

§ 1.3. ФОТОМЕТРИЯ

Поток излучения

Свет оказывает действие на тела благодаря тому, что он переносит энергию. Согласно электромагнитной теории света Максвелла световая энергия — это энергия электромагнитных волн. Методы измерения световой энергии составляют раздел оптики, называемый фотометрией. С помощью закономерностей, изучаемых в этом разделе, определяются расположение источников света, концентрация света в заданном направлении для создания освещенности, необходимой для нормальной работы, и т. д. Ряд величин характеризует свет с точки зрения переносимой им энергии.

Вы уже знаете, что энергетической характеристикой электромагнитного излучения является плотность потока излучения. Величина, определяемая энергией, переносимой светом через некоторую поверхность в единицу времени, представляет собой поток излучения (рис. 1.8).

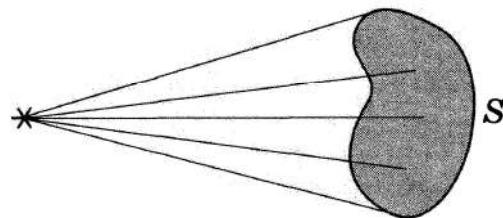


Рис. 1.8

Если за время Δt через поверхность переносится энергия ΔW , то поток излучения равен

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (1.3.1)$$

Эта величина выражается в ваттах и представляет собой мощность излучения.

Относительная спектральная световая эффективность

Для восприятия световой энергии особое значение, естественно, имеет глаз. Поэтому нас в первую очередь интересует не полная энергия, переносимая электромагнитными волнами, а лишь та ее часть, на которую реагирует наш глаз. Очень длинные электромагнитные волны (радиоволны) и очень короткие (например, рентгеновские лучи) глазом не воспринимаются.

Чувствительность глаза к излучениям различных длин волн характеризуют так называемой относительной спектральной эффективностью $V(\lambda)$. Глаз наиболее чувствителен к желто-зеленым лучам ($\lambda_3 \approx 0,5$ мкм).

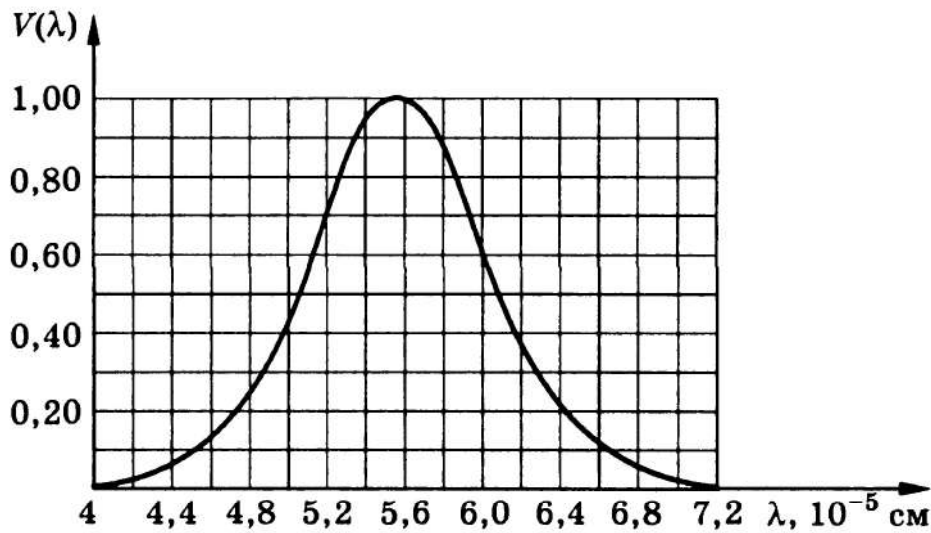


Рис. 1.9

Относительный спектральной световой эффективностью называют отношение мощности излучения на данной длине волны λ к мощности излучения на длине волны λ_3 при условии, что на глаз эти излучения воспринимаются как одинаково яркие. График относительной спектральной световой эффективности (рис. 1.9) имеет максимум при $\lambda = \lambda_3$.

У разных людей чувствительность глаза к излучениям различных длин волн различна. Но в среднем различия оказываются небольшими, и можно говорить о вполне определенной (усредненной) кривой относительной спектральной световой эффективности здорового глаза.

Глаз как продукт естественного отбора

Глаз воспринимает электромагнитные излучения в сравнительно небольшом интервале длин волн: от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ м. Кривая относительной спектральной световой эффективности обрывается на этих длинах волн. Почему же природа сделала наш глаз (равно как и глаза животных) чувствительным к определенному интервалу длин волн?

Полоса видимого излучения расположена между ультрафиолетовыми и инфракрасными (тепловыми) лучами. По краям шкалы электромагнитных волн простираются широкие полосы радиоволн и гамма-лучей, испускаемых атомными ядрами. Все эти волны несут энергию и, казалось бы, могли с тем же успехом делать для нас то, что делает свет. Глаз мог бы быть чувствительным и к ним.

Конечно, сразу же можно сказать, что подходят волны не всех длин. Гамма-лучи и рентгеновские лучи излучаются заметно лишь при особых условиях, и вокруг нас их почти нет. Это и хорошо. Они (особенно это относится к гамма-лучам) вызывают лучевую болезнь, и долго наслаждаться картиной в гамма-лучах человечество не могло бы.

Длинные радиоволны были бы крайне неудобны. Они свободно огибают предметы метровых размеров, подобно тому как морские волны огибают прибрежные камни. Мы не могли бы рассматривать предметы, видеть которые четко нам жизненно необходимо. Дифракция волн привела бы к тому, что мы видели бы мир «как рыба в тине». Но есть еще инфракрасные волны, способные нагревать тела, но невидимые нами. Они, казалось бы, с успехом могли заменить волны тех длин, которые воспринимаются глазом. Или, наконец, глаз мог бы приспособиться к ультрафиолету.

Получается, что выбор узкой полосы длин волн, которую мы именуем светом, именно на данном участке шкалы совершенно случаен. Ведь Солнце испускает как видимые лучи, так и ультрафиолетовые и инфракрасные.

Нет и нет! Этот выбор далеко не случаен. Прежде всего максимум излучения электромагнитных волн Солнца лежит как раз в желто-зеленой области видимого спектра. Но не это все же главное! Излучение в соседних областях спектра тоже достаточно интенсивно.

Мы живем на дне воздушного океана. Земля окружена атмосферой. Мы ее считаем прозрачной или почти прозрачной. И она является таковой в действительности, но только для узкого участка длин волн, который как раз воспринимает наш глаз.

Это первое оптическое «окно» в атмосфере. Озон сильно поглощает ультрафиолетовое излучение. Пары воды значительно ослабляют инфракрасное излучение*. Длинные радиоволны отбрасываются назад верхним слоем атмосферы — ионосферой.

Имеется еще только одно «радиоокно», прозрачное для длин волн от 0,25 см до 30 м. Но эти волны плохо подходят для глаза, да и интенсивность их в солнечном спектре мала. Потребовался большой скачок в развитии радиотехники, вызванный усовершенствованием радиолокаторов во время Второй миро-

* Надо отметить, что сам глаз, как нагретое тело, тоже излучает инфракрасные волны. Если бы глаз был к ним чувствителен, то это сильно мешало бы его работе.

вой войны, прежде чем научились уверенно улавливать эти волны.

Таким образом, в процессе борьбы за существование живые организмы приобрели орган, реагирующий как раз на те излучения, которые были наиболее интенсивны и очень хорошо подходили для своего назначения.

То, что максимум излучения Солнца приходится на середину «оптического окна», следует, вероятно, считать дополнительным подарком природы.

Световой поток

Практически важно знать не просто мощность излучения, регистрируемую соответствующими измерительными приборами, а мощность светового потока, оцениваемую непосредственно нашим глазом. Для оценки световой энергии введена особая физическая величина — *световой поток* (обозначается буквой Φ).

Световым потоком называют отношение протекающей через некоторую поверхность за время Δt световой энергии, оцениваемой по зрительному впечатлению, ко времени Δt . Другими словами, световой поток — это мощность светового излучения, оцениваемая непосредственно нашим глазом.

Как в принципе осуществляется эта оценка? Выбирают некоторый эталонный источник света. Световой поток этого источника сравнивают со световыми потоками всех остальных источников. Сравнение осуществляется с помощью глаза.

Световой поток создается источником света и действует на окружающие предметы. Соответственно вводят еще две световые величины: одну для характеристики источника света — *силу света* источника, а другую для характеристики действия света на поверхность тел — *освещенность*.

§ 1.4. СИЛА СВЕТА

Понятие силы света проще всего ввести для так называемого точечного источника света.

Точечный источник

Источник света считается точечным, если его размеры много меньше расстояний, на которых оценивается его действие. Так, например, расстояния до звезд настолько превосходят их

размеры, что именно звезды являются лучшей моделью точечного источника, несмотря на то что их размеры огромны. Вводя понятие точечного источника света, мы выделяем лишь существенные для фотометрии свойства реальных источников, отвлекаясь от второстепенных свойств. Точечный источник является идеализацией, как и другие модели, принятые в физике, — материальная точка, абсолютно твердое тело, идеальный газ и т. п.

Сила света

Силой света I источника называется отношение светового потока $\Delta\Phi$ к телесному углу $\Delta\Omega$, в котором этот световой поток распространяется от источника:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}. \quad (1.4.1)$$

Точечный источник света создает равномерный по всем направлениям световой поток, поэтому и сила света точечного источника одинакова во всем направлениям; она равна

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (1.4.2)$$

где Φ — полный световой поток источника, т. е. мощность светового излучения, распространяющегося по всем направлениям от источника, оцениваемая по зрительному ощущению.

Для характеристики источника излучения вместо силы света говорят о *силе излучения* источника и выражают ее в ваттах на стерадиан.

Единица силы света

В системе единиц световых величин за основную принята *единица силы света*. В СИ эта единица называется к а н д е л о й* (кд). Дело в том, что проще всего создать эталон именно для силы света, а не для светового потока.

В качестве единицы силы света принята сила света некоторого эталонного источника. В разное время использовались различные эталонные источники: свеча, пламенная лампа,

* От латинского слова *candela* — свеча.

электрическая лампа накаливания, поверхность расплавленной платины. В настоящее время принято следующее определение канделы: *кандела равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м), сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.*

Все остальные световые единицы, в том числе и единица светового потока, являются производными.

Единица светового потока

За единицу светового потока принимается люмен* (лм).

Люмен — это световой поток, испускаемый точечным источником, сила света которого 1 кд, в телесном угле, равном 1 ср.

Из определения канделы следует, что световой поток в 1 лм соответствует потоку энергии излучения в 1/683 Вт при частоте $5,4 \cdot 10^{14}$ Гц.

§ 1.5. ОСВЕЩЕННОСТЬ. ЯРКОСТЬ

Источник света почти всегда освещает поверхности предметов неравномерно. Так, лампа, висящая над столом, лучше всего освещает центр стола. Края стола освещены значительно хуже. И дело здесь не только в том, что сила света электрической лампы различна по различным направлениям. Даже в случае точечного источника на площадку в центре стола придется бо́льшая световая мощность (световой поток), чем на такую же площадку на краю.

Освещенность

Освещенностью E называется отношение светового потока $\Delta\Phi$, падающего на некоторый участок поверхности, к площади ΔS этого участка:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}. \quad (1.5.1)$$

* От латинского слова *lumen* — свет.

Освещенность не зависит от размеров освещаемой поверхности. При равномерном освещении большей площади поверхности соответствует пропорционально больший световой поток, а их отношение остается одним и тем же.

Единица освещенности в СИ называется люксом* (лк). Из формулы (1.5.1) следует, что

$$1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}.$$

Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м^2 при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм .

Закон освещенности

Для фотометрических расчетов важно знать, как зависит освещенность E какой-либо поверхности от ее расположения по отношению к падающим лучам, от расстояния R до источника света и от силы света I источника.

Очевидно, что при прочих равных условиях освещенность прямо пропорциональна силе света источника. В самом деле, два находящиеся рядом одинаковых источника будут посылать в данном направлении в два раза больше световой энергии в единицу времени, чем один источник. Но такие два источника можно заменить одним, сила света которого в два раза больше.

Выяснить зависимость освещенности от расстояния до источника можно, поместив мысленно точечный источник в центр сферы. Площадь поверхности сферы равна $S = 4\pi R^2$, а полный световой поток равен $\Phi = 4\pi I$ [см. формулу (1.4.2)]. Поэтому освещенность выразится так:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}. \quad (1.5.2)$$

В рассмотренном случае лучи падали на поверхность сферы перпендикулярно (нормально).

Следовательно, освещенность поверхности в случае, когда лучи падают на поверхность нормально, прямо пропорциональ-

* От латинского слова lux — свет. Как видите, в латинском языке понятие *свет* выражается различными словами: lux, lumen.

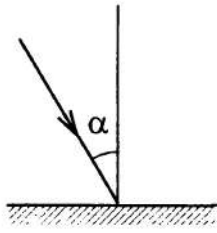


Рис. 1.10

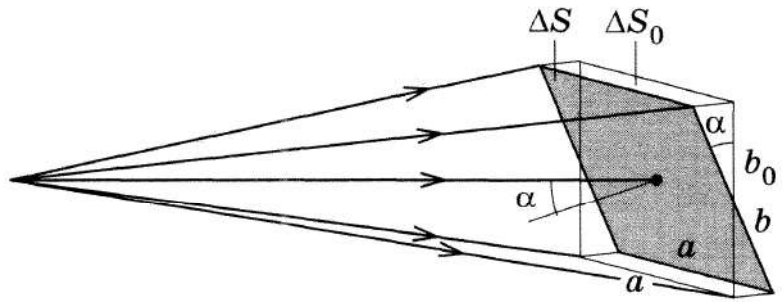


Рис. 1.11

на силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния его от освещаемой поверхности.

Чаще, однако, лучи падают на освещаемую поверхность не перпендикулярно, а наклонно. Направление падающих на площадку лучей принято характеризовать *углом падения*.

Углом падения луча называют угол между падающим лучом и перпендикуляром, восставленным к поверхности в точке падения луча (рис. 1.10).

Угол падения лучей на поверхность сферы от источника, расположенного в ее центре, равен нулю.

Выясним теперь, как изменится освещенность какой-либо площадки, если при том же расстоянии площадки от источника угол падения лучей будет отличен от нуля.

Для этого рассмотрим очень маленький участок на внутренней поверхности той же сферы. Если размеры этого участка значительно меньше радиуса сферы, его можно считать плоским, а лучи, падающие на него, приблизительно параллельными. Пусть площадь участка равна ΔS_0 (рис. 1.11). Рассмотрим другую площадку, на которую от источника падает тот же световой поток, что и на первую. Если вторая площадка составляет с первой угол α , то угол падения на нее лучей из центрального источника также будет равен α . Площадь второй площадки равна ΔS . Как легко видеть из рисунка, обе площадки имеют одинаковую ширину a , но различные длины b и b_0 , причем

$$\frac{b_0}{b} = \cos \alpha.$$

Поэтому $\frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \frac{ab_0}{ab} = \cos \alpha.$

При одном и том же световом потоке $\Delta\Phi$ освещенности обеих площадок не будут одинаковыми:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad E_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S_0}.$$

Следовательно, $\frac{E}{E_0} = \frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \cos \alpha$.

Таким образом, освещенность E наклонной площадки связана с освещенностью E_0 площадки, перпендикулярной лучам, так:

$$E = E_0 \cos \alpha. \quad (1.5.3)$$

Это значит, что освещенность поверхности прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей.

Объединив полученные результаты (1.5.2) и (1.5.3), можно получить закон освещенности.

Освещенность поверхности, создаваемая точечным источником, прямо пропорциональна силе света источника, косинусу угла падения лучей и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha. \quad (1.5.4)$$

Если источников несколько, то общая освещенность равна сумме освещенностей, созданных каждым источником в отдельности.

С целью сохранения нормального зрения людей в нашей стране установлены гигиенические нормы освещенности жилых и служебных помещений, обеспечивающие наилучшие условия работы и быта. Так, освещенность классной доски должна быть равна 150 лк, а освещенность школьной лестницы 30 лк.

Яркость

Источники света далеко не всегда можно считать точечными. Любой источник света является протяженным, имеет определенную форму и размер. В том случае, когда протяженностью источника нельзя пренебречь, вводят новую величину, характеризующую световое излучение участка поверхности источника в заданном направлении. Такая величина называется яркостью.

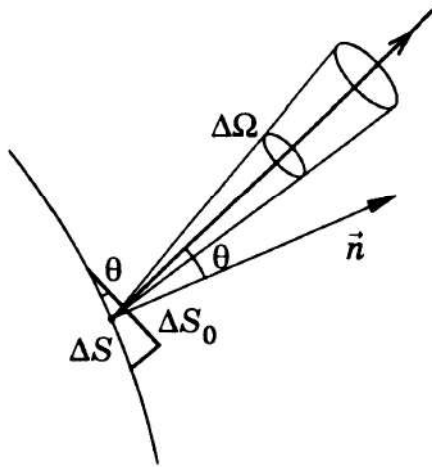


Рис. 1.12

Выделим на поверхности светящегося тела элемент поверхности площадью ΔS (рис. 1.12) и проведем от нее световой луч под углом θ к нормали. Если рассматривать площадку ΔS в этом направлении, то ее видимая поверхность будет иметь площадь

$$\Delta S_0 = \Delta S \cos \theta,$$

равную площади проекции излучающей площадки на плоскость, перпендикулярную к направлению наблюдения.

Яркостью L называют отношение светового потока $\Delta\Phi$ с поверхности ΔS в заданном направлении θ внутри телесного угла $\Delta\Omega$ к произведению площади видимой поверхности ΔS_0 на телесный угол $\Delta\Omega$:

$$L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S \cos \theta \cdot \Delta\Omega}. \quad (1.5.5)$$

Сила света площадки ΔS согласно определению (1.4.1) равна $I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}$. Поэтому яркость равна отношению силы света элемента поверхности к площади видимой поверхности элемента ΔS_0 :

$$L = \frac{I}{\Delta S \cos \theta}. \quad (1.5.6)$$

Единица яркости в СИ: 1 кд/м^2 . *Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м^2 при силе света 1 кд.*

Наш глаз непосредственно реагирует именно на яркость, а не на силу света источника. Освещенности изображений предметов на сетчатке глаза пропорциональны яркостям светящихся предметов. Из-за этого маленькая лампочка кажется нам более яркой, чем большая, и в том случае, когда силы света обеих лампочек одинаковы.

В таблице 1 приведены яркости часто встречающихся светящихся поверхностей.

Таблица 1

Источник света	Яркость, кд/м ²	Источник света	Яркость, кд/м ²
Ночное безлунное небо	$1 \cdot 10^{-4}$	Спираль лампы накаливания	$5 \cdot 10^6$
Полная Луна	$1 \cdot 10^3$	Кратер угольной дуги	$1,5 \cdot 10^8$
Пламя стеариновой свечи	$2,5 \cdot 10^3$	Солнце	$1,5 \cdot 10^9$
Ясное дневное небо	$1,5 \cdot 10^4$		

Источники света с яркостью более $1,6 \cdot 10^5$ кд/м² вызывают в глазу болезненные ощущения.

Понятие яркости можно применить не только к самосветящимся поверхностям, но и к поверхностям, освещенным каким-либо источником света.

§ 1.6. ФОТОМЕТРЫ

Измерения фотометрических величин (силы света, освещенности и др.) делятся на объективные (или физические) и субъективные (или визуальные). В первом случае производится измерение энергии излучения с помощью тех или иных приборов без участия глаза. Во втором случае измерение основывается на сравнении глазом освещенностей двух соприкасающихся плоскостей. В последнее время объективные методы измерения получают все большее применение.

Люксметры

Для измерения освещенности объективным методом применяют специальные приборы — люксметры. Их действие основано на явлении фотоэффекта, о котором будет рассказано в дальнейшем. Под действием света в приборе возникает электрический ток, при этом сила тока прямо пропорциональна освещенности. Приемное окошко прибора покрывают светофильтром, поглощательная способность которого обратно

пропорциональна световой эффективности глаза (см. § 1.3). В результате чувствительность прибора оказывается близкой к чувствительности глаза. Шкалу прибора можно непосредственно проградуировать в люксах. Приборы, подобные люксметру, предпочтительнее глаза, так как могут работать непрерывно и обладают большой точностью измерений. Действие прибора, которым фотографы пользуются для определения экспозиции при фотографировании, — фотоэкспонетра — основано на измерении освещенности.

Простейший фотометр

Познакомимся с *фотометром* — прибором для измерения силы света источника с помощью визуального сравнения действия на глаз световых потоков от двух различных источников.

Один из простейших фотометров устроен следующим образом. Два источника S_1 и S_2 , близких к точечным, освещают белую треугольную призму ABC , помещенную внутри зачерненной трубки (рис. 1.13). Сила света I_1 одного из источников, например S_1 , известна, а силу света I_2 источника S_2 надо определить. Освещенности граней призмы AB и BC зависят от сил света источников и расстояний от них до граней. Глаз наблюдателя сравнивает освещенности граней. Перемещая один из источников света или оба источника, добиваются равенства освещенностей обеих граней призмы. После этого измеряют расстояния r_1 и r_2 от источников до призмы. Равенство освещенностей граней приводит согласно формуле (1.5.4) к уравнению:

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2} \quad (1.6.1)$$

(углы падения лучей на грани одинаковы, и косинусы соответствующих углов сокращаются).

Отсюда сила света I_2 второго источника равна:

$$I_2 = I_1 \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (1.6.2)$$

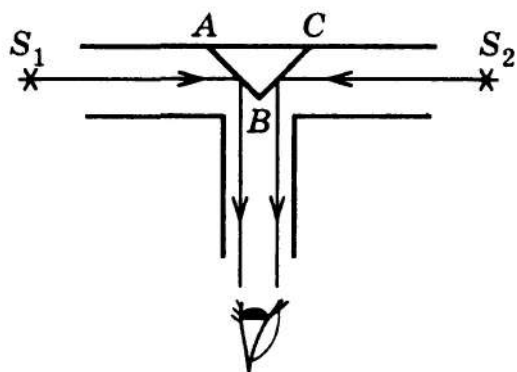


Рис. 1.13

Фотометр имеет тот недостаток, что варьировать расстояния можно только в определенных пределах, и поэтому нельзя добиваться равенства освещенностей, если силы света источников значительно отличаются друг от друга.

§ 1.7. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Мы рассмотрим задачи на прямолинейное распространение света и фотометрию. Решение этих задач не требует особой изобретательности. Необходимо хорошо знать закон прямолинейного распространения света (см. § 1.2), определения световых величин: светового потока (см. § 1.3), силы света (1.4.1), силы света точечного источника (1.4.2), освещенности (1.5.1), яркости (1.5.5). Надо знать закон освещенности (1.5.4).

Задача 1

Матовая электрическая лампочка сферической формы радиусом $r = 3$ см освещает глобус радиусом $R = 13$ см. Определите диаметр D полной тени от глобуса на стене, если расстояние от центра лампочки до центра глобуса $l = 1$ м, а от центра глобуса до стены $2l$.

Решение. Так как свет от лампочки распространяется прямолинейно, то диаметр полной тени от глобуса представляет собой отрезок MN (рис. 1.14), заключенный между внешними касательными к лампочке (круг с центром O_1) и глобусу (круг с центром O_2), перпендикулярный к линии центров O_1O_2 .

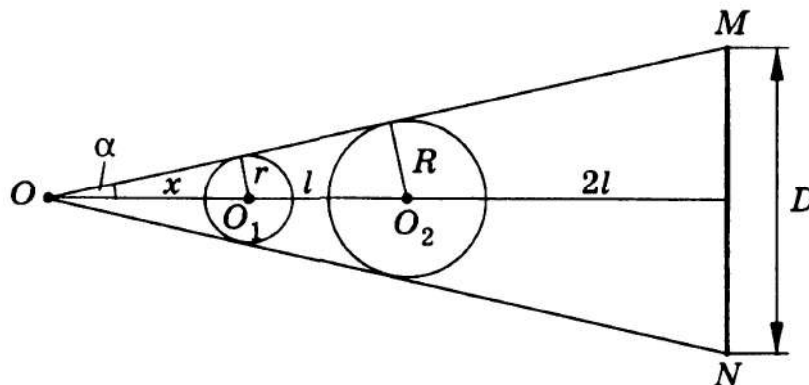


Рис. 1.14