

Федеральное агентство по образованию РФ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ**

*Лабораторные работы*

*Для студентов специальности  
«Исследование природных ресурсов»*



Москва  
МИИГАиК 2007

УДК 53.082.74  
ББК 22.343  
Л 12

Физические основы методов дистанционного зондирования: Лабораторные работы./ Под редакцией проф. Ильина Ю.А. –М.: МИИГАиК, 2007. –59 с.

Методические указания написаны в соответствии с программой курса «Физические основы методов дистанционного зондирования», рекомендованы кафедрой физики и утверждены к изданию методической комиссией факультета прикладной космонавтики.

Данное пособие является переработанным вариантом методических указаний, изданных в 1986 году. В пособии учтены те изменения, которые произошли в результате обновления и модернизации лабораторного практикума по данному курсу, часть описаний расширена, в конце описания каждой работы даны контрольные вопросы. Описание работы №7 подготовлено доц. Чернышевым О.Н.

УДК 53.082.74  
ББК 22.343

© Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), 2007

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства МИИГАиК и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия издательства запрещается

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 <b>ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ИК-РАДИОМЕТРА</b> .....	4
Лабораторная работа №2 <b>ИНДИКАТРИССЫ РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ МАЛЫХ ЧАСТИЦ</b> .....	12
Лабораторная работа №3 <b>ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ</b> .....	21
Лабораторная работа №4 <b>ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ</b> .....	28
Лабораторная работа №5 <b>ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЯРИЗАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТА НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ</b> .....	36
Лабораторная работа №6 <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА</b> .....	43
Лабораторная работа №7 <b>ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НАКАЛЁННОГО ТЕЛА</b> .....	52

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ИК-РАДИОМЕТРА.

**Приборы и принадлежности:** ИК-радиометр ИМП-3, ручные радиометры, стенд с регулируемым температурным полем, зонд-нагреватель с источником питания, ванна с водой и термометр для калибровки радиометра.

### Общие сведения

При любой температуре, отличной от абсолютного нуля, все физические объекты излучают электромагнитную энергию. Это излучение генерируется хаотическим движением заряженных частиц. Данная энергия излучается в широком спектре частот (длин волн).

При температурах, близких к нормальной, таких, как температура земной поверхности или температура окружающих нас предметов, основная доля излучения происходит в инфракрасной области.

Распределение теплового излучения по спектру длин волн  $\lambda$  (или частот  $\omega$ ) зависит от температуры тела и от природы вещества. Существует, однако, особый случай, когда тепловое излучение есть функция одной лишь температуры — это случай чёрного тела (ЧТ). Для излучения чёрного тела справедлив закон Стефана-Больцмана:

$$R(T) = \sigma T^4, \quad (1.1)$$

где  $R(T)$  — интегральная плотность излучения,  $T$  — абсолютная температура,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$  — постоянная Стефана-Больцмана.

Интегральная плотность излучения  $R$  — это поток энергии, испускаемый единицей поверхности излучающего тела по всем направлениям. Единица измерения  $R$  —  $[\text{Вт}/\text{м}^2]$ .

Зависимость спектральной плотности излучения единичной площадью поверхности  $\Delta S$  тела по всем направлениям, для чёрного тела выражается формулой Планка:

$$E(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\lambda T} - 1}, \quad (1.2)$$

где константы  $C_1$  и  $C_2$  (при измерении  $\lambda$  в микрометрах, а  $T$  — в кельвинах) равны:  $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ ;  $C_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Длина волны  $\lambda_m$ , для которой ордината спектральной плотности излучения  $E(\lambda, T)$  проходит через максимум, обратно пропорциональна абсолютной температуре (закон смещения Вина)

$$\lambda_m = \frac{C_3}{T}, \quad (1.3)$$

где  $C_3$  — константа. Для длины волны  $\lambda_m$ , выраженной в микрометрах, а  $T$  — в кельвинах,  $C_3 = 2880 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Практически вся энергия излучается в диапазоне длин волн от  $\frac{\lambda_m}{3}$  до  $3\lambda_m$ . При температуре Солнца, которая равна примерно  $6000^\circ \text{К}$ ,  $\lambda_m = 0,48 \text{ мкм}$ , так что почти всё солнечное излучение распределяется в области от 0,2 до 4 мкм. При  $20^\circ \text{С}$  (или  $293 \text{К}$ ) длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения равна  $\lambda_m = 9,85 \text{ мкм}$ , и тепловое излучение в основном проходит на область между 3,5 мкм и 30 мкм.

В случае нечёрного тела закон Стефана-Больцмана принимает вид:

$$R(\lambda, T) = K(\lambda, T) \sigma T^4, \quad (1.4)$$

где  $K(\lambda, T)$  — спектральный коэффициент излучения. В случае серого тела спектральный коэффициент излучения не зависит от длины волны:  $K(\lambda, T) = K(T)$ , и закон Стефана-Больцмана для такого серого тела запишется в виде:

$$R(T) = K(T) \sigma T^4. \quad (1.5)$$

В формулы (1.1), (1.4), (1.5) входит температура излучающего тела. Поэтому они могут быть использованы для определения температуры тел по измерениям плотности излучения тела. Соответствующие приборы называются радиационными приемниками или радиометрами. Радиометр измеряет поток излучения тела  $R$  в некотором диапазоне  $\Delta\lambda$ .

Формулу (1.5) можно записать в виде (1.1), но вместо истинной температуры следует взять радиационную  $T_a$ , т.е.  $R(T) = K(T) \sigma T^4 = \sigma T_a^4$ , тогда связь между  $T$  и  $T_a$ :

$$T_a^4 = K(T) T^4, \quad (1.6)$$

откуда следует связь между истинной (термодинамической) температурой тела  $T$  и радиационной  $T_a$

$$T = \frac{1}{\sqrt[4]{K(T)}} T_a. \quad (1.7)$$

В радиодиапазоне связь истинной температуры тела с радиационной имеет другую зависимость

$$T = \frac{1}{\delta} T_a, \quad (1.8)$$

где  $\delta$  — излучательная способность (коэффициент излучения) тела в радиодиапазоне. Излучательная способность объектов природной среды зависит от многих параметров (для подстилающей поверхности — тип, её состояние, температура, длина волны, угол наблюдения и т.п.). Зависимость (1.8) следует из закона Релея-Джинса  $E(\lambda, T) = \frac{2\pi}{\lambda^2} kT$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Так как  $K(T) \leq 1$ , то для нечёрных тел истинная температура  $T$  больше радиационной  $T_a$ . В справочниках имеются таблицы значений  $K(T)$  для различных тел. Например, для воды при 20°C (293°K)  $K(T) = 0,98-0,99$ , что позволяет считать поверхность воды хорошей моделью чёрного тела.

Спектральный коэффициент излучения  $K(T, \lambda)$  в случае равновесного излучения равен  $a(\lambda, T)$  — поглощательной способности тела (спектральному коэффициенту поглощения), а  $a(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) = 1$ , где  $\rho(\lambda, T)$  — отражательная способность тела (спектральный коэффициент отражения).

### Описание лабораторной установки

Радиометр типа ИМП-3 предназначен для определения радиационной температуры исследуемой поверхности в диапазоне 273-400К.

Прибор может использоваться для определения температуры и неоднородности нагрева любых объектов, обладающих одинаково окрашенной поверхностью.

Прибор показывает значения температуры контролируемой поверхности в градусах Цельсия по отношению к базовой температуре, которая выставляется по шкале. Значение базовой температуры задаётся в пределах от 0°C до +125°C. Погрешность определения температуры поверхностей не выше  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

### Принцип действия прибора ИМП-3

Структурная схема прибора приведена на рисунке 1.

По принципу действия прибор относится к классу радиационных пирометров с термоэлементом специального исполнения, позволяющего производить непосредственное измерение разности радиационной температуры поверхности и «базовой температуры». Для измерения используется метод вспомогательного тела (корпуса оптического блока), температура которого в свою очередь измеряется термометром сопротивления.

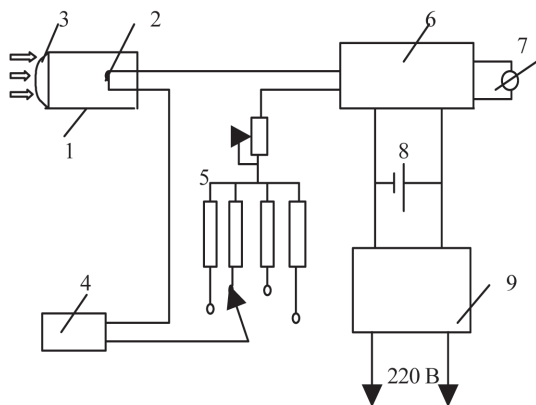


Рис. 1

Коэффициенты преобразования радиационного термоэлемента и термометра сопротивления по температуре выбираются одинаковые. Для расширения динамического диапазона измеряемых температур сигнал термометра сопротивления 4 с помощью постоянных и переменных резисторов 5 может регулироваться. Величина вводимого сопротивления прокалибрована в единицах температуры, и значение получаемого сигнала определяет «базовую температуру». Сигналы от обоих датчиков (радиационного термоэлемента и термометра сопротивления) складываются, и полученный суммарный сигнал пропорционален (при согласовании коэффициентов преобразования) искомой величине разности радиационной температуры и «базовой температуры».

Поток излучаемой энергии от объекта фокусируется линзой 3 на радиационный элемент 2, который вырабатывает сигнал, пропорциональный температуре исследуемого тела. Термометр сопротивления 4 с сопряжёнными с ним сопротивлениями вырабатывает сигнал, пропорциональный температуре корпуса 1. Цепь установки «базовой температуры» 5 состоит из постоянных и переменных резисторов. Регулировкой положения переключателя шкал и движка переменного резистора выбирается значения базовой температуры, от которой отсчитывается разность температур. Усилитель постоянного тока 6 выполнен по схеме модулятор-усилитель-демодулятор. Входной постоянный сигнал преобразовывается в переменное напряжение прямоугольной формы частотой 3кГц с последующим синхронным детектированием на выходе. В качестве индикатора 7 используется стрелочный прибор, имеющий постоянную составляющую протектированного напряжения на выходе усилителя 6.

Питание усилителя осуществляется от аккумуляторной батареи 8 или через выпрямитель 9 при питании прибора от сети.

### **Конструкция прибора**

Прибор состоит из двух блоков: электронного и оптического. Оптический блок совмещён с индикатором и кабелем соединён с электронным блоком. На лицевой панели электронного блока расположены органы регулировки: шкала установки «базовой температуры», переключатель шкал, «нуль-корректор», переключатель «уст.0»-«измерение», выключатель питания, разъём для подключения сети 220В, 50Гц.

### **Порядок измерений прибором**

При работе с прибором ИМП-3 следует точно выполнять следующий порядок действий.

1. Включить питание, для чего перевести тумблер включения в положение «сеть».
2. Поставить переключатель рода работ в положение «Уст.0» и ручкой электронного корректора поставить стрелку индикатора на нулевую черту шкалы.
3. В зависимости от ожидаемой величины разности температур поставить переключатель шкал в одно из следующих положений:

Пределы установки «базовой температуры» (пределы измерения) °С		Положение переключателя
-5	+25	0
+20	+50	+25
+15	+75	+50
+70	+100	+750
+95	+125	+100

4. Переключатель режима работ перевести в положение «измерение».
5. Для измерения разности базовой и радиационной температуры направить объектив оптической головки на контролируемый участок поверхности. Прибор измеряет радиационную температуру поверхности, которая зависит от её состояния. Показания справедливы для окрашенных, сильнозагрязненных или сильноокисленных металлических и иных поверхностей. При контроле температуры блестящих металлических поверхностей будет замерена температура предметов, видимых в отражении, так как в данном случае поверхность работает как зеркало.
6. Выключение прибора производится переводом тумблера включения в нейтральное положение.



### **Примечания.**

1. Установку «нуля» необходимо производить на каждом поддиапазоне отдельно.

2. Входная линза 3 оптического блока выполнена из германия, она не должна соприкасаться с посторонними предметами, её не следует протирать или касаться пальцами, в нерабочем состоянии она должна быть закрыта заглушкой.

## **Измерения и обработка результатов**

### **Задание 1. Определение угла зрения прибора.**

Для определения угла зрения прибора используется точечный источник излучения, в качестве последнего применяется нагретый электрическим током резистор. Данный источник излучения перемещается к центру координатной сетки, определяемому точкой пересечения оптической оси прибора с поверхностью, по которой перемещается источник. На каждом сантиметровом делении снимается отсчёт по радиометру. После того, как источник оказывается в центре, аналогичные измерения проводятся с других направлений координатной сетки. По результатам измерений строится график зависимости  $\Delta T = f(r)$ , где  $r$  — координата, отсчитываемая от центра,  $\Delta T = T_a - T_0$ ,  $T_0$  — температура, показываемая прибором до внесения источника излучения,  $T_a$  — радиометрическая температура при внесённом источнике излучения.

Полученные данные наносятся на график (рис.2). На графике по

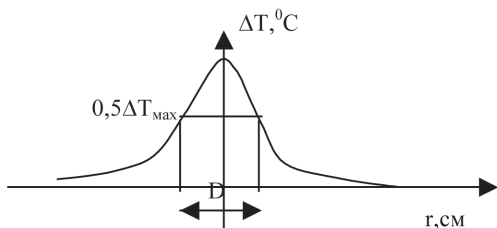


Рис. 2

уровню  $0,5\Delta T_{\text{max}}$  определяется диаметр  $D$  поля зрения на поверхности по оси  $x$  и по оси  $y$ , а затем по формуле  $\alpha = 2 \arctg \frac{D}{2H}$  вычисляется углы зрения прибора в плоскости  $xz$  —  $\alpha_x$  и в плоскости  $yz$  —  $\alpha_y$ . Здесь  $H$  — высота от объектива радиометра до плоскости.

### **Задание 2. Калибровка приборов.**

Перед измерением температурного поля исследуемой поверхности необходимо провести калибровку приборов.

Для калибровки приборов используется кювета с водой. Перед началом измерений воду в кювете нагревают до температуры  $60-70^\circ\text{C}$ . Понижая температуру воды до  $25^\circ\text{C}$ , через каждые  $5^\circ\text{C}$  необходимо, измеряя температуру воды ртутным термометром ( $T$ ), одновременно регистрировать показания исследуемого радиометра ( $T_a$ ) также измеряю-

щего температуру воды. Так как вода в ИК-диапазоне является хорошей моделью чёрного тела, то радиометры будут регистрировать температуру воды, близкую к истинной (термодинамической). Следовательно, данные ртутного термометра и радиометра не должны сильно различаться. Поэтому проводя измерения, анализируйте результаты: обратите внимание на методику измерений, если данные радиометров и термометра расходятся более чем на 1-3 градуса. При измерениях необходимо тщательно перемешивать воду в кювете.

Далее постройте график зависимости  $T_a = f(T)$ .

По указанной методике наряду с прибором ИМП-3 проведите калибровку ещё двух ручных радиометров с электронными системами отсчёта. Ручные радиометры получите у преподавателя.

### **Задание 3. Получение тепловой картины исследуемой поверхности.**

Под исследуемой поверхностью (рис.3) установите нагреватель (электроплитку), на который подают напряжение 60-100 В через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР). Через 20-30 минут после включения нагревателя установившаяся тепловая картина снимается одним из радиометров по точкам координатной сетки. Тип используемого радиометра устанавливает преподаватель.

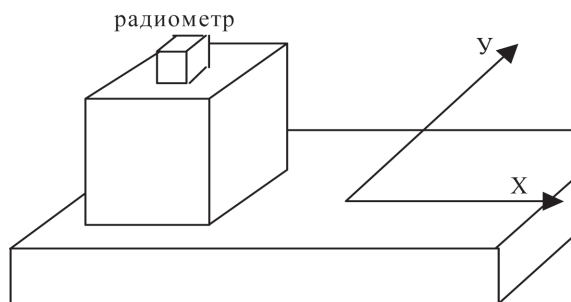


Рис. 3

Смещение по оси  $x$  и  $y$  делать через 5-10 см. Значения температуры сначала заносятся в таблицу, а затем обрабатываются в виде изотерм через  $5^\circ\text{C}$  на чертеже в прямоугольной системе координат  $(x, y)$ .

### **Контрольные вопросы**

1. *Что такое радиационная температура тела?*
2. *Почему радиометр регистрирует радиационную температуру тела?*

3. По данным измерений, используя связь между термодинамической и радиационной температурами, определите излучательную способность (коэффициент излучения) воды для 3 различных температур.
4. Каким образом можно повысить чувствительность радиометра?
5. Изобразите структурную схему радиометра и опишите принцип действия.
6. Почему при калибровке прибора можно использовать в качестве эталона воду? Какова погрешность измерения температуры получается в этом случае? Какие тела (кроме воды) можно использовать для калибровки радиометра?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ МАЛЫХ ЧАСТИЦ

**Приборы и принадлежности:** лазер с блоком питания, поворотный столик с фотоприёмником и кюветой для исследуемого вещества, милливольтметр.

### Общие сведения

При применении дистанционных методов зондирования атмосферы и океана измеряются различного рода характеристики излучения, проходящего к наблюдателю — направление излучения, его интенсивность, спектральный состав, состояние поляризации. Для пересчёта измеряемых характеристик излучения в интересующие параметры атмосферы и океана необходимо знать закономерности рассеяния и поглощения света в воде и воздухе.

Основы теории молекулярного рассеяния были заложены Релеем, исследовавшим действие весьма малой частицы на световые волны. В теории Релея размер  $r$  рассеивающей частицы значительно меньше длины световой волны ( $r \ll \lambda$ ).

Всякую мутную среду можно рассматривать как совокупность частиц, распределённых в пространстве и нарушающих ход световой волны. Если на пути световой волны оказывается частица, показатель преломления которой отличается от показателя преломления окружающей среды, то на поверхности раздела «среда-частица» возникают вынужденные электромагнитные колебания, которые порождают вокруг частицы две системы световых волн, поляризованных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Если за единицу энергии принять интенсивность, т.е. поток  $I$  падающего света в единице телесного угла, а через  $I_1$  и  $I_2$  обозначить интенсивности систем волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях, то для интенсивности света, исходящего от частицы в некотором направлении, получаем выражение:

$$I_1 + I_2 = \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4 W_0} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta), \quad (2.1)$$

где  $\theta$  — угол между падающим лучом (вектором Пойнтинга  $\Pi$ ) и направ-

лением из данной частицы в точку наблюдения  $P$ ,  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  — показатель преломления вещества частицы,  $r$  — радиус частицы (рис. 1),  $W_0 = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}}$

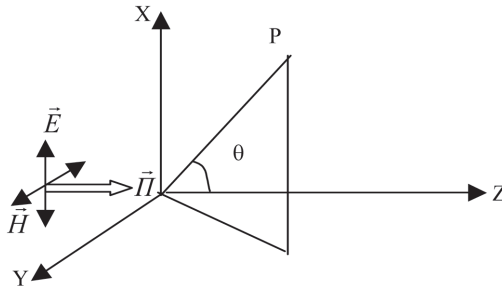


Рис. 1

— волновое сопротивление среды.

Формула (2.1) свидетельствует о том, что интенсивность света, рассеянного частицей, обратно пропорциональна четвёртой степени длины световой волны.

$$I_1 - I_2 = \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4 W_0} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 (1 - \cos^2 \theta). \quad (2.2)$$

Из формулы (2.2) видно, что поляризация рассеянного света равна нулю лишь в двух направлениях — в направлении падающего света ( $\theta = 0^\circ$ ) и в прямо противоположном направлении ( $\theta = 180^\circ$ ). В направлении  $\theta = 90^\circ$  и  $\theta = 270^\circ$  свет является полностью поляризованным, т.к. для этих углов  $I_1 + I_2 = I_1 - I_2$ , т.е.  $I_2 = 0$ .

Найдя распределение рассеянной световой энергии вокруг одной частицы, Релей исследовал эффект множества частиц, включённых в однородную среду. Для случая прохождения потока световой энергии  $I$  сквозь слой среды толщиной  $dz$  во все стороны рассеивается количество энергии

$$dI = -\sigma I dz, \quad (2.3)$$

где  $\sigma$  — коэффициент рассеяния, определяемый из соотношения

$$\sigma = \frac{8\pi^3 (n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} \approx \frac{a}{\lambda^4}. \quad (2.3a)$$

Здесь  $N$  — число частиц в  $1 \text{ см}^3$ .

Таким образом:

а) поток энергии, рассеянный слоем мутной среды, обратно про-

порционален четвёртой степени длины световой волны. Этот эффект объясняет происхождение голубого цвета неба: прямые солнечные лучи на пути сквозь атмосферу претерпевают частичное рассеяние, причём в синем конце спектра (более короткие волны) рассеяние оказывается наибольшим. Вот почему в диффузно рассеянном световом потоке, исходящем от небесного свода, преобладают синие лучи. Подобным же образом объясняется красная окраска солнца во время восхода или заката, т.к. при малых высотах солнца солнечные лучи проходят в атмосфере значительно более длинный путь, нежели при больших высотах солнца. При этом короткие волны (синяя часть) в спектре солнца в значительной степени рассеиваются. Красные лучи доходят до поверхности земли, испытав сравнительно малое рассеяние;

б) интенсивность света, рассеянного частицей, определяется симметрично относительно первоначального направления. Угловое распределения потока рассеянного частицей света характеризуется индикатрисой рассеяния  $f(\theta)$ . Индикатриса рассеяния (в формулах (2.1), (2.2)  $f(\theta) = 1 \pm \cos^2 \theta$ ) определяется как отношение потока энергии, рассеянной в единице телесного угла  $d\Omega$  в данном направлении  $\theta$ , к средней энергии, рассеянной в единице телесного угла  $d\Omega$  во всех направлениях

$$f(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_0}.$$

Малую частицу можно представить элементарным диполем-осциллятором, т.е. системой двух противоположных по знаку зарядов, имеющих гибкую связь. При падении на такой диполь электромагнитной волны  $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz)$ , заряды колеблются с частотой  $\omega$ , и диполь переизлучает энергию, т.е. становится источником вторичных волн. Распределение переизлучённой энергии в пространстве описывается индикатрисой  $f(\theta) = 1 \pm \cos^2 \theta$ . Эта индикатриса представляет собой «бублик» без дырки, т.е. в направлении своей оси диполь не излучает (рис.2). Вектор  $E$  в переизлучённой (рассеянной) волне ориентирован параллельно оси диполя. Из рисунка видно, вектор  $E$  в рассеянной волне имеет ориентацию только вдоль оси  $X$ .

Диполи в рассеивающей среде могут быть ориентированы произвольно относительно вектора  $E$  падающей волны. В общем случае возможна ориентация диполей вдоль осей  $X, Y, Z$  (рис.3 а, б, в).

Пусть падающая волна плоская, неполяризованная, т.е. вектор  $E$  у падающей волны имеет составляющие по  $X$  и по  $Y$ :  $\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$ . В этом случае падающее поле  $\vec{E}_x$  возбуждает диполь, ориентированный вдоль

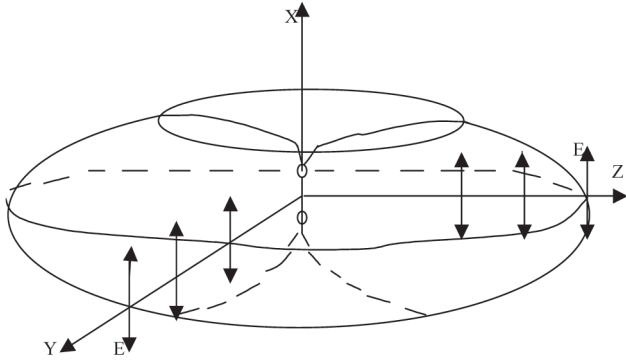


Рис.2

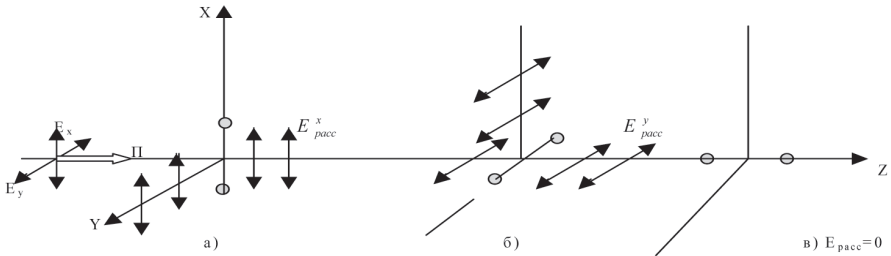


Рис.3

оси  $X$  (случай  $a$ ), а поле  $\vec{E}_y$  — диполь, ориентированный вдоль оси  $Y$  (случай  $b$ ). Диполь, ориентированный вдоль оси  $Z$  остаётся невозбуждённым (случай  $v$ ). Таким образом, рассеянная волна в направлении оси  $X$  поляризована, она имеет только компоненту  $\vec{E}_{расс}^y$ . Волна, рассеянная в направлении оси  $Y$ , тоже поляризована (имеет только компоненту  $\vec{E}_{расс}^x$ ).

А в направлении оси  $Z$  рассеянная волна содержит как компоненту  $\vec{E}_{расс}^x$ , так и компоненту  $\vec{E}_{расс}^y$ , т.е. она неполяризована. Следовательно, рассеянный свет, отражённый в направлении, перпендикулярном падающему лучу (вдоль осей  $X$  и  $Y$ ) является линейно-поляризованным;

$v$ ) интенсивность поляризованного света представляет собой сумму интенсивностей рассеяния отдельными молекулами (пропорциональность  $dI$  и  $dz$  по формуле (2.3).

Теория Релея применима лишь при выполнении ряда условий:

— если среда, в которой распространяется электромагнитная вол-

на, и возмущающая частица не содержат свободные заряды, т.е. они не являются проводниками;

— если магнитная проницаемость среды и частицы одинакова;

— если размер рассеивающей частицы не более  $0,1$  длины волны ( $r \leq 0,1\lambda$ );

— если интенсивность рассеянного света вычисляется для точек весьма удалённых от возмущающей частицы (в дальней зоне  $kr \gg 1$ ).

Теория Релея объясняет явления, происходящие в разреженных газах, но она неприменима для жидкости, т.к. здесь межмолекулярные расстояния сравнимы с размерами молекул, световые волны от соседних молекул мало отличаются по фазе, интерференция их должна привести к ослаблению полного потока рассеянного света.

Процесс рассеяния света в жидкостях лучше описывается с помощью теории Смолуховского, рассматривающей рассеяние света на флуктуациях плотности. Смолуховский исследовал тепловое движение молекул газообразного или жидкого тела статистически, что позволило выявить закономерности распределения частиц в некоторой области пространства в различные моменты времени. При хаотическом тепловом движении молекул, они будут то собираться теснее в каком-то малом объёме, то расходиться на большие расстояния. Число молекул в единице объёма непрерывно колеблется, вызывая тем самым колебания плотности вещества. Такие колебания плотности очевидно превращают всякое вещество в оптически неоднородную среду, в различных точках которой физические константы (плотность, диэлектрическая проницаемость) неодинаковы. Между диэлектрической проницаемостью вещества и его плотностью существует зависимость

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = A \cdot \rho,$$

где  $A$  — постоянная величина,  $\rho$  — плотность. Таким образом, функции плотности вызывают и колебания диэлектрической проницаемости среды. Последнее весьма важно для рассматриваемых процессов, поскольку колебания диэлектрической проницаемости неразрывно связаны с колебаниями коэффициента преломления (коэффициент преломления пропорционален корню квадратному из диэлектрической проницаемости вещества —  $n = \sqrt{\varepsilon}$ ).

Для расчета потока энергии рассеянного света теория Смолуховского даёт формулу:

$$I = \frac{\pi^2 R T \beta_0}{18 N_A} \cdot \frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)^2}{\lambda^4}, \quad (2.4)$$



где  $I$  — интенсивность рассеянного света;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $\beta_0$  — коэффициент заполнения частицами объёма;  $N_A$  — число Авогадро.

Для случая газообразной среды формула эта может быть приведена к формуле Релея. В газах  $\beta_0 = \frac{1}{\rho}$ . При величине коэффициента преломления  $n$  порядка единицы можно принять:  $n^2 + 2 = 3$ , а  $n^2 - 1 = (n + 1) \cdot (n - 1) = 2(n - 1)$ . Кроме того, для газов, используя уравнение состояния, имеем

$$PV = \frac{m}{\mu} RT; \quad m = m_0 N_2,$$

где  $m_0$  — масса молекулы,  $N_2$  — число молекул в объёме  $V$ ;  $\mu = m_0 N_A$ , тогда

$$\frac{RT}{N_A} \cdot \frac{1}{P} = \frac{V}{N_2} = \frac{1}{N}. \quad (2.5)$$

Подставив эти выражения в формулу (4.4), получим

$$I = \frac{2\pi^2 (n-1)^2}{N\lambda^4}. \quad (2.6)$$

Эта зависимость выражает интенсивность света, рассеянного перпендикулярно падающему лучу. В этом случае для коэффициента рассеяния получится величина, определяемая уравнением (2.3а). Таким образом, для потока энергии света, рассеянного молекулами газа, обе теории — и Релея, и Смолуховского — дают один и тот же числовой результат. Однако теория Релея рассматривает рассеяние на индивидуальных молекулах, которые являются источниками вторичных волн. С точки зрения теории Смолуховского рассеяние света происходит на неоднородностях среды, возникающих благодаря случайным изменениям плотности при тепловом движении молекул. Очевидно, что для молекулярного рассеяния в жидкостях теория Смолуховского даст иную величину рассеянной энергии, нежели теория Релея, и полученный результат будет ближе к истине. На основе формулы (2.4) Смолуховским определено количество энергии, рассеянной единичным объёмом мутной среды во все стороны и получено выражение для коэффициента рассеяния  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{8\pi^3 RT\beta_0 (n^2 - 1)^2 (n^2 + 2)^2}{27 N_A \lambda^4}. \quad (2.7)$$

Теория Релея и Смолуховского основывается на предположении, что рассеяние происходит на объёмах, размеры которых малы по сравнению с

длиной световой волны. Такое допущение можно принять, если жидкость однородна в оптическом отношении. Подобной жидкостью, например, является вода, в которой не растворено никаких газов, или вода с раствором электролита, концентрация которого далека от насыщения. Если в воде растворены газы, то при колебаниях температуры их молекулы, прежде чем выделиться в виде пузырьков, будут собираться в отдельные скопления. Эти скопления газов могут достигать размеров порядка длины световой волны и вместе с тем не будут всплывать в виде пузырьков. Такие крупные частицы вызывают рассеяние света, не подчиняющееся релеевскому закону. На это обстоятельство обратил внимание Г. Мее (Ми), исследовавший рассеяние света коллоидными взвесями золота, получающимися при горении вольтовой дуги между золотыми электродами, опущенными в воду. Пары золота конденсируются в воде и дают частички с диаметром порядка  $0,1 \mu\text{км}$ , не выпадающие из раствора.

Если размер частицы мал по сравнению с длиной волны, то при рассмотрении рассеяния такую частицу можно рассматривать как одиночный диполь. Это случай релеевского рассеяния, который был рассмотрен выше.

При рассеянии Ми размеры частиц – порядка длины световой волны или больше. В этом случае частица представляет собой не один, а два, три и более диполей (осцилляторов). Рассеянная волна будет представлять собой интерференцию большого числа вторичных волн, возникающих при колебаниях этих осцилляторов под действием падающей волны. В результате возникает сложная картина рассеянного поля, зависящая от поляризации и длины падающей волны, размера и показателя преломления рассеивающей частицы, угла, под которым наблюдается рассеянное излучение. Если показатель преломления является комплексным  $n = n' - in''$ , то частица будет не только рассеивать, но и поглощать падающую световую волну, что ещё больше осложняет анализ.

Теория Ми показывает, что с возрастанием размеров частиц симметрия индикатрисы рассеяния относительно направления падающей волны нарушается: наибольшее рассеяние наблюдается в направлении падающей волны, максимум поляризации смещается в этом направлении (рис.4). На рисунках отрезок радиуса-вектора между внутренней и вне-

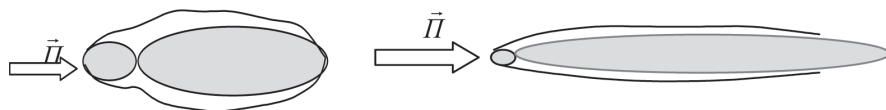


Рис.4

шней кривыми показывает интенсивность рассеянного поляризованного света.

В настоящей работе изучаются индикатрисы рассеяния света на модельных средах, полученных в результате смешивания различных взвесей (молоко, гуммигут) с водой.

### Описание лабораторной установки.

Установка (рис.5) состоит из лазера-осветителя 1, дающего поля-

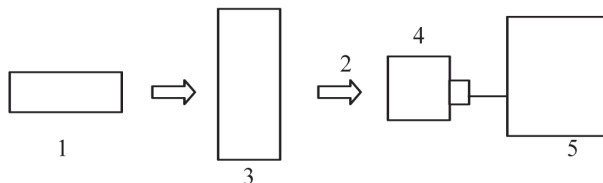


Рис.5

ризованный монохроматический свет, камеры 2, кюветы с модельной средой 3, фотоприёмника 4 и регистрирующего прибора 5.

Приёмник света вращается вокруг сосуда с модельной средой, и положение его может фиксироваться относительно лимба, на котором установлен сосуд.

### Измерения и обработка результатов.

1. Наполнить дистиллированной водой кювету и, вращая приёмник, снять по показаниям прибора индикатрису рассеяния.

2. Добавить по заданию преподавателя суспензии (молоко) и снять индикатрису рассеяния в этом случае.

3. По заданию преподавателя изменить концентрацию суспензии в растворе и снять ещё 3-4 индикатрисы. Устанавливая перед приёмником поляриды, снять индикатрисы при соответствующих поляризациях света.

4. Нормированные индикатрисы  $\frac{f(\theta)}{f_{\max}}$  построить в полярных или прямоугольных координатах. Проанализировать полученные результаты.

### Контрольные вопросы.

1. Что такое индикатриса рассеяния? Изобразите индикатрису рассеяния для сферической частицы, радиус которой много меньше длины падающей волны.

2. Как изменится индикатриса, если длина волны остаётся прежней, а радиус частицы увеличивается?

3. *От каких параметров зависит интенсивность рассеянного мутной средой света?*
4. *При каких условиях справедлива теория рассеяния Релея?*
5. *Какая связь диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и плотности  $\rho$  для газообразных и жидких сред? Увеличивается или уменьшается диэлектрическая проницаемость при возрастании плотности среды?*
6. *При каких углах наблюдения свет, рассеянный релеевской частицей, будет поляризованным?*

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

**Приборы и принадлежности:** спектрокалориметр «Specol-10» с блоком питания, приставки типа R 45/0 и R d/0, измеряемые образцы.

### Общие сведения

В данной работе определяется зависимость коэффициента отражения различных материалов от длины в оптическом диапазоне ( $\lambda = 350-750 \text{ нм}$ ).

Большая часть света, приходящая в наш глаз, попадает к нам не непосредственно от источника, а косвенно — за счёт рассеяния. Всё вокруг нас наполнено рассеянным светом. Поверхность океана и поверхность суши, множество предметов, нас окружающих, мы видим лишь потому, что они отражают свет.

Способность отражать свет, свойственная всем телам, представляет собой частное проявление рассеяния света, которое происходит на атомах и молекулах этих тел. Рассеяние позволяет наблюдать взаимодействие электромагнитного излучения и вещества, и оно происходит на всех длинах волн спектра.

Падающая на земную поверхность солнечная радиация отражается отчасти зеркально (например, от поверхности воды), отчасти рассеянно (например, от шероховатой поверхности почвы). В некоторых случаях это явление ещё более сложно. Так, в лесу или в густой траве луч света может многократно отражаться от листьев, проходить сквозь них, прежде чем уйдёт ослабленным в атмосферу. При падении света на естественные поверхности всегда происходит частичное поглощение энергии.

Основная характеристика электромагнитного излучения — это количество электромагнитной энергии  $dE$ , передаваемой в пределах некоторой полосы спектра  $\Delta\lambda$  в определённом телесном угле или через определённую площадку  $dS$  в каком-либо направлении —  $\theta, \varphi$ . Энергия, излучаемая источниками или отражаемая телами, зависит от длины волны  $\lambda$ : ( $E(\lambda) = E_\lambda$ ). Энергия в некотором спектральном интервале

$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  находится интегрированием:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda = W(\Delta\lambda). \quad (3.1)$$

Выражение (3.1) даёт полную энергию всего диапазона излучения, когда пределы интегрирования берутся  $\lambda_1 = 0; \dots, \lambda_2 = \infty$ . Если спектральное распределение энергии такое же, как у чёрного тела, то нет необходимости проводить интегрирование, т.к. энергия, излучаемая единицей площади  $\Delta S$  в единицу времени  $\Delta t$ , зависит только от температуры  $T$  в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$E_T = \delta T^4. \quad (3.2)$$

Спектральный поток энергии  $\Phi_\lambda$  определяется формулой:

$$\Phi_\lambda = \frac{dW(\lambda)}{dt dS}, \quad (3.3)$$

т.е. поток есть энергия, проходящая через некоторую площадку в единицу времени. Именно поток энергии измеряется большинством приёмных устройств. В фотометрии единица светового потока называется люмен (*лм*). В радиометрии единицей потока энергии является ватт (*Вт*). Связь между ними на длине волны  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$  следующая:  $1 \text{ Вт} = 680 \text{ лм}$ ;  $1 \text{ лм} = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ .

Для других длин волн число люменов в заданном потоке энергии даётся формулой:

$$\Phi_{\phi,\lambda} = 680 U(\lambda) \Phi_{p,\lambda}, \quad (3.4)$$

где  $\Phi_{\phi,\lambda}$  — спектральный поток энергии в люменах,  $\Phi_{p,\lambda}$  — спектральный поток в ваттах,  $U(\lambda)$  — некоторая табличная функция.

Спектральный коэффициент отражения — это отношение отражённого потока энергии  $\Phi_\lambda(\theta, \varphi)$  в данном направлении  $\theta, \varphi$  к падающему на данную поверхность потоку  $\Phi_{0,\lambda}$  на некоторой длине волны:

$$R_\lambda(\theta, \varphi) = \frac{\Phi_\lambda(\theta, \varphi)}{\Phi_{0,\lambda}}. \quad (3.5)$$

Спектральное альbedo — это отношение потока энергии  $\Phi_{\pi,\lambda}$ , отражённого по всем направлениям, к потоку  $\Phi_{0,\lambda}$ , падающему на данную поверхность на некоторой длине волны  $\lambda$

$$A_\lambda = \frac{\Phi_{\pi,\lambda}}{\Phi_{0,\lambda}}. \quad (3.6)$$

Характеризуя отражающие свойства поверхности тел, кроме коэффициента отражения и альbedo, вводят ещё одну величину — яркость  $B$  (рис.1).

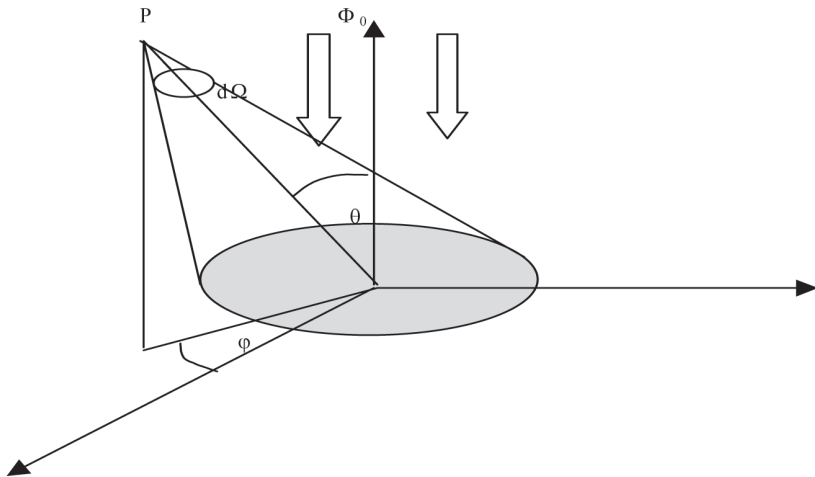


Рис.1

$$B_{\lambda}(\theta, \varphi) = \frac{\Phi_{\lambda}(\theta, \varphi)}{d\Omega dS \cos \theta}, \quad (3.7)$$

где  $d\Omega$  — величина телесного угла, внутри которого находится излучающая площадка  $dS$ ,  $\theta$  — угол наблюдения площадки  $dS$ .

Т.к.  $\frac{\Phi_{\lambda}(\theta, \varphi)}{d\Omega} = I_{\lambda}(\theta, \varphi)$  — сила света, то яркость можно выразить через  $I_{\lambda}(\theta, \varphi)$ :

$$B_{\lambda}(\theta, \varphi) = \frac{I_{\lambda}(\theta, \varphi)}{dS \cos \theta}. \quad (3.8)$$

Яркость, определённая в соответствии с (3.8), называется спектральной яркостью. В большинстве случаев она изменяется для различных направлений  $\theta, \varphi$  и зависит от  $\lambda$ .

Источники, яркости которых одинаковы по всем направлениям ( $B = \text{const}$ ), называются ламбертовскими. Для ламбертовской поверхности в соответствии с формулой (3.7) поток излучённой (или отражённой) энергии в плоскости  $\varphi = \text{const}$  в элементе теле-

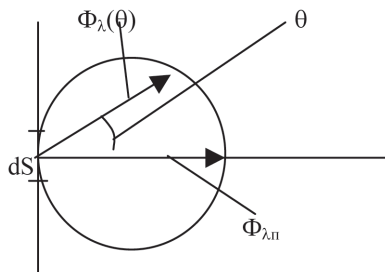


Рис.2

сного угла  $d\Omega$  должен изменяться в зависимости от угла  $\theta$  в соответствии с выражением (рис.2)

$$\Phi_{\lambda}(\theta) = \Phi_{\lambda n} \cos \theta, \quad (3.9)$$

где  $\Phi_{\lambda n}$  — поток в направлении нормали к поверхности.

Ламбертова поверхность — это оптически шероховатая или матовая поверхность, такая, например, как поверхность фильтровальной бумаги.

В соответствии с (3.5) и (3.7) коэффициент отражения можно выразить через яркость

$$R_{\lambda}(\theta, \varphi) = \frac{B_{\lambda}(\theta, \varphi)_{нов.}}{B_{\lambda}(\theta, \varphi)_{этал.}}, \quad (3.10)$$

где  $B_{\lambda}(\theta, \varphi)_{нов.}$  — яркость изучаемой поверхности,  $B_{\lambda}(\theta, \varphi)_{этал.}$  — яркость ламбертовой поверхности (эталон).

В качестве эталона используют баритованную бумагу, прессованные порошки  $MgO$ ,  $BaSO_4$ . Эти эталоны имеют не только одинаковую яркость по всем направлениям, но и практически постоянный коэффициент отражения во всём диапазоне измеряемых длин волн  $\lambda$  (350-750 нм).  $R_{\lambda}$  часто называют и коэффициентом спектральной яркости.

Величины  $R_{\lambda}$  и  $A_{\lambda}$  необходимо знать в широком диапазоне волн электромагнитного излучения для интерпретации типов и свойств природных образований, отображённых на аэрокосмических снимках.

Следует отметить, что  $R_{\lambda}$  и  $A_{\lambda}$  зависят как от типа природных образований, так и от большого числа других условий (освещения, угла наблюдения, состояния атмосферы, местных условий и т. п.).

Спектральные характеристики отражения ( $R_{\lambda}$ ,  $A_{\lambda}$ ,  $B_{\lambda}$ ) могут изменяться в широких пределах. В таблице 3.1 даны значения спектральных альбедо  $A_{\lambda}$  в % для некоторых типов поверхности.

Т а б л и ц а 3.1

Альбедо в %

Диапазоны	0,5-0,6 мкм	0,6-0,7 мкм	0,7-0,8 мкм	0,8-1,1 мкм
Песок	5,19	4,32	3,46	6,71
Лёд	18,30	16,10	12,0	11,00
Рыхлая сухая земля	7,40	6,19	5,68	-
Посевы овса	3,21	2,20	3,27	9,46



## Описание установки

В работе для определения коэффициента отражения используется однолучевой спектрограф «Sresol-10», имеющий следующую оптическую схему (рис. 3).

Источник света 1 через входной конденсор 2, зеркало 3, входную щель 4 и объектив коллиматора 5 даёт параллельный пучок света, падающий на дифракционную решётку 6. Применяемая в приборе дифракционная решётка имеет 651 штрих на 1 мм. Отражённый и разложенный в спектр на дифракционной решётке свет фокусируется ахроматическим объективом 7 на выходную щель 8. Монохроматическое излучение, сфокусированное линзой 9, попадает в приставку 10 для определения коэффициента отражения, а затем — на фотоприёмник 11. Полученный в приёмнике фототок усиливается усилителем 12 и отображается на измерительном приборе 13. Установка требуемой длины волны осуществляется вращением решётки 6 посредством барабана 14 (рис. 4), имеющего точность установки 1 нм в интервале 300-850 нм. Отклонение между реальной длиной волны и установленной по барабану лежит в пределах  $\pm 1$  нм. Щели, используемые в приборе, позволяют выделять спектральный участок шириной 10 нм.

Лицевая часть прибора изображена на рис.4.

Затвор 15 в положении «0» перекрывает щель и тем самым предохраняет оптико-электронную схему во время смены проб от влияния дневного света, в положении «I» щель открыта полностью, в положении «0»

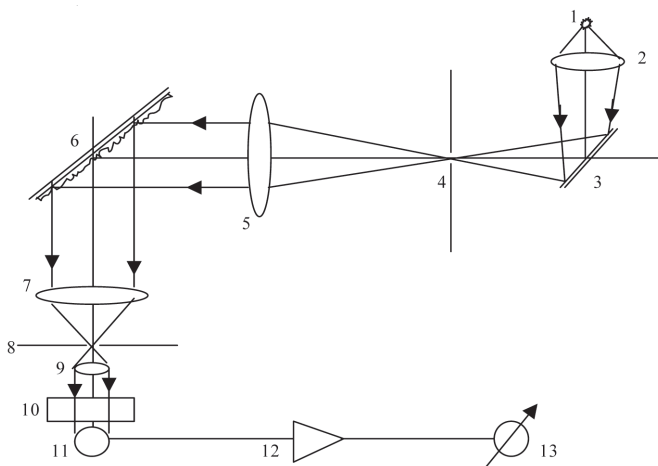


Рис.3

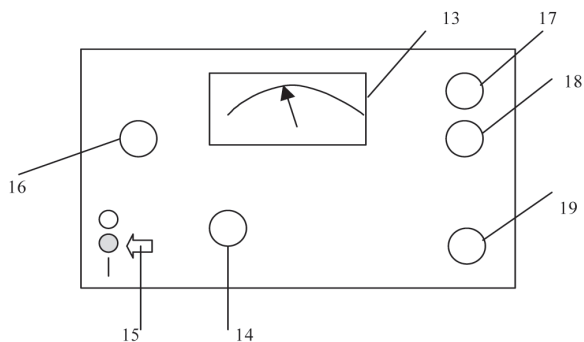


Рис.4

— закрыта. Ручки 18 и 19 служат для регулирования фототока ступенчато и плавно. Ручкой 17 устанавливается «0» на стрелочном индикаторе 13. Вращением барабана 14 устанавливают требуемую длину волны в *нм*.

В работе используются две приставки R 45/0 и R d/0.

В приставке R 45/0 монохроматическое излучение из выходной щели падает на исследуемый образец под углом  $45^\circ$ , а фотоприёмник принимает свет, отражённый по нормали к поверхности. В приставке R d/0 внутренняя поверхность, куда из выходной щели падает излучение, представляет собой диффузно отражающую сферу. Свет, диффузно рассеянный сферой, падает на исследуемую поверхность. Фотоприёмник регистрирует свет, отражённый от образца по нормали. Так как чувствительность прибора с приставкой R 45/0 выше, то измерения проводятся сначала с данной приставкой. Измерения с другой приставкой проводятся по указанию преподавателя.

### Измерения коэффициента отражения

1. Подготовить прибор к работе. Подсоединить рефлектометрическую приставку R 45/0.

Измерения коэффициента отражения проводятся методом сравнения светового потока, отражённого от эталона, и потока, отражённого от исследуемого материала (формула (3.10)). В качестве эталона используется матовая бумага белая. Образцы исследуемых поверхностей получить у преподавателя.

После включения прибора (через источник питания) установить вращением барабана длину волны  $450 \text{ нм}$ .

2. Закрыть световой затвор и при максимальном усилении (ручка 18 в положение 100) компенсировать ток фотоприёмника с помощью потенциометра 17, т.е. добиться, чтобы стрелка измерительного прибора 13 установилась на нуле.

3. Установить под прижим приставки эталонный образец. Открыть световой затвор 15 и установить ручкой 19 прибора коэффициент усиления прибора такой, чтобы отклонение стрелки соответствовало 100 делениям шкалы.

4. Закрыть световой затвор и эталонный образец заменить измеряемой пробой. Открыть световой затвор и отсчитать величину  $R_\lambda$  по шкале прибора 13. Величина  $R_\lambda$  сразу выражается в %, т.к. поток от эталона устанавливается равным 1 (100 делений шкалы).

5. Вращением барабана 14 установить длину волны 400 нм и провести измерения  $R_\lambda$  образца на установленной длине волны (400 нм) согласно пп.3, 4.

6. Изменяя длину волны по барабану через 10 нм и устанавливая каждый раз поток от эталона равным 100%, снять кривую зависимости  $R_\lambda$  в диапазоне 400–750 нм.

6. Измерить коэффициент отражения  $R_\lambda$  для второго образца аналогичным образом, повторяя операции по пп.3-6.

7. Приставку R 45/0 заменить приставкой R d/0 и аналогичным образом снять  $R_\lambda$  для тех же самых образцов. Следует иметь в виду, что приставка R d/0 даёт меньший отражённый поток, поэтому частотный диапазон измерений  $\Delta\lambda$  сужается и измерения проводятся, начиная с 500 нм. По разнице значений  $R_\lambda$ , полученных на разных приставках для одного и того же образца, можно судить об изотропности отражения поверхностью данного образца.

8. В результате измерений должны быть получены спектральные зависимости  $R_{45}(\lambda)$  и  $R_d(\lambda)$ . На миллиметровой бумаге необходимо построить графики  $R_\lambda$ . Объяснить полученные зависимости.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое спектральный коэффициент отражения? В каком случае спектральный коэффициент отражения равен 1?

2. Что такое яркость тела? В каких единицах измеряется яркость тела? Что измерялось в данной работе: спектральный коэффициент отражения или яркость?

3. Каким условиям должен удовлетворять эталон при измерениях яркости?

4. Чем определяется цвет тела?

5. Нарисуйте оптическую схему спектрофотометра и поясните принцип его действия.

6. Изобразить зависимость спектрального коэффициента отражения  $R(\lambda)$  для серого тела.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

**Приборы и принадлежности:** селективный транзисторный вольтметр STV-301-2, штыревая антенна STA-101, источник питания 12В «Агат», кривые градуировочного коэффициента «К» антенны.

### Общие сведения

Целью настоящей работы является ознакомление с условиями распространения радиоволн различных диапазонов и помеховой обстановкой в радиодиапазоне. Участки частот и длин волн, относящиеся к радиоволновому диапазону, приведены в таблице 4.1.

Т а б л и ц а 4.1

Название диапазона	Частота	Длина волны	
Сверхдлинные волны (СДВ)	30 кГц	10 км	
Длинные волны (ДВ)	30-300 кГц	1-10 км	
Средние волны (СВ)	0,3-3 МГц	100 м- 1 км	
Короткие волны (КВ)	3-30 МГц	10-100м	
Ультракороткие волны (УКВ): — метровые	30-300 МГц	10-1 м	
	— дециметровые	0,3-3 ГГц	0,1-1 м
	— сантиметровые	3-30 ГГц	1-10 см
	— миллиметровые	30-300 ГГц	1-10 мм
	— субмиллиметровые	300 ГГц	1 мм

В земных условиях на значительные расстояния распространяются лишь волны первых четырёх перечисленных диапазонов. УКВ подчиняются законам геометрической оптики и распространяются лишь в пределах прямой видимости (исключая редкие случаи аномального дальнего распространения метровых волн). Механизмы дальнего распространения СДВ, ДВ, СВ, КВ существенно различны. Решающее влияние на распространение оказывает ионосфера Земли, преломляющая падающую на неё волну в сторону земной поверхности. Различают поверхностную волну 1 (рис.1) и пространственную волну 2, отражённую от ионосферы.

Дальность действия поверхностной волны 1 в диапазонах СДВ и ДВ превосходит 1000 км. Огибание сверхдлинными и длинными радиоволнами сферической поверхности Земли объясняется явлением дифракции. Эти волны проникают довольно глубоко в грунт и воду, причём фронт распространяющейся поверхностной волны несколько наклонён вблизи поверхности.

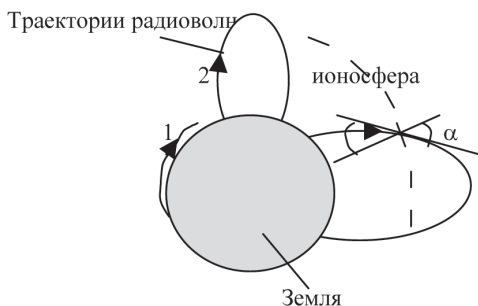


Рис.1

Поверхностная волна в диапазоне СВ распространяется на расстояние в несколько сотен километров. Пространственная волна 2 днём сильно поглощается, ночью распространяется на значительные расстояния. Напряжённость поля пространственной волны нестабильна — наблюдается её изменения — замирание (или фединги).

КВ распространяются пространственной волной. Различают односкачковое распространение (до 3000 км) и многоскачковое (до 10-20 тыс. км), когда волна переотражается поверхностью Земли и ионосферой несколько раз. Возможны также многократные пологие переотражения только ионосферой, при этом наблюдается особенно дальнее распространение и даже «кругосветное эхо». Для КВ характерны следующие явления:

- мёртвая зона, иногда наблюдающаяся на расстояниях 100-1000 км, где уже нет поверхностной волны (из-за её ослабления — она распространяется всего на 10-100км), а пространственная отсутствует по причине отражения ионосферой лишь полого падающих волн;

- замирание сигнала вследствие интерференции волн, пришедших в точку приёма различными путями;

- сильная зависимость условий распространения от электронной концентрации слоёв ионосферы (т.е. времени суток, времени года, фазы цикла солнечной активности и т.д.).

Для каждого слоя ионосферы (D, E, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>) различают критическую частоту  $f_{кр}$ , при которой вертикальный луч ещё отражается слоем, и максимально-применимую частоту (МПЧ), при которой ещё отражается касательный к горизонту луч. МПЧ и  $f_{кр}$  связаны отношением:

$$МПЧ = \frac{f_{кр}}{\cos \alpha}, \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  — угол падения волны на слой (рис. 1). Его можно найти, зная радиус Земли и высоту слоя. Ориентировочные значения  $f_{кр}$  и высот различных слоёв ионосферы приведены в таблице 4.2.

Т а б л и ц а 4.2

Слой	H	$f_{кр}$
D	90 км	0,3-0,6 МГц
E	120 км	3-4 МГц
F	200 км	3-6 МГц
день	220 км	5-15 МГц
ночь	250 км	2-8 МГц

Волны с частотами выше МПЧ на поверхность Земли не возвращаются из-за слабого преломления в ионосфере.

Напряжённость поля, создаваемого удалённым радиопередатчиком в свободном пространстве при ненаправленной антенне составляет:

$$E [\text{мкВ/м}] = 1,7 \cdot 10^5 \frac{\sqrt{P [\text{кВт}]}}{R [\text{км}]}, \quad (4.2)$$

где  $P$  — излучаемая мощность в киловаттах,  $R$  — расстояние в километрах.

Для учёта ослабления поверхностной волны вводят множитель ослабления  $W(x)$ , где  $x$  — относительное расстояние, определяемое, в соответствии с теорией Шулейкина-Ван-дер-Поля, следующим образом:

$$x = \frac{\pi R}{\lambda} \left| \frac{\epsilon_k - 1}{\epsilon_k^2} \right|, \quad (4.3)$$

где  $\epsilon_k$  — комплексная диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности. Для  $x > 25$ :

$$W(x) \approx \frac{1}{2x}. \quad (4.4)$$

Учитывая множитель ослабления и тот факт, что мощность передатчика, расположенного на поверхности Земли, излучается в полусферу, формулу для расчёта напряжённости поля поверхностной волны можно записать так:

$$E [\text{мкВ/м}] = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\sqrt{P [\text{кВт}]}}{R [\text{км}]} W(x). \quad (4.5)$$

Напряжённость поля пространственной волны сильно зависит от состояния слоёв ионосферы и поэтому строгому расчёту не поддаётся,

хотя оценочные методы расчёта и существуют.

Напряжённость поля  $E$ , а также напряжение сигнала  $V$  на приёмной антенне часто измеряют в децибелах относительно  $1 \text{ мкВ/м}$  или  $1 \text{ мкВ}$

$$E[\text{дБ}] = 20 \lg \left[ \frac{E[\text{мкВ/м}]}{1[\text{мкВ/м}]} \right].$$

Для быстрого перевода одних единиц в другие полезна таблица 4.3.

Т а б л и ц а 4.3

$E[\text{мкВ/м}]$	$V[\text{мкВ}]$	1	2	3	5	10	100	1000	10000
$E[\text{дБ}]$	$V[\text{дБ}]$	0	6	10	14	20	40	60	80

При пользовании таблицей надо иметь в виду, что увеличение  $E[\text{мкВ/м}]$  или  $V[\text{мкВ}]$  в 2, 3, 5 раз соответствует прибавлению 6, 10, 14 дБ, поэтому 2000 мкВ соответствуют 66 дБ (60 + 6), а 500 мкВ — 54 дБ (40 + 14).

Атмосферные помехи в радиодиапазоне создаются преимущественно грозowymi разрядами (в любой момент времени на всём земном шаре насчитываются в среднем несколько сотен гроз). Значительный вклад вносит излучение космических источников (Млечный путь, звёзды, квазары, Солнце). Уровень атмосферных помех особенно велик на СВД и ДВ, понижаясь с увеличением частоты. Он сильно зависит от времени года, суток, условий распространения волн. В диапазоне УКВ атмосферные помехи малы (исключая индустриальные) и определяются в основном тепловым излучением Земли и атмосферы, а на метровых волнах — тепловым излучением космоса. Уровень атмосферных помех определяет возможность приёма слабых сигналов.

В первой части данной работы определяется напряжённость поля нескольких радиостанций в диапазонах ДВ, СВ и КВ, а также измеряются изменения напряжённости поля. Тем самым определяется тип принимаемой волны (земная — поверхностная или пространственная волна).

Во второй части измеряется напряжённость поля атмосферных помех на нескольких частотах и строится зависимость уровня помех от частоты.

## Описание установки

Лабораторная установка содержит высокочувствительный селективный микровольтметр STV301-2 с источником питания, оснащённый калиброванной антенной STA101 с длиной активной части 1 м, принимающей вертикальную составляющую электрического поля падающей волны  $E$ .

**ВНИМАНИЕ!** Перед включением прибора следует внимательно ознакомиться с настоящим описанием.

На рис.2 показана передняя панель микровольтметра.

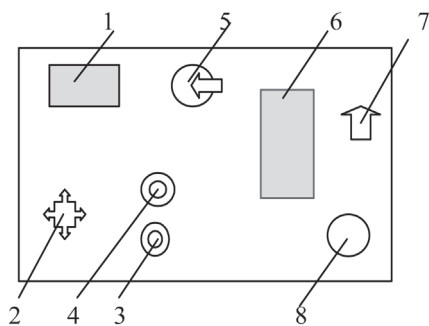


Рис.2

Цифрами обозначаются:

1 — измерительный прибор, отградуированный в  $\mu\text{кВ}$  и  $\text{дБ}$ ; 2 — переключатель рода работ; 3 — общий выключатель и регулятор громкости для встроенного громкоговорителя; 4 — регулятор калибровки; 5 — основной аттенюатор; 6 — шкала настройки; 7 — переключатель диапазонов; 8 — ручка настройки частоты принимаемого сигнала.

### Порядок выполнения работы

1. Переключатель рода работ 2 устанавливают в крайнее положение  $U_B$ , регулятор громкости также устанавливают в крайнее левое положение со щелчком.

2. Источник питания подключают к сети и включают тумблером, расположенным на его передней панели.

3. Включают микровольтметр STV301-2, повернув регулятор громкости 3 вправо со щелчком. Стрелка измерительного прибора 1 должна отклониться до отметки « $U_B$ », указывая на готовность прибора к работе.

4. Переключателем диапазонов 7 и ручкой настройки 8 устанавливают нужную частоту приёма по шкале настройки 6.

5. Аналогичные переключатели диапазонов и шкала настройки имеются в антенне STA101. Устанавливают их на ту же частоту.

6. Установив переключатель рода работ 2 в положение  $U_{эфф.}$  и регулируя усиление аттенюатором 5, отыскивают сигнал нужной станции с помощью ручки настройки 8 «на слух». При перестройке по диапазону усиление (регулятор 5) должно быть таким, чтобы стрелка измерительного прибора 1 не выходила за пределы шкалы, а громкость звука (устанавливается ручкой 3) такой, чтобы не мешать окружающим.



После выбора станции переключатель рода работ 2 устанавливается в соседнем положении  $U_{эфф.}$ , где функции прибора сохраняются, но отключается громкоговоритель. Во избежание потери сигнала на КВ можно включить автоматическую подстройку частоты (АПЧ), установив переключатель рода работ в положение  $U_{эфф.∇}$ .

Все ручки прибора должны вращаться легко и свободно только до упора. **Нельзя прикладывать чрезмерных усилий!** Особенно это относится к ручке настройки. После установки частоты необходимо подстроить и антенну по максимуму сигнала.

7. Калибровка микровольтметра. После установки частоты прибор необходимо откалибровать. С этой целью аттенюатор 5 устанавливают в положение  $∇$ . Переключатель рода работ 2 также устанавливают в положение  $∇$ . С помощью регулятора калибровки 4 устанавливают стрелку измерительного прибора на 0 дБ.

8. Измерение напряжённости поля станции. После калибровки прибора устанавливают переключатель рода работ в положение  $U_{эфф.}$  или  $U_{эфф.∇}$  и вращают аттенюатор 5 до тех пор, пока стрелка прибора не установится на деление 0 дБ. Записывают показания шкалы на ручке аттенюатора 5 в децибелах. Оно соответствует уровню входного сигнала  $V$  в децибелах относительно 1 мкВ.

По калибровочному графику антенны (выдаётся преподавателем) определяют коэффициент « $K$ » в децибелах сигнала, ослабленного антенной и её резонансным контуром.

Таким образом, напряжённость поля станции в децибелах относительно 1 мкВ/м определяется следующей суммой:

$$E(\text{дБ}) = V(\text{дБ}) + K(\text{дБ}).$$

9. Измерение напряжённости поля помех. Находят участок диапазона вблизи нужной частоты, свободный от сигналов радиостанций, руководствуясь п.1-6, и калибруют микровольтметр на выбранной частоте, руководствуясь п.7.

Установив переключатель рода работ в положение  $U_{эфф.}$ , измеряют эффективное значение напряжения помех в соответствии с п.8.

Установив переключатель рода работ в положение  $U_{\Omega}$  измеряют импульсное напряжение поля помех  $V$ . С помощью калибровочного графика антенны пересчитывают значения напряжённости поля в соответствии с п. 8:  $E = V + K$ .

## Измерение и обработка результатов.

**Задание 1. Измерить напряжённость поля радиостанций в диапазонах ДВ, СВ, КВ.**

1. Выбрать станцию в диапазоне КВ (12-30 МГц) и измерить напряжённость её поля. Записать частоту, время приёма, характер передаваемой программы (телеграф, телефонная связь, радиовещание) и, если удастся, позывной или название станции.

2. Проследить за изменениями напряжённости поля принимаемой станции в течение 5-10 мин. Оценить среднюю частоту и амплитуду флуктуаций с помощью часов и измерительного прибора — микровольтметра (на шкале прибора имеется градуировка в децибелах). Частоту отсчёта выбрать самостоятельно в соответствии с характером измерений сигнала.

Рекомендуется отмечать лишь экстремальные значения сигнала и соответствующие моменты времени. Все результаты заносятся в таблицы 4.4 и 4.5.

Т а б л и ц а 4.4

**Пример измерений**

Частота	Время	Программа	Позывной (город)	$E$ [дБ]	$E \left[ \frac{\text{мкВ}}{\text{м}} \right]$
547 кГц	13 <sup>05</sup>	РВ (речь)	Москва	63 дБ	$2000 \left[ \frac{\text{мкВ}}{\text{м}} \right]$

Т а б л и ц а 4.5

**Пример измерений**

Время	13 <sup>05</sup> + 0 с	+10 с	+20 с	+30 с	+40 с
$E$ [дБ]	63 + 0 дБ	-1 дБ	-3 дБ	+2 дБ	-1 дБ

Построить график одной временной реализации сигнала  $E(t)$ , подобный рис.3.

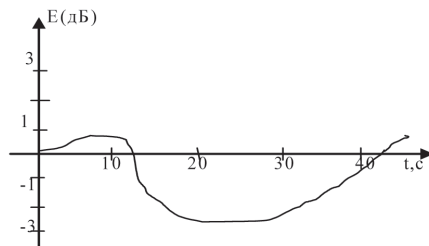


Рис.3

Если уровень сигнала постоянный, график строить не требуется.

3. Повторить измерения напряжённости поля для двух других станций. Перед началом измерений провести калибровку приёмника (микровольтметра).

4. Выбрать станцию в диапазоне СВ (0,85-2 МГц) и выполнить пункты 1-2.

5. Ориентировочно оценить МПЧ, прослушивая сигналы данных станций на верхних трёх поддиапазонах микровольтметра (12-30МГц). На частотах выше МПЧ эфир становится относительно «чистым».

6. На основе выполненных измерений сделать заключение о механизме распространения волн выбранных трёх диапазонов.

### **Задание 2. Измерить напряжённость поля помех в радиодиапазоне.**

1. Выбрать в 8 поддиапазоне частоту, свободную от сигналов радиостанций. Откалибровать прибор и, подстроив антенну, измерить эффективное и пиковое импульсное значение напряжённости поля помех. По

отношению  $\frac{U_{эфф.}}{U_{\Omega}}$  оценить характер помех.

Тип помех	Гладкие (белый шум)	Чистые импульсы	Редкие импульсы
$\frac{U_{эфф.}}{U_{\Omega}}$	> 0.7	0.2 .....0.7	< 0.2

Проверить сделанную оценку, прослушивая помеху.

2. Прodelать то же на частотах каждого из 8 поддиапазонов прибора.

3. По полученным данным построить график зависимости напряжённости поля помех от частоты и  $U_{\Omega} = \xi(f)$ . На графике приводятся две кривые — для эффективных  $U_{эфф.} = \varphi(f)$  и пиковых  $U_{\Omega} = \xi(f)$  значений помех.

### **Контрольные вопросы**

1. *Какие особенности распространения радиоволн различных диапазонов в условиях Земли?*

2. *Опишите строение ионосферы Земли.*

3. *Что такое МПЧ?*

4. *Чем вызваны замирания радиосигнала (фединги)?*

5. *Что такое «множитель ослабления», для какого типа волн он используется и для какой цели он нужен?*

6. *Каково происхождение помех в радиодиапазоне?*

7. *Чему равен сигнал в мВ, если по отсчёту микровольтметра он равен 72 дБ?*

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЯРИЗАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТА НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

**Приборы и принадлежности:** генератор СВЧ сигналов, детекторная секция, приёмник, исследуемая и приёмная антенны на поворотном устройстве.

#### Общие сведения.

Среди методов, используемых при исследовании природных ресурсов Земли, достаточно широко используются СВЧ-радиометрия и радиолокация.

Все объекты с температурой выше абсолютного нуля излучают электромагнитную энергию. Принимая и анализируя это излучение, можно дистанционно получить информацию об объекте. Количество излучаемой энергии и её спектральное распределение зависят не только от физической температуры объекта, но также от его химического состава, состояния поверхности и т.д. Анализируя интенсивность и спектр принятого сигнала, можно дистанционно классифицировать объект и его параметры. Такие методы давно используются в оптической и инфракрасной (ИК) областях спектра, где, как правило, сосредоточена большая часть излучаемой энергии окружающих нас объектов и где хорошо разработана техника приёма и обработки сигнала.

В СВЧ-области спектра (длина волны 0,1-100 см) энергия, излучаемая окружающими нас телами, на несколько порядков меньше. Однако последние достижения полупроводниковой технологии сделали возможным создание сканирующих СВЧ-радиометров (радиометры, работающие в диапазоне СВЧ), обеспечивающих получение изображений подстилающей поверхности. Из-за более низкой разрешающей способности на СВЧ (мгновенный угол зрения  $\theta \cong \lambda/d$ , где  $\lambda$  — длина волны, а  $d$  — линейный размер раскрыва антенны) эти «изображения» не так детальны, как оптические, но они мало чувствительны к ослаблению и рассеянию излучения этого диапазона в атмосфере. СВЧ радиоволны имеют большую проникаемость, чем оптические, что может быть важно для некоторых измерений, например, определения влажности почв.

Наряду с вышеописанным методом, который может быть назван «пассивным», при исследовании природных ресурсов Земли используются и активные методы, одним из которых является радиолокация. Радиолокационная станция (РЛС) обычно располагается на борту самолёта или спутника и информация о подстилающей поверхности Земли получается в результате приёма и обработки отражённого земной поверхностью сигнала.

Неотъемлемой частью бортовой радиоаппаратуры, используемой для исследования природных ресурсов Земли, являются антенные системы, позволяющие принимать или передавать радиоизлучение. Антенные системы многообразны. Их конструкции определяются задачами, которые ставятся перед проектируемой аппаратурой. Широкий класс представляют вибраторные и щелевые антенны. Для создания антенн, имеющих узкий луч излучения (приёма), сканирующий в некотором телесном угле, используют системы пространственно ориентированных индивидуальных излучателей. Такие антенные системы называются антенными решётками. Характеристики решёток зависят в основном от пространственного расположения и ориентации индивидуальных излучателей, от распределения амплитуд и фаз токов в излучателях, а также от электрических характеристик самих излучателей.

К основным электрическим характеристикам излучателей относятся: форма диаграмм направленности (ДН), коэффициент направленного действия (КНД), усиление и коэффициент поляризации.

Диаграмма направленности определяет распределение напряжённости  $E(\theta, \varphi)$  электрического поля излучателя в пространстве на больших расстояниях ( $R \gg \lambda$ ).

Диаграмму направленности излучателя можно описать графически многими способами. На практике наиболее часто используются графики напряжения  $U$  на выходе детектора (пропорционального напряжённости поля на входе антенны) или мощности  $P$  в зависимости от угла  $\theta$  или  $\varphi$ , построенные как в полярных, так и в прямоугольных координатах. В лабораторных условиях обычно измеряют зависимость мощности излучения, пропорциональной квадрату напряжённости поля, от угла наблюдения.

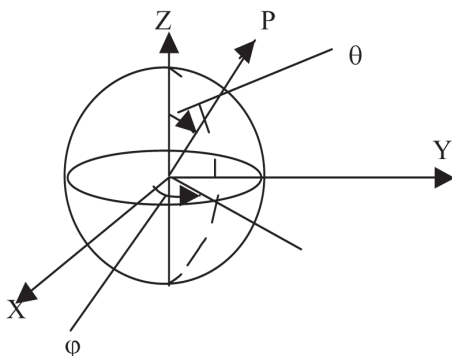


Рис. 1

Шириной диаграммы направленности антенны (ШДН) называют угол  $\Delta\theta$  или  $\Delta\varphi$ , в пределах которого уровень принимаемой мощности излучения  $P \geq 0,5P_{\max}$ , где  $P_{\max}$  — максимальная мощность излучения.

Коэффициентом направленного действия (КНД) —  $D$  (при диаграмме с осевой симметрией) в данном направлении называется отношение квадрата модуля напряжённости поля, создаваемого антенной в данном направлении, к среднему (по всем направлениям) квадрату модуля напряжённости поля.

Пусть имеем некоторую антенну. Вообразим вокруг неё сферу, в центре которой находится антенна с радиусом настолько большим, что поверхность сферы располагается в области, где ДН практически получается такой же, как при  $R \rightarrow \infty$ . Каждой точке  $P$  на выбранной сфере соответствует определённый радиус-вектор диаграммы направленности антенны, характеризуемой углами  $\theta$  и  $\varphi$  (рис. 1). Модуль напряжённости электрического поля в общем виде в дальней зоне ( $kR \gg 1$ , где  $k$  — волновое число) определяется формулой:

$$|\vec{E}| = f(\theta, \varphi). \quad (5.1)$$

Согласно определению, КНД равен:

$$D = \frac{|\vec{E}|^2}{|\vec{E}|_{cp}^2} \Big|_{P=const}. \quad (5.2)$$

КНД может быть также определён как отношение квадрата модуля напряжённости поля антенны в данном направлении к квадрату модуля напряжённости поля идеального изотропного излучателя (изотропным называется излучатель, который излучает во все стороны одинаково) при одинаковой мощности, излучаемой обеими антеннами.

Величина КНД удобна для использования в теоретических расчётах и определяется с помощью следующего соотношения:

$$D = \frac{4\pi S_{эфф.}}{\lambda^2}, \quad (5.3)$$

где  $S_{эфф.}$  — эффективная площадь раскрыва антенны, равная физической площадью  $S$ , умноженной на коэффициент эффективности площади раскрыва  $A$ .

Коэффициентом полезного действия  $\eta$  называется отношение излучаемой мощности к мощности, подводимой к антенне:

$$\eta = \frac{P_K}{P_0} = \frac{P_K}{P_K + P_n}, \quad (5.4)$$

где  $P_K$  — мощность, излучаемой антенной,  $P_0$  — мощность, подводимая к антенне,  $P_n$  — мощность, теряемая в антенне.

Коэффициент поляризации излучения антенн играет большую роль для различных целевых назначений систем, в которых используются антенны. Так, в радиометрии и радиолокации с целью исследования природных ресурсов Земли в основном используются антенны с линейной поляризацией. Для радиосвязных систем обычно используют антенны с эллиптической поляризацией.

Коэффициент поляризации по мощности в общем случае может быть рассчитан по следующей формуле:

$$K_{эл} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} = \frac{E_{\max}^2 - E_{\min}^2}{E_{\max}^2 + E_{\min}^2}, \quad (5.5)$$

где  $P_{\min} \approx E_{\min}^2$  и  $P_{\max} \approx E_{\max}^2$  — минимальная и максимальная мощности, принятые антенной с линейной поляризацией при вращении её вокруг своей оси (при этом испытываемая и приёмная антенны ориентированы друг на друга). Исходя из этого определения, можно сказать, что антенна с линейной поляризацией имеет  $K_{эл} = 1$ , антенна с круговой поляризацией имеет  $K_{эл} = 0$ , а эллиптически поляризованная антенна имеет  $0 \leq K_{эл} \leq 1$ .

Линейный симметричный вибратор (рис.2) является простейшей антенной. В результате действия ЭДС, приложенной в точках А и В, в пространстве вокруг провода длиной  $L$  создаётся электромагнитное поле с линейной поляризацией. Диаграмма направленности полуволнового ( $L = \lambda/2$ ) вибратора представляет собой «восьмёрку» (рис.3)

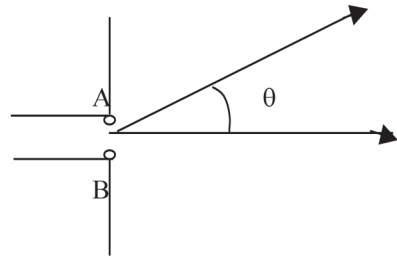


Рис.2

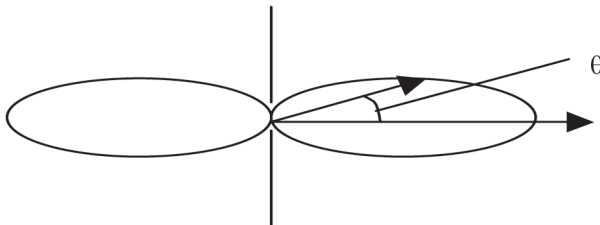


Рис.3

## Описание установки

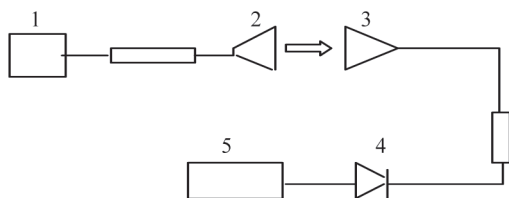


Рис.4

Целью данной работы является измерение диаграмм направленности рупорной антенны, излучающей и принимающей электромагнитные волны сантиметрового диапазона. Передающая часть установки, включающая генератор 1 (рис.4), передающий тракт и антенну 2, излучает СВЧ-сигнал, модулированный низкочастотной составляющей ( $f = 1 \text{ кГц}$ ). Рупорная приёмная антенна 3 имеет детектор 4, выделяющий сигнал на частоте модуляции, уровень которого соответствует уровню принятого СВЧ-сигнала. Принятый сигнал усиливается и отображается стрелочным индикатором 5.

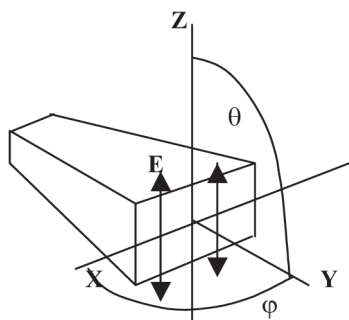


Рис.5

И передающая, и приёмная антенны могут разворачиваться в трёх плоскостях (рис.5).

В работе необходимо снять диаграмму направленности, т.е. зависимость принимаемого сигнала от направления: в плоскости  $ZY$  (по углу  $\theta$ ) и в плоскости  $XY$  (по углу  $\varphi$ ).

Диаграммы направленности рупорных антенн достаточно узкие, по уровню 0,5 принимаемой мощности ширина диаграммы составляет 6-10°, поэтому вблизи максимума принимаемого сигнала измерения необходимо проводить с малым угловым шагом.

## Порядок выполнения работы.

1. Включите генератор и приёмник и убедитесь, что установка готова к работе: при изменении уровня излучаемого сигнала изменяется принимаемый сигнал, поворот приёмной антенны также приводит к изменению принимаемого сигнала. Установите на генераторе частоту вблизи 10 ГГц, а аттенюатор выходного сигнала — на минимальное ослабление. В этом случае излучаемый сигнал будет максимальным. После этого настройку генератора не изменяйте.



2. Установите антенны напротив друг друга так, чтобы их горизонтальные оси лежали на одной линии. При правильной настройке принимаемый сигнал будет максимальный. После установки антенн работайте только с приёмной антенной.

Регулировкой чувствительности приёмника добейтесь максимального отклонения стрелки прибора. Проверьте, что поворот антенны в любом направлении только уменьшает сигнал, но не увеличивает. Если при повороте антенны сигнал увеличивается, повторите установку антенн, следуя п.2.

3. Поворачивая антенну по углу  $\theta$ , снимите зависимость принимаемого сигнала от угла поворота  $U = f(\theta)$ .

Повторите измерения, поворачивая антенну в другом направлении. Помните, что ширина диаграммы направленности не превышает  $10^\circ$ , поэтому полные повороты антенны не должны превышать  $15-20^\circ$ .

4. Снимите зависимость  $U = f(\varphi)$  в соответствии с п.3.

5. Поворачивая приёмную антенну вокруг оси  $Y$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , снимите поляризационную характеристику принимаемого сигнала. Антенна, изображённая на рис.5, излучает и принимает электромагнитные волны линейной поляризации, у которых вектор  $E$  всегда ориентирован перпендикулярно широкой стороне раскрыва (рис.5).

Вычислите коэффициент поляризации  $K = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$ . В данной

формуле предполагается, что принимаемая мощность СВЧ-излучения пропорциональна напряжению на выходе детектора  $U$ , т.е. характеристика детектора  $I = f(U)$  квадратичная. (Ток детектора  $I$  пропорционален напряжённости поля  $E$ , принимаемого антенной).

6. Повторите измерения диаграмм направленности  $U = f(\theta)$  и  $U = f(\varphi)$ .

7. Постройте графики зависимости  $U = f(\theta)$  и  $U = f(\varphi)$ . По графикам на уровне 0,5 от максимального значения  $U$  определите ширину диаграммы направленности (ШНД).

8. Измерьте длину узкой  $a$  и широкой  $b$  части приёмного рупора. Рассчитайте ширину диаграммы направленности антенны по формуле

$\theta = \frac{\lambda}{D}$ , где  $D$  — ширина узкой ( $a$ ) или широкой ( $b$ ) стороны раскрыва

рупора,  $\lambda$  — длина волны. Сравните измеренные и расчётные значения ШНД. Если эти значения близки по величине, то сигнал  $U$  пропорционален  $P$  — мощности принимаемого излучения. Если сигнал пропорционален напряжённости принимаемого излучения, расчётные данные

ШНД должны соответствовать экспериментальным по уровню 0,7. Проверьте это.

### **Контрольные вопросы**

- 1. Что такое КНД антенны? Рассчитайте КНД приёмного и передающего рупоров, измерив площадь раскрыва каждого рупора и определив рабочую длину волны. Принять коэффициент эффективности площади раскрыва антенн равным 0,8.*
- 2. Как определяется поляризация излучающей и приёмной волн по геометрии антенны?*
- 3. Что такое ширина диаграммы направленности антенны? Как она определяется?*
- 4. Изменится ли длина излучаемой волны, если раскрыв рупора закрыть диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=4$ ?*
- 5. Что такое диаграмма направленности антенны? Как она определяется экспериментально?*
- 6. Изменяются ли результаты эксперимента (ДН, ШНД, КНД), если антенны по-менять местами?*

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ВОЗДУХА

**Приборы и принадлежности:** лабораторный интерферометр ЛИ-3, газовые кюветы, измерители температуры, давления и влажности воздуха.

### Общие сведения

Показатель преломления  $n$  некоторой среды определяется как отношение скорости электромагнитной волны в вакууме  $c$  к скорости в среде

$v$ :  $n = \frac{c}{v}$ . Показатель преломления является функцией диэлектрической проницаемости среды:  $n = \sqrt{\epsilon}$ . Явления рефракции, рассеяния, поглощения электромагнитных волн определяются величиной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , следовательно, и показателем преломления. Показатель преломления различных газов близок к 1.

Показатель преломления воздуха зависит от давления, температуры и влажности. Так как указанные метеопараметры в реальных условиях изменяются как во времени, так и в пространстве, показатель преломления воздуха весьма сложным образом может зависеть от координат  $x, y, z$  и времени  $t$ .

$$n = f(P(x, y, z, t), T(x, y, z, t), e(x, y, z, t)). \quad (6.1)$$

Реальные среды, как правило, обладают дисперсией, т.е. их показатель преломления зависит от длины волны  $\lambda$ .

Зависимость (6.1) в различных диапазонах электромагнитного излучения носит различный характер. В радиодиапазоне на величину  $n$  сильно влияет влажность воздуха, в оптическом диапазоне основное влияние оказывают температура и давление.

В общем случае для среды с поглощением диэлектрическую проницаемость можно записать в виде:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon - i60\lambda\sigma,$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость вещества в электростатическом поле;  $\lambda$  — длина электромагнитной волны;  $\sigma$  — удельная проводимость среды. Показатель преломления среды в этом случае комплексный:

$$n = \sqrt{\epsilon^*} = n' - in''. \quad (6.2)$$

В случае воздуха вместо показателя преломления  $n$  используют индекс преломления  $N = (n - 1) \cdot 10^6$ .

Для воздуха в радиодиапазоне показатель (индекс) преломления является функцией температуры  $T$ , влажности (давление водяного пара)  $e$  и давления воздуха  $P$ . Существует ряд эмпирических зависимостей  $n(N)$  от этих параметров. Наибольшую точность даёт формула, рекомендованная XII Генеральной ассамблеей Международного геодезического и геофизического союза в 1960г. (г. Хельсинки):

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{103,49}{T} P + \left( \frac{495822}{T^2} - \frac{17,23}{T} \right) e. \quad (6.3)$$

Здесь 1-ое слагаемое в правой части (6.3) характеризует влияние на диэлектрическую проницаемость смещений молекул сухого воздуха, возникающих под воздействием внешнего электромагнитного поля, 2 — то же для молекул водяного пара, 3 — отражает влияние на диэлектрическую проницаемость изменений ориентации молекул водяного пара.

Показатель преломления в оптическом диапазоне слабо зависит от влажности, но в этом диапазоне сильнее дисперсия. Для видимого диапазона интегральное значение  $n$  чаще всего определяют по формуле Кольрауша:

$$n - 1 = \frac{n^0 - 1}{T/273} \cdot \frac{P}{760} - \left( 0,0624 - \frac{0,00204}{\lambda^2} \right) \frac{e}{T/273} \cdot 10^{-6}, \quad (6.4)$$

где  $n^0 = 1,000305$  — показатель преломления абсолютно сухого воздуха при нормальных условиях ( $T = 273K$ ,  $P = 760$  мм.рт.ст.) и для длины волны  $\lambda = 0,541$  мкм. В формуле (6.4) значение  $P$  выражается в мм.рт.ст.,  $T$  — в К,  $e$  — в мм.рт.ст.,  $\lambda$  — в мкм; 1 мм.рт.ст. = 1,33 мб = 1,33 гПа; 1 мб = 0,75 мм.рт.ст.

Давление водяного пара определяется следующим образом: по электронному прибору определяют относительную влажность  $\eta$  при данных атмосферных условиях, а затем, определив по таблице (см. приложение к работе)  $E$  — давление насыщающих паров воды при данной температуре, находят давление водяного пара:

$$e = \eta E. \quad (6.5)$$

## Методы определения показателя преломления и аппаратура, применяемая для измерений $n$

Показатель преломления воздуха, как уже отмечалось выше, определяется как отношение скорости распространения излучения в вакууме к скорости в среде. Непосредственное определение показателя преломления возможно при использовании приборов, чувствительных к изме-

нению скорости распространения световых или радиоволн. Существует также метод косвенного определения показателя преломления путём измерения температуры, влажности и давления с последующим расчётом  $n$  по формулам. При косвенном определении показателя преломления температуру обычно измеряют с помощью ртутных или спиртовых термометров, давление по ртутным барометрам, влажность – путём сравнения смоченного и сухого термометров. В настоящее время появилось много моделей электронных приборов измерения температуры и влажности. Степень точности этих измерений обычно зависит от тщательности, с которой они проводятся. Термометры с радиационной защитой имеют точность порядка  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , барометры  $\pm 1,0$  мбар.

Исследования нижнего слоя атмосферы до высоты 1-2 км можно производить с помощью приборов, поднимаемых на привязных аэростатах. Таким образом, оказывается возможным производить детальные измерения метеорологических элементов на любой высоте в пределах потока подъёма аэростата и в течение длительного промежутка времени. Для исследования атмосферы широко применяются радиозонды. Сущность метода радиозондирования заключается в подъёме на резиновом, наполненном водородом шаре, прибора (радиозонда), в котором показания приёмников метеоэлементов преобразуется с помощью кодирующего устройства в радиосигналы. Расшифровав последние, можно получить значения метеорологических элементов на различных высотах.

Самолёт является мощным средством для аэрологических исследований; большая маневренность самолёта по сравнению с радиозондами и аэростатами позволяет производить как вертикальное, так и горизонтальное зондирование.

Для прямого определения показателя преломления в радиодиапазоне используют рефрактометры. Принцип действия рефрактометра основан чаще всего на сравнении резонансных частот двух резонаторов, т.е. действует принцип сравнения параметров двух веществ, находящихся в разных полостях рефрактометра (закрытой и открытой). Резонансные полости – существенная часть любого из этих устройств. При этом особенно существенной является величина температурного коэффициента полости. В настоящее время большая часть резонаторов изготавливаются из инвара, температурный коэффициент которого составляет одну миллионную на  $1^\circ\text{C}$ . Точность рефрактометра примерно на порядок выше, чем могут дать косвенные измерения.

При сравнении прямых и косвенных методов измерений показателя преломления абсолютная точность не является единственным критерием. Действительно, точность определения показателя преломления рефрак-

тометра оказывается выше. Однако это преимущество сводится на нет высокой стоимостью изготовления рефрактометров, требованиями к квалификации обслуживающего персонала и т.д.

Во многих случаях, когда наблюдаются медленные вариации  $n$ , т.е. среда может рассматриваться как квазистатическая, применение рефрактометров не имеет смысла. Рефрактометры рационально применять там, где необходима большая точность и высокое быстродействие. Примерами таких случаев являются радиолокация и радионавигация, когда определение рефракции в атмосфере требует точной оценки значений показателя преломления у поверхности Земли в момент измерений.

При оценке точности измерений атмосферных параметров следует иметь в виду, что любому измерительному прибору свойственны погрешности измерений, слагающиеся из случайных и систематических ошибок.

В атмосфере коэффициент преломления с высотой в среднем должен изменяться по логарифмическому закону. Эти изменения можно описать следующей формулой:

$$n(z) = 1 + (n_0 - 1)e^{-cz}, \quad (6.6)$$

где  $n_0$  — значение коэффициента преломления у Земли,  $n(z)$  — значение этого коэффициента на высоте  $z$ ,  $c$  — постоянная, равная для января — 0,1224, апреля — 0,1216, июня — 0,1270, октября — 0,1224.

Как видим, наиболее резкое убывание  $n$  с высотой наблюдается в летнее время года. Более медленно убывает  $n$  зимой. Однако в каждом отдельном случае на тех или иных высотах могут наблюдаться отклонения от этого закона, вызванные нарушениями в распределении температуры и особенно удельной влажности воздуха. Эти отклонения наиболее часто имеют место в нижнем слое атмосферы.

Как уже указывалось, величина показателя преломления обратно пропорциональна скорости светового сигнала, и её необходимо знать, в частности, при светодальнометрии, применяемой в геодезии, т.е. для точного определения расстояния по времени прохождения светового импульса. Скорость распространения света, а также форма световой траектории зависят от состояния атмосферы во время измерений. В связи с этим, результаты измерения расстояний при светодальнометрии будут зависеть от точности, с которой удастся учитывать состояние атмосферы. Наиболее важной и в то же время наиболее трудной задачей является точное определение фактической скорости распространения света в атмосфере, т.е. среднего показателя преломления при известном значении скорости света в вакууме.

## Измерение показателя преломления воздуха с помощью интерферометра Релея.

Метод измерения показателя преломления газов (воздуха) с помощью интерферометра Релея есть развитие классического опыта по получению интерференционной картины для двух когерентных световых пучков, прошедших через две параллельные щели.

В интерферометре Релея реализуется схема, показанная на рис.1.

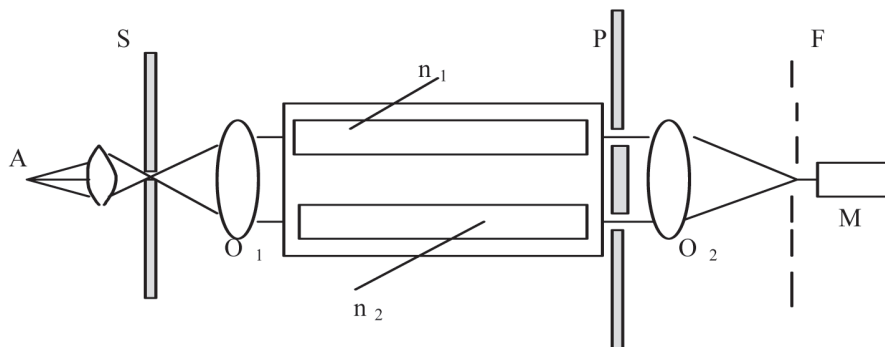


Рис.1

Прибор состоит из трёх основных частей: коллиматора, двойной щели и зрительной трубы. Коллиматор включает в себя щель  $S$  и объектив  $O_1$ . Зрительная труба состоит из объектива  $O_2$  и окуляра, представляющего собой микроскоп  $M$ . От источника света  $A$  лучи проходят через конденсор и, пройдя через щель  $S$ , проходят через кюветы с газом, имеющим разные коэффициенты преломления:  $n_1$  и  $n_2$ . После прохождения кювет между лучами возникает разность хода  $\Delta = (n_2 - n_1)L$ . Далее лучи попадают на двойную щель  $P$ , и в фокальной плоскости объектива  $O_2$  образуется дифракционная картина, рассматриваемая с помощью микроскопа  $M$ .

Для решения задач определения показателя преломления с помощью интерферометра Релея используется принцип сравнения показателей преломления двух веществ, когда показатель преломления  $n$  одного из веществ известен с достаточной степенью точности. Поэтому схема технического интерферометра несколько отличается от схемы, приведённой выше.

Через окуляр мы рассматриваем две системы полос, а не одну, как в обычном интерферометре. Верхняя система полос, образуемая лучами, прошедшими через кюветы (трубки) и компенсатор, подвижна. Нижняя система образуемая интерференцией лучей, прошедших под кюветами (трубками) и компенсатором, неподвижна. Она называется опорной.

На рис.2 показана схема технического интерферометра. Пучок лучей от источника света проходит через линзу 2 и освещает щель 3; после прохождения через коллиматорный объектив 4 свет представляет собой параллельный пучок. Непосредственно за объективом находятся две параллельные щели 5, на которых происходит дифракция света. Нижние половины световых пучков, проходящие под кюветами 6, направляются в зрительную трубу 9 и дают нижнюю, неподвижную систему полос. Верхние половины световых пучков проходят через соответствующие отделения двойной кюветы 6, через компенсационные пластины 7, и, направляясь в зрительную трубу, формируют верхнюю систему полос. Вспомогательная пластина 8 сближает обе полосы до тонкой горизонтальной разделительной линии. Возникающие интерференционные изображения очень малы, поэтому для их наблюдения применяется линза 10, дающая сильное увеличение в горизонтальном направлении.

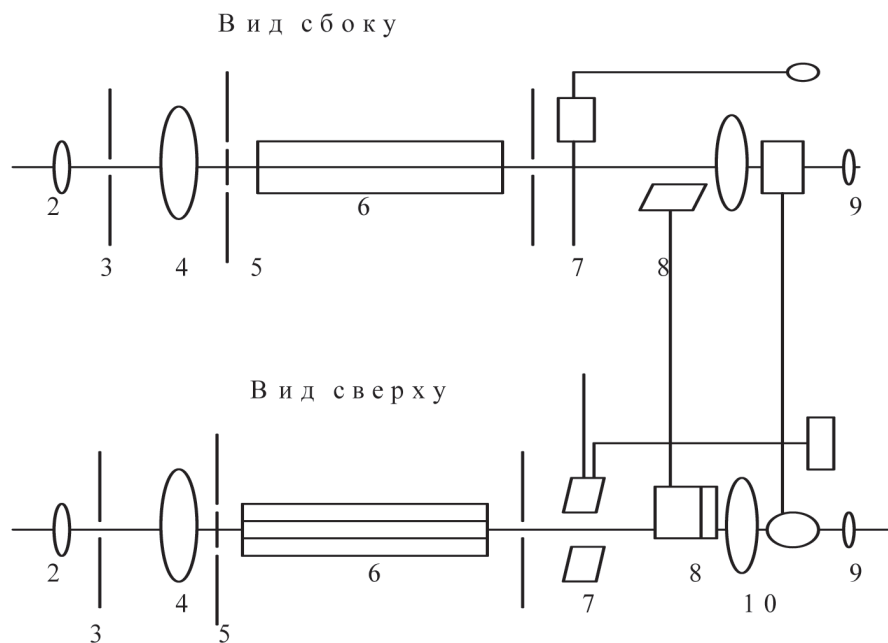


Рис.2



к определённомu сдвигу верхней системы интерференционных полос в зависимости от данной разности показателей преломления. Вычисление показателя преломления производится по формуле:

$$n = n_0 \pm \frac{h\lambda}{L}, \quad (6.7)$$

где  $n$  — показатель преломления излучаемого вещества,  $n_0$  — показатель преломления эталонного вещества (воздуха в лаборатории),  $h$  — число интерференционных полос,  $\lambda = 546 \text{ нм}$ ,  $L$  — длина кювет (трубок) в  $m$ .

В качестве эталонного вещества в работе используется атмосферный воздух лаборатории. Для определения  $n_0$  по формуле (6.4) сначала измеряются давление  $p$ , температура  $T$  воздуха и давление водяного пара  $e$ , содержащегося в воздухе.

Создавая насосом дополнительное давление в кювете (увеличивая  $p$  на  $\Delta p_1$ ), измеряют  $n$  при новых атмосферных условиях  $p_1 = p_0 + \Delta p_1$  с помощью интерферометра Релея.

Число интерференционных полос  $h$  определяется по таблице  $h = f(i)$ , где  $i$  — число делений микрометрического винта интерферометра.

Для измерения показателя преломления интерферометром нужно, чтобы показатели преломления в кюветах были близки по величине. Только в этом случае с большой точностью можно определять  $n$ .

### **Измерения и обработка результатов.**

Так как интерферометр измеряет разность показателей преломления в двух соседних параллельно расположенных трубках, в начале работы необходимо измерить метеопараметры воздуха в лаборатории. Температура и влажность воздуха определяются с помощью электронного измерителя, давление — с помощью барометра. При измерении температуры и влажности датчики необходимо располагать вблизи кювет интерферометра. Измерения метеопараметров ( $P$ ,  $V$  и  $T$ ) необходимо провести дважды: в начале работы и в конце. По измеренным значениям метеопараметров рассчитайте величину показателя преломления воздуха в лаборатории  $n_0$  по формуле (6.4). Перед началом измерений убедитесь, что при одинаковом давлении в кюветах (выводы трубок не закрыты) верхние и нижние системы интерференционных полос совпадают при значении «0» на микрометрическом винте. Если нуль смещён, необходимо определить это смещение и учесть при отсчёте показаний микрометрического винта в ходе измерений.

1. В интерферометре левую трубку (если смотреть со стороны окуляра) оставьте открытой, а в правой с помощью груши создайте избыточное давление величиной  $20 \text{ мм.рт.ст.}$  Вращая микрометрический винт,

совместите верхнюю и нижнюю системы интерференционных полос. Запишите показания микрометрического винта  $i$  и по прилагаемой таблице (см. приложение к работе) определите значение  $h$ , соответствующее данному давлению.

2. Проведите измерения по п. 1 для давлений 40, 60, 80, ... мм.рт.ст. Измерения продолжайте до значений  $i = 1250$ . Если в процессе измерений давление в измеряемой трубке снижается, проверьте плотность соединений трубок и с помощью груши поддерживайте требуемое давление.

3. Повторите измерения по пп. 1, 2 ещё два раза.

4. Постройте график зависимости индекса рефракции  $N$  от давления  $P$ :  $N(P)$ . В соответствии с приведённой формулой он должен иметь линейный характер.

### Контрольные вопросы

1. От какого параметра ( $p$ ,  $T$ ,  $e$ ) индекс преломления воздуха зависит наиболее сильно в оптическом диапазоне, радиодиапазоне?

2. Как изменяется показатель преломления воздуха с ростом температуры? Влажности? Давления?

3. Какой метод измерения показателя преломления (прямой или косвенный) используется в данной работе?

4. От чего зависит точность измерения показателя преломления в данной работе?

5. Изобразите зависимость показателя преломления воздуха от высоты над уровнем моря

6. Нарисуйте оптическую схему интерферометра Релея и изложите принцип действия данного прибора

Приложение .

Таблица значений  $h = f(i)$

$i$	$h'$	$i$	$h'$	$i$	$h'$	$i$	$h'$	$i$	$h'$
0	0	250	8,40	500	16,67	750	24,80	1000	32,82
10	0,34	260	8,73	510	16,99	760	25,13	1010	33,18
20	0,63	270	9,07	520	17,32	770	25,45	1020	33,48
30	1,01	280	9,40	530	17,64	780	25,78	1030	33,77
40	1,35	290	9,73	540	17,97	790	26,10	1040	34,06
50	1,69	300	10,07	550	18,30	800	26,43	1050	34,35
60	2,03	310	10,40	560	18,62	810	26,76	1060	34,63
70	2,37	320	10,73	570	18,95	820	27,08	1070	34,91
80	2,70	330	11,06	580	19,28	830	27,41	1080	35,19
90	3,04	340	11,40	590	19,60	840	27,75	1090	35,47
100	3,38	350	11,73	600	19,93	850	28,06	1100	35,74
110	3,71	360	12,06	610	20,25	860	28,40	1110	36,01

120	4,05	370	12,39	620	20,57	870	28,73	1120	36,26
130	4,38	380	12,72	630	20,91	880	29,05	1130	36,53
140	4,72	390	13,06	640	21,23	890	29,37	1140	36,79
150	5,05	400	13,38	650	21,55	900	29,70	1150	37,04
160	5,39	410	13,70	660	21,88	910	30,02	1160	37,29
170	5,72	420	14,03	670	22,20	920	30,33	1170	37,54
180	6,06	430	14,36	680	22,53	930	30,65	1180	37,78
190	6,39	440	14,69	690	22,85	940	30,96	1190	38,02
200	6,73	450	15,02	700	23,18	950	31,27	1200	38,26
210	7,06	460	15,35	710	23,50	960	31,60	1210	38,59
220	7,40	470	15,68	720	23,83	970	31,91	1220	38,82
230	7,43	480	16,01	730	24,16	980	32,21	1230	39,04
240	8,07	490	16,34	740	24,47	990	32,52	1240	39,25

**Таблица значений  $E$  ( $t^{\circ}\text{C}$ )**

$t,^{\circ}\text{C}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$E(\text{мб})$	12,27	13,22	14,17	15,13	16,09	17,04	18,31	19,58	20,85	22,12	23,37
$t,^{\circ}\text{C}$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$E(\text{мб})$	25,03	26,69	28,35	30,01	31,67	33,82	35,97	38,12	40,27	42,43	44,59

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НАКАЛЁННОГО ТЕЛА

**Приборы и принадлежности:** лабораторная установка, включающая в себя источник излучения — лампу накаливания с вольфрамовой нитью, пирометр «Проминь М», блок питания и измерительные приборы.

### Краткая теория

Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется тепловым излучением. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры.

Количественной характеристикой теплового излучения служит спектральная плотность энергетической светимости (излучательной способности) тела — мощность излучения с единицы поверхности излучающего тела в единичном интервале частоты:

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{изл}}{d\nu},$$

или в другом виде:

$$dW_{\nu,\nu+d\nu}^{изл} = R_{\nu,T} d\nu = R_{\lambda,T} d\lambda,$$

причем

$$R_{\nu,T} = \frac{\lambda^2}{c} R_{\lambda,T}.$$

Если проинтегрировать спектральную излучательную способность по всему интервалу частот, то получим интегральную энергетическую светимость:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu,T} d\nu.$$

Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется спектральной поглощательной способностью:

$$A_{\nu,\nu+d\nu} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{погл}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}},$$

где  $dW_{\nu,\nu+d\nu}^{погл}$ ,  $dW_{\nu,\nu+d\nu}$  — соответственно поглощенная и падающая энергия в диапазоне частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ .

Тело, способное поглощать всю падающую на него энергию при любой температуре, называется черным телом (ЧТ), для него  $A_{\nu,T} = 1$ .

Закон Кирхгофа. Отношение спектральной излучательной способности к спектральной поглощательной способности при термодинамическом равновесии не зависит от природы тела и является универсальной функцией частоты и температуры:

$$r_{\nu,T} = \frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}}.$$

Если учесть, что для ЧТ  $A_{\nu,T} = 1$ , то универсальная функция  $r_{\nu,T}$  Кирхгофа является ни чем иным, как излучательной способностью ЧТ:

$$r_{\nu,T} = R_{\nu,T}^{ЧТ}.$$

Закон Стефана-Больцмана устанавливает зависимость интегральной энергетической светимости ЧТ от абсолютной температуры, т.е.,

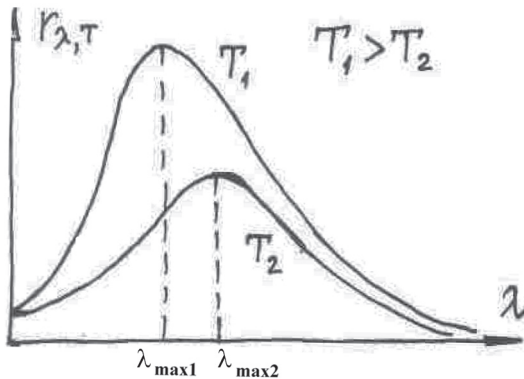
$$R_T^{ЧТ} = \sigma T^4,$$

где  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана-Больцмана.

Закон смещения Вина устанавливает зависимость длины волны, соответствующей максимуму функции  $r_{\lambda,T}$  от  $\lambda$

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  — постоянная Вина.



Формула Рэля-Джинса дает явный вид зависимости универсальной функции Кирхгофа от частоты и температуры:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \dots$$

Как показал опыт, полученное выражение хорошо согласуется с экспериментальными данными только при условии  $h\nu \ll kT$ .

Макс Планк, предположив, что атомы излучают энергию не непрерывно, а определенными порциями (квантами), энергия которых пропорциональна частоте  $\varepsilon = h\nu$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка, получил для излучательной способности ЧТ следующую формулу (формула Планка)

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^3 h}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{или} \quad r_{\lambda,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Эта формула блестяще согласуется с экспериментальными данными во всем интервале частот, длин волн и температур. В области малых частот, в предположении, что  $h\nu \ll kT$ , формула Планка переходит в формулу Рэлея-Джинса.

Законы теплового излучения используются для измерения температуры раскаленных тел. В зависимости от того, какой закон используется, различают радиационную, цветовую и яркостную температуры.

Радиационной температурой называется такая температура ЧТ, при которой его интегральная излучательная способность (энергетическая светимость) равна интегральной излучательной способности (энергетической светимости) исследуемого тела, т.е.  $R_T^{CT} = \sigma T_p^4$  если учесть, что  $R_T^{CT} = \sigma T^4$  и  $R_T^{CT} = A_T R_T^{CT}$ , то  $T_p = \sqrt[4]{A_T} T$ .

Так как  $A_T < 1$ , то  $T_p < T$ , т.е. радиационная температура всегда меньше истинной (термодинамической) температуры.

Цветовая температура. Среди нагретых тел выделяются так называемые серые тела, для которых характер распределения излучения совершенно подобен спектру излучения ЧТ, но излучение ослаблено по сравнению с ним в  $A_T$  раз для любой длины волны при заданной температуре тела  $T$ . Для серых тел излучательная способность равна  $R_{\lambda,T} = A_T r_{\lambda,T}$  следовательно, распределение энергии в спектре излучения серого тела такое же, как и в спектре ЧТ, так как  $A_T < 1 = \text{const}$ . Потому закон Вина применим и к серым телам, т.е. зная  $\lambda_{\text{max}}$  соответствующую максимуму спектральной плотности  $R_{\lambda,T}$  исследуемого тела, можно определить его температуру, которая называется цветовой температурой:

$$T_U = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}$$

Яркостной температурой называется температура ЧТ, при которой для определенной длины волны его спектральная излучательная способность равна спектральной излучательной способности исследуемого тела, т.е.  $r_{\lambda,T} = R_{\lambda,T}$

Если учесть то, что для исследуемого тела при длине волны  $\lambda$

$$\frac{R_{\lambda,T}}{A_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}$$

и  $A_{\lambda,T} < 1$  для серых тел, то  $T_{я} < T$ , т.е. яркостная температура меньше термодинамической.

Измерение яркостной температуры производится с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью, основанного на визуальном сравнении яркости раскаленной нити с яркостью изображения исследуемого тела. Равенство видимых яркостей нити и тела, наблюдаемых через монохроматический светофильтр ( $\lambda_0 = 650 \text{ нм}$ ) фиксируется по исчезновению изображения нити на фоне изображения исследуемого тела.

Установка состоит из лампы накаливания с вольфрамовой спиралью, миллиамперметра для измерения тока, текущего по спирали, вольтметра для измерения напряжения, подаваемого на спираль лампы, блока питания, с помощью которого можно регулировать напряжение на спирали лампы, и пирометра «Проминь М» (схема установки приведена на рис. 1).

Яркостная температура  $T_{я}$  в работе определяется как температура черного тела (ЧТ) с той же интенсивностью излучения вблизи  $\lambda = 650 \text{ нм}$ , что и у серого тела с термодинамической температурой  $T$ , т.е. (в приближении Вина)

$$A(\nu, T) e^{\frac{h\nu}{kT}} = e^{\frac{h\nu}{kT_{я}}}$$

Для вольфрама в области температур  $800\text{K} < T < 2000\text{K}$  используется приближение для  $A(\nu, T) = 0,483 + 2,5 \cdot 10^{-5} T^2$ . В этом случае зависимость между  $T$  и  $T_{я}$  дается выражением

$$T = 21,1 + 0,96T_{я} + 5,63 \cdot 10^{-5}(T_{я})^2 \quad (7.1)$$

Радиационная температура ( $T_{я}$ ) является температурой ЧТ с той же интегральной светимостью, т.е.

$$A_T T^4 = T_p^4$$

Для того же интервала температур используется приближение:

$$A_T = -0,31 + 1,4 \cdot 10^{-4} T \quad (7.2)$$

С учетом этого радиационная температура определяется выражением:

$$T_p = -90,7 + 0,559T_{я} + 1,34 \cdot 10^{-4}(T_{я}) \quad (7.3)$$

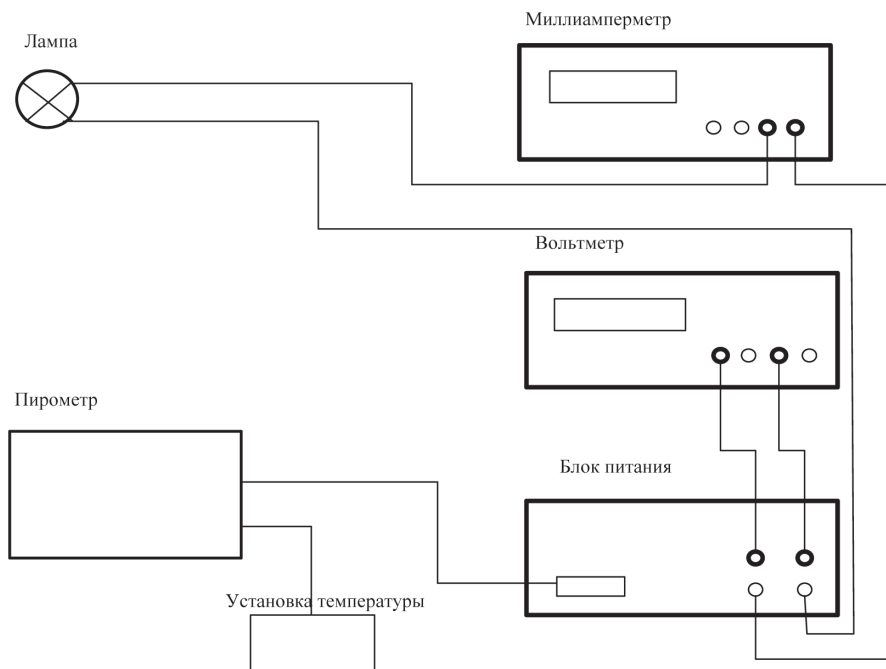


Рис.1. Блок-схема лабораторной установки

Таким образом, измерив  $T_{я}$ , можно определить  $T$  и  $T_p$ . Если бы спираль лампы накаливания излучала как ЧТ, то баланс потребляемой энергии определялся бы выражением:

$$P = \sigma S (T^4 - T_0^4), \quad (7.4)$$

где  $P$  — электрическая мощность, потребляемая спиралью;  $S$  — площадь излучающей поверхности;  $T$  и  $T_0$  — температуры нити и окружающей среды соответственно. Если предположить, что спираль излучает как серое тело и учесть, что  $T_0 \ll T$ , то можно выражение (7.4) записать в виде:

$$P = A_r S \sigma T^4. \quad (7.5)$$

Это закон Стефана-Больцмана для серого тела (СТ). Значения  $A_r$  при различных температурах приведены в таблице 7.1.

Т а б л и ц а 7.1

$T, ^\circ K$	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
$A_r$	0,067	0,081	0,105	0,119	0,133	0,144	0,164	0,179	0,195	0,209	0,223	0,236	0,249



Измерив температуру вольфрамовой спирали в зависимости от подводимой мощности, можно убедиться в справедливости закона Стефана-Больцмана. Для этого нужно построить график зависимости  $P(T)$  в логарифмическом масштабе и по углу наклона прямой можно определить  $n$ -показатель степени в исследуемой зависимости. Понятно, в пределах погрешности он должен быть близок к 4.

### Порядок выполнения работы.

1. На блоке питания ручку «О-12» привести в крайнее левое положение.
2. Включить блок питания.
3. Включить миллиамперметр и вольтметр.
4. Включить питание пирометра с помощью тумблера «пирометр».
5. С помощью ручки «О-12» на блоке питания и вольтметра установить напряжение накала 2 В.
6. С помощью двух кнопок на стенде  $\langle \bullet \text{ } ^\circ\text{C} \text{ } \bullet \rangle$  добиться исчезновения нити на фоне раскаленной спирали.
7. Снять значение  $T_{Я}$  со шкалы пирометра.
8. Записать в таблицу 7.2 значения:  $u$  — напряжение по вольтметру;  $I$  — силу тока по миллиамперметру;  $T_{Я}$  в кельвинах, учитывая то, что пирометр отградуирован в  $^\circ\text{C}$ .
9. Произвести действия по п.п. 5–8 в диапазоне напряжений от 2 В до 14 В с шагом в 1 В.

**Примечание.** Время между двумя последовательными измерениями должно быть не менее 1 мин. из-за тепловой релаксации спирали. Всего произвести 3 серии таких измерений.

### Обработка измерений

1. Вычислите абсолютную погрешность измерения яркостей температуры для 3-х значений напряжения  $u_1 = 3 \text{ В}$ ;  $u_2 = 6 \text{ В}$ ;  $u_3 = 9 \text{ В}$  по формуле

$$\Delta T_{Я} = \sqrt{(\Delta T_{Я,сл})^2 + (\Delta T_{Я,сист})^2},$$

где  $\Delta T_{Я,сл} = \sqrt{\frac{\sum_i (T_{Я_i} - \bar{T}_{Я})^2}{n(n-1)}}$  — случайная погрешность измерения,

$\Delta T_{Я,сист} = 15\text{K}$  — систематическая погрешность согласно паспорту пирометра.

Таблица 7.2

$u (B)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$T_{я1}(K)$													
$T_{я2}(K)$													
$T_{я3}(K)$													
$\bar{T}_я (K)$													
$\Delta T_я (K)$													
$T (K)$													
$\Delta T (K)$													
$T_p (K)$													
$I (A)$													
$\bar{I} (A)$													
$U (B)$													
$P (Bm)$													
$\Delta P (Bm)$													
$R (Om)$													
$\Delta R (Om)$													

Все последующие погрешности рассчитываются для указанных напряжений.

2. Вычислите термодинамическую температуру  $T$  по формуле (7.1) и погрешность  $\Delta T$  по формуле:

$$\Delta T = (0,96 + 1,2 \cdot 10^{-4}) \Delta T_я.$$

3. Вычислите радиационную температуру  $T_p$  по формуле (7.3) и погрешность  $\Delta T_p$  по формуле:

$$\Delta T_p = \sqrt{(\Delta T_{p,cl})^2 + (\Delta T_{p,cuct})^2},$$

$$\text{где } \Delta T_{p,cl} = \sqrt{\frac{\sum_i (T_{p_i} - \bar{T}_p)^2}{n(n-1)}}.$$

4. Вычислите абсолютную погрешность измерения тока по формуле

$$\Delta I_{cuct} = I \frac{\Delta u}{u} \quad (\Delta u = 0,01 B \text{ — систематическая погрешность измерения})$$

напряжения).

5. Рассчитайте напряжение на спирали по формуле  $U = u - Ir$ , где  $r = 0,25 \text{ Ом}$  (для установки 1);  $r = 0,4 \text{ Ом}$  (для установки 2) — сопротивление подводящих проводов и внутреннее сопротивление амперметра.

6. Рассчитайте мощность, выделяющуюся на спирали и ее погрешность по формулам:

$$P = IU \text{ и } \Delta P = R \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$$

7. Рассчитайте сопротивление спирали и его погрешность по формулам:

$$R = \frac{U}{I}; \quad \Delta R = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2}$$

8. Постройте график зависимости  $T_{\text{Я}}(P)$ ,  $T(P)$  и  $T_p(P)$  на одной координатной сетке.

9. Постройте график зависимости  $\lg P = \lg(A_T \sigma) + n \lg T$  и по графику определите  $n$ .

10. Вычислите величину постоянной Стефана-Больцмана для 3-х температур  $T$ , соответствующих напряжениям  $u_1 = 3 \text{ В}$ ;  $u_2 = 6 \text{ В}$ ;  $u_3 = 9 \text{ В}$ , из выражения,  $\sigma = \frac{P}{A_T S T^4}$ , где  $S = 0,05 \text{ см}^2$ ,  $\Delta S = 0,005 \text{ см}^2$ ,  $A_T$  — по табл. 7.1.

11. По найденным значениям  $\sigma$  вычислите постоянную Планка по формуле

$$h = \sqrt[3]{\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 \sigma}},$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  — постоянная Больцмана;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света.

12. Определить погрешности определения  $\sigma$  и  $h$  по формулам

$$\Delta \sigma = \sigma \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \text{ и } \Delta h = \sqrt{\frac{\sum_i (h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}}.$$

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение яркостной, термодинамической и радиационной температур.

2. Сформулируйте закон Кирхгофа.

3. Сформулируйте закон Стефана-Больцмана.

4. Каков физический смысл универсальной функции Кирхгофа.
5. ЧТ нагрели от температуры  $T_1=500\text{ K}$  до  $T_2=2000\text{ K}$ . Определить:
- во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость?
  - как уменьшилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости?