Изучение явления естественной оптической активности

Цель работы: исследовать с помощью визуального поляриметра явление вращения плоскости поляризации света оптически активным веществом – раствором сахара.

Решаемые задачи:

- изучить оптическую систему визуального поляриметра и метод регистрации малых углов поворота плоскости поляризации;
- исследовать зависимость угла поворота плоскости поляризации света от концентрации водного раствора сахара и от толщины слоя этого раствора;
- определить удельную постоянную вращения раствора сахара;
- исследовать физиологические особенности глаза при сравнении яркости объектов[1].

В некоторых веществах распространение линейно поляризованного света сопровождается поворотом плоскости поляризации вокруг оси пучка (рис. 1). Это явление называют *естественным вращением* или *естественной оптической активностью.*

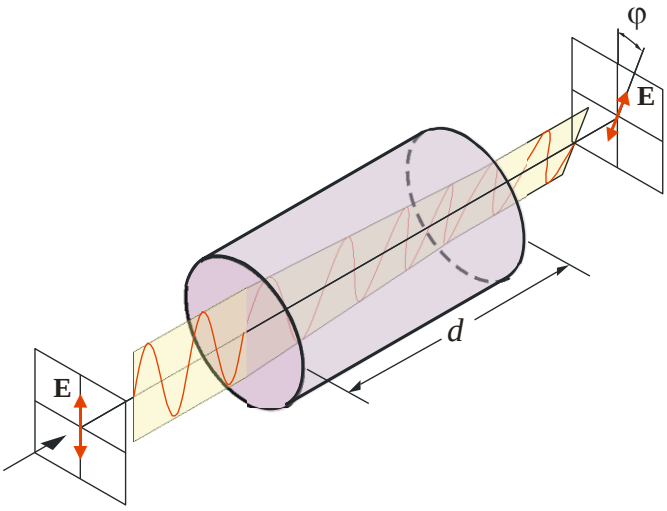


Рис. 1 Поворот плоскости поляризации оптически активным веществом

Для наблюдения оптической активности слой вещества помещают между скрещенными поляризаторами. Проходящий при этом свет можно погасить поворотом одного из поляризаторов.

В настоящее время известно много оптически активных веществ. Среди них кварц, киноварь (кристаллические), скипидар, никотин (жидкие), водные растворы сахара и винной кислоты.

Различают правовращающие и левовращающие вещества. Правовращающие поворачивает плоскость поляризации по часовой стрелке

[1] По согласованию с преподавателем

(для наблюдателя, смотрящего навстречу световому лучу), а левовращающие - в обратном направлении.

В случае химически чистого вещества угол поворота плоскости поляризации пропорционален толщине слоя d:

$$\varphi = \beta \cdot d. \qquad (1)$$

Коэффициент пропорциональности β называется постоянной вращения или вращательной способностью. Он характеризует природу вещества, зависит от длины волны света и температуры.

В растворах угол поворота φ плоскости поляризации пропорционален толщине слоя d оптически активного вещества и его концентрации C (закон Био):

$$\varphi = [\gamma] \cdot C \cdot d, \qquad (2)$$

где $[\gamma]$ – удельная вращательная способность. Она зависит от природы оптически активного вещества, температуры и длины волны света.

Объяснение явления вращения плоскости поляризации дал Френель.

Он предположил, что физическая причина поворота плоскости поляризации состоит в различии фазовых скоростей волн левой и правой круговой поляризации в оптически активных средах.

Пусть на слой оптически активного вещества падает линейно поляризованная волна, в которой колебания вектора **E** происходят вдоль направления АА (рис. 2а). В точке z =0, где волна входит в слой, векторы $\mathbf{E}_л$ и $\mathbf{E}_п$ лево- и правоциркулярно поляризованных волн, на которые можно разложить падающую линейно поляризованную волну, вращаются с угловой скоростью ω в противоположных направлениях, сохраняя симметричное расположение относительно направления АА.

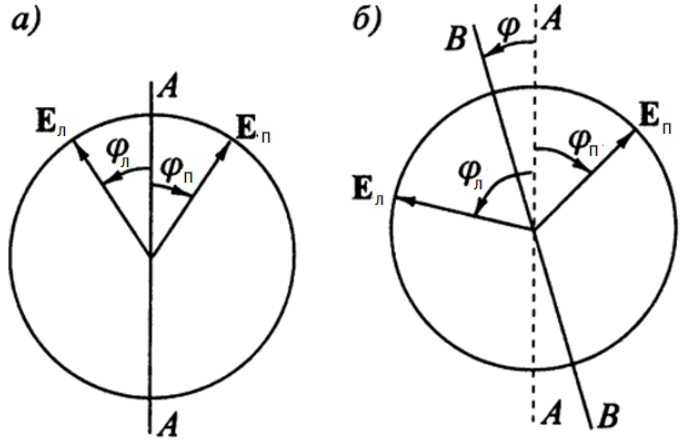


Рис. 2 Поворот плоскости поляризации

На прохождение слоя толщины d волны затратят разное время:

$$\tau_п = \frac{d}{v_п} = \frac{dn_п}{c}, \quad \tau_л = \frac{d}{v_л} = \frac{dn_л}{c} \ .$$

Поэтому на выходе из слоя в момент времени t векторы $\mathbf{E}_л$ и $\mathbf{E}_п$ будут иметь такое же направление, как и на входе в более ранние моменты t - $\tau_л$ и t - $\tau_п$:

$$\varphi_{\text{п}} = \omega(t - \tau_{\text{п}}) = \omega\left(t - \frac{dn_{\text{п}}}{c}\right), \quad \varphi_{\text{л}} = \omega(t - \tau_{\text{л}}) = \omega\left(t - \frac{dn_{\text{л}}}{c}\right).$$

Векторы $\mathbf{E}_{\text{л}}$ и $\mathbf{E}_{\text{п}}$ вращаются с угловой скоростью ω в противоположных направлениях и в сумме дают колебание вдоль направления BB (рис. 2б), относительно которого они в каждый момент расположены симметрично. Направление BB оказывается повёрнуто относительно исходного направления AA на угол φ:

$$\varphi = \frac{\varphi_{\text{п}} - \varphi_{\text{л}}}{2} = \frac{\omega d}{2c}(n_{\text{л}} - n_{\text{п}}) \,. \tag{3}$$

(в формуле (3) учтено, что $\varphi_{\text{л}} < 0$).

Особенностью оптически активных веществ является то, что их молекулы не имеют центра и плоскости симметрии. Молекулы таких веществ могут существовать в виде двух зеркально симметричных изомерных форм - оптических изомеров. Один из оптических изомеров вращает плоскость поляризации вправо, другой - влево. Вещество в целом будет вращать плоскость поляризации света в том случае, если концентрации оптических изомеров различны.

В настоящей работе измерение угла поворота плоскости поляризации производится с помощью визуального поляриметра, хотя существуют подобные автоматические приборы. Его оптическая схема показана на рис. 3.

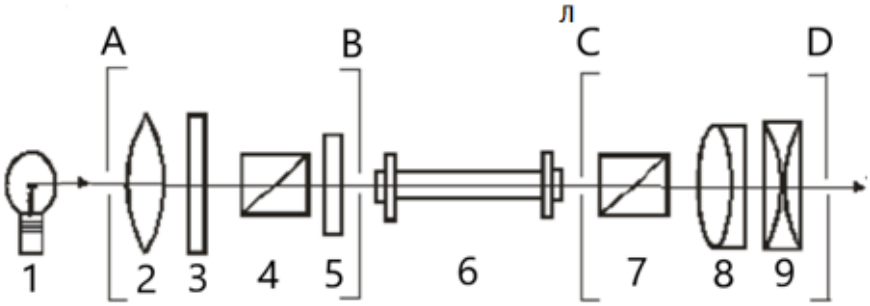


Рис. 3 Оптическая схема поляриметра (пояснения в тексте)

В качестве источника света используется натриевая газоразрядная лампа (1), в основном излучающая на длине волны λ=589,3 нм (желтый свет). Свет от лампы проходит через собирающую линзу (2), светофильтр (3) и попадает на поляризатор (4). Далее плоско поляризованный свет проходит через трубчатую кювету (6) с раствором оптически активного вещества, например, сахара, второй поляризатор-анализатор (7) со шкалой угла поворота, объектив (8) и окуляр (9) зрительной трубы. AB – узел поляризатора, CD – узел анализатора.

Для повышения точности измерения в поляриметре применен принцип уравнивания яркостей частей поля зрения. Такие поляриметры называются полутеневыми. Разделение поля зрения на части проводится введением полуволновой ("$\lambda/2$") кварцевой пластинки (5), которая перекрывает лишь среднюю часть поля зрения, наблюдаемого в окуляр. Боковые же части поля зрения освещаются светом, прошедшим только через поляризатор и

анализатор. Таким образом, поле зрения делится на три части и выглядит как кружок с полосой в середине (рис. 4а).

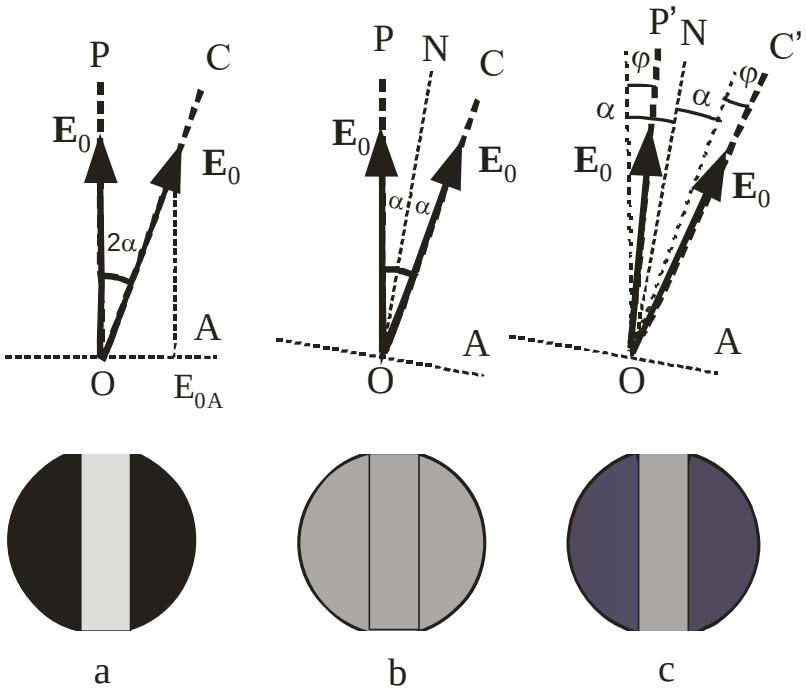


Рис. 4 Вид поля зрения в поляриметре. *a* - при скрещенных поляризаторе P и анализаторе A; *b* - при равенстве проекций векторов $\mathbf{E}_0$ на плоскость пропускания анализатора; *c* - изменение освещённостей полей при повороте плоскости поляризации активным веществом на угол φ. OP и OC - плоскости поляризации волн, вышедших из поляризатора и кристаллической пластинки; OA - плоскость пропускания анализатора и N – нормаль к ней.

Оптическую ось полуволновой пластинки (5) располагают под небольшим углом α с направлением пропускания поляризатора. Тогда плоскость поляризации света, вышедшего из нее, будет повёрнута на угол 2α по отношению к плоскости поляризации света, прошедшего через поляризатор. В случае, когда поляризатор и анализатор скрещены, боковые поля зрения (в соответствии с законом Малюса) будут чёрными, а центральная полоска - светлой (рис. 4а). Если повернуть анализатор так, что колебания векторов $\mathbf{E}_0$ напряженностей линейно поляризованных волн, вышедших из поляризатора (OP) и кварцевой пластинки (OC), расположены симметрично относительно нормали N к направлению пропускания анализатора (OA), то освещённости боковых полей и центральной полоски сравняются, и поле будет выглядеть однородно освещённым (рис. 4b).

Такая картина наблюдается без оптически активного вещества в кювете поляриметра, и с этим положением связан ноль угловой шкалы прибора.

При помещении в кювету поляриметра, например, правовращающего оптически активного вещества направления колебаний световых векторов на входе в анализатор OP и OC повернутся на угол φ по часовой стрелке в положения OP′ и OC′ (рис. 4с). Теперь направления OP′ и OC′ составляют с нормалью N к направлению пропускания анализатора OA углы $(\alpha - \varphi)$ и

($\alpha + \varphi$), соответственно. В этом случае части поля зрения будут освещены различно: интенсивность света, прошедшего через боковые участки, равна $I_{бок} = \sin^2(\alpha-\varphi)$, а $I_ц = \sin^2(\alpha+\varphi)$. Даже малый угол поворота φ приводит к заметному нарушению равенства освещенностей обоих полей.

Человеческий глаз весьма чувствителен к незначительным различиям яркости световых потоков, если она невелика (т.е. не вызывает рефлекторной регулировки размера зрачка глаза и длительность адаптации минимальна). Поэтому рекомендуется проводить измерения при практически скрещенных поляризаторах, когда кварцевая пластинка лишь слегка просветляет центральное поле зрения в поляриметре.

Снять отсчет искомого угла φ можно после поворота анализатора и восстановления равенства яркости всех частей поля. При этом нормаль N к направлению пропускания анализатора OA окажется расположенной симметрично относительно OP′ и OC′.

Описание экспериментальной установки

Внешний вид поляриметра приведен на рис. 5.

1 – источник света,

2 – крышка отсека для кюветы,

3 – винт для поворота анализатора,

4 – винт регулировки резкости поля зрения,

5 – шкала прибора.

Угол поворота анализатора отсчитывается по шкале (5), которая поделена на 180^0 (с ценой деления 1^0). Шкала снабжена подвижным нониусом, при помощи которого отсчитываются доли градуса. Цена деления нониуса $0{,}05^0$.

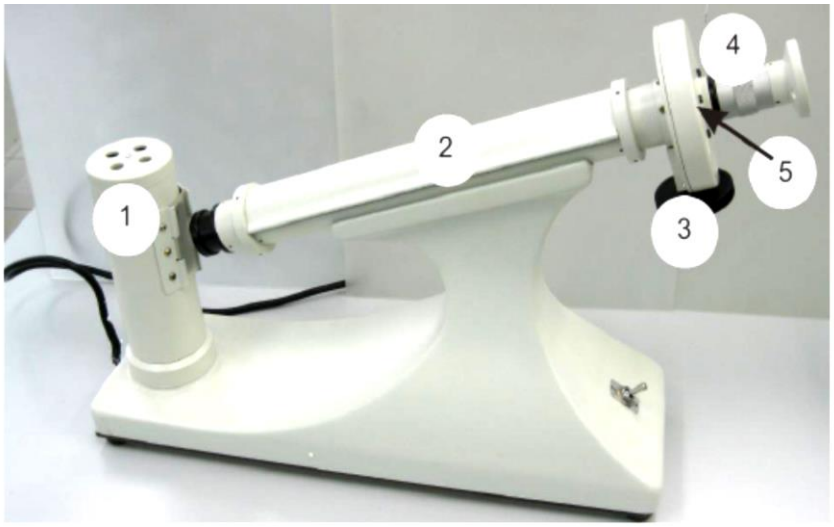


Рис. 5 Внешний вид поляриметра (обозначения указаны в тексте)

Целые значения градусов считывается по шкале, между которыми остановился ноль нониуса. Сотые доли градуса определяются так. Находится

деление нониуса, которое наилучшим образом совпадает с делением лимба. Число, стоящее против этого деления нониуса, умножается на 0,05. Например, отсчет на рис. 6 равен 1,20 (то есть 1 + 4·0,05).

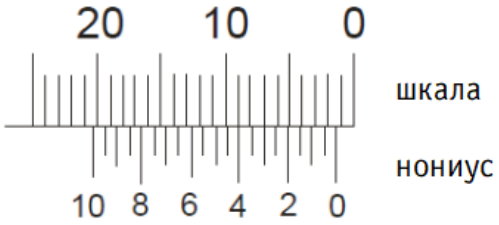
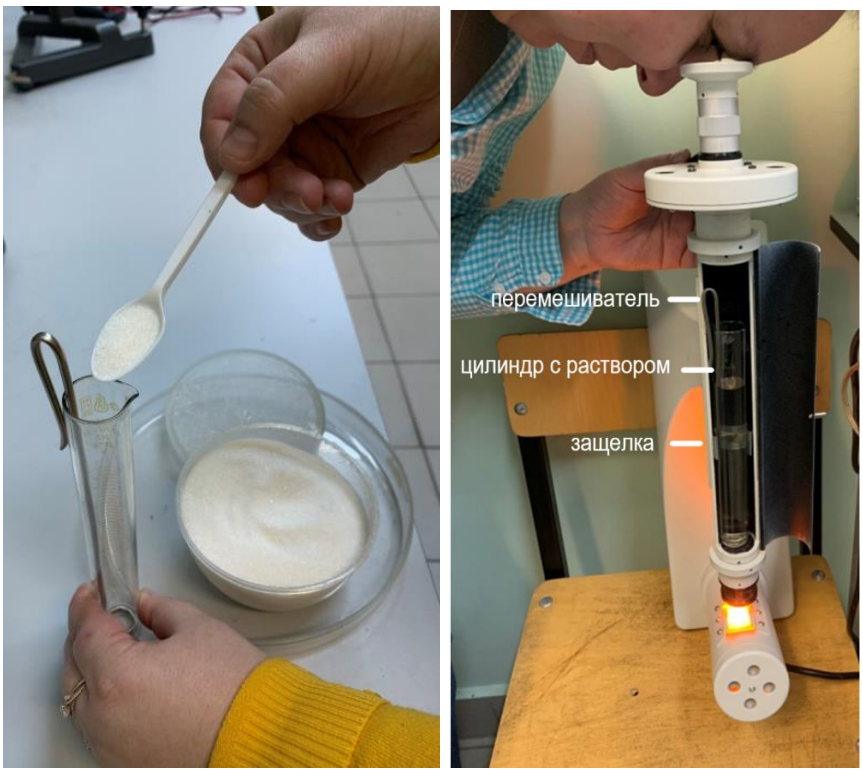


Рис. 6 Шкала с нониусом для измерения угла поворота плоскости поляризации

Для удобства измерений в качестве кюветы используется стеклянный мерный цилиндр с плоским дном (рис. 7а). В цилиндр вставлен металлический перемешиватель раствора с кольцом на конце, который не нужно вынимать при измерениях. Сахарный песок дозируют пластиковой чайной ложкой, скинув возвышающийся излишек песка пластинкой. Масса такой навески составляет 1,3 г.

Поляриметр установлен нестандартным образом, вертикально (рис. 7б), чтобы обойтись без крышки для мерного цилиндра с раствором. Цилиндр устанавливают в отсек тоже вертикально и фиксируют с помощью охватывающей защелки.

Для упражнения 4 предусмотрен набор нейтральных светофильтров с известными оптическими плотностями D.



a b

Рис. 7 a - дозирование сахара в цилиндр; b - положение цилиндра в поляриметре

Порядок выполнения работы:

Упражнение 1. Исследование зависимости угла поворота плоскости поляризации света от концентрации водного раствора сахара.

1. Включите поляриметр. Дайте лампе разгореться в течение 5 минут.
2. Налейте в мерный цилиндр с перемешивателем воду до верхней метки 50 мл. Протрите досуха боковую поверхность и дно цилиндра салфеткой. Вставьте цилиндр в камеру поляриметра и зафиксируйте его защёлкой.
3. Винтами 3 и 4 добейтесь резкого изображения светлой центральной полоски в поле зрения поляриметра как на рис.4a при полном затемнении боковин. Форма полоски может исказиться из-за неровности дна цилиндра – это допустимо.
4. Добейтесь тусклого равномерного свечения всего поля зрения как на рис.4b и снимите отсчет угла φ на шкале поляриметра. Он должен практически совпадать с нулевым отсчётом.
5. Наберите в сухую чайную пластиковую ложечку порцию сахарного песка, скинув излишек сверху пластиной. Выньте цилиндр из поляриметра и засыпьте в цилиндр эту порцию сахара (она равна 1,3 г). Ложку не мочить! Вертикальными движениями перемешивателя аккуратно размешайте сахар до полного растворения. Не вынимая перемешиватель, вставьте цилиндр в поляриметр.
6. Снова добейтесь тусклого равномерного свечения всего поля зрения и снимите отсчет угла φ на шкале поляриметра.
7. Проделайте пункты 5 и 6 не менее четырех раз, увеличивая концентрацию сахара в растворе на одну ложку и снимая соответствующие углы поворота плоскости поляризации φ.
8. Постройте график зависимости φ от концентрации сахара в растворе (увеличением объема раствора при добавках сахара можно пренебречь). Сделайте вывод, соответствует ли полученная зависимость закону Био.

Упражнение 2. Исследование зависимости угла поворота плоскости поляризации света от толщины слоя водного раствора сахара.

1. Измерьте линейкой высоту столба d водного раствора сахара максимальной концентрации из предыдущего упражнения.
2. Выньте цилиндр из поляриметра и отлейте в раковину примерно пятую часть раствора. Протрите досуха боковую поверхность и дно цилиндра салфеткой. Измерьте линейкой высоту столба d оставшегося раствора сахара. Вставьте цилиндр в поляриметр.
3. Винтами 3 и 4 добейтесь резкого изображения светлой центральной полоски в поле зрения поляриметра как на рис.4a при полном затемнении боковин. Форма полоски может исказиться из-за неровности дна цилиндра – это допустимо.
4. Добейтесь тусклого равномерного свечения всего поля зрения как на рис.4b и снимите отсчет угла φ на шкале поляриметра.

5. Проделайте пункты 2 - 4 не менее четырех раз, уменьшая высоту столба раствора и снимая соответствующие углы поворота плоскости поляризации φ. По окончании экспериментов ополосните цилиндр водой из-под крана. Протрите досуха боковую поверхность и дно цилиндра салфеткой и вставьте цилиндр в поляриметр.
9. Постройте график зависимости φ от толщины просвечиваемого слоя водного раствора сахара d. Сделайте вывод, соответствует ли полученная зависимость закону Био.
6. По графику определите удельную постоянную вращения [γ] для сахара.

Упражнение 3[2]*. Определение угла α между плоскостью пропускания поляризатора и осью полуволновой пластинки*

1. Извлеките кювету из поляриметра и аккуратно положите ее на стол.
2. Винтами 3 и 4 добейтесь резкого изображения светлой центральной полоски в поле зрения поляриметра, как на рис. 4а, при полном затемнении боковин. Снимите отсчет угла φ_1 на шкале поляриметра, при котором анализатор А скрещен с поляризатором Р (рис. 8, плоскость пропускания анализатора на рисунке не показана).
3. С помощью винта 3 поверните анализатор на **небольшой** угол, при котором максимально тёмной будет центральная полоска. При этом боковины станут слабо освещены. Запишите угол φ_2 (вероятна ситуация, когда углы φ_1 и φ_2 будут иметь противоположный знак). Этот угол соответствует ориентации анализатора, при котором он скрещен с направлением поляризации света, вышедшего из кристаллической пластинки С (рис. 8). Вычислите угол α между плоскостью пропускания поляризатора и осью полуволновой пластинки в поляриметре:

$$\alpha = (\varphi_1 - \varphi_2)/2.$$

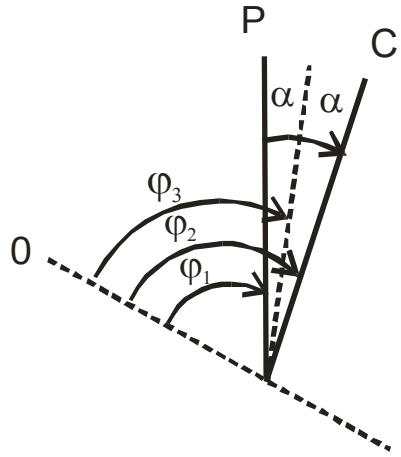


Рис.8. К определению угла α между плоскостью пропускания поляризатора и осью полуволновой пластинки С

[2] Упражнение выполняется по согласованию с преподавателем.

5. Добейтесь тусклого равномерного свечения всего поля зрения как на рис.4b и снимите отсчет угла φ_3 на шкале поляриметра (угол φ_3 находится в диапазоне между φ_1 и φ_2). Вычислите угол $\alpha = (\varphi_3 - \varphi_2)$. Сравните это значение с полученным в пункте 4.

Упражнение 4.[3] *Исследование способности глаза сравнивать светящиеся объекты в зависимости от их яркости.*

1. Выньте цилиндр из поляриметра.
2. Винтами 3 и 4 добейтесь резкого изображения светлой центральной полоски в поле зрения поляриметра как на рис. 4а при полном затемнении боковин.
3. Поворотом винта 3 добейтесь максимально яркого поля зрения. Вблизи этого положения определите диапазон углов Δφ, при которых яркости всех частей поля кажутся одинаковыми.
4. Поместите на плафон лампы нейтральный светофильтр с оптической плотностью D. Определите диапазон углов, при которых яркости всех частей поля кажутся одинаковыми. Повторите это с другими светофильтрами.
5. Постройте график зависимости Δφ от D. Сделайте вывод о точности визуального контроля равенства яркостей поверхностей в зависимости от их освещённости.

Контрольные вопросы:

1. Виды поляризации света.
2. Закон Малюса.
3. Явление естественного вращения плоскости поляризации. Каковы особенности в строении оптически активных веществ?
4. Сформулируйте закон Био.
5. Феноменологическая теория вращения плоскости поляризации.
6. Визуальный метод измерения угла поворота плоскости поляризации в поляриметре. Роль полуволновой пластинки.
7. Основываясь на результатах выполнения упражнения 4, обоснуйте необходимость проведения измерений при практически скрещенных поляризаторах, когда кварцевая пластинка лишь слегка просветляет поле зрения в поляриметре.

Рекомендуемая литература

1. Бутиков Е.И. Оптика. Гл.2, §2.9
2. Ландсберг Г.С. Оптика, Гл.XXX, §§163 - 168

[3] Упражнение выполняется по согласованию с преподавателем.

3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.4. Волны. Оптика, Изд. Лань, С.-П., 2022. Гл.6, §6.8

Составители:
И.Н.Грачёва,
Ю.А.Захаров,
Д.С.Ирисов,
А.И.Фишман