

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА ИРФ-22

Цели работы:

- 1) ознакомление с принципом действия рефрактометра;
- 2) освоение методики измерений показателя преломления на рефрактометре Аббе;
- 3) измерение показателей преломления некоторых жидкостей, имеющих в лаборатории.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Свет, падающий на границу раздела двух прозрачных сред, частично отражается от поверхности раздела, а частично проходит внутрь второй среды, изменяя при этом свое направление. Направление распространения светового луча в средах 1 и 2 определяется законом преломления Снеллиуса: преломленный луч лежит в той же плоскости, в которой находится падающий луч и нормаль к поверхности раздела, а отношение синусов угла падения i_1 и угла преломления i_2 есть величина постоянная для данной пары сред:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} = \text{const} . \quad (1)$$

Константа n_{21} называется относительным показателем (коэффициентом) преломления второго вещества по отношению к первому.

Электромагнитная теория Максвелла выяснила простой физический смысл показателя преломления, установив его связь со скоростью распространения света в веществе:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} . \quad (2)$$

Показатель преломления вещества по отношению к «пустоте» называется абсолютным показателем преломления или просто показателем преломления. Из (2) следует, что абсолютный показатель преломления вещества равен отношению скорости света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$) к скорости света в веществе v , т.е. показывает, во сколько раз скорость света в вакууме превосходит скорость распространения света в

веществе. Относительный показатель преломления двух сред показывает, во сколько раз изменяется скорость света при переходе из первой среды во вторую. Относительный показатель преломления пары сред есть отношение их абсолютных показателей: $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$. Очевидно, что абсолютный показатель преломления вакуума равен 1.

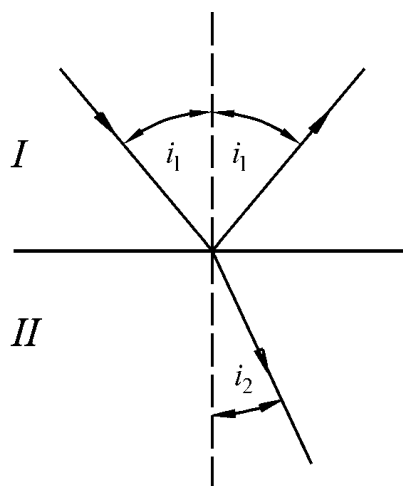


Рис. 1. Отражение и преломление луча света на границе раздела двух сред

Для веществ в различных агрегатных состояниях показатели преломления имеют различные значения. Для газообразных веществ значения показателей преломления близки к 1. В геометрической оптике показатель преломления воздуха принимают равным единице, хотя его точное значение $n=1,000274$ (при нормальном давлении и температуре 20°C). Величины показателей преломления для жидкостей изменяются в интервале от 1,2 до 1,9. Твердые тела имеют наибольшие значения показателей преломления (от 1,3 до 4,0).

Используя абсолютные показатели преломления, закон преломления (1) удобно переписать в виде:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (3)$$

Произведение показателя преломления среды на синус угла между нормалью и лучом при каждом преломлении есть величина постоянная, называемая оптическим инвариантом. Форма записи (3) очень удобна для запоминания.

Полное внутреннее отражение

Из соотношения (3) видно, что если луч идет из среды оптически менее плотной в среду более плотную (т.е. $n_2 > n_1$), то угол преломления i_2 будет меньше угла падения i_1 . Если же среды таковы, что $n_1 > n_2$, то углы падения и преломления подчиняются неравенству $i_2 > i_1$. В этом случае при увеличении угла падения в пределе угол преломления может оказаться равным 90° . Соответствующий ему угол падения называется предельным углом полного внутреннего отражения $i_{пред}$. При падении света под большими углами $i_1 > i_{пред}$, преломленного луча не существует, свет не

выходит из первой среды и имеет место явление *полного внутреннего отражения*. Рисунок 2 иллюстрирует это явление.

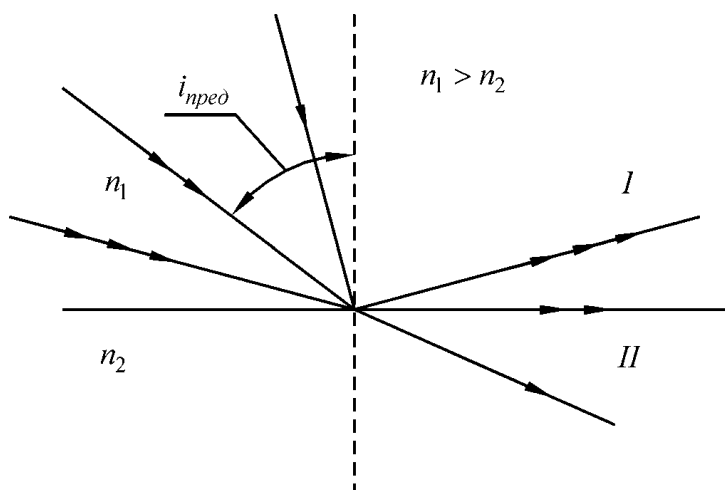


Рис. 2. Возникновение полного внутреннего отражения на границе оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой

Величина предельного угла определяется соотношением:

$$\sin i_{пред} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (\text{причем } n_1 > n_2). \quad (4)$$

Если луч идет из вещества с показателем преломления n в воздух, то $\sin i_{пред} = 1/n$. Величина предельного угла на границе двух сред зависит только от показателей преломления этих сред. Следовательно, величину предельного угла можно использовать для определения показателя преломления одной из сред, если известен показатель преломления другой среды. Предельный угол можно наблюдать двумя способами: в отраженном и проходящем свете.

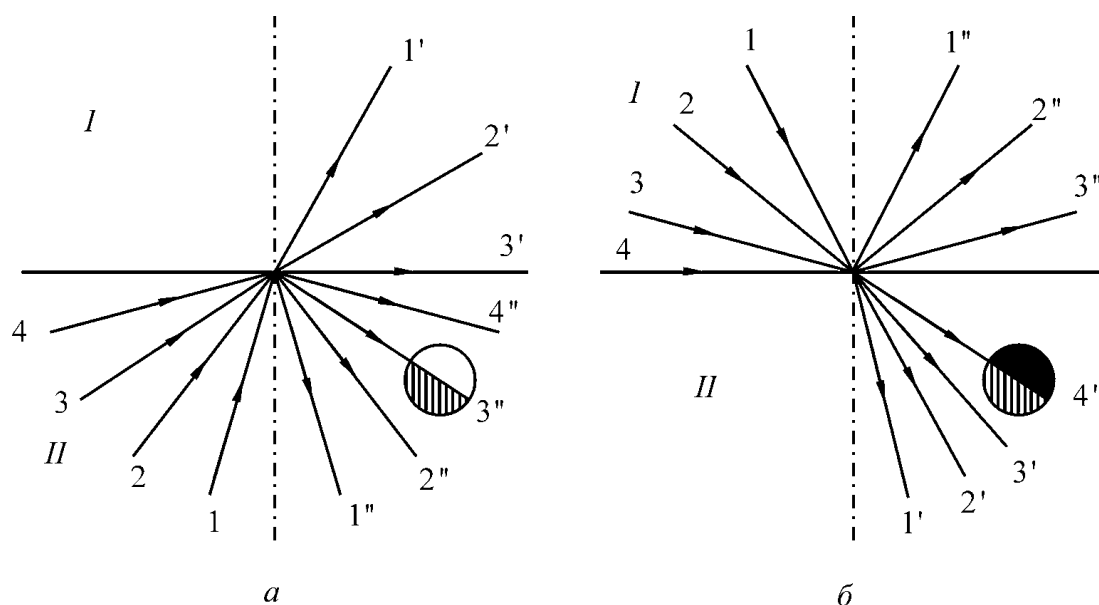


Рис. 3. Наблюдение резкой границы в освещенности поля зрения в отраженном (а) и преломленном (б) пучках лучей света

Если направить в какую-либо точку на границе раздела двух сред пучок лучей с углами падения от 0 до 90° со стороны оптически более плотной среды и наблюдать картину в отраженных лучах, то поле зрения будет разделено на две части различной освещенности. Та часть поля зрения, которая освещается лучами, испытавшими частичное отражение от границы раздела и частичное преломление (лучи 1 и 2 на рис. 3, а), будет менее освещена, чем вторая половина, которая освещается только лучами, испытавшими полное внутреннее отражение (лучи 3 и 4 на рис. 3, а).

При наблюдении картины в проходящем свете граница раздела сред освещается пучком лучей, идущих из среды с меньшим показателем преломления (лучи 1, 2, 3, 4 на рис. 3, б). Очевидно, что в пучке преломленных лучей луч 4' будет крайним. Поле зрения будет разделено на полностью затененную и освещенную части. Этот способ дает очень отчетливую границу, но пригоден только для прозрачных сред. Первый же способ может применяться и в том случае, когда среда с меньшим показателем преломления мало прозрачна, но в этом случае граница наблюдается труднее из-за малой разницы в освещенности обеих половин поля зрения.

Дисперсия света

Все изложенное выше справедливо, строго говоря, только в том случае, если для освещения используется монохроматический свет. Если пучок света имеет сложный спектральный состав, то в описанных выше явлениях наблюдается дисперсия света.

Дисперсией света называется разложение света в спектр, происходящее при преломлении, дифракции или интерференции. В настоящей работе дисперсия света происходит в связи с тем, что показатели преломления веществ зависят от частоты ν используемого для освещения света. Ход зависимости $n = f(\nu)$, наблюдаемый для всех прозрачных бесцветных веществ таков, что при уменьшении частоты волны показатель преломления уменьшается. Производная $dn/d\nu$ называется *дисперсией вещества*.

Из явления дисперсии следует, что скорость распространения света в веществе зависит от цвета излучения. Было найдено, что в вакууме скорость света для любой длины волны одна и та же, но в веществе синий свет, например, распространяется медленнее, чем красный.

В результате дисперсии света происходит пространственное разделение пучков лучей различных длин волн. Поэтому для характеристики приборов, в которых наблюдается дисперсия, вводят в качестве меры дисперсии величины угловой и линейной дисперсии. Под угловой дисперсией понимают отношение $\theta = d\varphi / d\lambda$, где $d\varphi$ - разность углов между пучками лучей, отличающихся по длинам волн на $d\lambda$. Линейная дисперсия определяется отношением расстояния между положениями двух спектральных линий $dl/d\lambda$.

Из наличия дисперсии при преломлении следует, что рассмотренная выше картина наблюдения предельного угла полного внутреннего отражения усложнится. Для наглядного представления рассмотрим преломление различных монохроматических пучков со всевозможными углами падения в какой-либо точке на границе раздела оптически менее плотной среды с более плотной. Для крайних длин волн в пределах видимого спектра картины будут различаться величиной предельного угла.

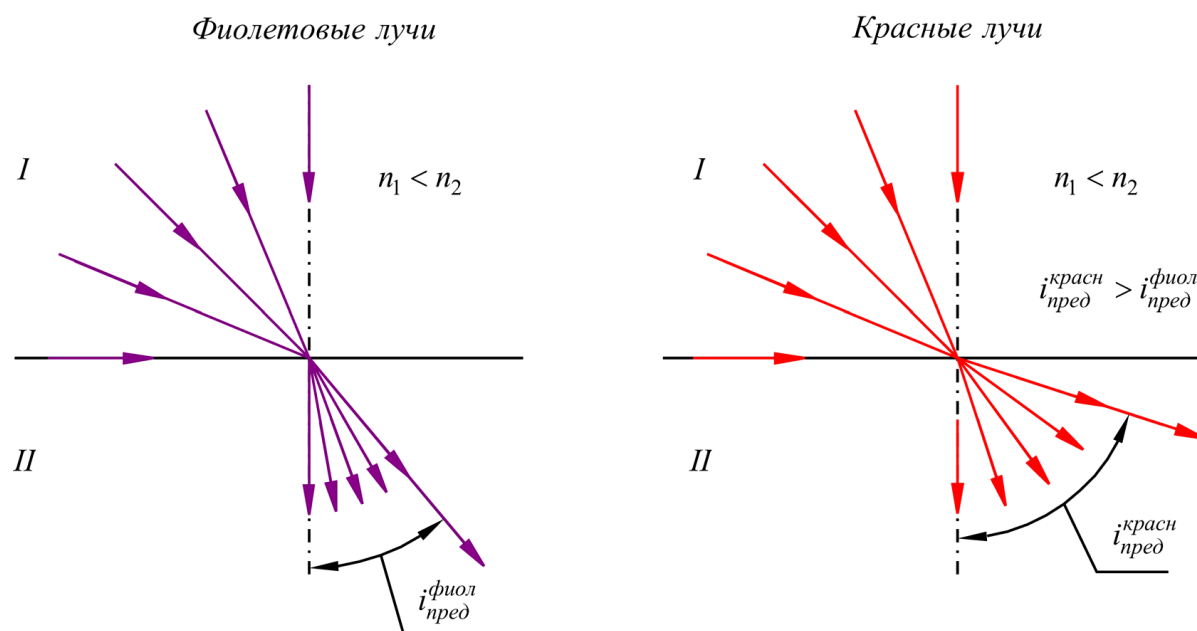


Рис. 4. Влияние дисперсии света на величину предельного угла преломления

Если падающий свет является белым, то происходит наложение подобных картин для различных длин волн. В результате вблизи нормали (при малых углах преломления) преломленный свет остается белым. По мере удаления от нормали (увеличения угла преломления) преломленный пучок будет обедняться фиолетовыми лучами (прежде всего, достигается значение предельного угла для фиолетовых лучей), затем последовательно – синими, голубыми, зелеными, желтыми, оранжевыми и, наконец, красными. Следует помнить, что деление на 7 определенных цветов условно. При наличии в составе света различных длин волн смена цветов происходит очень плавно.

Направление, определяемое предельным углом для красных лучей, будет соответствовать границе раздела поля зрения на освещенную и затененную части.

Таким образом, граница раздела будет окрашена. Кроме того, появляется неопределенность при измерении предельного угла, так как для различных длин волн он имеет различные значения.

Из сказанного следует, что показатель преломления является константой для данной среды только при определенной длине волны света. И, следовательно, предельный угол должен измеряться при использовании монохроматического излучения. Принято для характеристики сред использовать значение показателя преломления, измеренного для света, излучаемого газовой натриевой горелкой (желтая – D линия Na , $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$). В обозначении показателя преломления n_D^{20} индекс D относится к спектральной линии, а 20 обозначает температуру, которой соответствует данное значение показателя. Иногда показатель преломления определяют для других спектральных линий (например, красный – C и голубой – F – линий водорода, $\lambda_C = 6563 \text{ \AA}$, $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}$).

Приборы, с помощью которых описанным выше способом определяют показатели преломления различных веществ, называют рефрактометрами. Широкое распространение получил рефрактометр Аббе.

Принцип действия рефрактометра Аббе

Световой пучок падает на призмный блок Аббе, представляющий собой две прямоугольные призмы, сложенные гипотенузными гранями. Нижняя грань верхней призмы матовая (шероховатая) и служит для освещения рассеянным светом исследуемой жидкости между призмами. Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает на гипотенузную грань нижней измерительной призмы под различными углами. Измерительная призма изготовлена из оптически плотного стекла (тяжелый флинт), показатель преломления которого больше 1,7. Поэтому измерения могут проводиться для веществ с $n < 1,7$. Для скользких лучей (с углом падения $\sim 90^\circ$) угол падения на границе жидкость – измерительная призма будет близок к предельному. Этот угол и определяет границу распространения света в призме

$$n = N \sin i_{пред}, \quad (5)$$

где n и N показатели преломления жидкости и призмы соответственно. Обычно измеряют угол выхода предельного луча из призмы в воздух φ .

Следует отметить, что точка O (рис.5) произвольно выбрана на гипотенузной грани измерительной призмы. В результате преломляющего действия всей поверхности AB через грань CB будет выходить множество параллельных пучков. Направление каждого из них определяется одним из множества углов, среди которых наименьшим является угол φ .

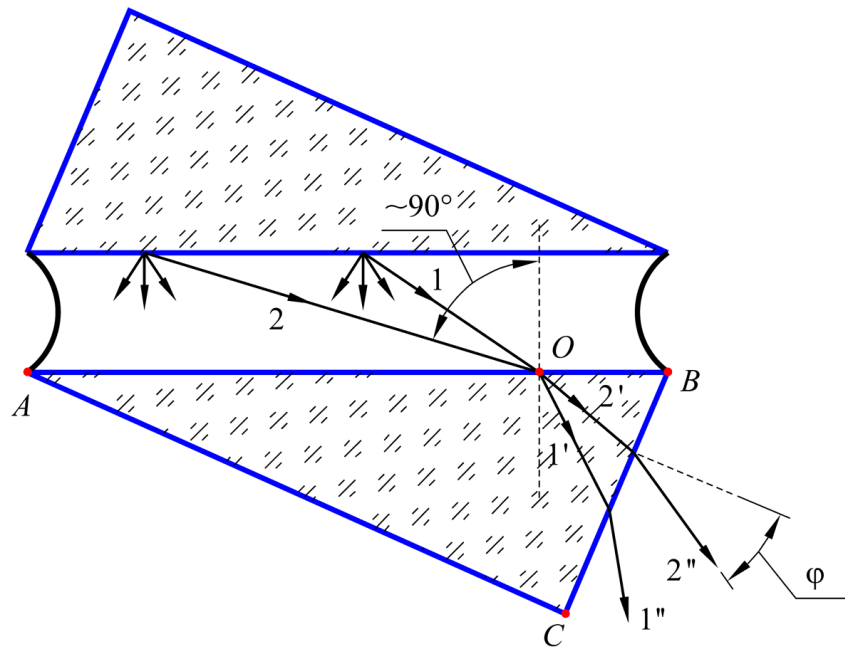


Рис. 5. Ход лучей света в призмном блоке Аббе

Измерение угла φ производят с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность. При такой установке зрительная труба собирает в соответствующих точках своей фокальной плоскости лучи, выходящие параллельными пучками через грань CB призмы под различными углами. В направлениях, заданных углами, меньшими, чем φ , свет не распространяется. Поэтому, наводя крест нитей окуляра зрительной трубы на границу раздела света и темноты, можно измерить угол φ . При этом, если оптическая ось трубы будет совпадать с направлением, заданным углом φ на рис.5, то нижняя половина поля зрения будет соответствовать направлениям лучей, идущих под углами, большими, чем φ , а верхняя – меньшими, чем φ .

Легко показать, рассмотрев преломление лучей света на грани BC призмы, что показатель преломления жидкости n связан с углом φ соотношением

$$n = \sin B \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi} - \cos B \sin \varphi, \quad (6)$$

где B – преломляющий угол призмы (угол между преломляющими гранями). В действительности при измерениях нет необходимости пользоваться этой формулой для вычисления показателей преломления, так как отсчетная шкала рефрактометра уже проградуирована в значениях n с учетом соотношения (6).

Особенностью рефрактометра Аббе является использование для измерений белого света. Это возможно благодаря компенсатору дисперсии, вмонтированному в зрительную трубу. Основной деталью компенсатора является призма прямого видения (призма Амичи). Призма Амичи является сложной призмой состоящей из трех простых призм, изготовленных из разного стекла. Подбором материала и преломляющих углов призм можно варьировать угол преломления того или иного цвета, а также величину суммарной угловой дисперсии. В частности, можно добиться отсутствия отклонения для какого-либо среднего в спектре луча, не уничтожая при этом суммарной дисперсии. Такая комбинация призм будет давать спектр, в котором средние лучи будут выходить по направлению падающего белого луча.

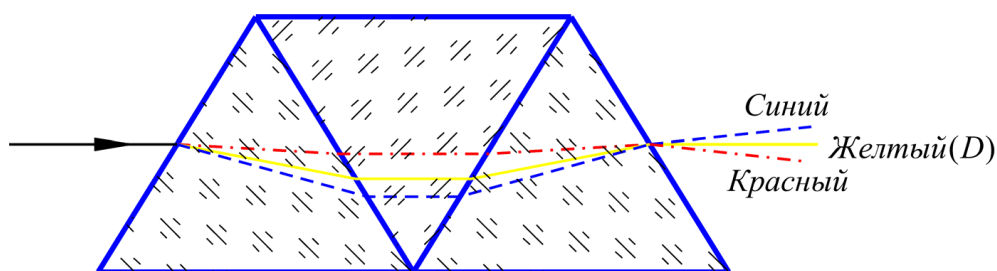


Рис. 6. Ход лучей различного цвета в призме Амичи

Лучи света других длин волн будут отклоняться, и образовывать спектральную окраску по обе стороны от центрального луча. В призме Амичи, составляющие ее призмы подобраны с таким расчетом, чтобы лучи, соответствующие D -линии натрия, проходили всю систему без отклонения.

В силу обратимости световых лучей с помощью призмы Амичи можно пучок цветowych лучей собрать в белый луч.

Принцип действия компенсатора в рефрактометре Аббе сводится к следующему. Из призмленного блока Аббе лучи разного цвета выходят под разными углами, зависящими от соотношения показателей преломления исследуемой жидкости и измерительной призмы. Иначе говоря, призмленный блок Аббе характеризуется некоторой величиной угловой дисперсии $d\varphi/d\lambda$. Если на пути этих лучей установить призму Амичи таким образом, чтобы ее угловая дисперсия, которая зависит также от поворота призмы, была равна по величине и противоположна по знаку угловой дисперсии $d\varphi/d\lambda$, то суммарная дисперсия системы будет равна нулю. При этом пучок цветных лучей соберется в белый луч, направление которого совпадает с направлением желтого луча D . Линия полного внутреннего отражения (в поле зрения окуляра зрительной трубы) представится в виде резкой неокрашенной границы между светлой и темной частями поля зрения, причем положение границы будет соответствовать предельному лучу D , хотя для освещения применялся белый свет. Таким образом, показания шкалы рефрактометра дают значения n_D .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Прибор ИРФ-22 представляет собой современную модель рефрактометра Аббе (рис.7). Он состоит из следующих основных частей: корпуса 1, измерительной головки 2 и зрительной трубы 3 с отсчетным устройством. В измерительной головке находится призмленный блок Аббе, который жестко связан со шкалой отсчетного устройства, расположенной внутри корпуса. Шкала подсвечивается зеркалом 14 и проектируется специальной оптической системой в поле зрения трубы.

Таким образом, в поле зрения трубы одновременно видны граничная линия, крест нитей, деления шкалы и визирный штрих шкалы. Чтобы найти границу раздела и совместить ее с перекрестием, необходимо вращая маховичок 10, наклонить измерительную головку. Окрашенность наблюдаемой границы устраняется поворотом компенсатора с помощью маховичка 11. Вместе с компенсатором одновременно вращается барабан 12 со шкалой, по которой в случае необходимости можно измерить дисперсию вещества. Подсветка исследуемого вещества осуществляется с помощью зеркала 13 дневным светом или от электрической лампы накаливания.

Измерение показателя преломления прозрачных жидкостей на ИРФ-22

На поверхность измерительной призмы наносят несколько капель исследуемой жидкости и осторожно закрывают головку; наблюдают в окно 15, чтобы жидкость полностью заполнила зазор между измерительной и осветительной призмами. Осветительное зеркало 13 устанавливают перед окном 15 так, чтобы поле зрения трубы было равномерно освещено, затем зеркало закрепляют винтом 16. Вращая маховичок 10, находят границу раздела света и тени, маховичком 11 устраняют ее окрашенность. Точно совмещая границу раздела с перекрестием сетки, снимают отсчет по шкале показателей преломления. Индексом для отсчета служит неподвижный визирный штрих сетки. Целые, десятые, сотые и тысячные доли значения показателя преломления отсчитываются по шкале, десятитысячные доли оцениваются на глаз. Шкала рефрактометра проградуирована для температуры 20°. Так как показатель преломления в значительной мере зависит от температуры, в приборе предусмотрено термостатирование призмного блока с помощью камер, через которые пропускается вода, идущая от термостата. В учебных целях, если не требуется высокая точность при определении показателя, измерения могут проводиться без термостатирования.

По окончании измерений тщательно вытирают рабочие поверхности блока Аббе мягкой тряпочкой или фильтровальной бумагой. Полированную грань измерительной призмы надо вытирать очень осторожно, чтобы не повредить полировку. Затем призмы промывают спиртом или эфиром, протирают и оставляют блок на некоторое время открытым для просушки. После этого измерительную головку осторожно закрывают, и прибор накрывают футляром.

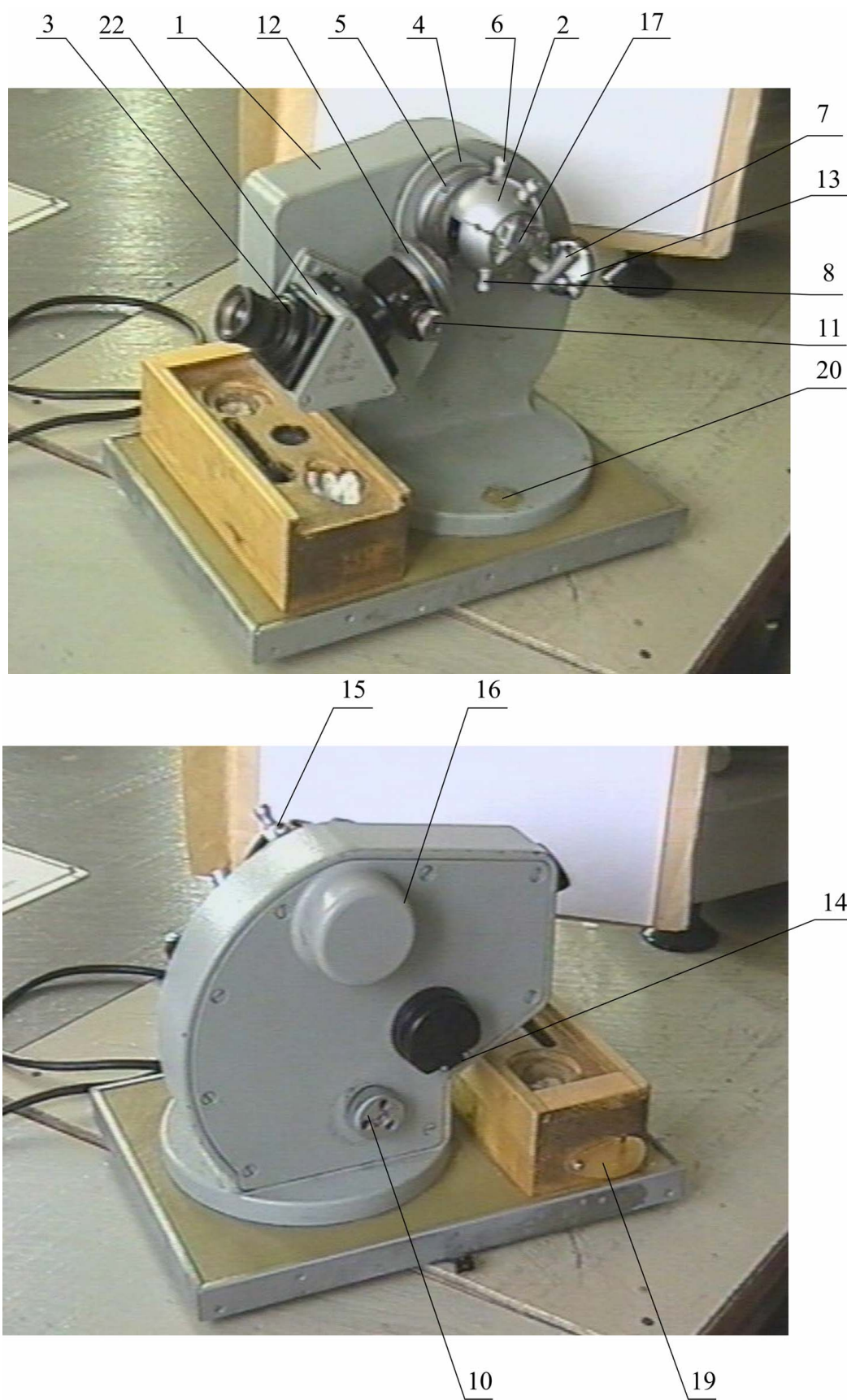


Рис.7. Внешний вид рефрактометра Аббе типа ИРФ-22

Контрольные задания и вопросы

1. Сформулировать закон преломления и пояснить физический смысл относительного и абсолютного показателей преломления.
2. Сформулировать условия, при которых наблюдается полное внутреннее отражение. Получить формулу для определения предельного угла полного внутреннего отражения. Объяснить зависимость величины предельного угла от длины волны.
3. Построить ход лучей в рефрактометре ИРФ-22 при монохроматическом освещении. Какую роль играет в приборе компенсатор дисперсии?
4. Как формируется изображение в фокальной плоскости зрительной трубы при освещении белым светом?

Дополнительные вопросы

1. Почему в рефрактометре нельзя вести измерения предельного угла без зрительной трубы? Какова ее роль?
2. Что такое компенсатор дисперсии, в чем состоит его действие?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики, 1978.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
3. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974.