



Г. В. Ю И Н Г

# ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

*Перевод с английского*  
*В. Е. ПАНОВОЙ*  
*под редакцией*  
*К. Б. ЯЦИМИРСКОГО*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ХИМИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА · 1960

В книге изложены основные инструментальные методы анализа неорганических и органических соединений, подробно описаны приборы, принцип их действия и правила обращения с ними. Приведены примеры применения различных инструментальных методов в аналитической химии.

Книга является руководством для работников исследовательских и производственных аналитических лабораторий, а также может служить пособием для студентов химических факультетов университетов и химико-технологических институтов.

## INSTRUMENTAL METHODS OF CHEMICAL ANALYSIS

GALEN W. EWING

NEW YORK, 1954

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Предисловие редактора . . . . . | 5 |
|---------------------------------|---|

### Часть I

#### ОСНОВЫ МЕТОДОВ, ТЕОРИЯ И АППАРАТУРА

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Введение . . . . .                                                   | 7   |
| 2. Кондуктометрия . . . . .                                             | 12  |
| 3. Измерение электродвижущих сил . . . . .                              | 34  |
| 4. Вольт-амперометрия и полярография . . . . .                          | 70  |
| 5. Электроосаждение . . . . .                                           | 101 |
| 6. Эмиссионная спектроскопия . . . . .                                  | 128 |
| 7. Поглощение излучения (абсорбционная спектроскопия) . . . . .         | 170 |
| 8. Турбидиметрия, нефелометрия и флуорометрия . . . . .                 | 244 |
| 9. Поглощение инфракрасного излучения . . . . .                         | 259 |
| 10. Поглощение и диффракция рентгеновых лучей и электронов . . . . .    | 276 |
| 11. Поляриметрия . . . . .                                              | 301 |
| 12. Светопреломление (рефракция) и светорассеяние (дисперсия) . . . . . | 309 |
| 13. Применение радиоактивности в аналитической химии . . . . .          | 325 |
| 14. Масс-спектрометрия . . . . .                                        | 338 |
| 15. Газовый анализ . . . . .                                            | 356 |
| 16. Термический анализ . . . . .                                        | 374 |
| 17. Определение содержания воды . . . . .                               | 385 |
| 18. Экстракционный анализ . . . . .                                     | 394 |
| 19. Хроматография . . . . .                                             | 405 |
| 20. Ионный обмен . . . . .                                              | 412 |
| 21. Общие указания для проведения анализа . . . . .                     | 420 |

### Часть II

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Введение . . . . .                                                                                                          | 426 |
| Лабораторные работы . . . . .                                                                                               | 432 |
| Работа 1. Кондуктометрическое титрование. Определение растворимости сульфата серебра . . . . .                              | 432 |
| Работа 2. Потенциометрическое титрование. Нейтрализация фосфорной кислоты . . . . .                                         | 433 |
| Работа 3. Потенциометрическое титрование. Изучение окислительно-восстановительной реакции иодометрического метода . . . . . | 436 |
| Работа 4. Потенциометрическое титрование. Определение железа посредством сульфата церия . . . . .                           | 437 |
| Работа 5. Полярография. Анализ растворов, содержащих никель и цинк . . . . .                                                | 439 |
| Работа 6. Полярография. Изучение аппаратуры и способов построения графиков . . . . .                                        | 441 |
| Работа 7. Амперометрическое титрование. Определение свинца посредством бихромата . . . . .                                  | 443 |
| Работа 8. Электроосаждение. Осаждение меди при постоянном токе . . . . .                                                    | 444 |
| Работа 9. Электроосаждение. Анализ латуни при регулируемом потенциале катода . . . . .                                      | 446 |

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Работа 10.</i> Кулонометрическое титрование арсенита бромом . . . . .                                                     | 448        |
| <i>Работа 11.</i> Электрографический капельный анализ . . . . .                                                              | 450        |
| <i>Работа 12.</i> Эмиссионная спектрография. Качественный анализ . . . . .                                                   | 454        |
| <i>Работа 13.</i> Эмиссионная спектрография. Количественный анализ . . . . .                                                 | 456        |
| <i>Работа 14.</i> Фотометрия пламени. Анализ воды . . . . .                                                                  | 459        |
| <i>Работа 15.</i> Абсорбционная спектроскопия. Сравнение методов . . . . .                                                   | 461        |
| <i>Работа 16.</i> Абсорбционная спектроскопия. Определение никеля посредством диметилглиоксима . . . . .                     | 463        |
| <i>Работа 17.</i> Абсорбционная спектроскопия. Определение меди посредством бромистоводородной кислоты . . . . .             | 464        |
| <i>Работа 18.</i> Абсорбционная спектроскопия. Определение хрома и марганца в стали . . . . .                                | 466        |
| <i>Работа 19.</i> Абсорбционная спектроскопия. Ультрафиолетовый спектр органического соединения . . . . .                    | 467        |
| <i>Работа 20.</i> Абсорбционная спектроскопия. Анализ таблеток аскофена . . . . .                                            | 469        |
| <i>Работа 21.</i> Абсорбционная спектроскопия. Изучение индикатора . . . . .                                                 | 471        |
| <i>Работа 22.</i> Абсорбционная спектроскопия в инфракрасной области. Анализ ксилола . . . . .                               | 472        |
| <i>Работа 23.</i> Турбидиметрия. Определение сульфата посредством хлорида бария . . . . .                                    | 473        |
| <i>Работа 24.</i> Флуорометрия. Определение алюминия в цинковом сплаве с применением электролиза с ртутным катодом . . . . . | 474        |
| <i>Работа 25.</i> Поляриметрия и рефрактометрия. Определение сахарозы . . . . .                                              | 476        |
| <i>Работа 26.</i> Радиоактивность. Метод изотопного разбавления . . . . .                                                    | 477        |
| <i>Работа 27.</i> Газовый анализ. Определение углекислого газа посредством поглощения. . . . .                               | 479        |
| <i>Работа 28.</i> Газовый анализ методом теплопроводности . . . . .                                                          | 482        |
| <i>Работа 29.</i> Определение содержания воды посредством азеотропной дистилляции . . . . .                                  | 483        |
| <i>Работа 30.</i> Экстрагирование растворителем. Определение жира в орехах . . . . .                                         | 485        |
| <i>Работа 31.</i> Определение жиров и общего содержания твердых веществ в молочных продуктах . . . . .                       | 486        |
| <i>Работа 32.</i> Ионный обмен. Разделение кобальта и никеля . . . . .                                                       | 488        |
| <i>Работа 33.</i> Химическая микроскопия . . . . .                                                                           | 490        |
| <b>Приложения.</b>                                                                                                           |            |
| 1. Нормальные потенциалы полуэлементов . . . . .                                                                             | 494        |
| 2. Изотопы . . . . .                                                                                                         | 496        |
| <b>Предметный указатель . . . . .</b>                                                                                        | <b>505</b> |

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Последние десятилетия развития аналитической химии ознаменовались широким внедрением в практику различных физико-химических методов анализа. Эмиссионная и абсорбционная спектроскопия, полярография, потенциометрия, кондуктометрия и ряд других методов анализа завоевали широкое признание. Во многих вузах учебным планом предусмотрено изучение физико-химических методов анализа.

В связи с этим ощущается настоятельная потребность в издании такой книги, в которой в сжатой и доступной форме была бы изложена совокупность современных физико-химических методов анализа. Таких книг на русском языке пока почти нет. Имеющиеся книги либо предназначены для студентов техникумов, либо посвящены изложению отдельных методов анализа (колориметрии, спектральному анализу, полярографии и т. д.). Перевод книги американского профессора Г. В. Юинга «Инструментальные методы химического анализа» отчасти восполняет этот пробел.

Эта книга отличается от ряда других аналогичных пособий, изданных за рубежом, полнотой охвата существующих методов анализа, сжатостью изложения в сочетании с достаточно высоким научным уровнем. Наряду с физико-химическими методами анализа в книге излагаются основы физико-химических методов разделения (экстракции, хроматографии, ионного обмена), основы газового анализа, а также наиболее распространенные методы определения воды в различных веществах. При описании методов автор излагает в доступной форме теоретические основы метода, приводит примеры его использования и рассматривает принципы действия приборов для выполнения соответствующих измерений.

Во второй части книги дано описание 33 лабораторных работ, иллюстрирующих применение методов, рассмотренных в первой части. Таким образом, книга может быть использована отчасти и как пособие к лабораторному практикуму по физико-химическим методам анализа.

К недостаткам книги следует отнести прежде всего то, что автор ссылается главным образом на работы, опубликованные в Соединенных Штатах Америки. Ссылки на работы советских авторов отсутствуют. Этот недостаток мы стремились хотя бы отча-

сти устранить путем помещения в соответствующих разделах дополнительных ссылок на работы советских авторов (преимущественно книги и обзоры).

В книге дано описание приборов и аппаратов, изготавливаемых в США. Это обстоятельство несколько затрудняет пользование книгой для советского читателя. Для того чтобы устранить этот недостаток, книга снабжена дополнениями, содержащими описание аппаратуры, выпускаемой и применяемой в Советском Союзе. Эти не претендующие на полноту охвата дополнения составлены К. Б. Яцимирским и К. Е. Прик.

Автор книги уделил главное внимание описанию приборов. Физико-химическая и в особенности химическая сторона рассматриваемых методов не нашла достаточно полного отражения.

Несмотря на указанные недостатки, книга будет полезной для химиков-аналитиков, работающих в заводских и других лабораториях, а также может быть использована в качестве пособия студентами химических факультетов и химико-технологических специальностей институтов.

*К. Б. Яцимирский*

---

*Посвящается моим учителям*

*Вильяму Джорджу Гай  
и Томасу Фразеру Юнгу*

## ЧАСТЬ I

# ОСНОВЫ МЕТОДОВ, ТЕОРИЯ И АППАРАТУРА

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Аналитическую химию можно определить как науку и искусство определения состава вещества, т. е. входящих в него элементов или соединений. Исторически развитие аналитических методов было тесно связано с введением новых измерительных приборов. Первые количественные анализы проводились весовым методом, который стал возможным благодаря изобретению точных весов. Вскоре было найдено, что тщательно прокалиброванная стеклянная посуда дает возможность значительно экономить время при объемных измерениях растворов, титры которых установлены весовым способом. Аналогичная аппаратура для измерения объемов способствовала развитию методов газового анализа.

В последние десятилетия XIX века изобретение спектроскопа позволило успешно применить его в качестве аналитического прибора. Однако вначале он мог быть использован только в качественном анализе; в течение многих лет только весовой и объемный методы применялись при проведении почти всех количественных анализов. Постепенно вводились некоторые колориметрические и нефелометрические методы главным образом для определения тех веществ, которые не могли быть надежно определены в то время другими методами. Затем было найдено, что для установления конечной точки титрования можно использовать измерения, связанные с прохождением электрического тока. Начиная приблизительно с 1930 г., быстрое развитие электронно-ламповых усилителей, фотоэлементов и других приборов привело к внедрению многих аналитических методов, основанных на применении этих приборов. В настоящее время аналитик должен уметь обращаться примерно с дюжиной приборов, которые в сущности не были известны еще 20 лет назад.

Почти любое физическое свойство, характерное для отдельного элемента или соединения, может служить основой метода ана-

лиза. Таким образом, светопоглощение окрашенного раствора, способность рассола проводить ток, теплопроводность газа — каждое из этих свойств может служить основой метода анализа соответствующего вещества. Ряд сходных методик анализа различных элементов и их соединений основан на измерении их электрических свойств, таких, как электродные потенциалы и потенциалы разложения. Явления искусственной радиоактивности, в широком масштабе исследованные в связи с изучением атомной энергии, привели к созданию нескольких аналитических методов чрезвычайно большого значения, обладающих широкими перспективами.

Целью настоящей книги является рассмотрение возможностей применения современных инструментальных методов анализа. Однако вначале будет целесообразно напомнить о некоторых основных понятиях.

**Качественный и количественный анализ.** Качественный анализ указывает, какие вещества присутствуют в образце, и дает очень грубую оценку их количества. При количественном определении получают гораздо более точные сведения о количестве определяемого компонента в образце. На некоторых приборах, таких, как полярограф и спектрограф, можно получать одновременно результаты как качественного, так и количественного анализа.

**Элементарный и приближенный анализ.** Если анализ дает возможность определять химические *элементы*, из которых состоит анализируемое вещество, то в таком случае его называют «элементарным» анализом. Однако часто бывает необходимо найти количества радикалов, соединений или даже классов соединений; в таком случае анализ называют «приближенным». Таким образом, мы можем определять в одном и том же образце как нитрит, так и нитрат, в то время как элементарный анализ дает только соотношение азота и кислорода. В качестве других примеров приближенного анализа можно привести определение числа гидроксильных групп в органическом соединении, определение содержания белков, жиров или углеводов в продуктах питания и содержания окиси углерода в горючем газе. Слово «приближенный» в данном случае не означает отсутствия точности.

**Основные и производные физические величины.** Имеется чрезвычайно мало основных физических величин, которые можно измерить непосредственно. Большинство измерений, которые мы производим в лаборатории, состоят по существу в наблюдении линейного или углового перемещения указателя при помощи определенной шкалы. Взвешивая на аналитических весах, мы на самом деле отмечаем угловое смещение стрелки и подбираем разновески, чтобы привести смещение к нулю. Отсчет на бюретке

сводится к наблюдению линейного смещения мениска от исходного к конечному положению. Электрические измерения связаны с угловым перемещением стрелок измерительных приборов или ручек потенциометра и т. д. Многие другие величины, как, например, интенсивность света или звука, служат только в качестве нулевых индикаторов, т. е. или саму величину, или разность между ней и стандартной величиной приводят к нулю, если их нельзя выразить показаниями шкалы измерительного прибора. Функция прибора заключается в том, чтобы выражать химический состав в виде непосредственно наблюдаемых показаний. Почти во всех случаях прибор действует непосредственно или косвенно как *компаратор*, посредством которого оценка анализируемого вещества проводится по отношению к стандартному.

Большинство рассматриваемых в книге аналитических методов основано на физико-химических законах, которые могут быть выражены математическими формулами. Иногда встречаются аналитические способы, при разработке которых исходили не из теоретических положений, а из опытных данных. Последние способы могут применяться для аналитических целей, но правильность их должна быть доказана путем обстоятельного исследования и проверки результатов другими способами так, чтобы аналитик твердо знал, что именно он фактически измеряет.

**Титрование.** Титрование—это определение содержания компонента при помощи измерения точно эквивалентного количества некоторого стандартного реактива. Физические измерения проводят двумя способами: нахождением точки эквивалентности и отсчетом количества израсходованного реагента. Обычно, если только не указывается другой метод, количество реагента измеряют объемным способом посредством бюретки. Единственным значительным исключением является *кулонометрическое* титрование, в котором реагент генерируется электролитически непосредственно в самой титрационной системе и количество его определяется измерениями, связанными с прохождением тока.

В анализе можно использовать много физических свойств, применяя при этом титрование или обходясь без него. Среди них отметим электропроводность, электродные потенциалы и диффузионные токи, которые будут рассмотрены в следующих главах.

**Физические свойства, используемые в анализе.** Ниже перечислены физические свойства, которые могут быть использованы в химическом анализе. Приводимый список не является исчерпывающим, в него включены все основные физические свойства, как широко применяемые в анализе, так и недостаточно еще

используемые. Большая часть их детально описывается в дальнейших главах.

*Экстенсивные свойства:*

Масса (или вес).

Объем (жидкости или газа).

*Механические свойства:*

Удельный вес (или плотность).

Поверхностное натяжение.

Вязкость.

Скорость звука (в газе).

*Взаимодействие вещества с лучистой энергией:*

Поглощение лучистой энергии (рентгеновы лучи, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное излучение, микроволны).

Мутность.

Лучеиспускание (вследствие возбуждения).

Раман-эффект (комбинационное рассеяние света)\*.

Вращение плоскости поляризованного света.

Показатель преломления.

Дисперсия.

Флуоресценция.

Дифракция рентгеновых лучей и электронов.

Ядерный магнитный резонанс.

*Электрические свойства:*

Потенциалы электродных процессов.

Потенциалы разложения.

Электропроводность.

Диэлектрическая постоянная.

Магнитная восприимчивость.

*Термические свойства:*

Температуры фазовых превращений (температуры плавления или кипения и т. д.).

Теплоты реакции (сгорания, нейтрализации и т. д.).

Теплопроводность (газа).

*Ядерные свойства:*

Радиоактивность.

**Методы разделения, предшествующие анализу.** Желательно иметь в распоряжении такие аналитические методы, которые были бы *специфичны* для каждого элемента, или радикала, или класса соединений. К сожалению, лишь незначительное число их действительно является специфичными\*\*; в силу этого часто

\* В СССР вместо термина «Раман-эффект» применяют термин «комбинационное рассеяние света» (Примечание переводчика).

\*\* Примером анализа, который является специфичным, служит весовое или колориметрическое определение никеля при помощи диметилглиоксима; этим реактивом осаждается, кроме никеля, только палладий, но при гораздо более высокой кислотности, чем требуемая для осаждения никеля.

приходится проводить количественные разделения, изолируя определяемый компонент в форме, доступной измерению, или удаляя мешающие вещества. Ниже приводятся некоторые из методов разделения:

- 1) Осаждение.
  - 2) Электроосаждение.
  - 3) Комплексообразование.
  - 4) Перегонка.
  - 5) Экстрагирование растворителями.
  - 6) Распределительная хроматография.
  - 7) Адсорбционная хроматография.
  - 8) Ионный обмен.
  - 9) Электрофорез.
  - 10) Диализ.
-

## 2. КОНДУКТОМЕТРИЯ

Одним из важнейших физических свойств водных растворов электролитов является их способность проводить электрический ток. Электропроводность зависит от концентрации и природы присутствующих ионов. Благодаря этому она может быть использована для количественного определения химического состава раствора.

Если в стакан, содержащий раствор электролита, поместить два платиновых электрода и присоединить их к источнику электричества, то через раствор потечет ток. Сила его определяется как приложенным напряжением  $E$ , так и сопротивлением  $R$  той части раствора, которая заключена между электродами. Это отношение математически выражается законом Ома  $I = E/R$ , где  $I$  — сила тока в амперах,  $E$  — напряжение в вольтах и  $R$  — сопротивление в омах. Электропроводность  $L$  определяется как величина, обратная сопротивлению, так что  $I = EL$ . Единицей измерения электропроводности является обратный ом ( $\text{ом}^{-1}$ , или  $\text{мо}$ ).

Электропроводность раствора  $L$  обратно пропорциональна расстоянию  $d$  между электродами и прямо пропорциональна их площади  $a$ . Она также зависит от числа ионов  $n$ , приходящихся на единицу объема раствора, и от подвижности  $l$  этих ионов, т. е. легкости, с которой они движутся в электрическом поле. Выражая эту зависимость математически, получаем:

$$L = k \frac{anl}{d} \quad (2-1)$$

где  $k$  — константа пропорциональности.

Для данной пары электродов, при неизменном расстоянии между ними,  $a$  и  $d$  постоянны. Следовательно, можно ввести новую константу  $K$ . Тогда

$$L = Knl \quad (2-2)$$

Уравнение (2-2) справедливо для каждого подобного случая. При наличии нескольких видов ионов в растворе электропроводность будет представлять собой величину аддитивную, и уравнение можно записать так:

$$L = K(n_1 l_1 + n_2 l_2 + \dots)$$

или

$$L = K \sum_i n_i l_i \quad (2-3)$$

В эту сумму должны включаться как анионы, так и катионы.

Чтобы можно было сравнить значения электропроводности, полученные с различными комбинациями электродов, электропроводность  $L$  заменяют величиной, известной под названием *удельной электропроводности*. Последняя обозначается  $L_s$  и определяется отношением

$$L_s = L \frac{d}{a} \quad (2-4)$$

Удельная электропроводность раствора представляет собой электропроводность раствора, заключенного между плоскими электродами площадью  $1 \text{ см}^2$ , находящимися друг от друга на расстоянии  $1 \text{ см}$ . Отношение  $d/a$  является характеристикой сосуда для измерения электропроводности и называется *постоянной сосуда*. Эту постоянную лучше всего определять путем измерения электропроводности тщательно приготовленного раствора, удельная электропроводность которого точно известна. Для этой цели употребляется  $0,0200 \text{ M}$  раствор хлорида калия; для него  $L_s = 0,002768 \text{ ом}^{-1}$  при  $25^\circ$ .

Электропроводность зависит от температуры; ее значение увеличивается приблизительно на  $2\%$  при повышении температуры на  $1^\circ$ . Таким образом, при точной работе сосуда для измерения электропроводности следует погружать в термостаты с постоянной температурой. Обычно все измерения проводят при  $25^\circ$ . Для непосредственного сравнения со стандартом допустима любая температура при условии, что она поддерживается постоянной в течение опыта.

Описание методов определения величины подвижности ионов не входит в задачу настоящего руководства. общепринятые значения для многих ионов даны в табл. 1. Следует отметить, что величина подвижности иона  $\text{H}^+$  гораздо больше, чем у других ионов, за ним стоит ион  $\text{OH}^-$ ; у всех остальных ионов подвижности значительно меньше.

**Аппаратура.** Обычной аппаратурой для определения сопротивления, а следовательно, и электропроводности является мостик Уитстона (рис. 1). Он представляет собой совокупность четырех сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_x$  (неизвестное), соединенных с источником электричества  $I$ , как показано на рисунке. Сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  являются двумя плечами одного постоянного сопротивления, снабженного скользящим контактом 2. При замыкании выключателя 3 напряжение батареи 1 будет подводиться к точкам А и В. Так как в точке В потенциал выше, чем в точке А, то в точке D потенциал должен иметь промежуточное значение. Кроме того, на ветви мостика  $R_2-R_3$  должна быть точка с таким же потенциалом, как и в точке D. Эту точку легко найти перемещением скользящего контакта 2 до тех пор, пока

Таблица 1

Подвижность ионов\* ( $l$ ) при 25°

| Катион        | $l$ | Анион               | $l$ |
|---------------|-----|---------------------|-----|
| $H^+$         | 362 | $OH^-$              | 205 |
| $K^+$         | 76  | $1/4 Fe(CN)_6^{4-}$ | 114 |
| $NH_4^+$      | 76  | $1/3 Fe(CN)_6^{3-}$ | 104 |
| $1/2 Pb^{2+}$ | 73  | $1/2 SO_4^{2-}$     | 83  |
| $1/3 Fe^{3+}$ | 68  | $1/2 CrO_4^{2-}$    | 82  |
| $1/2 Ba^{2+}$ | 66  | $Br^-$              | 81  |
| $Ag^+$        | 64  | $1/3 PO_4^{3-}$     | 80  |
| $1/2 Ca^{2+}$ | 62  | $J^-$               | 80  |
| $1/2 Sr^{2+}$ | 62  | $Cl^-$              | 79  |
| $1/2 Cu^{2+}$ | 57  | $NO_3^-$            | 74  |
| $1/2 Zn^{2+}$ | 56  | $1/2 C_2O_4^{2-}$   | 74  |
| $1/2 Mg^{2+}$ | 55  | $ClO_4^-$           | 71  |
| $1/2 Fe^{2+}$ | 54  | $1/2 CO_3^{2-}$     | 70  |
| $Na^+$        | 52  | $HCO_3^-$           | 46  |
| $Li^+$        | 39  | $C_2H_3O_2^-$       | 42  |

\* Для того чтобы можно было сравнить подвижности друг с другом, их относят к эквиваленту иона; отсюда и обозначения « $1/2 Pb^{2+}$ » и т. д. Числа, приведенные в таблице, являются увеличенными в 105 раз расстояниями (выраженными в сантиметрах), проходимыми ионами в 1 сек. при градиенте потенциала в 1 в/см.

в гальванометре не будет наблюдаться отклонений ни влево, ни вправо. Когда эта настройка будет проведена, отношение  $R_1/R_x$  станет равным отношению  $R_2/R_3$  и

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$

Таким образом

$$L_x = \frac{1}{R_x} = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_3} \quad (2-5)$$

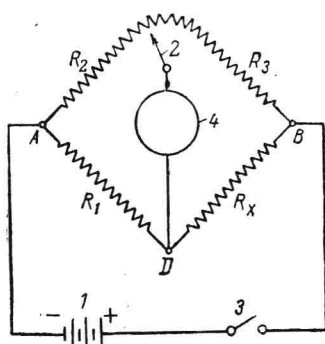


Рис. 1. Мостик Уитстона для измерения сопротивлений:

1—источник тока; 2—скользящий контакт; 3—выключатель; 4—гальванометр.

Выключатель 3 должен быть все время разомкнутым. Его следует замыкать лишь на время, необходимое для проведения отсчета, чтобы свести к минимуму нагревание раствора.

При измерении электропроводности должны быть приняты меры для предотвращения поляризации, об-

условленной электролитическим разложением раствора. Влияние поляризации можно уменьшить, покрывая платиновые электроды платиновой чернью. Эту операцию проводят, подвергая электролизу раствор, содержащий 3 г хлороплатината калия и 0,02 г ацетата свинца в 100 мл воды. Электроды после электролиза тщательно промывают водой.

Электролитическое разложение уменьшается до ничтожных размеров при применении мостика Уитстона с питанием прибора от сети переменного тока. В таком приборе используют гальванометр для переменного тока. Можно снизить затраты на аппаратуру, заменив гальванометр парой наушников. В идеальном случае в точке компенсации звук не должен ощущаться. Практически же побочные явления индукции обычно вызывают слабый звук, который в точке компенсации соответствует минимальной слышимости. Употребляемая на практике частота переменного тока составляет 60 или 1000 герц\*. Единственным преимуществом 60-периодного тока является его широкая доступность. Предпочтительнее применять 1000-периодный ток, особенно при использовании наушников в качестве детектора. Этот ток можно получить при помощи лампового генератора или камертона, приводимого в действие электрическим током (*микрофонный зуммер*). Применять телефонную технику неудобно, так как в рабочей комнате должна соблюдаться полная тишина, вследствие чего этот метод вытесняется другими. Применение радиочастот (порядка  $10^7$  герц) будет обсуждаться позднее.

Мостик для определения электропроводности, подобный описанному выше, можно легко собрать из стандартного электрооборудования. Для этого до последнего времени широко использовались детали самодельного изготовления<sup>11</sup>. Но за последнее десятилетие такие детали были в значительной степени вытеснены специально предназначенной аппаратурой, в которой все части мостика, включая и источник питания, соединены в один агрегат.

В одном из наиболее широко распространенных приборов (рис. 2 и 3), работающих на 60-периодном токе, состояние равновесия определяется при помощи лампового усилителя. В последнем имеется электронно-лучевой индикатор настройки, так называемый «магический глаз». Он часто применяется как средство для точной настройки в радиоприемниках. При вращении ручки, регулирующей переменное сопротивление мостика, темный сегмент «глаза» то открывается, то закрывается, в зависимости от того, в какой стороне от точки компенсации находится ручка. Максимальный угол темного сектора соответствует состоянию равновесия в мостике. Калиброванная шкала, соединенная

\* В СССР установлена стандартная частота переменного тока 50 герц.  
*Прим. ред.*

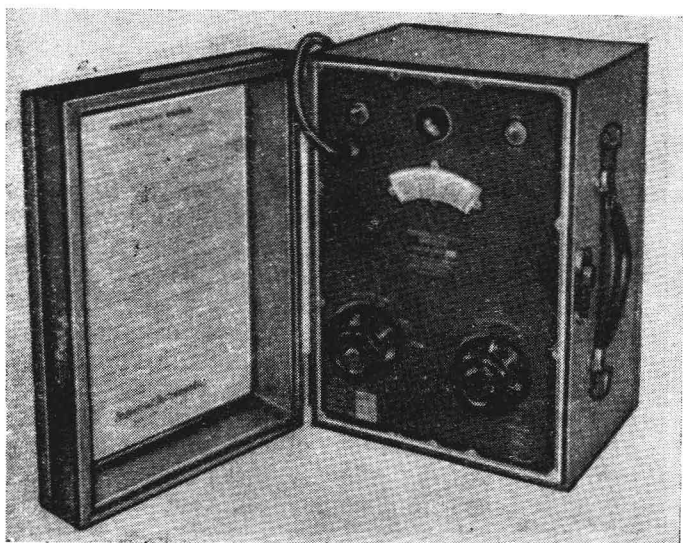


Рис. 2. Мостик для измерения электропроводности, питаемый от сети переменного тока.

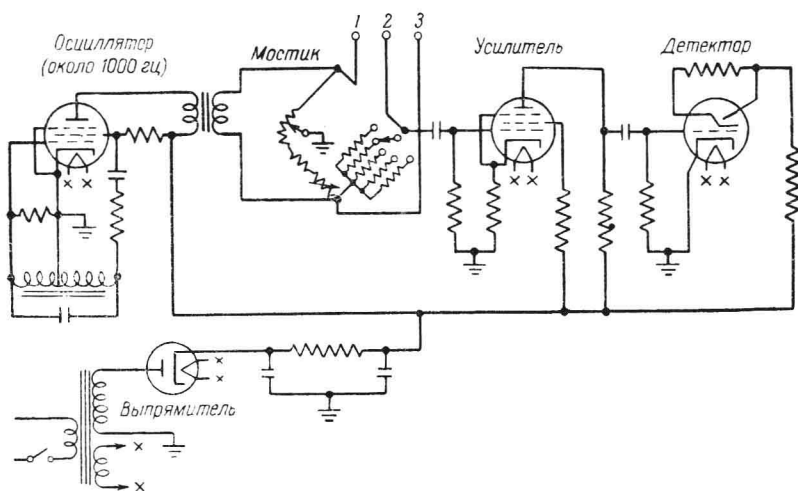


Рис. 3. Схема мостика для измерения электропроводности.