

1. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ (МОЛЕКУЛЯРНАЯ АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ). ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Метод абсорбционной спектроскопии (спектрофотометрия) относится к оптическим методам анализа и основан на поглощении молекулами вещества излучений в ультрафиолетовой (УФ), видимой и инфракрасной (ИК) областях электромагнитного спектра.

Электромагнитное излучение может быть охарактеризовано следующими параметрами: длиной волны λ , частотой или волновым числом ν и соответствующей им энергией E излучения.

Длина волны λ - это расстояние между двумя максимумами волны. Основными единицами измерения длин волн являются микрометр (мкм) и нанометр (нм): $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$.

Частота излучения ν представляет собой число колебаний в одну секунду. Она равна отношению скорости света к длине волны:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Частота излучения измеряется в обратных секундах с^{-1} или герцах (Гц).

Волновое число показывает сколько длин волн приходится на 1 см пути излучения в вакууме:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

Размерность волнового числа см

Энергия излучения E измеряется в электрон-вольтах, эВ:

$$E = h\nu$$

Оптический спектр включает ультрафиолетовую (УФ), видимую и инфракрасную (ИК) области (тал. 1.1).

Область оптических спектров

Спектральная область	Длина волны, нм	Энергия E, эВ
Ультрафиолетовая: вакуумная	200	
близкая	200-400	10 - 10
Видимая	400-700	10 – 1
Инфракрасная: близкая	700-1500	
фундаментальная	1500-75000	1 - 10
далекая	75000-1000000	

Поглощение электромагнитной энергии молекулами связано с переходами электронов (УФ и видимая область) с молекулярных орбиталей с меньшей энергией на орбитали с более высокой энергией. Помимо этого, часть энергии возбуждает колебательные (ИК) и вращательные уровни (микроволны) в молекуле. Такое возбуждение молекул приводит к появлению спектров с широкими (1-50 нм) полосами поглощения по сравнению с атомными спектрами, в которых возбуждаются только электронные уровни и спектры поглощения ($\Delta\lambda \ll \text{нм}$) не уширены за счет колебательных и вращательных движений.

1.1. Методы фотометрического анализа

Фотометрический анализ можно производить спектрофотометрическим или фотоэлектроколориметрическим методами.

Фотоэлектроколориметрия - анализ на основе измерения поглощения окрашенными растворами не монохроматического излучения видимой области спектра. Измерения производят с помощью фотоэлектроколориметров, снабженных узкополосными светофильтрами с шириной полосы пропускания 20-40 нм, если исследуемое вещество не окрашено, его можно перевести в окрашенное соединение, проведя химическую реакцию с определенными реагентами (фотометрическую аналитическую реакцию).

Спектрофотометрия - анализ на основе измерения поглощения монохроматического излучения (ширина полосы пропускания 1-3 нм) ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра. Такие измерения проводят с помощью спектрофотометров, где в качестве монохроматизаторов используются диспергирующие призмы и дифракционные решетки.

Фотометрический метод имеет низкий предел обнаружения ($10^{-5} - 10^{-6}$ М), достаточно высокую точность. Относительная ошибка определения этими методами составляет примерно 1-2%.

1.2. Основной закон светопоглощения (закон Бугера-Ламберта-Бера)

Между количеством поглощенной световой энергии, толщиной слоя поглощающего вещества и его количеством существует определенная зависимость, выраженная основным законом светопоглощения - законом Бугера-Ламберта-Бера. Основной закон светопоглощения выведен для монохроматического излучения (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Прохождение света через окрашенный раствор

Уменьшение интенсивности света, прошедшего через раствор, характеризуется величиной пропускания и обозначается Т:

$$T = \frac{J}{J_0}$$

где J - интенсивность светового потока, прошедшего через раствор;

J_0 - интенсивность падающего на раствор светового потока.

Пропускание T изменяется от 0 до 100%.

Уменьшение интенсивности света при прохождении его через раствор подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$J = J_0 \cdot 10^{-\epsilon l C}$$

или в логарифмической формуле:

$$\lg \frac{J_0}{J} = \epsilon l C$$

где: C - концентрация вещества, поглощающего свет;

l - толщина слоя раствора, поглощающего свет;

ϵ - коэффициент поглощения;

J_0 - интенсивность падающего на раствор светового потока;

J - интенсивность прошедшего через раствор светового потока.

Величина $\lg \frac{J_0}{J}$ является важной характеристикой раствора, поглощающего свет, и называется оптической плотностью (иногда погашением или экстинкцией), обозначается A . Оптическая плотность изменяется от 0 до ∞ ;

$$A = \epsilon l C; \quad \lg \frac{J_0}{J} = -\lg \frac{J}{J_0} = -\lg T; \quad A = -\lg T.$$

Общий закон светопоглощения - оптическая плотность раствора пропорциональна произведению концентрации поглощающего свет вещества на толщину слоя раствора.

Физический смысл закона - растворы одного и того же вещества при одинаковой концентрации и толщине слоя поглощают равные количества световой энергии.

Если $C = 1$ моль/л, $l = 1$ см, то $A = \epsilon$. Следовательно, коэффициент светопоглощения, называемый при этих значениях C и l молярным коэффициентом поглощения, равен оптической плотности одномолярного раствора при толщине слоя 1 см. Если раствор вещества поглощает в

видимой области, величина ε характеризует интенсивность окраски данного вещества в растворе. Значение ε для различных веществ колеблется от единицы до сотен тысяч.

Молярный коэффициент светопоглощения зависит от природы вещества, поглощающего свет, от длины волны проходящего света, от температуры и не зависит от концентрации и толщины слоя раствора, т.е. при определенной длине волны и температуре, молярный коэффициент поглощения представляет собой постоянную для данного соединения величину и является индивидуальной характеристикой вещества, по которой можно судить о природе исследуемого вещества.

Чем больше ε , тем меньшие количества вещества могут быть определены, исходя из того, что A можно измерить достаточно надежно если $A > 0,5$, $C = A/\varepsilon_{\lambda}$. Таким образом, для повышения чувствительности определения необходимо выбирать такие реакции, в результате которых образуются соединения, обладающие большим значением ε .

В реальных условиях определяют кажущееся значение молярного коэффициента поглощения ε . Определение истинного значения ε требует выполнения ряда условий и специальных методов расчета.

1.3. Спектр светопоглощения (спектральная характеристика вещества)

Спектром поглощения называют зависимость оптической плотности раствора от длины волны. Спектр поглощения является индивидуальной характеристикой вещества, т.к. зависит от молекулярного строения данного вещества. Его обычно представляют в виде графика (рис. 1.2), на котором по оси абсцисс откладываются длины волн или частоты. Ординатами спектра поглощения могут быть оптические плотности (A), логарифмы оптических плотностей, молекулярные коэффициенты светопоглощения (ε) или логарифмы молекулярных коэффициентов светопоглощения (рис. 1.3).

Основной характеристикой спектральной линии или участка спектра является их поглощение в спектре. Оно определяется длиной волны или частотой. Полоса поглощения характеризуется тремя основными параметрами: максимальным значением коэффициента светопоглощения ε , длиной волны λ_{max} , соответствующей ε_{max} и полушириной спектра (ab) (рис. 1.3). Чем больше значение ab , тем труднее проводить анализ смеси из-за наложения полос поглощения, соответствующих отдельным компонентам смеси.

Спектры поглощения одного и того же вещества в координатах $A - \lambda$ имеют одинаковую форму независимо от толщины слоя раствора или концентрации вещества в растворе (рис. 1.4) и характеризуются максимумом при одной и той же длине волны.

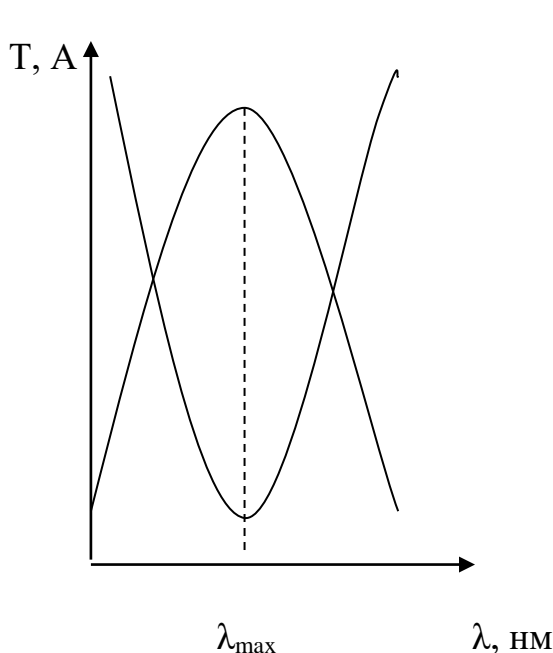


Рис. 1.2. Спектр светопоглощения вещества (спектральная характеристика)

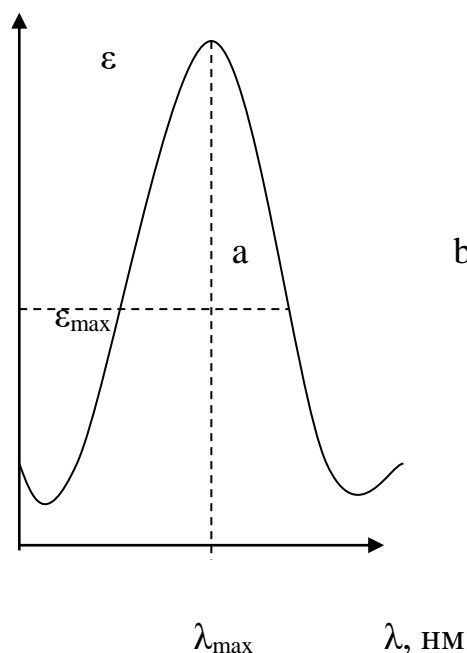


Рис. 1.3. Параметры, характеризующие полосу поглощения в спектре.

Принимая во внимание, что ε не зависит от концентрации раствора

и толщины поглощающего слоя, спектры поглощения более оправданно представлять в координатах $\varepsilon - \lambda$. Однако, обычный спектр поглощения представляют в виде графика $A = f(\lambda)$. Это простейший способ, т.к. значения A и λ снимают непосредственно со шкалы прибора, в автоматических спектрофотометрах зависимость $A = f(\lambda)$ записывается автоматически.

Количественный анализ по светопоглощению следует проводить при длине волны λ макс, отвечающей ε макс, т.к. ошибка определения концентрации в этом случае наименьшая.

Если длина волны максимума поглощения по каким-либо причинам не доступна для использования, то измерения проводят при длине волны возможно более близкой к максимуму. Обычно цвет светофильтра соответствует тому участку спектра, который этим светофильтром пропускается. Чувствительность определения повышается с увеличением степени монохроматизации потока световой энергии.

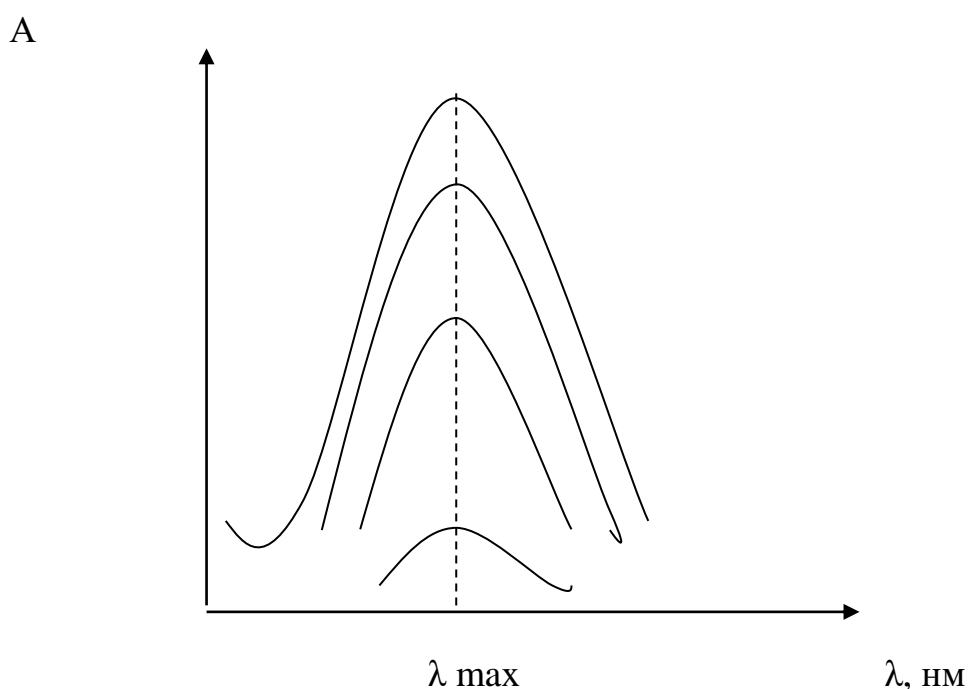


Рис. 1.4. Зависимость оптической плотности от длины волны при различных концентрациях вещества в растворе ($C_4 > C_3 > C_2 > C_1$).

В зависимости от ширины полосы выделяемого спектра (или другими

словами - монохроматизации применяемого света), в методах анализа по светопоглощению различают фотоколориметрию и спектрофотометрию.

Приборы, применяемые в фотоколориметрии - фотометры, фотоэлектроколориметры; в спектрофотометрии - различные типы спектрофотометров.

Спектрофотометры позволяют выделить монохроматизатором существенно более узкий диапазон длин волн, что позволяет подробно исследовать изменение оптической плотности (спектр) в узком диапазоне частот. Это обеспечивает большую чувствительность определения по сравнению с фотоколориметрией (рис. 1.5).

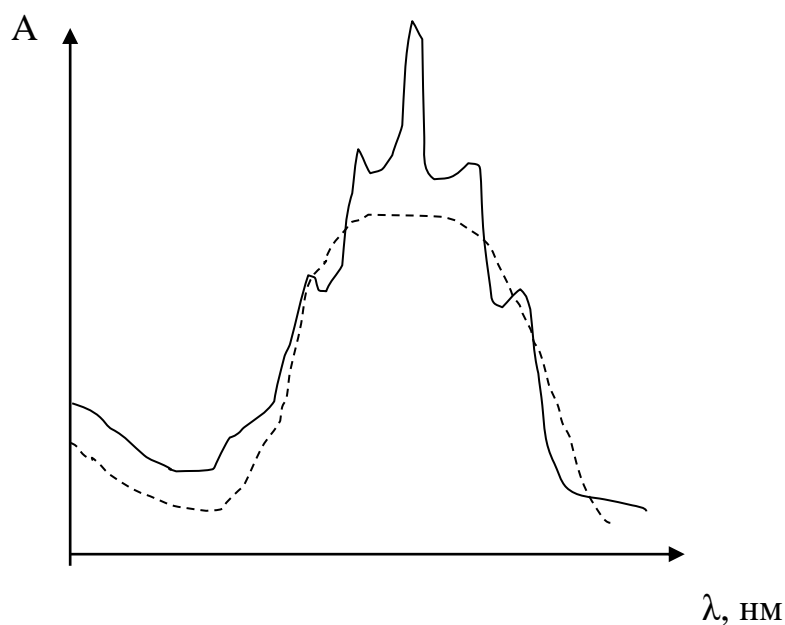


Рис. 1.5. Спектры светопоглощения раствора KMnO_4
————— - измеренный на спектрофотометре;
----- - полученный с помощью фотоколориметра

1.4. Отклонения от основного закона светопоглощения

Закон Бугера-Ламберта-Бера справедлив для монохроматического излучения. Поэтому одной из причин отклонения от линейной зависимости оптической плотности растворов от толщины поглощающего слоя и

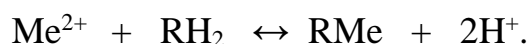
концентрации является недостаточная монохроматичность светового потока.

Другой причиной отклонения от закона Бугера-Ламберта-Бера является изменение состояния поглощающего вещества в растворе. Это возможно в следующих случаях:

1. В растворе присутствуют посторонние электролиты, вызывающие деформацию молекул и ионов окрашенных веществ (особенно комплексных), вследствие чего изменяется их светопоглощение.

2. При изменении концентрации раствора изменяется степень гидратации (сольватации), что вызывает при разбавлении непропорциональное изменение светопоглощения раствора.

3. Полнота образования окрашенного соединения зависит от pH среды. Например, под влиянием ионов H^+ нарушается равновесие



В кислой среде комплексное соединение становится менее устойчивым.

4. Изменяется степень диссоциации поглощающего вещества при разбавлении. Если имеем малоустойчивое комплексное соединение, то при изменении концентрации раствора линейная зависимость между A и C нарушается.

1.5. Закон аддитивности светопоглощения

В соответствии с этим законом при наличии в растворе нескольких поглощающих веществ, каждое из них будет давать свой аддитивный вклад в экспериментально измеряемую оптическую плотность смеси $A_{\text{смеси}}$:

$$A_{\text{смеси}}^{\lambda} = A_1^{\lambda} + A_2^{\lambda} + A_3^{\lambda} + \dots + A_n^{\lambda}$$

где A_1^{λ} , A_2^{λ} и т.д. - оптическая плотность вещества 1, 2 и т.д. при длине волны λ .

Так как $A = \epsilon l C$, то

$$A_{\text{смеси}}^{\lambda} = l (\epsilon_1^{\lambda} C_1 + \epsilon_2^{\lambda} C_2 + \epsilon_3^{\lambda} C_3 + \dots + \epsilon_n^{\lambda} C_n) = \sum \epsilon_i^{\lambda} l C_i$$

где C_1 , C_2 и т.д. - концентрация вещества 1, вещества 2 и т.д.; ε_1^λ , ε_2^λ и т.д. - молярный коэффициент поглощения вещества 1, вещества 2 и т.д. при длине волны λ .

Закон аддитивности позволяет определить вещество в присутствии других веществ без предварительного его выделения.

1.6. Качественный спектрофотометрический анализ

Поскольку спектрофотометр позволяет детально исследовать спектр поглощения, отражающий молекулярное строение вещества, его используют для идентификации и исследования строения молекул. Идентификация веществ может быть проведена на основе определения истинного значения (по соответствующим таблицам). Кроме того, можно идентифицировать исследуемое вещество, записывая его спектр поглощения в различных растворителях и сравнивая с соответствующими спектрами известных веществ. Существуют специальные атласы, в которых приведены спектры поглощения различных веществ.

Особый интерес представляют спектры поглощения в инфракрасной области. Главная область применения ИК-спектров - это установление строения молекул, характера связи между отдельными атомами. Это возможно благодаря тому, что группам атомов и различным функциональным группам (карбонильным, карбоксильным, гидроксильным и т.д.) соответствуют определенные полосы поглощения в ИК-спектрах (так называемые характеристические полосы). Эти характеристические полосы наблюдаются в определенной области ИК-спектра всех веществ, содержащих соответствующие функциональные группы.

Качественный анализ в инфракрасной области спектра в основном сводится к двум способам:

- снимают спектр неизвестного вещества и сравнивают со спектрами известных веществ, которые имеются в специальных каталогах и таблицах;

- в спектре неизвестного вещества отыскивают характеристические полосы, по которым можно судить о составе вещества.

1.7. Количественный анализ по светопоглощению

Проведя фотометрическую реакцию и получив окрашенное соединение, проводят следующие операции:

- измеряют оптические плотности раствора при разных длинах волн (светофильтрах), строят спектр поглощения ($A = f(\lambda)$), по спектру поглощения выбирают длину волны (светофильтр), соответствующую $\lambda_{\text{макс}} \approx \lambda_{\text{зфф. светофильтра}}$;

- поскольку измерение оптической плотности дает минимальную ошибку при абсолютном значении $A_{\text{опт}} \approx 0,5$, выбирают длину кюветы (толщину слоя) и разбавляют анализируемый раствор так, чтобы измеряемая оптическая плотность была вблизи указанного оптимального значения.

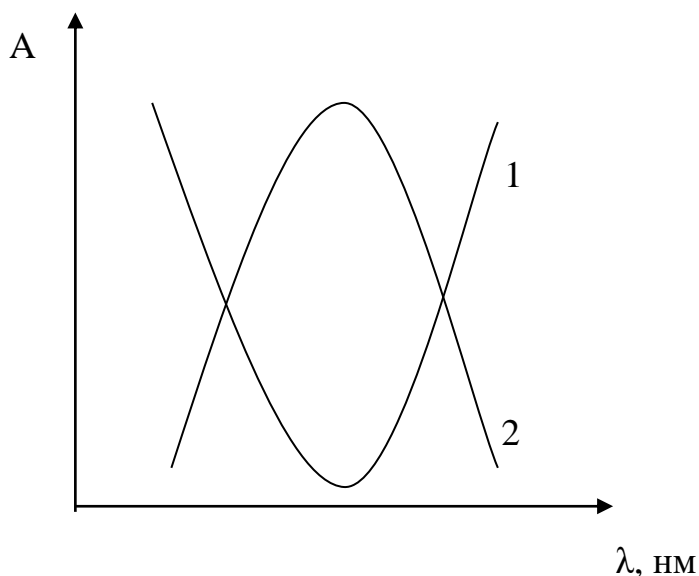


Рис. 1.6. Спектральные характеристики светофильтра (1) и исследуемого вещества (2)

Выбрав кювету с определенной толщиной слоя l и эффективную длину

волны $\lambda_{\text{макс}}$ (или светофильтр), далее одним из способов количественного фотометрического определения устанавливают концентрацию неизвестного вещества.

Для выделения определенного светового потока в фотоэлектроколориметрах применяют набор светофильтров. Светофильтры - это специальные стекла, пропускающие излучение определенного интервала длин волн (20-40 нм). Для количественного анализа исследуемого компонента по светопоглощению выбирают светофильтр, пропускающий излучение, которое исследуемый компонент поглощает (рис. 1.6), т.е. минимум поглощения света светофильтром должен совпадать с максимумом поглощения раствора.

В видимой части спектра воспринимаемый цвет есть результат избирательного поглощения веществом определенного участка сплошного спектра электромагнитного излучения (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Наблюдение цвета и соответствующие им поглощенные участки спектра

Интервал длин волн поглощенного излучения, нм	Цвет поглощенного излучения	Наблюдаемый цвет (дополнительный цвет)
380-420	Фиолетовый	Желто-зеленый
420-440	Синий	Желтый
440-470	Голубой	Оранжевый
470-500	Голубовато-зеленый	Красный
500-520	Зеленый	Пурпурный
520-550	Желто-зеленый	Фиолетовый
550-580	Желтый	Синий
580-620	Оранжевый	Голубой
620-680	Красный	Голубовато-зеленый
680-780	Пурпурный	Зеленый

Цвет светофильтра является дополнительным к цвету раствора и

соответствует участку спектра электромагнитного излучения, который этим светофильтром пропускается.

Условия проведения фотометрической реакции. В результате проведения фотометрической реакции исследуемый компонент переводят в окрашенное соединение:



Количество образовавшегося окрашенного соединения эквивалентно количеству исследуемого вещества. Поэтому количество исследуемого вещества определяют путем измерения светопоглощения полученного окрашенного соединения. Условия проведения фотометрической реакции должны обеспечивать полноту образования и устойчивость получающегося окрашенного соединения.

На образование окрашенного соединения существенное влияние оказывает рН. Для выбора оптимального значения рН необходимо изучить влияние рН на интенсивность окраски раствора при постоянных концентрациях исследуемого вещества и реагента. Интенсивность окраски измеряют при длине волны, соответствующей максимальному поглощению раствора. Значение рН выбирают таким образом, чтобы достигалось по возможности максимальное светопоглощение. При этом наиболее подходящими условиями для фотометрического определения являются такие, когда небольшие изменения рН практически не влияют на светопоглощение (рис. 1.7). Постоянное значение рН в фотометрируемом растворе поддерживают при помощи буферных растворов или добавляя определенное количество кислоты или основания.

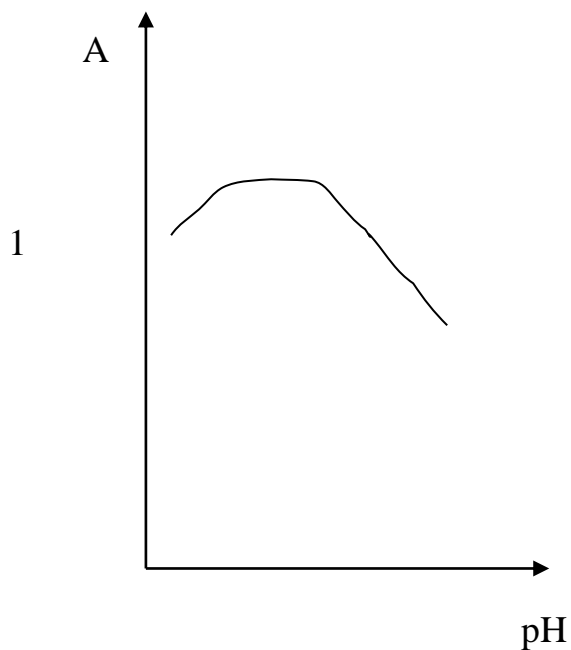


Рис. 1.7. Зависимость оптической плотности от pH среды

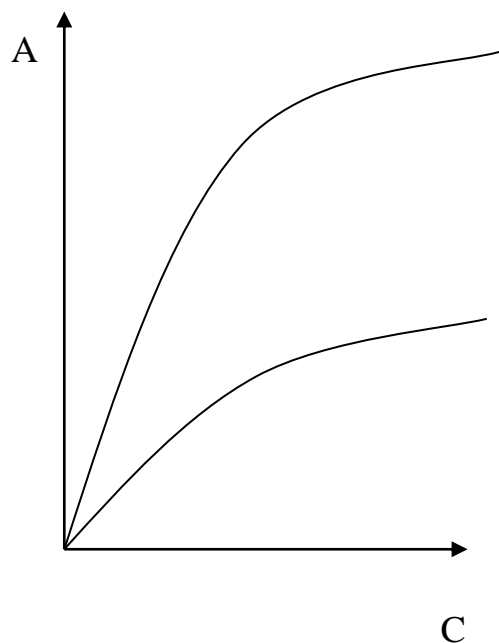


Рис. 1.8. Зависимость оптической плотности от объема добавляемого реагента:

- 1 - при образовании устойчивого соединения;
- 2 - при образовании малоустойчивого соединения

Реагент добавляют к исследуемому веществу в количестве, достаточном для обеспечения полного перевода определяемого компонента в окрашенное соединение. Оптимальным объемом реагента является такой, выше которого дальнейшее добавление реагента не увеличивает выход поглощающего соединения (т.е. не увеличивает светопоглощения раствора) (рис. 1.8).

Интенсивность окраски может изменяться во времени, поэтому надо исследовать зависимость $A = f(\tau)$, на основании которой установить оптимальное время для проведения фотометрической реакции (рис. 1.9).

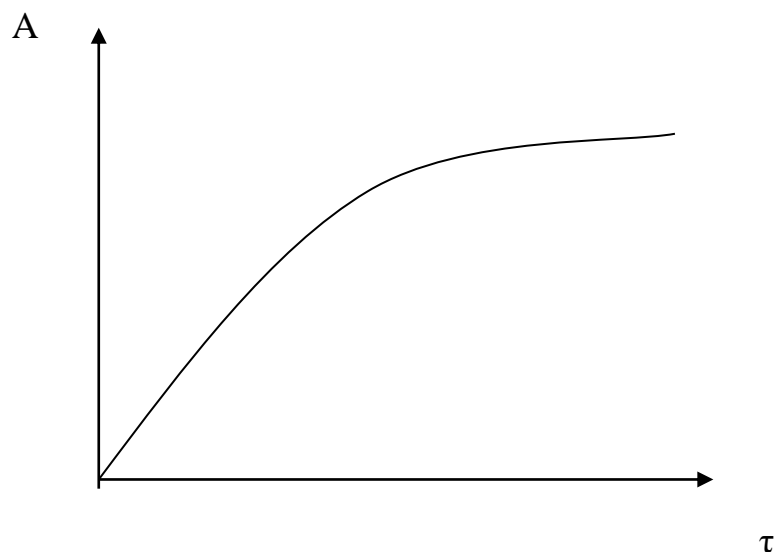


Рис. 1.9. Зависимость оптической плотности от продолжительности фотометрической реакции

1.7.1. Подчинение основному закону светопоглощения

Подчинение основному закону светопоглощения, полученного при реакции окрашенного соединения, является основным условием для количественного фотометрического определения. Подчинение окрашенного соединения закону Бугера-Ламберта-Бера в данном диапазоне концентраций проверяют следующими способами.

1. Построение градуировочного графика зависимости $A = f(C)$ при выбранной длине волны λ . Если раствор подчиняется основному закону светопоглощения, то график в координатах $A - C$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 1.10 а).

2. Построение графика зависимости оптической плотности от длины волны для растворов различных концентраций. Если раствор подчиняется основному закону светопоглощения, то получают серию кривых одинаковой формы, независимо от толщины слоя раствора или концентрации вещества в растворе, сохраняющих положение максимума поглощения при одной и той же длине волны (см. рис. 1.4).

3. Построение графика зависимости величины молярного коэффициента светопоглощения от концентрации. Если раствор подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера, то график имеет следующий вид (рис. 1.10 б).

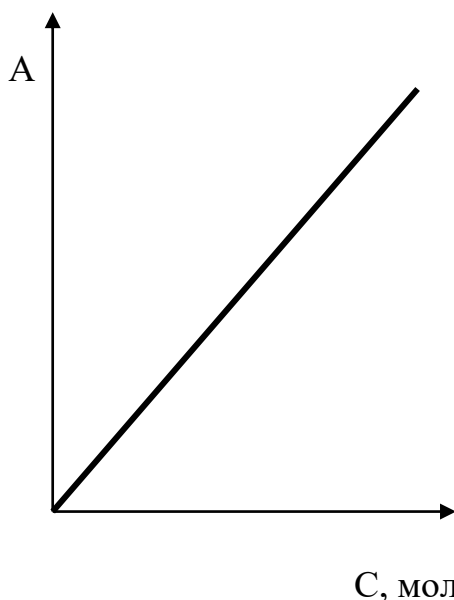


Рис. 1.10 а. Зависимость оптической плотности от концентрации вещества (градуировочный график).

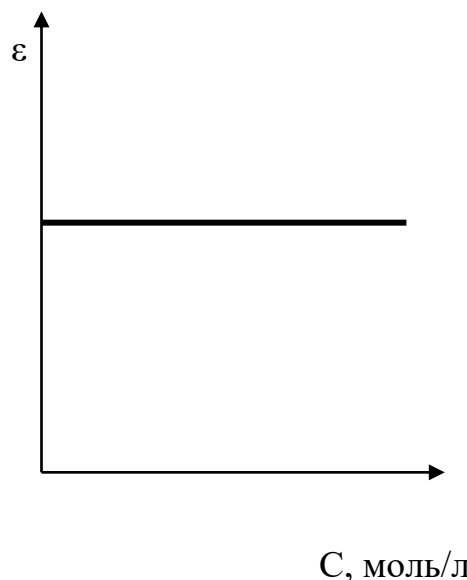


Рис. 1.10 б. Зависимость молярного коэффициента светопоглощения от концентрации вещества.

1.7.2. Определение концентрации вещества в растворе с помощью градуировочного графика

Метод градуировочного графика является наиболее распространенным и точным методом фотометрических измерений. Градуировочный график представляет собой графическую зависимость $A = f(C)$. В соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера (рис. 1.10) этот график должен представлять прямую линию, проходящую через начало координат. Для его построения готовят серию стандартных растворов определяемого вещества различной концентрации: Стандартные растворы готовят из химически чистых веществ с использованием дистиллированной воды. При выбранной длине волны и

толщине слоя раствора измеряют оптические плотности стандартных растворов и строят график зависимости оптической плотности от концентрации (см. рис. 1.10а). Измерив затем оптическую плотность A исследуемого раствора, по градуировочному графику находят его концентрацию C .

1.7.3. Определение концентрации веществ в смеси

Спектрофотометрический метод в принципе дает возможность определить несколько светопоглощающих веществ в одном растворе без предварительного разделения. Если в растворе присутствует смесь двух веществ, измеряют оптическую плотность этого раствора при двух длинах волн λ_1 и λ_2 . В соответствии с законом аддитивности светопоглощения

$$A_{\text{смеси } \lambda_1} = \varepsilon_{1\lambda_1} l C_1 + \varepsilon_{2\lambda_1} l C_2$$

$$A_{\text{смеси } \lambda_2} = \varepsilon_{1\lambda_2} l C_1 + \varepsilon_{2\lambda_2} l C_2$$

Решение этой системы уравнений дает возможность рассчитать C_1 , и C_2 , если известны молярные коэффициенты поглощения компонентов $\varepsilon_{1\lambda_1}$, $\varepsilon_{2\lambda_1}$, $\varepsilon_{1\lambda_2}$, $\varepsilon_{2\lambda_2}$.

Если имеется спектральная область, в которой один из компонентов смеси не поглощает, расчеты значительно упрощаются. Кроме того, в этом случае может быть использован способ построения градуировочных графиков.

1.8. Приборы для измерения поглощения растворов.

Принципиальные схемы и основные элементы

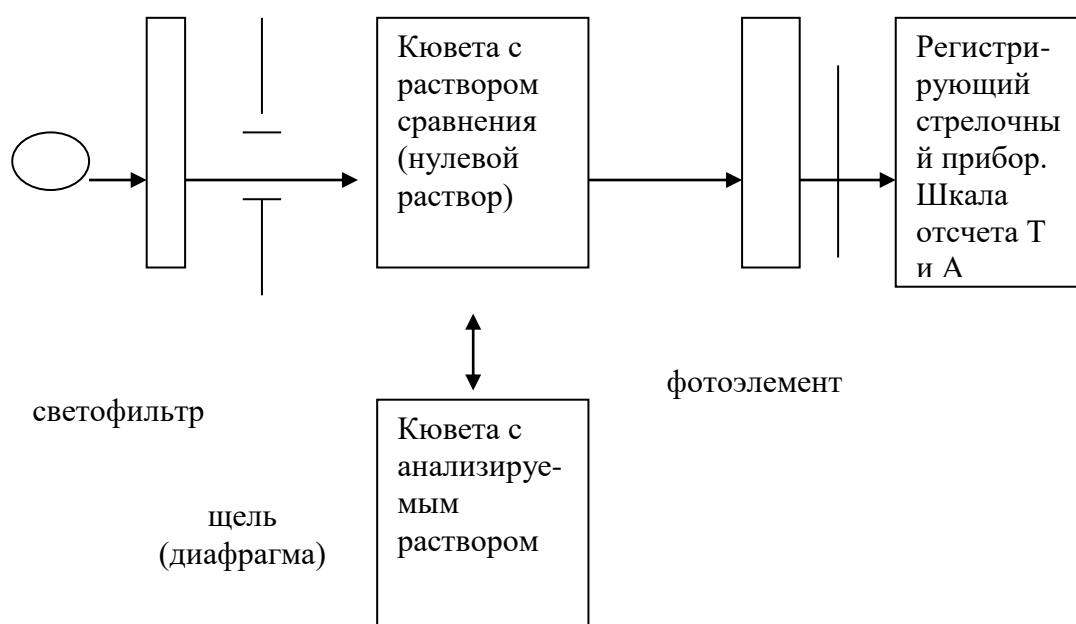
В основе метода измерения интенсивности светопоглощения лежит измерение ослабления светового потока после прохождения его через раствор поглощающего вещества. Для этого сравнивают два потока: один, проходящий через исследуемый раствор, другой - через

раствор сравнения (раствор, содержащий все реактивы, кроме определяемого вещества) или растворитель. Поглощение раствора сравнения принимают за ноль, и поглощение анализируемого раствора измеряют относительно поглощения раствора сравнения. Интенсивности световых потоков измеряют фотоэлектродиметрически после преобразования излучения в электрический сигнал. В качестве приемника и анализатора светового потока в фотометрических приборах служит фотоэлемент. Фотоэлемент превращает световую энергию в электрическую.

Для измерения оптической плотности (светопропускания) окрашенных растворов применяют фотоэлектродиметры. Их классифицируют на однолучевые с прямой схемой измерения и двухлучевые с компенсационной схемой. Приборы отградуированы на измерение светопропускания T и оптической плотности A .

Основными элементами прибора для измерения поглощения света растворами являются: источник излучения в видимой и УФ-области; монохроматизатор – светофильтр; кювета для анализируемого раствора и фотоэлемент с услителем, стрелочным прибором и шкалой отсчета T и A .

В качестве источника в видимой области используют лампу накаливания, в УФ-области – ртутную лампу.



1. Однолучевой фотометр (ЛМФ-69, КФК и др. марки)

Однолучевой фотометр обеспечивает прямое измерение потока света, прошедшего через регулируемую щель (диафрагму), светофильтр и кювету.

Устройство прибора позволяет механически устанавливать на пути светового потока либо кювету с раствором сравнения, либо с анализируемым раствором.

В случае ЛМФ-69 шкала градуирована только в процентах светопропускания T . Перевод T в оптическую плотность осуществляют по дополнительной шкале.

Недостатком однолучевого прибора является измерение абсолютной величины прошедшего потока, зависящей от нестабильности потока источника света в процессе измерения.

1.9. Спектрофотометрическое титрование

Спектрофотометрическое титрование основано на изменении оптической плотности раствора в процессе титрования. Аликвотную часть анализируемого раствора помещают в кювету, через которую проходит световой поток, выделенный светофильтром, и приступают к титрованию. Измеряют оптическую плотность раствора. На основании результатов строят кривую спектрофотометрического титрования, откладывают по оси ординат значения оптической плотности A , а по оси абсцисс - объем раствора титранта (мл).

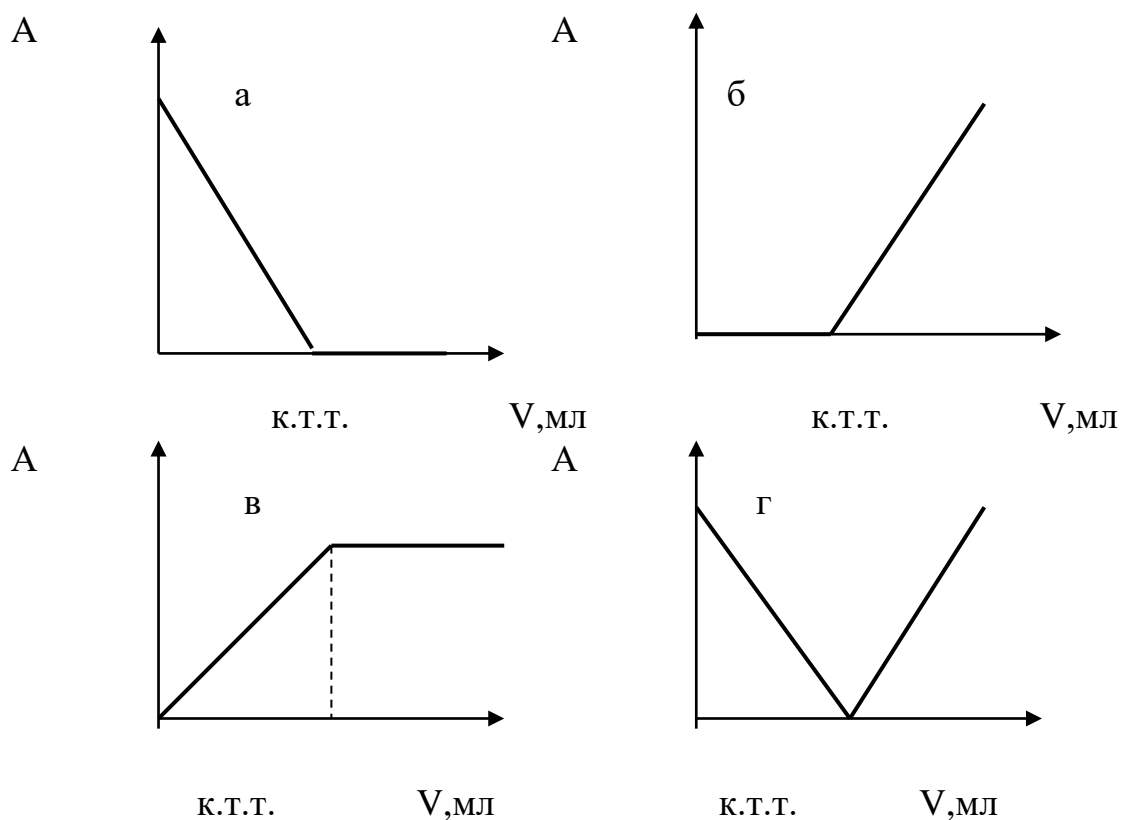


Рис. 1.11 Кривые спектрофотометрического титрования:
 $A + B \rightarrow C$

- а) А поглощает, В и С не поглощают при данной длине волны,
- б) А и С не поглощают, В – поглощает;
- в) А и В не поглощают, С – поглощает;
- г) А и В поглощают, С - не поглощает.

Например, при титровании железа (II) раствором перманганата калия кривая титрования имеет вид, изображенный на рис. 1.11.б. При выбранной длине волны железо (II) не поглощает свет и поэтому, пока в растворе есть Fe^{2+} , оптическая плотность раствора практически не изменяется. После того, как все железо прореагировало, в растворе появится избыток $KMnO_4$, который поглощает свет данной длины волны, и оптическая плотность возрастает пропорционально объему добавляемого раствора перманганата калия. Конечную точку титрования находят графически. Для этого достаточно иметь несколько точек, характеризующих недотитрованный и перетитрованный растворы.

На рис. 1.11 представлены кривые спектрофотометрического

титрования раствора вещества А и раствором В при данной длине волны.

Метод спектрофотометрического титрования имеет ряд преимуществ перед визуальными методами: он более избирателен, позволяет проводить последовательное определение нескольких компонентов одной пробы, дает возможность проводить анализ окрашенных растворов с низкой концентрацией определяемого компонента ($10^{-1} - 10^{-8} \%$), позволяет автоматизировать процесс титрования.