок хлорной извести.

В настоящее время различают четыре вида сорбции.

Адсорбция – поглощение вещества на поверхности твердого или жидкого тела. Поверхность некоторых специально приготовленных пористых адсорбентов обычно велика (при этом нужно представить себе сумму всех поверхностей стенок мельчайших пор, развернутых в плоскости).

Например, поверхность 1 г пористого угля, применяемого в противогозах, достигает 600–1000 м².

Абсорбция – поглощение газов, паров или растворенных веществ во всем объеме твердой или жидкой фазы. Классическим примером абсорбции твердым телом является поглощение газов металлами. Один объем твердого металлического палладия поглощает до 400 объемов водорода, который при нагревании может быть снова выделен (десорбирован) в чистом виде. Растворение газов в жидкостях, например воздуха в воде, представляют собой явление абсорбции.

Хемосорбция – поглощение веществ твердыми или жидкими сорбентами с образованием химических соединений. Гашеная известь поглощает из воздуха двуокись углерода, превращаясь в углекислый кальций (мел).

Белый порошок высушенного медного купороса поглощает водяные пары, превращаясь в голубой гидрат сернокислой меди. Раствор едкого натра поглощает сернистый газ, при этом получается сер-

нокислый натрий. Вода растворяет хлористый водород, давая соляную кислоту.

Как правило, образующиеся химические соединения при обычных условиях устойчивы.

Получить двуокись углерода из углекислого кальция можно только путем нагревания мела до ярко-красного каления. Медный купорос можно снова высушить и получить белый порошок. Но удалить хлористый водород из воды простым кипячением не удастся.

Капиллярная конденсация – образование жидкой фазы сорбированного вещества в порах и капиллярах твердого сорбента при поглощении паров вещества. Капиллярная конденсация может наблюдаться только при наличии пористых объектов и только для газов веществ при температуре ниже критической.

Все перечисленные типы сорбции редко встречаются в «чистом» виде. Обычно наблюдается сочетание двух или нескольких типов поглощения. *Адсорбция* – первая ступень, предшествующая хемосорбции и капиллярной конденсации; абсорбция может сопровождаться химической реакцией между поглощенным газом и жидкостью и т. д.

Поверхностные свойства твердого вещества отличаются от свойств веществ в массе – внутри куска металла, стекла, пластмассы, кристалла, минерала, соли.

Например, поверхность свежего излома куска свинца через короткое время темнеет, покрывается окислами. Мгновенно изменяется внешний вид свежих срезов мягких металлов – натрия и калия. Если массивные куски стекла или кристаллы размалывать до состояния порошка в герметически закрытой шаровой мельнице, то давление в ней падает, так как воздух адсорбируется на свежееобразованных поверхностях изломов. Здесь-то и вступают в действие поверхностные силы.

Кристаллическая решетка твердого тела построена из ионов, которые удерживаются в определенном порядке один возле другого электростатическими силами. В кристалле поваренной соли (NaCl) решетка состоит из чередующихся ионов натрия и хлора.

На поверхности кристалла, особенно на его свежем изломе, часть электрического поля каждого атома не будет компенсирована близлежащими атомами; силовое поле будет находиться вне кристалла.

Попадая в это силовое поле, посторонняя молекула газа может быть им удержана и остается на поверхности на некоторое время, исчисляемое десяти – и сотысячными долями секунды. Если кинетическая энергия молекулы велика, то она может, преодолевая силовые поля, покинуть поверхность и уйти в окружающее пространство. Так как движение молекул беспорядочно, не исключена возможность возвращения этой молекулы к поверхности. Попад случайно в более мощное силовое поле, она может большее время оставаться адсорбированной. Электрические силы действуют только на малых расстояниях и быстро убывают по мере удаления от поверхности. Поэтому не следует думать, что поверхность адсорбента (поглотителя) притягивает к себе молекулы газа из окружающего пространства, что адсорбент является чем-то вроде насоса.

Более удачным сравнением будет прилипание мух к клейкой бумаге. Бумага тоже не притягивает мух к своей поверхности, и клей не содержит в своем составе каких-либо привлекательных для мух веществ. Беспорядочно летая по комнате, мухи садятся на все предметы, в частности и на липкую бумагу. Но десорбция с бумаги уже обуславливается качеством клея в данном месте и «мушиной» силой. В конце концов, оказывается, что в большинстве случаев мухи долго задерживаются на поверхности бумаги. Это очень хорошо иллюстрирует картину адсорбции.

Чем дольше молекулы газа пребывают на поверхности сорбента, тем, следовательно, больше и адсорбция.

Таким образом, выясняется кинетическая картина процесса адсорбции. Если число молекул, приходящих к поверхности, больше числа уходящих, то адсорбция возрастает. Если же эти количества равны, то наступает состояние адсорбционного равновесия.

На скорость адсорбции влияет и структура поверхности сорбента. Чем доступнее она для молекул газа, жидкости, тем быстрее протекает процесс поглощения.

На плоских поверхностях – на стекле, металле, кристаллах – адсорбция завершается очень быстро. Гораздо сложнее обстоит дело с техническими сорбентами, основная часть поверхности которых складывается из поверхности стенок мельчайших пор и капилляров, пронизывающих всю частицу сорбента. Такими поглотителями, например,

являются уголь, окись алюминия, высушенный гель кремневой кислоты и т. д. Суммарная поверхность стенок частиц этих веществ очень велика и исчисляется десятками и сотнями квадратных метров на 1 г сорбента.

2. Некоторые понятия хроматографии

Хроматография как эффективный метод анализа и исследования веществ и их смесей родилась в начале XX в. и к настоящему времени сформировалась в самостоятельную научную дисциплину, изучающую распределение химических веществ в системе двух контактирующих несмешивающихся фаз, из которых, как правило, одна подвижна и перемещается относительно другой, неподвижной.

Хроматография как метод была открыта в 1903 г. русским ученым – ботаником М. С. Цветом, который для разделения растительных пигментов на их составляющие использовал колонки, заполненные порошком мела. При вымывании пигментов петролейным эфиром пигменты перемещались вдоль колонки, разделяясь при этом на кольца разного цвета, по числу которых можно было судить о сложности состава анализируемой смеси.

Этот метод и был позднее назван Цветом хроматографией (цветописью) (греч. *chromatos* – цвет, окраска и *grapho* – пишу, описываю).

В настоящее время хроматографическими методами исследуются не только окрашенные вещества, но название сохранилось прежнее.

Рассмотрим некоторые понятия, которые необходимы при рассмотрении данной темы.

Подвижная фаза – поток жидкости, флюида или газа, перемещающий компоненты разделяемой смеси вдоль неподвижной фазы.

Неподвижная фаза – твердый сорбент или несмешивающаяся с подвижной фазой жидкость, на которых осуществляется дифференциальное удерживание отдельных веществ и разделение компонентов исследуемых смесей веществ.

Сорбент – твердое вещество, жидкость или их смеси, способные поглощать или удерживать газы, пары или растворенные вещества и используемые в хроматографии в качестве неподвижной фазы.

Адсорбент – твердый сорбент, концентрирующий на своей поверхности газы, пары или растворенные вещества.

Абсорбент – твердый или жидкий сорбент, растворяющий в своем объеме газы, пары или компоненты жидких смесей.

Сорбат – вещество, удерживаемое сорбентом (в хроматографии – компонент разделяемой смеси).

Элюент – жидкость, флюид или газ, используемые в качестве подвижной фазы.

Элюат – выходящий из колонки поток подвижной фазы с компонентами разделяемой смеси или отдельных исследуемых веществ.

3. Классификация хроматографических методов и их применение в экспертных исследованиях

Классификацию хроматографических методов проводят по разным признакам.

I. По цели хроматографирования выделяют хроматографию:

- аналитическую, осуществляющую качественный и количественный анализ;
- препаративную, используемую для получения веществ в чистом виде, концентрирования и выделения микропримесей;
- промышленную, применяемую для получения веществ в производстве.

II. По технике выполнения выделяют хроматографию:

- колоночную – разделение проводят в специальных хроматографических колонках;
- капиллярную – разделение проводят в узких и длинных полых капиллярах (25–50 м × 0,25–0,5 мм) с неподвижной фазой, закрепленной на их внутренних стенках;
- тонкослойную – разделение проводят на пластинках в тонком слое сорбенте;
- бумажную – разделение проводят на специальной бумаге.

III. В зависимости от агрегатного состояния подвижной фазы хроматографию подразделяют на:

- газовую (подвижная фаза – газ);
- жидкостную (подвижная фаза – жидкость);

– сверхкритическую флюидную, где в качестве подвижной фазы используется флюид.

1. *Понятие «газовая хроматография»* (ГХ) объединяет все методические варианты хроматографического исследования, в которых подвижная фаза газообразна (находится в состоянии газа или пара).

С помощью газовой хроматографии можно выполнять качественное и количественное исследование веществ и компонентов смесей любых органических и неорганических газов, жидкостей, твердых тел, давление пара которых при температуре колонки находится в диапазоне 0,133–133 Па (0,001–1 мм рт. ст.), т. е. перегоняющихся без разложения в области температур до 400–500°C, или более высококипящих соединений, для которых, однако, отработана методика воспроизводимого термического разложения. Методом газовой хроматографии могут также анализироваться и такие соединения, которые хотя и не попадают в очерченные границы, но могут быть превращены в летучие производные для последующего газохроматографического анализа.

Газовая хроматография применяется для исследования легколетучих веществ.

В экспертной практике методы ГХ применяются при решении следующих экспертных задач:

- определение вида наркотических средств и содержания наркотически активных компонентов;
- определение классификационной категории лекарственных препаратов и установление содержания активных компонентов;
- установление соответствия ГОСТу спиртосодержащих жидкостей (по содержанию спирта и микропримесей);
- установление вида и марки нефтепродуктов;
- установление классификационной категории растворителей и технических жидкостей;
- определение содержания в воздухе органических микропримесей веществ, вредных для здоровья человека;
- установление времени исполнения записи по содержанию летучих компонентов материалов письма (паст шариковых ручек);
- установление вида полимеров и композиционных материалов на их основе (например, резин) и соответствия их состава утвержден-

ной рецептуре (используется вариант реакционной хроматографии – пиролитическая газовая хроматография).

2. *Жидкостная хроматография (ЖХ)* — хроматографический метод, в котором подвижной фазой является жидкость.

Основными разновидностями жидкостной хроматографии являются:

Жидкостная хроматография в ее классическом варианте (при атмосферном давлении) и высокоскоростная, или высокоэффективная, жидкостная хроматография (ВЭЖХ) при повышенном давлении позволяют анализировать химические соединения, ионы, радикалы, вирусы в широком диапазоне молекулярных масс — от 50 до 106.

Это оптимальный метод анализа химически и термически нестойких молекул, высокомолекулярных веществ с пониженной летучестью, что объясняется особой ролью подвижной фазы:

- в отличие от газа-носителя элюент в жидкостной хроматографии выполняет не только транспортную функцию, способствуя перемещению анализируемых веществ по слою сорбента;

- природа и строение компонентов подвижной фазы контролируют хроматографическое поведение разделяемых веществ.

Среди объектов жидкостной хроматографии — белки, нуклеиновые кислоты, аминокислоты, красители, полисахариды, взрывчатые вещества, нефтепродукты, лекарственные препараты, метаболиты растений и животных.

3. *Сверхкритическая флюидная хроматография.*

Флюидом принято называть особое агрегатное состояние вещества, находящегося при температуре и давлении, превышающих критические. Привлекательность применения флюидов в качестве подвижных фаз обусловлена тем, что их плотность (при низкой вязкости, почти такой же, как и у газов) в 10^2 – 10^3 выше, чем у газов, а скорость диффузии молекул хроматографируемых соединений во флюиде примерно в 10^2 раз выше, чем в жидкости.

Эти свойства флюидов открывают принципиальную возможность выполнения хроматографических анализов смесей весьма высококипящих соединений, низкая летучесть которых не позволяет проводить их разделение методом газовой хроматографии.

В сравнении с высокоэффективной жидкостной хроматографией сверхкритическая флюидная капиллярная хроматография обеспечивает большую эффективность разделения (за счет использования колонок большей длины (5–25 м), а при разделении на укороченных колонках позволяет существенно сократить продолжительность анализа.

IV. По механизму разделения анализируемых или разделяемых веществ высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) делится на адсорбционную, распределительную, ионообменную и эксклюзионную, аффинную.

В *адсорбционной хроматографии* разделение веществ, входящих в смесь и движущихся по колонке в потоке растворителя, происходит за счет их различной способности адсорбироваться и десорбироваться на поверхности адсорбента с развитой поверхностью, например с поверхности силикагеля.

В *распределительной ВЭЖХ* разделение происходит за счет разной растворимости разделяемых веществ в неподвижной фазе. Как правило, химически привитой к поверхности неподвижного носителя, и подвижной фазе – растворителе.

В *ионообменной хроматографии* молекулы веществ смеси, диссоциировавшие на катионы и анионы в растворе, разделяются при движении через сорбент, на поверхности которого катионные или анионные центры, способные к обмену с ионами анализируемых веществ за счет из разной скорости обмена.

В *эксклюзионной* (ситовой, гель – проникающей, гель – фильтрационной) хроматографии молекулы веществ разделяются по размеру за счет их разной способности проникать в поры носителя. Разделение анализируемых веществ происходит за счет перераспределения молекул между растворителем, находящимся внутри пор сорбента, и растворителем, протекающим между его частицами.

Удерживание молекул в эксклюзионной (греч. exclusion – исключение) колонке зависит от соотношения размеров анализируемых молекул и пор сорбента.

Молекулы или ионы, размеры которых находятся между максимальным и минимальным диаметрами пор геля, разделяются на отдельные зоны. При этом первыми выходят из колонки наиболее крупные молекулы (наибольшей молекулярной массы), способные прони-

кать в минимальное число пор носителя. Последними выходят вещества с малыми размерами молекул, свободно проникающие в поры сорбента.

Этот метод нашел наибольшее распространение в биохимических исследованиях и в химии полимеров (в том числе и в варианте тонкослойной хроматографии).

Аффинная хроматография основана на исключительной способности биологически активных веществ связывать специфически и обратимо другие вещества, называемые в общем случае лигандами, или аффиантами. Основной предпосылкой для проведения аффинной хроматографии является образование специфического комплекса между выделяемым ферментом и аффинным лигандом, связанным с нерастворимым носителем. С разработкой аффинной хроматографии стали возможными анализ и разделение биологически активных веществ. Следует иметь в виду, что в практической работе разделение часто протекает не по одному, а по нескольким механизмам одновременно.

Так, эксклюзионное разделение бывает осложнено адсорбционными эффектами, адсорбционное – распределительными и наоборот.

При этом, чем больше различие веществ в исследуемой пробе по степени ионизации, основности или кислотности, по молекулярной массе, полярности и др., тем больше вероятность для каких-то веществ неожиданно большого проявления другого механизма разделения.

Классификацию всех методов хроматографии можно увидеть на рис. 1. При выборе условий разделения (природы подвижной и неподвижной фаз) необходимо учитывать молекулярную массу компонентов образца, их полярность и природу сопутствующих соединений, от которых необходимо отделить исследуемое вещество.

В сложных случаях прибегают к комплексному использованию газовой и жидкостной хроматографии в едином аппаратном оформлении. Этот подход позволяет исследовать состав сложных смесей как высоко-, так и низкомолекулярных соединений, проводить групповое и покомпонентное разделение (при этом колонка жидкостного хроматографа, размещаемая перед газохроматографической, может выполнять функции своеобразной системы пробоподготовки).

Наиболее распространенная методика выполнения анализов смеси веществ при использовании проявительной (иначе – элюентной) колоночной газовой или высокоэффективной жидкостной хроматографии сводится к следующему.

Вертикально стоящую трубку – колонку заполняют зерненным сорбентом. Перед началом анализа хроматографическую колонку, содержащую неподвижную фазу, непрерывно промывают подвижной фазой (в газовой хроматографии подвижную фазу часто называют газом – носителем, в жидкостной – элюентом) и в этот поток подвижной фазы на входе в колонку вводят небольшую порцию анализируемой смеси компонентов. Например, *A*, *B* и *C* – компоненты анализируемой смеси (при выполнении газохроматографических анализов жидкие и твердые вещества должны быть предварительно переведены в парообразное состояние; в жидкостной хроматографии анализируемые образцы предварительно растворяют в элюенте или в другом подходящем, смешивающемся с ним растворителе). По мере прохождения газа *Q* (или жидкости) сквозь сорбент сорбируемое вещество в нем задерживается, а из колонки выходит очищенный газ-носитель (или элюент), очищенный от растворенного вещества. Вследствие специфических различий в сорбции или растворимости при движении через слой неподвижной фазы компоненты группируются в зоны, отделенные друг от друга подвижной фазой (рис. 2).



Рис. 2. Проявительная хроматография: участок колонки со сложившимся распределением хроматографических зон

Практически формирование зон проявляемых компонентов наблюдается на всем пути их следования, т. е. на протяжении всей дли-

ны колонки. Из-за диффузионных процессов в подвижной и неподвижной фазах границы зон размываются, так что максимальная концентрация компонента оказывается сосредоточенной в центре зоны.

Если после колонки поместить детектор, то можно обнаружить изменения в составе элюента по различным величинам (катарометр-детектор, регистрирующий изменения теплопроводности, пламенно-ионизационный детектор (ПИД) – детектор, регистрирующий изменение тока по ионизации исследуемого вещества, УФ-детектор, ИК-спектрометр, регистрирующие спектры поглощения, рефрактометр, регистрирующий изменение показателя преломления, и т. д.

Если на выходе из колонки регистрировать изменение во времени какого-либо свойства потока подвижной фазы (так называемое *дифференциальное* детектирование), то выходная хроматографическая кривая – *хроматограмма* – запишется в виде более или менее острых пиков, возвышающихся над нулевой (базовой) линией, уровень которой по окончании анализа, как правило, соответствует исходному ее положению до начала анализа (рис. 3).

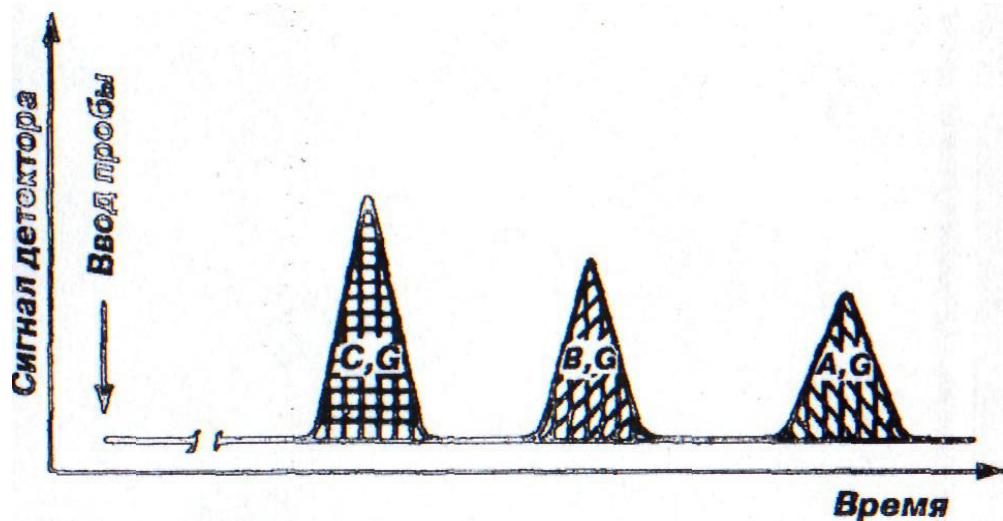


Рис. 3. Проявительная хроматография: хроматограмма

Таким образом, сразу по окончании одного анализа колонка автоматически оказывается подготовленной к выполнению следующего.

Время выхода компонентов, отсчитываемые от момента ввода пробы до момента регистрации вершины пика, или иначе *объемы подвижной фазы*, затраченные на перенос через колонку каждого компонента, дают качественную характеристику анализируемых веществ. Сопоставление площадей (или высот) хроматографических пиков позволяет с высокой точностью выполнять количественные определения анализируемых веществ.

Кроме качественных и количественных определений, рассмотренная методика позволяет проводить препаративное выделение и очистку любого содержащегося в анализируемом образце вещества, поскольку имеется принципиальная возможность осуществить полное разделение всех компонентов смеси.

4. Тонкослойная хроматография

Тонкослойная хроматография (ТСХ) является разновидностью жидкостной хроматографии в плоскостном варианте, т. е. разделение смеси веществ происходит не в колонке, а на поверхности адсорбента. Подвижная фаза перемещается по слою неподвижной фазы, нанесенной тонким слоем на пластинку, за счет капиллярных сил.

Примером такого адсорбента является силикагель, который наносят на полимерную (лавсановую), стеклянную или алюминиевую подложку.

ТСХ является простым хроматографическим методом, для реализации которого не требуется применение сложных приборов, и в то же время он позволяет одновременно в одинаковых условиях анализировать большое количество образцов и легко сравнивать их между собой. ТСХ является быстрым методом анализа и позволяет получать богатую качественную и количественную информацию обо всех компонентах смеси. ТСХ широко применяется при производстве различных видах судебной экспертизы: идентификация пятен крови, обнаруженных на месте преступления, определение наркотиков в моче или крови людей, подозреваемых в употреблении наркотических веществ, взрывчатых веществ, красителей, пищевых продуктов, спирто-содержащих жидкостей и др.

В отличие от колоночной хроматографии применяемые в ТСХ адсорбенты удерживаются на поверхности пластинки с помощью связывающих веществ. Наиболее распространенными связывающими являются гипс, крахмал, силикаты щелочных металлов и некоторые органические жидкости. Связывающие вещества удерживают на пластинках слой адсорбента, в котором и происходит хроматографическое разделение.

Тонкослойная хроматография, как было уже сказано выше, является одним из видов жидкостной хроматографии, в которой подвижная фаза (элюент) движется в пористой среде плоского слоя адсорбен-

та за счет *капиллярных* сил. Роль «хроматографической колонки» в ТСХ играет пластина размером примерно 10×15 (15×20 , 10×10) см, на которую нанесен тонкий слой адсорбента. Пластина для ТСХ состоит из трех элементов: подложка, слой адсорбента и связующее вещество. В качестве подложки используют стеклянные пластинки, алюминиевую фольгу или полимерные пленки (например, на основе полиэтилентерефталата).

Адсорбентами в ТСХ чаще всего являются силикагель и оксид алюминия. Иногда к адсорбенту добавляют люминесцентный индикатор для детектирования веществ, поглощающих в УФ-области спектра. Адсорбент в виде очень мелких частиц (10–15 мкм) наносят на пластинку слоем толщиной 100–300 мкм.

Большинство исследований методом ТСХ проводятся на готовых пластинках, выпускаемых различными фирмами.

Методика ТСХ исследования. Для проведения анализа вещества методом ТСХ необходимо осуществить несколько последовательных операций:

- 1) подготовить пробы для анализа;
- 2) подготовить хроматографические пластинки;
- 3) нанести пробу анализируемых веществ и объекты сравнения («свидетелей») на пластину;
- 4) провести хроматографирование;
- 5) выявить вещества на пластинке;
- 6) оценить полученные результаты.

1. *Подготовка пробы для анализа.* Способ подготовки пробы заключается в получении концентрированного раствора исследуемого объекта (вещества или смеси веществ). Для каждого объекта способ подготовки определяется его природой, поэтому при описании каждого опыта в методическом руководстве дан способ подготовки данной пробы.

2. *Подготовка пластинки для хроматографии.* Для отдельных исследований необходимы пластинки разных размеров. Пластинку вынимают из упаковки, помещают на стол и с помощью линейки и простого карандаша размечают, как показано на рис. 4 а. По разметке пластинку разрезают на две пластинки размером 5×10 см, если данный размер подходит для исследования.

На каждой пластинке (рис. 4 б) отмечают линии старта (мягким карандашом по линейке легким нажатием, не разрушающим слой адсорбента, на расстоянии 1 см или 1,5 см от нижнего края пластинки проводят линию) и линию, которую должен при хроматографировании достичь фронт подвижной фазы (как правило, такую линию проводят на расстоянии 10–15 см от линии старта). Линия старта на пластинке – линия, на которую наносят пробы исследуемых веществ. Линия фронта – линия, до которой поднимается элюент (смесь растворителей или один растворитель, в котором проводится хроматографирование).

3. Нанесение проб анализируемых веществ и объектов сравнения («свидетелей») на пластинку. Анализируемую пробу вещества, подготовленную в виде раствора, наносят на пластинку для ТСХ с помощью стеклянных капилляров, микропипеток или микрошприцев. Проба (2–10 мкл раствора в летучем растворителе) наносится в виде пятна или полосы на расстоянии $\sim 0,5$ см от края пластинки. Растворитель должен быть меньшей полярности, чем элюент, чтобы уменьшить размывание пятна на точке старта. Он также должен быть летучим, чтобы после нанесения пробы мог бы быстро испариться.

Капилляр опускают одним концом в сосуд, где находится раствор анализируемого вещества или стандарта, при этом раствор поднимается по капилляру на высоту 1–2 см.

При нанесении проб на пластинку капилляр следует держать в вертикальном положении, при этом рука должна опираться на стол, где помещена пластинка, слегка прикасаясь к поверхности пластинки (необходимо следить, чтобы в точке нанесения слой адсорбента не разрушился). При этом раствор впитывается в слой адсорбента. Чем дольше капилляр касается поверхности адсорбента, тем больше будет диаметр стартового пятна. Необходимо следить, чтобы диаметр стартового пятна не превышал 2–3 мм.

При необходимости нанесения большого объема пробы (для увеличения концентрации вещества в пятне) следует несколько раз повторить этот прием, просушивая каждый раз пластину на воздухе (диаметр пятна не должен превышать 3 мм).

На одну пластинку можно при сравнительном исследовании нанести несколько проб на расстоянии не менее 1 см друг от друга. После

нанесения пробы высушивают для удаления растворителя, и при необходимости наносят в точку новую порцию пробы (концентрируют).

Аналогичным образом на хроматографическую пластинку наносят пробы стандартов («свидетелей»).

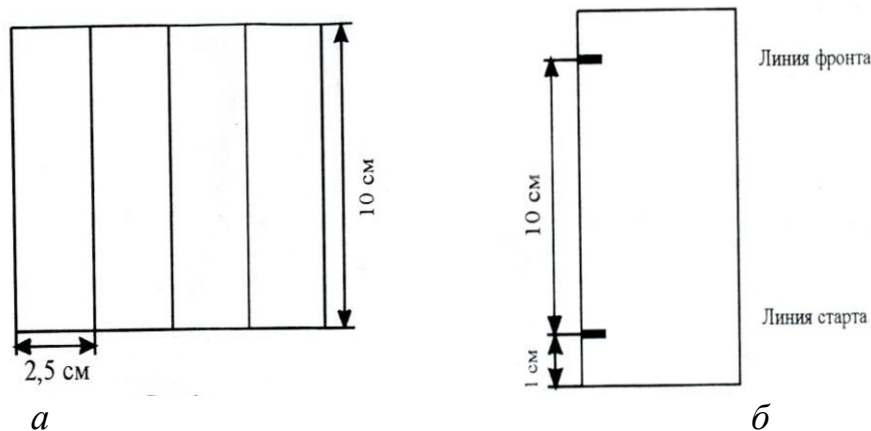


Рис. 4. Подготовка пластинки

4. *Хроматографирование.* Хроматографирование проводят в стеклянной хроматографической камере с крышкой. В отдельной колбе или цилиндре готовят элюент, смешивая соответствующие растворители в нужном соотношении, указанном в каждой методике. Наливают в хроматографическую камеру элюент. Слой растворителя должен быть ниже точек нанесения проб на пластинке и составляет обычно 0,5 мм.

Пластинку с нанесенными пробами с помощью пинцета вертикально опускают в камеру и закрывают крышкой (рис. 5).

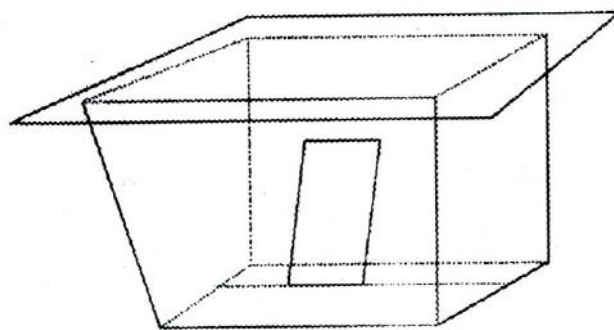


Рис. 5. Расположение хроматографической пластинки в камере.

Под действием капиллярных сил растворитель перемещается вверх по слою адсорбента, при этом скорость движения растворителя в основном зависит от его вязкости (при более вязком элюенте движение происходит медленнее). При этом компоненты исследуемой смеси продвигаются через слой неподвижной фазы с различными скоростями. После того, как фронт подвижной фазы дойдет до отме-

ченной линии в верхней части пластинки, ее извлекают из камеры и испаряют подвижную фазу (растворитель).

Необходимо заметить, что с увеличением высоты подъема элюента скорость его движения замедляется.

При достижении элюентом линии фронта, отмеченной на пластинке, крышку камеры снимают, пластину вынимают пинцетом и сушат в вытяжном шкафу до полного испарения элюента).

5. Обнаружение или детектирование веществ на пластинке. Если компоненты пробы имеют собственную окраску, то они хорошо видны на пластинке после хроматографирования. Положение в видимой области электромагнитного спектра разделенных зон на хроматограмме, если они не видны визуально, определяют при наблюдении в УФ-свете (с помощью лампы с эмиссионным максимумом при 365 и 254 нм) или после опрыскивания пластинки подходящими реагентами.

Первый способ без применения химических реагентов основан на регистрации собственной флуоресценции разделенных соединений или на регистрации поглощения веществ в УФ-области, и отдельные компоненты выявляются в виде темных пятен (синих, зеленых).

При этом в слой адсорбента на пластинке (при изготовлении) вводятся флуоресцентные индикаторы (люминофоры), которые при облучении УФ-светом возбуждаются при такой длине волны, при которой детектируемые вещества поглощают. В результате исследуемые вещества на хроматограмме становятся хорошо различимы в виде темных зон на светящемся зеленоватом фоне сорбента.

Второй способ используют, если компоненты пробы бесцветны. В этом случае применяют различные химические реагенты (их около 300), позволяющие обнаружить на хроматограмме органические и неорганические вещества. Например, используют пары йода, которые адсорбируются многими органическими соединениями после выдерживания в них хроматограмм, с образованием желто-коричневых зон. Для этого кристаллики йода помещают на дно хроматографической камеры, а рядом укладывают высушенную после хроматографирования пластинку таким образом, чтобы она не касалась йода.

Камеру закрывают крышкой и оставляют на 5–15 минут. После появления окрашенных йодом зон пластинку вынимают, и камеру плотно закрывают стеклом для того, чтобы йод не испарился. Если

через некоторое время пятна с хроматограммы исчезнут, процедуру можно повторить.

Возможна пропитка пластинки после хроматографирования проявляющими реагентами, которые образуют окрашенные зоны с разделенными соединениями, и осуществляется либо методом погружения в раствор реагентов, либо с помощью распыления реагентов пульверизатором (в этом случае пластинку равномерно опрыскивают до полного увлажнения необходимым раствором). В первом случае готовят растворы соответствующих реагентов, которые наливают в камеру. После хроматографии и высушивания пластинку помещают в раствор на 2–3 с. Затем вынимают пинцетом, переносят на фильтровальную бумагу и промокают другим листом фильтровальной бумаги. Далее хроматограмму высушивают на воздухе или нагревают над электроплиткой или спиртовкой, помещая на кольцо с асбестированной сеткой или огнезащитной прокладкой.

Реагенты для пропитки, приготовленные таким способом, могут быть общего действия (например, смесь серной кислоты с этанолом, которая обугливает многие органические вещества, образуя при этом зоны темного цвета) или специфического действия для данного класса веществ.

Например, 5 %-ный раствор нингидрина для выявления белков, пептидов и аминокислот (для обнаружения пота, крови и др. объектов биологической природы), для наркотических средств 10 % – водный раствор гексацианоферрат II, 10 % – водный раствор гексацианоферрат II калия (желтая кровяная соль) является детектирующим реагентом для катионов Cu^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , превращая их после пропитки пластинки в зоны оранжевого, синего, сиреневого и желтого цвета.

6. *Оценка результатов.* В зависимости от поставленной задачи оценка результатов будет различной. В методическом руководстве для каждой предложенной методики формулируется цель работы.

Основным параметром в ТСХ является *величина относительной хроматографической подвижности* R_f , которая характеризует подвижность веществ на слое адсорбента пластинки. На рис. 6 показано, как рассчитывается R_f на полученной хроматограмме.

С помощью линейки измеряют расстояние от стартовой точки до центра выявленного пятна – величина (a) – расстояние, которое веще-

ство проходит по пластине. Затем измеряют расстояние от стартовой точки до линии фронта – величина ($\bar{b}$) – расстояние, на которое продвинулся элюент по пластинке. Величина R_f определяется как отношение расстояния, пройденного пятном (хроматографической зоной) от точки нанесения (a), к расстоянию, пройденному фронтом растворителя ($\bar{b}$), т. е. $R_f = a / \bar{b}$.

Из рис. 6 видно, что для образца (1) $R_f = 0$. Это вещество не перемещалось по пластинке. Для вещества (2) $R_f \approx 1$. Это вещество быстро перемещалось по пластинке. Для вещества (3) $R_f = 0.5$. Это вещество имеет среднюю подвижность. Таким образом, R_f вещества при ТСХ находится в пределах от 0 до 1.

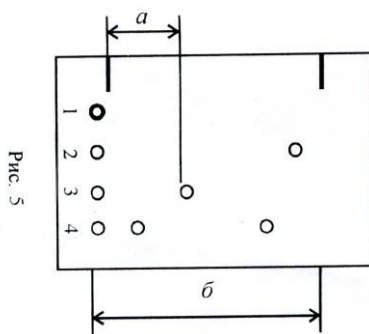


Рис. 6. Расчет относительной хроматографической подвижности

Для того чтобы методом ТСХ определить наличие в исследуемой пробе конкретного компонента, необходимо иметь стандарт (свидетель).

Стандарт («свидетель») – это вещество, которое наносят для контроля на пластину одновременно с анализируемой пробой, в которой хотят найти это вещество. Если стандарт («свидетель») и какой-либо компонент пробы двигаются на одном уровне (имеют одинаковые значения относительной хроматографической подвижности R_f), значит, в исследуемой пробе содержится компонент одинакового структурно-группового состава со «свидетелем». На рис. 7 показано, как можно провести идентификацию вещества в анализируемой пробе по стандарту. Видно, что в пробе 1 содержится стандарт («свидетель»), нанесенный в точке 4, а пробы 2 и 3 не содержат стандартное вещество.

Определение R_f хроматографических зон разделенных компонентов и сравнение их со значениями R_f стандартных (эталонных) образцов используют для установления структурно-группового состава исследуемой пробы.

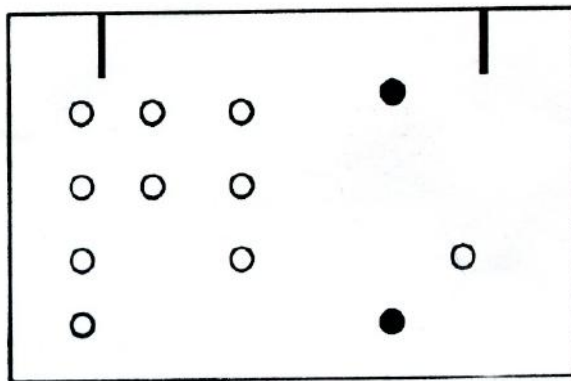


Рис. 7. Получение хроматографического разделения в присутствии «свидетеля»

В ТСХ для установления компонентов веществ часто используют метод с внутренним стандартом (отношение R_f целевого компонента к R_f какого-либо стандартного соединения).

Для полной уверенности в правильности установления состава вещества следует использовать специфические реагенты, а еще лучше – провести установление состава вещества другими независимым методом (газовая хроматография, ИК – или ЯМР – спектроскопия и др.). В последнем случае результаты установления состава вещества целевых компонентов могут быть практически однозначными, а информативность может достигать 90–100 %.

Эффективность разделения можно повысить с помощью *двухмерной хроматографии*. В этом случае пробу наносят в виде отдельного пятна в нижний угол пластинки и проводят разделение в одном направлении. Затем пластинку вынимают из камеры, высушивают, после чего хроматографируют в другой системе растворителей в направлении, перпендикулярном первому.

В экспертной практике ТСХ используется при предварительном исследовании наркотических средств, в исследовании материалов документов, лекарственных средств, спиртосодержащих жидкостей и т. д.

Благодаря возможности объединения процесса высокоселективного разделения с последующим высокочувствительным детектированием хроматография стала самым распространенным методом анализа сложных смесей, позволяющим определять до 1000 веществ в одной пробе с пределом обнаружения на нанограммовом и фемтограммовом уровнях.

Лекция 19. Биологические методы исследования объектов судебной экспертизы

Вопросы, рассматриваемые на лекции

1. Понятие биологических методов.
2. Основы и возможности метода ДНК-анализа.
3. Ольфакторный метод исследования запаховых следов в судебной экспертизе.
4. Сравнение биологических методов, применяемых в судебной экспертизе.

1. Понятие биологических методов

Биологические методы анализа основаны на том, что для жизнедеятельности – нормального функционирования, развития и размножения живых организмов необходимы строго определенные среда и условия, в том числе ее элементный (химический) состав.

При изменении этого состава, например, при исключении из среды какого-либо компонента или введении дополнительного (определяемого) соединения, а также при изменении количественного состава веществ живой организм через какое-то время, а иногда практически сразу, подает соответствующий ответный сигнал: реагирует на изменение условий существования – внешнее или внутреннее вмешательство.

Установление связи между характером или интенсивностью ответного сигнала организма и количеством введенного в среду или исключенного из среды компонента служит для его обнаружения и определения.

Аналитическими индикаторами в биологических методах являются различные живые организмы, их органы, ткани, физиологические функции и т. д., т. е. биологические методы основаны на использовании биологических систем в качестве детекторов.

В роли индикаторного организма могут выступать микроорганизмы, беспозвоночные, позвоночные, а также растения.

От характера определяемого вещества зависит выбор того или иного индикаторного организма.

Его ответный сигнал на изменение химического состава твердой, жидкой или воздушной сред может быть самым разнообразным: изменение характера поведения, интенсивности роста, скорости метаморфоза, состава крови, биоэлектрической активности органов и тканей; нарушение функций органов пищеварения, дыхания, размножения.

Обобщенным показателем эффективности действия определяемого соединения на индикаторный организм является либо выживаемость, либо летальный исход.

Все вещества по отношению к живым организмам можно условно разделить на: 1) жизненно необходимые; 2) токсичные; 3) физиологически неактивные. Очевидно, только в двух первых случаях можно ожидать сравнительно быструю ответную реакцию организма (аналитический сигнал). Физиологически неактивные вещества могут дать отдаленный результат, либо их можно перевести в активное состояние в результате реакций взаимодействия с ингибиторами или стимуляторами процессов жизнедеятельности организмов.

Механизм взаимодействия определяемого химического соединения и индикаторного организма чрезвычайно сложен.

Выбор способа регистрации ответного сигнала зависит как от целей анализа, так и от механизма и степени взаимодействия определяемого вещества и индикаторного организма. Чем сложнее организм, тем большее число его жизненных функций можно использовать в качестве аналитических индикаторов, тем выше информативность биологических методов анализа. Ответный сигнал индикаторного организма на одно и то же вещество зависит от концентрации вещества. Малые концентрации обычно стимулируют процессы жизнедеятельности организма, высокие – угнетают. Существенное повышение концентрации биологически активного вещества приводит к летальному исходу.

Диапазон определяемых содержаний, предел обнаружения соединений биологическими методами зависят от направленности и продолжительности воздействия химического соединения на организм, температуры и pH среды, уровня организации индикаторного организма, его видовых и индивидуальных особенностей.

При использовании в качестве *индикаторов микроорганизмов* (бактерий, дрожжей, водорослей, плесневых грибов) наблюдают, как с изменением химического состава питательной среды изменяется динамика роста как отдельной клетки, так и их популяций в целом и сравнивают с контрольным опытом (табл. 1).

Интенсивность роста (размножения, угнетения) популяций оценивают чаще всего оптическими или электрохимическими методами.

Таблица 1

**Примеры использования биологических методов
для определения различных соединений**

Индикаторный организм	Определяемое соединение	$c_{\min}$, $P = 0,95$
Микроорганизмы		мкг/мл
Плесневые грибы	Hg(II)	0,02
	Cd(II)	0,5
	Tl(I)	5
	Zn(II)	0,01
	Cu(II)	0,001
	Mn(II)	0,0002
	Fe(II, III)	0,002
	HAsO_3^{2-}	100
	CrO_4^{2-}	10
Дрожжи	Эфиры тиосульфокислот	1 нг
	Элементоорганические соединения Pb(II), Sn(II)	3 нг — 4 мкг
Светящиеся бактерии	АТФ	10^{-17} — 10^{-15} М
Беспозвоночные		мкг/мл
Инфузории	Ag(I)	0,01
	Hg(II)	0,05
	Cu(II)	0,1
	Фурфурол, формальдегид	0,05
Личинки комаров	Пестициды	0,006 — 5
Позвоночные		нг/мл
Амфибии	Cu(II)	0,06

Ростовые реакции микроорганизмов, изменяющиеся под действием различных химических соединений, применяют в анализе природных и сточных вод.

С использованием бактерий и дрожжей разработан диффузионный метод обнаружения в сточных водах фенолов, нефтепродуктов, фосфорорганических соединений.

Чрезвычайно высокой чувствительностью определения ряда биологически активных соединений отличается *биOLUMИнесцентный метод* (используются различные виды морских светящихся бактерий и жуков-светляков).

Микроорганизмы широко применяют при контроле технологических процессов промышленного производства антибиотиков, вита-

минов и аминокислот. Следует отметить еще один важный аспект применения микроорганизмов в химическом анализе – концентрирование и выделение микроэлементов из разбавленных растворов.

Потребляя и усваивая микроэлементы в процессе жизнедеятельности, микроорганизмы могут селективно накапливать некоторые из них в своих клетках, очищая при этом питательные растворы от примесей. Например, плесневые грибы применяют для избирательного осаждения золота из хлоридных растворов.

Наиболее изученными с точки зрения использования в аналитических целях *беспозвоночных в качестве индикаторных организмов* являются инфузории. С их помощью возможно определение ионов тяжелых металлов. Поведенческие реакции, скорость размножения инфузорий используют для определения этанола, сахарозы, уксусной кислоты, хлоридов кальция и аммония, хлорида бария.

Водных беспозвоночных – ракообразных (чаще всего рачков, дафний) – широко применяют для оценки санитарно-гигиенического состояния вод. Наиболее исследованными и используемыми в качестве индикаторных организмов являются дафнии, используемые для критерия очистки воды.

Регистрацию изменения скорости и траектории движения насекомых, например личинок комаров, выживаемость организмов используют для определения остаточных количеств пестицидов в воде, экстрактах из почв, растительных и животных тканях.

Наблюдения под микроскопом формы и скорости движения червей, фиксирование продолжительности их жизни позволяют определять микроколичества ионов металлов.

Классическими индикаторными организмами *позвоночных*, широко используемыми для решения многих медико-биологических проблем, являются амфибии.

На изолированных органах и тканях лягушки либо на всем организме проверяется физиологическая активность многих фармацевтических препаратов. Биопотенциал нервной ткани можно использовать в качестве индикатора для определения концентрации кислот и щелочей, некоторых тяжелых металлов.

Биологические системы животных – макросматиков (крыс, собак, иных псовых) в качестве детекторов можно использовать для

анализа веществ разной природы: определяющих индивидуальный запах человека и животных, наркотиков, нефти и других целевых и сложных органических веществ и маркеров.

Органолептические методы предварительного исследования объектов судебной экспертизы также относятся к биологическим методам, в которых в качестве детекторов используются обонятельные, вкусовые, зрительные и тактильные рецепторные системы человека. Наряду с определением цвета запах является одним из дифференцирующих признаков многих объектов судебной экспертизы (например, нефтепродуктов и горюче-смазочных веществ). Данные, полученные с помощью органолептического исследования, достаточно субъективны и используются только для предварительной оценки или обнаружения объектов экспертизы.

Биосенсорные методы достаточно широко используются при исследовании объектов судебной экспертизы.

Собственно биологическими методами, основанными на изучении биологических свойств объектов с помощью биосенсоров и биологических систем, являются иммунологические методы, методы ДНК-анализа и биосенсорные методы, которые все более широко используются в научной и практической деятельности.

В настоящее время судебно-биологические методы экспертизы тканей и выделений человека вносят весомый вклад в установление лиц, причастных к совершению преступлений. При этом каждый из видов судебно-биологических экспертиз имеет свой предмет, объект, методы и средства исследования, по-своему решает задачу идентификации личности, характеризуется собственным подходом к оценке достоверности полученных результатов, а также только ему присущими ограничениями в применении.

2. Основы и возможности метода ДНК-анализа

Практика показывает, что с мест происшествий все реже изымаются «традиционные» следы (отпечатки пальцев, следы обуви и др.) и все чаще – невидимые микроследы, в том числе биологического происхождения (волосы, перхоть, микроследы слюны и крови и др.). Установление лица, оставившего биологические следы, занимает центральное место в криминалистической идентификации и в методике

расследования преступлений. В решении этой задачи основное значение отводится судебно-генетической экспертизе тканей и выделений человека, проводимой методом ДНК-анализа, который ведущими экспертами характеризуется как наиболее важный технологический прорыв со времени начала применения дактилоскопии. Метод ДНК-анализа уже доказал перспективность его использования в оперативно-разыскной деятельности и при расследовании преступлений.

Молекулярно-генетическая экспертиза или экспертиза методом ДНК-анализа довольно широко используется в криминалистике. Это обусловлено тем, что ДНК обладает индивидуальной специфичностью (совпадает только у монозиготных (однойяйцевых) близнецов), идентична в любой ядродержащей клетке в пределах одного организма, неизменна в течение жизни организма и после его смерти, генетические признаки передаются по наследству от родителей детям согласно законам наследования генетических признаков.

В настоящее время методы ДНК-анализа позволяют исследовать:

- практически все ткани и биологические жидкости организма человека;
- биологические объекты, загрязненные микрофлорой;
- микроколичества биологического материала;
- смешанные следы.

Объектом исследования является ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота – носитель наследственной информации обо всех биологических признаках организма. Данная структура локализуется в ядрах клеток и называется ядерной ДНК.

Молекула ДНК представляет собой биополимер – высокомолекулярное соединение, состоящее из нуклеотидов, последовательность расположения которых в отдельных структурах молекулы уникальна для каждого индивидуума.

В ядрах клеток живых организмов содержатся хромосомы, представляющие собой расположенные в линейной последовательности гены (единица наследственной информации). Совокупность всей наследственной информации организма (всех генов и межгенных последовательностей нуклеотидов) называется геномом (от слов ген + хромосома).

В каждой клетке человека около 30–40 тыс. пар генов. В генах записана информация о структуре молекул РНК (рибонуклеиновая кислота): матричной (кодирующей белки), рибосомной, транспортной и некоторых других видов так называемой некодирующей РНК.

Хромосомы составляют комплекс белка с ДНК. Каждый вид организмов обладает постоянным и характерным набором хромосом в клетке (кариотипом). Хромосомный набор человека состоит из 23 пар хромосом.

Каждая из них содержит отдельную линейную двухнитевую молекулу ДНК (рис. 1).

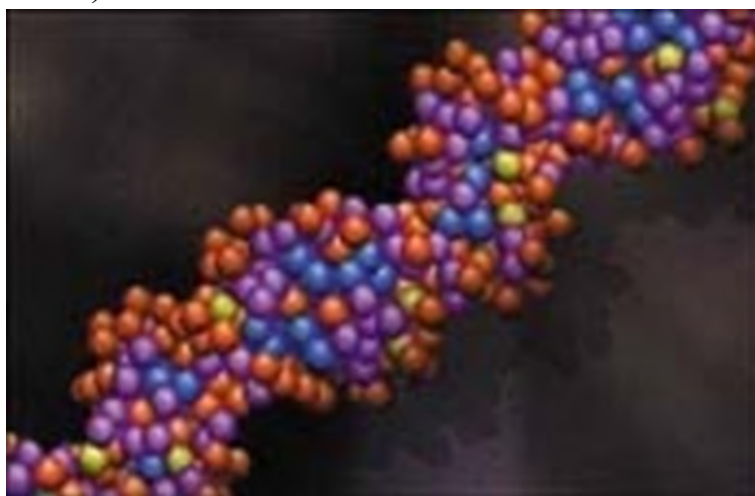


Рис. 1. Общий вид молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК)

Исключение составляет митохондриальная ДНК, т. е. ДНК митохондрий – клеточных органелл, которые находятся вне ядра и обладают собственным геномом (менее 1 % всей клеточной ДНК). Митохондриальным генам свойственен внехромосомный (цитоплазматический) тип наследования, поэтому митохондриальный геном передается в поколении только по материнской линии. В отличие от ядерной ДНК, содержащейся в клетке лишь в двух копиях, молекулы митохондриальной ДНК представлены в клетке в сотнях и тысячах копий.

Следовательно, пригодными для ДНК-анализа являются объекты, содержащие клетки.

Благодаря этому анализ митохондриальной ДНК позволяет исследовать образцы с минимальным количеством ДНК (например, костей, зубов и др.) и с выраженными изменениями (например, большими сроками давности до нескольких тысяч лет).

Однако исследование митохондриальной ДНК по сравнению с ядерной ДНК менее информативно, более трудоемко, имеет высокую

стоимость и поэтому не находит широкого применения в экспертной практике.

Из вышесказанного следует, что слюна и пот как секреты соответственно слюнных и потовых желез не являются объектами ДНК-исследования. Объектами в данном случае являются клетки эпителия, которые сопутствуют следам пота и слюны, букальный эпителий, выстилающий полость рта, – в случае следов слюны, клетки эпителия кожи – в случае следов пота. В свою очередь кровь, мышечная и костная ткань являются объектами исследования напрямую, так как собственно клетки данных тканей содержат ДНК. Стержень волоса содержит только митохондриальную ДНК, которая в криминалистических исследованиях имеет ограниченное применение (данный вид ДНК наследуется по материнской линии, т. е. передается от матери детям, и митохондриальный геном будет идентичным у всех родственников по женской линии: мать – дети – внуки от дочерей). Волосы, содержащие луковицу и её клеточные оболочки, содержат ядерную ДНК и пригодны для проведения ДНК исследования.

Молекула ДНК может быть условно разделена на множество участков. Некоторые из них имеют строение, одинаковое у всех людей, другие же обладают полиморфизмом (многообразием), существуя в популяции в различных вариантах. Некоторые полиморфные участки ДНК определяют (кодируют) строение определенных веществ, например антигенов. Некодирующие участки ДНК представляют наибольший интерес с точки зрения идентификации личности.

Полиморфные участки ДНК исследуются в рамках молекулярно-генетической экспертизы. Особенности полиморфных генетических признаков в том, что по отдельности они не являются уникальными для конкретного индивидуума, поскольку обычно присущи группе людей. Однако в совокупности они позволяют индивидуализировать объект исследования и решить основную задачу экспертизы – отождествления конкретного человека.

ДНК-анализ тканей и выделений человека

Наибольшее распространение в экспертной практике в настоящее время имеет метод анализ ДНК с использованием полимеразной цепной реакции (ПЦР). Метод ПЦР представляет собой циклический процесс амплификации (копирования) информативного (наиболее

подходящего для определения индивидуальности) участка последовательности ДНК, осуществляемый с помощью фермента ДНК-полимеразы.

Исследование ДНК состоит из следующих основных этапов:

- выделение и очистка ДНК из биоматериала;
- проведение ПЦР;
- анализа полученных последовательностей ДНК.

Данные свойства ДНК позволяют:

- устанавливать половую принадлежность следа;
- устанавливать происхождение следа, в том числе и смешанного, от конкретного лица;
- устанавливать биологическое родство.
- создавать криминалистический учет данных ДНК биологических следов изъятых с мест преступлений.

Применение ДНК-анализа в судебно-экспертных исследованиях

В качестве объектов ДНК-анализа используют следы крови, спермы, слюны, эпителия, а также фрагменты волос, костной ткани, зубов, ногтей, перхоти, различных органов.

В перспективе станет возможным по результатам ДНК-анализа с большой вероятностью устанавливать внешний облик человека – цвет волос, глаз, этнические и онтологические особенности человека (такие методы уже начинают применяться в практической работе).

В соответствии с Федеральным законом от 3 декабря 2008 г. № 242-ФЗ «О государственной геномной регистрации в Российской Федерации», с приказом МВД России от 10 февраля 2006 г. № 70 «Об организации использования экспертно-криминалистических учетов органов внутренних дел Российской Федерации» в экспертно-криминалистических подразделениях органов внутренних дел Российской Федерации (далее – ЭКП) функционируют региональные учеты данных геномной информации биологических объектов.

Геномная информация, содержащаяся в ФБДГИ (федеральная база данных геномной информации), используется в целях:

1) предупреждения, раскрытия и расследования преступлений, а также выявления и установления лиц, их совершивших (установление лиц, оставивших биологические следы на месте происшествия, фактов

принадлежности биологических следов, изъятых по нескольким преступлениям, одному и тому же неустановленному лицу);

2) розыска пропавших без вести граждан Российской Федерации, а также иностранных граждан и лиц без гражданства, проживающих или временно пребывающих на территории Российской Федерации;

3) установления личности человека, чей труп не опознан иными способами;

4) установления родственных отношений разыскиваемых (устанавливаемых) лиц.

Обязательной постановке на учет в ФБДГИ подлежит геномная информация:

- неустановленных лиц, биологический материал которых изъят в ходе производства следственных действий и иных мероприятий;

- неопознанных трупов, установить личность которых иными методами не представилось возможным;

- лиц, подлежащих обязательной государственной геномной регистрации;

- лиц, участвующих в добровольной государственной геномной регистрации.

3. Ольфакторный метод исследования запаховых следов в судебной экспертизе

Ольфакторный метод – это биологический биосенсорный метод исследования следовых количеств пахучих веществ с помощью обонятельного анализатора и рефлексии живых организмов (животных).

Теоретически можно использовать обоняние любых животных – макросматиков, обладающих развитым обонянием и высокоорганизованной нервной системой.

Однако в судебной экспертизе используют обоняние специально подготовленных служебных собак (хорошо дрессируются, удобны в содержании, сосуществуют с человеком, длительный срок использования). В биологии понятие «запах» определяется, как свойство биологических организмов воспринимать пахучие раздражители. Существует и другое равноправное определение понятия «запах» – это свойство попавших в воздушную среду веществ вызывать обонятельные ощущения у воспринимающих их живых организмов.

Обонятельные способности собак, выработанные в ходе эволюции, широко применялись и используются в оперативно-разыскных мероприятиях: поиске и задержании преступников по «горячим» следам, отыскании сокрытых предметов, для их «узнавания» по заданному собаке запаху проверяемых лиц (при проведении оперативного мероприятия – кинологической выборки). Специально подготовленные собаки, кроме того, в последние десятилетия используются сотрудниками органов внутренних дел при розыске сокрытых трупов (в том числе захороненных в земле), поиске оружия, наркотических средств и взрывчатых веществ. В экспертных исследованиях, помимо специальной подготовки собак на поиск индивидуального запаха человека, их применение регламентируется специально разработанными методиками, в которых животному отведена роль биодетектора индивидуализирующих человека пахучих веществ, т. е. биосенсорного средства ольфакторного исследования.

При этом ноу-хау российских методик судебной экспертизы запаховых следов человека состоит в том, что объективность и точность результатов, полученных с их использованием, ни коем образом не зависят от «субъективного мнения» используемых животных. Система научно обоснованных и апробированных специальных тестов и проверок, встроенных в само исследование, настолько совершенна, что позволяет давать точные и надежные результаты, отсеивая любые сбои рефлекторной и обонятельной деятельности используемых животных.

Используемые в ольфакторном исследовании методики разработаны в строгом соответствии с методологией научного эксперимента, в основе которой лежат контролируемость и воспроизводимость получаемых данных.

Источниками индивидуализирующих человека запаховых следов служат специфичные для каждого организма метаболиты (продукты клеточных обменных процессов) – *компоненты пота и крови субъекта*. Исследования 1986–2002 гг. совместно с учеными Российского Федерального Центра судебных экспертиз (РФЦСЭ) и Института Эволюционной морфологии и экологии животных РАН показали, что вещества, отвечающие за ольфакторную индивидуальность человека, относятся к кислым липидам с незамещенной карбоксильной группой.

Объектом экспертного исследования запаховых следов человека являются фиксированные на материальном носителе микроколичества следов крови и пота человека.

Субъектом экспертного исследования запаховых следов выступает эксперт, вооруженный необходимыми знаниями в области производства судебных экспертиз, владеющий методиками исследования запаховых следов человека и практическим опытом их применения в соответствующих ситуациях. То, что запахи в лабораторных экспериментах обнаруживаются не человеком, а специализированными собаками не придает им, как и применяемым в других исследованиях приборам, статус субъекта проводимого исследования. Именно специалисты выявляют изучаемые ольфакторные характеристики запаховых следов, оценивают адекватность сигнального поведения собак-детекторов, определяют для своих выводов необходимые и достаточные основания. Следует особо подчеркнуть, что собака-детектор в экспертизе используется специалистами лишь как одно из средств исследования, его инструментарий в детекции запахов наряду со специальным набором тестирующих (контрольных) запаховых объектов. Задачи препарирования объектов, выявления их ольфакторных характеристик, воспроизведение и анализ получаемых результатов являются задачами субъекта судебного исследования запаховых следов человека – эксперта.

Инструментами или средствами исследования являются собаки-детекторы и сравнительный ряд контрольных объектов, соответствующим образом подобранных в каждом конкретном случае запаховых проб.

Сравнительный ряд запаховых проб – множество (до 10) расставленных по окружности единообразных по внешнему виду специально подготовленных запаховых объектов. Эти объекты включают исследуемые и контрольные (вспомогательные) и контрольно-эталонные ольфакторные пробы.

Основной экспертной задачей, решаемой с помощью судебной экспертизы запаховых следов, является установление наличия запаховых следов конкретных лиц на объектах, обнаруженных в ходе проведения следственных действий. В качестве биодетекторов запаховых следов в идентификационном исследовании используются собаки,

специально обученные для поиска запаховых проб по сходству их запаховых составляющих с приоритетной ориентацией на выбор объектов по индивидуализирующим субъекта запаховым признакам.

Проводимые в ольфакторном исследовании эксперименты по дифференциации собаками-детекторами запаховых следов предусматривают управление животным со стороны специалиста, который приводит собаку в лабораторное помещение, дает ей для ознакомления к поиску запаховые пробы, обеспечивает процесс поиска животным искомого запаха в требуемом направлении с определенного объекта в сравнительном ряду, а также подкрепляет требуемое в исследовании поведение собаки-детектора.

Во избежание негативного влияния на поведение собак-детекторов со стороны управляющего ими специалиста дифференциация запаховых следов животными в ольфакторном исследовании проводится в условиях *«слепого опыта»*. Описанные условия предусматривают проведение исследования, при котором применяющего собаку эксперта не информируют о последовательности размещения объектов сравнительного ряда до проявления в нем сигнальных реакций собаки-детектора.

Места расположения исследуемых и вспомогательных (контрольных) объектов, направление и объект в ряду, с которого начинается движение с собакой-детектором, определяются другим экспертом.

Данные условия обеспечивают чистоту и независимость проводимых исследований от проявлений негативного влияния на поведение собак-детекторов управляющего ими специалиста.

В судебной экспертизе запаховых следов человека контроль над сигнальным поведением собак-детекторов не только не включает их выучку, но и вовсе не апеллирует к ней как к механизму обеспечения правильности получаемых в исследовании данных, что снимает с рассмотрения такой вопрос этической плоскости, как «доверие» к выучке собаки, который неприемлем при проведении научных исследований и получении достоверных результатов.

Контроль над сигнальным поведением собак-детекторов подразумевает создание оптимальных условий и тактических приемов их применения, методически обоснованный подбор вспомогательных (контрольных) объектов сравнительного ряда на каждом этапе прово-

димого исследования, использование сравнительных запаховых образцов проверяемых лиц, максимально свободных от посторонних пахучих включений, специальную проверку исследуемых объектов и сравнительных запаховых образцов проверяемых лиц на наличие в них аттрактивных пахучих компонентов, постоянную проверку работоспособности животных на каждый момент их применения и правильности их ориентации на выбор объектов по исследуемой пахучей характеристике, исключение негативного влияния на сигнальное поведение животных управляющего ими специалиста и других негативных факторов, способствующих образованию у применяемых собак-детекторов нежелательных условно-рефлекторных связей в ходе проведения исследования.

Таким образом, контрольную роль выполняют как условия проводимых экспериментов, так и сами модельные объекты сравнительного ряда с априорно известными эксперту пахучими характеристиками.

Анализ совокупного сигнального поведения биодетектора по отношению к контрольным запаховым объектам, воспроизводимость данных сигнальных реакций при измененных условиях эксперимента с одной, а затем с несколькими применяемыми собаками-детекторами позволяют объективно контролировать их реакции на исследуемый объект как адекватные условиям и задачам эксперимента в выявлении исследуемой ольфакторной характеристики запахового следа.

4. Сравнение биологических методов, применяемых в судебной экспертизе

Экспертиза запаховых следов человека занимает прочные позиции в практике раскрытия и расследования преступлений и имеет следующие преимущества перед другими видами биологических исследований.

1. Запаховые следы почти всегда имеются на местах совершения преступлений: на орудиях преступления, на оставленных, забытых, выброшенных или сокрытых преступником предметах. Стереть или уничтожить их преступникам, как правило, не удастся. Попытки маскировать запаховые следы, посыпая или поливая их различными пахучими или едкими средствами (табак, перец, кислоты и пр.), могут в некоторых случаях сбить с толку лишь служебно-разыскную собаку.

Повлиять данными действиями на результаты судебной экспертизы запаховых следов человека практически невозможно. Встречающиеся на исследуемых объектах посторонние примеси (горюче-смазочных и строительных материалов, ароматических веществ, следы пищевых продуктов, крови домашних животных и др.) также не препятствуют ольфакторному исследованию имеющихся на них запаховых следов человека. Поэтому запаховые следы представляют собой ценный и надежный источник доказательственной информации.

2. Уникальная чувствительность ольфакторного метода исследования позволяет идентифицировать субъекта по микроследам пахучих веществ его крови и пота, не содержащим клеточных структур, что недоступно другим биологическим методам анализа. Известно, что для успешной идентификации с использованием молекулярно-генетических методов исследования необходимо, чтобы ДНК подозреваемого лица присутствовала в следах биологического происхождения в определенном минимальном количестве. Но даже если это условие не соблюдается, концентрация в них пахучих веществ, которая не связана с наличием или отсутствием ДНК-содержащих структур, может оказаться достаточной для идентификации субъекта по его запаховым следам ольфакторным методом. На практике имеются примеры, когда деградация ДНК в высохших следах крови на объектах исследования приводила к невозможности результативного использования методов молекулярной генетики, но при этом оказывалось возможным получение достоверных результатов идентификации в ходе ольфакторного исследования. Кроме того, ученым и практикам хорошо известно, что количество ДНК в следах пота значительно (в десятки и сотни раз) ниже, чем в следах крови. Поэтому молекулярно-генетическое исследование следов пота преступника с наложением следов крови потерпевшего в трех из четырех случаев не дает результатов для расследования преступлений

Для экспертного исследования запаховых следов человека, напротив, наличие на объекте следов высохшей крови потерпевшего является фактором, способствующим сохранению от выветривания запаховых следов преступника (см. нижеприведенные примеры).

3. Высокая избирательность ольфакторного метода позволяет идентифицировать в смешанных запаховых следах, происходящих от

двух до 20 и более лиц, каждого субъекта, чьи пахучие вещества пота и крови имеются в такой смеси. Кроме того, данный метод экспертного исследования позволяет дифференцировать по запаховым следам монозиготных близнецов, что недоступно методам ДНК-анализа. Среди биологических методов исследования, применяемых в судебных экспертизах, такими возможностями обладает исключительно ольфакторный метод.

Российскими методиками экспертного исследования запаховых следов человека предусмотрено использование неразрушающих способов пробоподготовки. Для извлечения с объекта запаховых проб в современной экспертной практике используются специальные криогенно-вакуумные сборники пахучих веществ, которые позволяют извлекать их не только с поверхности предмета, но и из пор материала объекта исследования. При этом извлечение пахучих веществ не приводит к видоизменению объекта исследования и позволяет сохранить на нем всю имеющуюся следовую информацию: клеточный материал, папиллярные следы, волокна (без изменения их локализации), микротрассы и др.

4. Точность и надежность идентификации субъекта по запаховым следам, проводимой с использованием российских методик, сопоставимы с точностью и надежностью самых современных инструментальных методов анализа (вероятность ошибки идентификации составляет $1,02 \times 10^{-8}$), а иногда и значительно их превосходят. Достоверность результатов идентификации по запаховым следам обеспечивается научно обоснованной и апробированной системой тестов поведения собак-детекторов, последовательно реализуемой в процессе ольфакторного исследования. Это позволяет давать оценку каждому факту сигнального поведения применяемых собак-детекторов, отсеивая любые сбои («ошибки») рефлекторной и обонятельной деятельности используемых животных.

5. Время производства идентификационных ольфакторных экспертиз не превышает в среднем 4–7 рабочих дней, многообъектных и сложных – 7–14, что способствует получению доказательственной информации в сжатые сроки. Возможность получить в экспертной лаборатории запаховые пробы с представленных объектов исследования в течение 1,5–3 часов и сразу после этого вернуть следоносители в

распоряжение следствия для назначения исследований других видов также способствует ускорению процесса предварительного расследования.

6. Затраты на техническое оснащение одной лаборатории экспертизы запаховых следов человека без учета капитального строительства не превышают 2,5 млн руб., что, например, в 25–30 раз дешевле оснащения лаборатории ДНК-анализа основными средствами исследования. Ежегодные затраты на содержание данной лаборатории без учета денежного содержания сотрудников не превышают 500 тыс. руб. При этом одна такая лаборатория, в штате которой состоят не менее четырех экспертов, может производить до 400 экспертиз и исследований запаховых следов человека в год, удовлетворяя потребности органов предварительного расследования.

7. Исследование запаховых следов человека как в плане материально-технического, так и научно-методического обеспечения не зависит от зарубежных научных и технологических разработок, поставок оборудования и расходных материалов. Ольфакторный метод при кажущейся простоте применяемых средств обладает высокой наукоемкостью в отношении объема и качества используемых специальных знаний.

При своевременном и правильном изъятии объектов исследования эффективность судебной экспертизы запаховых следов человека достаточно высока – каждое третье идентификационное экспертное исследование по изъятим запаховым следам человека способствует установлению лиц, причастных к совершению преступлений.

Таким образом, ольфакторное экспертное исследование является эффективным средством установления личности преступника даже в тех случаях, когда применение других методов идентификации с использованием следов человека биологического происхождения оказывается невозможным.

В процессе развития метода ДНК-анализа возрастает его чувствительность (снижается количество биологического материала, минимально необходимое для результативной идентификации). В то же время прогресс по избирательности данного метода, его помехоустойчивости не столь значительный. Это налагает ряд ограничений на использование методов молекулярно-генетической идентификации

(например, при исследовании предметов общего пользования, объектов, изъятых с мест массового скопления людей, несущих на себе вещества-ингибиторы ПЦР и других), а также предъявляет особые требования к работе с вещественными доказательствами при их обнаружении, упаковке и изъятии.

Ольфакторный метод исследования запаховых следов человека характеризуется сочетанием высокой чувствительности, избирательности и помехоустойчивости и с перечисленными выше ограничениями, характерными для использования метода ДНК-анализа, не сталкивается.

В то же время использование ольфакторного метода для идентификации человека по следам его тканей и выделений имеет ряд других ограничений.

По сравнению с методом ДНК-анализа круг пригодных для такого исследования объектов значительно уже. Так, для ДНК-анализа пригодны следы широкого спектра тканей и выделений человека, поскольку все они содержат клеточные структуры (следы выделений почти всегда загрязнены клетками эпителия), а для ольфакторных исследований пригодны исключительно следы пота и крови человека. Никакие другие биологические следы (слюна, моча, сперма), индивидуализирующие человека, пахучих компонентов не содержат.

Имеются также ограничения и по качеству и количеству вещества, необходимого в качестве образцов для сравнения при производстве ольфакторной судебной экспертизы. Так, для молекулярно-генетического анализа иногда достаточно единичных молекул ДНК, количество которых может быть многократно увеличено применением полимеразной цепной реакции – ПЦР (если в исходном объекте отсутствуют вещества-ингибиторы ПЦР). Хотя в экспертизе запаховых следов человека объектом исследования являются летучие компоненты плазмы крови и пота человека, не содержащие клеточных структур, причем в сверхмалых концентрациях, даже не поддающихся количественному приборному анализу, то в качестве образцов для сравнения для экспертизы данного вида в настоящее время используются образцы крови в количестве не менее 0,07 г (одна капля крови).

Исследование запаховых следов человека также ограничено исходным количеством пахучих веществ, получаемых с исследуемых

объектов, которые не могут быть размножены или восполнены (как в случае с ПЦР в ДНК-анализе), что закономерно ставит ограничения на возможность их многократного использования в ходе производства дополнительных и особо сложных (многообъектных) экспертных исследований. Так, например, исследовать объект на наличие в нем запаховых следов, происходящих от 20–30 лиц вполне возможно без существенных потерь исследуемых запаховых следов (что подтверждается экспертной практикой), тогда как при значительном увеличении указанного количества проверяемых лиц исходные запаховые пробы могут быть утрачены в процессе самого ольфакторного исследования. По этой же причине невозможно проводить различные учеты запаховых следов (любая проверка массива проб связана с утратой исходных пахучих веществ, потому невосполнима).

Кроме того, для ольфакторного исследования, в отличие от ДНК-анализа, практически непригодны объекты, извлеченные из захоронений, побывавшие длительное время в земле, воде, подвергшиеся процессам разложения или воздействию высоких температур.

Таким образом, исследование ДНК дает исключительную возможность использования в идентификации костных останков, следов слюны, спермы, в которых не содержатся пахучие вещества, индивидуализирующие человека.

В то же время ольфакторное экспертное исследование позволяет установить происхождение запаховых следов человека в тех случаях, когда имеются факторы, препятствующие результативному применению молекулярно-генетических методов (отсутствие ДНК-содержащих структур в следах биологического происхождения, происхождение следов пота и крови от двух и более лиц, проведение сравнительного исследования по образцам, полученным от гомозиготных близнецов).

Развитие методов исследования ДНК и запаховых следов человека в экспертной практике ЭКЦ МВД России и экспертно-криминалистических подразделениях территориальных органов МВД России с самого начала шло «рука об руку» и было наиболее интенсивным в тех регионах, где их результаты были востребованы практикой борьбы с преступностью.

Судебная экспертиза запаховых следов человека характеризуется присущими только ей объектом, предметом и методом исследований,

поэтому исследования ДНК и запаховых следов человека не заменяют, а взаимно дополняют друг друга как в масштабе деятельности по раскрытию и расследованию преступлений в целом, так и в рамках проведения конкретных экспертных исследований по уголовным делам. В последние годы также большое внимание уделяется диагностическим исследованиям, позволяющим получить информацию о человеке, оставившем след, в отсутствии подозреваемых лиц.

В настоящее время наиболее востребованной следственной и экспертной практикой остается диагностическое исследование по выявлению на объектах, изъятых с места происшествия, запаховых следов человека как биологического вида. Этот вид диагностического исследования позволяет не только оценить пригодность объекта для проведения дополнительных исследований, но также служит для обеспечения полноты исследования в идентификационных ольфакторных экспертизах, завершившихся с отрицательным или вероятным выводом. Кроме указанного диагностического исследования, имеется ряд диагностических методик по определению пола, возрастной группы, давности образования следа, которые уже разработаны и успешно используются в экспертной практике. В этом отношении представляется весьма перспективным дальнейшее развитие диагностических ольфакторных исследований, направленных на выявление по запаховым следам признаков некоторых психических заболеваний, например шизофрении, в том числе в латентной стадии, что позволяет говорить о перспективности разработки экспертных методик по установлению у лица, оставившего след, некоторых заболеваний.

Таким образом, ольфакторное исследование следов тканей и выделений человека в настоящее время является современным и результативным средством идентификации человека и в перспективе также может быть использовано для выявления диагностических признаков личности и условий образования запаховых следов.

Библиографический список

Анчабадзе Н. А., Коновалов Г. Г., Кочубей А. В., Симаков В. П. Методы и средства экспертных исследований : курс лекций. – Волгоград : Волгогр. акад. МВД России, 2001.

Бермант А. Ф. Краткий курс математического анализа для втузов / под ред. И. Г. Арамановича. – М., 1961.

Верзейм Джейн, Окслейд Крис, Ватерхаус Джон. Химия : справочник / пер. И. П. Чихачевой. – М. : Росмен, 1995.

Виноградова Н. И. Методы и средства экспертных исследований : учебник. – М. : Московский университет МВД России, 2012.

Виноградова Н. И. Тонкослойная хроматография : пособие. – М. : Московский университет МВД России, 2008.

Виноградова Н. И., Матвиенко Е. А. Естественные научные методы судебно-экспертных исследований : курс лекций. – М. : Щит-М, 2013.

Геккелер К. Е., Экштайн Х. Аналитические и препаративные лабораторные методы : справ. изд. / пер. с нем. – М. : Химия, 1994.

Глинка Н. Л. Общая химия – М. : Кнорус, 2010.

Дж. Бранд, Г. Эглинтон. Применение спектроскопии в органической химии / пер. с англ. – М. : «Мир», 1967.

Другов Ю. С., Родин А. А. Экологическая аналитическая химия : учебное пособие для вузов. – СПб., 2002.

Жданов Л. С., Маранджян В. А. Курс физики : учебник. Ч. 1, 2. – М. : Наука, 1987.

Зинин А. М., Майлис Н. П. Судебная экспертиза : учебник. – М. : Право и закон, 2002.

Зинкевич Э. П., Бродский Е. С., Моисеева Т. Ф., Габель Ю. Б. Летучие компоненты выделений поверхности кожи человека // Сенсорные системы. Т. 11. № 1. – М. : Наука, 1997.

Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Т. 3. – М. : Наука, 2005.

Использование запаховой информации с мест происшествий в раскрытии и расследовании преступлений : сб. науч. тр. – М. : ЭКЦ МВД России, 1992.

Исследование запаховых следов человека : учебное пособие / под ред. Т. Ф. Моисеевой, В. Г. Савенко. – М. : ЭКЦ МВД России, 2008.

Кабардин О. Ф. и др. Факультативный курс физики : пособие для учащихся. – М. : Просвещение, 1975.

Кабардин О. Ф. Физика : справочные материалы. – М. : Просвещение, 1985.

Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. – М. : Наука, 1970.

Киреев В. А. Краткий курс физической химии. – М. : Мир, 1985.

Колмогоров А. Н., Абрамов А. М., Вейц Б. Е. и др. Алгебра и начала анализа : учебное пособие / под ред. А. Н. Колмогоров. – М. : Просвещение, 1988.

Ландсберг Г. С. Элементарный учебник физики. Т. 1, 3. – М. : Физматлит, 2017.

Митричев В. С., Хрусталева В. Н. Основы криминалистического исследования материалов, веществ и изделий из них. – СПб. : Питер, 2003.

Моисеева Т. Ф. Комплексное криминалистическое исследование потожировых следов человека : монография. – М. : Городециздат, 2000.

Моисеева Т. Ф. Методы и средства экспертных исследований : учебник. – М. : Московский психолого-социальный институт, 2006.

Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б., Чаругин В. М. Физика : учебник. – 23-е изд. – М., 2014.

Основы аналитической химии. Кн. 1. Общие вопросы. Методы разделения : учебник для вузов / под ред. Ю. А. Золотова. – М. : Высшая школа, 1996.

Основы аналитической химии. Кн. 2. Методы химического анализа : учебник для вузов / под ред. Ю. А. Золотова. – М. : Высшая школа, 2006.

Основы судебной экспертизы. Ч. 1. Общая теория. – М. : РФЦСЭ, 1997.

Панфилов П. Б. Основные принципы обеспечения достоверности исследований запаховых следов человека с использованием собак-детекторов в судебной экспертизе. – М. : Юрлитинформ, 2007.

Перышкин А. В. Курс физики : учебник. Ч. 3 – М. : Просвещение, 1968.

Подгорнова И. И. Молекулярная физика в средней школе : пособие для учителей. – М. : Просвещение, 1970.

Полеес М. Э., Душечкина И. Н. Аналитическая химия : учебник. – М. : Медицина, 1994.

Практикум по коллоидной химии и электронной микроскопии / под ред. С. С. Воюцкого и Р. М. Панич. – М. : Химия, 1974.

Просыпайко В. И., Козырев Н. А., Логачева Б. В. Химические методы анализа : учеб. пособие для хим.-технол. вузов. – М. : Высш. школа, 1989.

Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров / пер. с англ. Ч. 2. – М. : Мир, 1983.

Саламатин А. В., Сергиевский Д. А., Панфилов П. Б., Чеkunчикова Н. В., Панфилова З. Ю. Работа с запахowymi следами с учетом комплексного характера следовой информации : методические рекомендации. – М. : ЭКЦ МВД России, 2011.

Селиванов Н. А. Математические методы в собирании исследовании доказательств. – М. : Юридическая литература, 1974.

Словарь основных терминов судебных экспертиз. – М. : ВНИИСЭ, 1980.

Старовойтов В. И., Сулимов К. Т., Гриценко В. В. Запаховые следы участников происшествия: обнаружение, сбор, организация исследования : методические рекомендации. – М. : ЭКЦ МВД России, 1993.

Старовойтов В. И., Панфилов П. Б. Кинологическая выборка и судебная экспертиза запаховых следов человека // Вестник МВД России. – 2002. – № 5 (64).

Стегнова Т. В., Сулимов К. Т., Старовойтов В. И., Гриценко В. В. Установление некоторых диагностических признаков человека по запаховым следам : методические рекомендации. – М. : ЭКЦ МВД России, 1996.

Столяров Б. В., Савинов И. М., Витенберг А. Г. и др. Практическая газовая и жидкостная хроматография : учебное пособие. – СПб., 1998.

Стыскин Е. Л., Ициксон Л. Б., Брауде Е. В. Практическая высокоэффективная жидкостная хроматография. – М. : Химия, 1986.

Типовые экспертные методики исследования вещественных доказательств / под ред. А. Ю. Семенова; общ. ред. канд. техн. наук В. В. Мартынова. – М. : ЭКЦ МВД России, 2012.

Указание Председателя Следственного комитета Российской Федерации от 11 августа 2011 г. № 8/208 «О совершенствовании организации использования запаховых следов человека при расследовании преступлений».

Физика: Толковый словарь школьника и студента / под ред. К. Гомонова, В. Н. Козлова. – М. : Проспект, 2010.

Чмутов К. В. Хроматография. – М. : Химия, 1978.

Шляхов А. Р. Правовые и методологические проблемы судебной экспертизы : сборник научных трудов. – М. : ВНИИСЭ, 1974.

Энциклопедия судебной экспертизы / под ред. Т. В. Аверьяновой, Е. Р. Россинской. – М. : Юрист, 1999.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики : учебник. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003.

*Виноградова Наталья Ивановна,
кандидат химических наук, доцент;*

Матвиенко Елена Анатольевна

ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЕ МЕТОДЫ СУДЕБНО-ЭКСПЕРТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В авторской редакции
Корректор *Титова В. П.*
Компьютерная верстка *Кухаревой Е. А.*

Подписано в печать 10.12.2018 г.
Заказ №1985

Формат 60×84 1/16
Цена договорная

Тираж 62 экз.
Объем 14,65 уч.-изд. л.
21,04 усл. печ. л.

Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя
117997, г. Москва, ул. Академика Волгина, д. 12