

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)
Факультет управления и прикладной математики

Вопрос по выбору для устного экзамена
(Общая физика: оптика)

Рефракция света в атмосфере. Миражи.

Работу выполнил
Линдеманн Никита, 779 группа



г. Долгопрудный
2019 год

Содержание

1	Введение	1
2	Опыт	2
3	Радиус кривизны светового луча	3
4	Миражи	4
5	Нижний мираж	5
6	Верхний мираж	5
7	Двойные и тройные миражи	6
8	Задача	7

1 Введение

Мы предполагали, что скорость света в воздухе равна скорости света в вакууме, т.е. считали, что показатель преломления воздуха равен единице. В действительности такое предположение является приближенным. Оно оправдано, если рассматривается переход светового луча через границу между воздухом и водой или воздухом и стеклом. Однако оно становится неправомерным при рассмотрении распространения света через земную атмосферу. При этом необходимо учитывать не только то, что показатель преломления немного больше единицы, но и то, что он изменяется от точки к точке соответственно изменению плотности воздуха. Атмосфера представляет собой оптически неоднородную среду, поэтому траектория светового луча в атмосфере, строго говоря, всегда в какой-то степени криволинейна. Искривление световых лучей при прохождении через атмосферу называют рефракцией света в атмосфере.

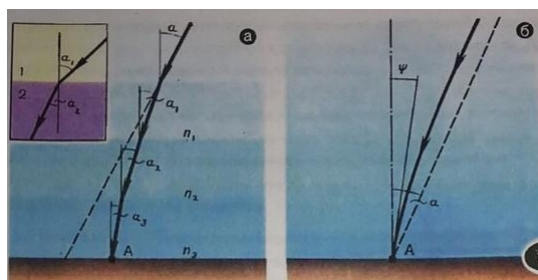


Рис. 1

Различают астрономическую и земную рефракцию. В первом случае рассматривается искривление световых лучей, приходящих к земному наблюдателю от небесных тел (Солнца, Луны, звезд). Во втором случае рассматривается искривление лучей, приходящих к наблюдателю от земных объектов. В обоих случаях вследствие искривления световых лучей наблюдатель может видеть объект не в том направлении, которое соответствует действительности; объект может казаться искаженным. Возможно наблюдение объекта даже тогда, когда тот фактически находится за линией горизонта. Таким образом, рефракция света в земной атмосфере может приводить к своеобразным обманам зрения.

Представим, что атмосфера состоит из оптически однородных горизонтальных слоев, показатель преломления которых скачком меняется от слоя к слою, постепенно возрастаая

при переходе от верхних слоев к нижним. Такая ситуация показана на рисунке, где атмосфера условно представлена в виде трех слоев с показателями преломления n_1, n_2, n_3 , причем $n_1 < n_2 < n_3$; за верхней границей атмосферы показатель преломления равен единице. При переходе луча из среды 1 с показателем преломления n_1 в среду 2 с показателем преломления n_2 , выполняется соотношение:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Это есть закон Снеллиуса преломления света на границе двух сред.

Из закона преломления следует, что траектория светового луча, приходящего к земному наблюдателю от некоторого заатмосферного объекта, должна иметь вид ломаной линии, причем

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_1} = n_1, \quad \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n_2, \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_3} = n_3.$$

В действительности плотность атмосферы, а, следовательно, и ее показатель преломления изменяются с высотой не скачками, а непрерывно. Поэтому траектория светового луча представляет собой не ломаную, а кривую линию. Предположим, что изображенный на рисунке луч приходит к наблюдателю от некоторого небесного объекта. Если бы не было рефракции света в атмосфере, то этот объект был бы виден наблюдателю под углом α (угол α рассматривается по отношению к вертикали; его называют зенитным расстоянием объекта). Вследствие рефракции наблюдатель видит объект не под углом α , а под углом ψ . Поскольку $\psi < \alpha$, то объект кажется находящимся выше над горизонтом, чем это есть на самом деле. Иначе говоря, наблюдаемое зенитное расстояние объекта меньше действительного зенитного расстояния.

Разность $\Omega = \alpha - \psi$ называют углом рефракции.

2 Опыт

Рассмотрим следующий опыт. Наполним аквариум прямоугольной формы или специально изготовленную плоскопараллельную кювету водой. Затем через воронку со шлангом, конец которого надо опустить до самого дна кюветы, будем медленно наливать насыщенный раствор поваренной соли (100 г соли на литр воды). В итоге нижняя половина кюветы окажется заполненной более плотной жидкостью (раствором соли), а верхняя — менее плотной (водой). Вследствие взаимной диффузии между жидкостями через некоторое время образуется переходный слой с плавно изменяющейся в вертикальном направлении плотностью, а значит, и показателем преломления. Он будет постепенно возрастать в направлении сверху вниз.

Через боковую стенку кюветы направим внутрь жидкости узкий световой луч. Сначала направим луч так, чтобы он шел снизу вверх под некоторым углом α к вертикали. По мере перехода луча в слои жидкости с более низкими показателями преломления угол луча с вертикалью будет возрастать. Световой луч внутри кюветы будет изгибаться; его направление будет приближаться к горизонтальному.

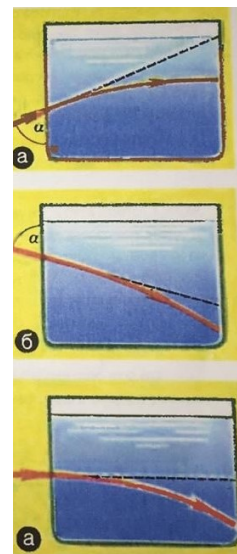


Рис. 2

Затем направим луч сверху вниз под углом α к вертикали. При переходе в слои жидкости с более высокими показателями преломления угол луча с вертикалью будет уменьшаться.

А теперь обратимся к более интересному случаю: луч входит в кювету строго горизонтально. Казалось бы, он должен распространяться внутри кюветы тоже горизонтально. Однако, как показывает опыт, световой луч в жидкости будет все более изгибаться книзу – в сторону слоев оптически более плотных.

Это нетрудно объяснить, если принять во внимание что бесконечно узкий световой луч есть идеализация, а в действительности мы имеем дело со световыми пучками конечной ширины. Пусть световой пучок входит в кювету строго горизонтально. Штрихованные линии изображают сечения волнового фронта пучка в разных точках вдоль оси пучка; стрелками показаны световые лучи. В любой момент времени все точки волнового фронта находятся в одной и той же фазе колебания и в каждой точке пространства поверхность волнового фронта и световой луч взаимно перпендикулярны. Рассмотрим фронт AB светового пучка, только что вошедшего в жидкость. Пусть v_A – скорость света в точке A , а v_B – в точке B . Показатель преломления равен скорости света в вакууме, деленной на скорость света в среде. Поскольку показатель преломления в точке A меньше, чем в точке B , то, следовательно, $v_A > v_B$. Отсюда следует, что вертикальный, вначале волновой, фронт пучка (фронт AB) будет по мере распространения пучка в жидкости все более наклоняться. Это означает, что пучок будет постепенно загибаться книзу.

Данный опыт позволяет заключить: если свет распространяется в среде, показатель преломления которой уменьшается в направлении снизу вверх, то независимо от начального направления луча он всегда будет искривляться так, чтобы его траектория была обращена выпуклостью вверх. Если бы показатель преломления уменьшался в направлении сверху вниз, то тогда выпуклая сторона изогнутого светового луча была бы обращена вниз.

Обобщая, можно сформулировать следующее важное правило: **в оптически неоднородной среде световой луч изгибается так, что его траектория всегда оказывается обращена выпуклостью в сторону уменьшения показателя преломления среды.**

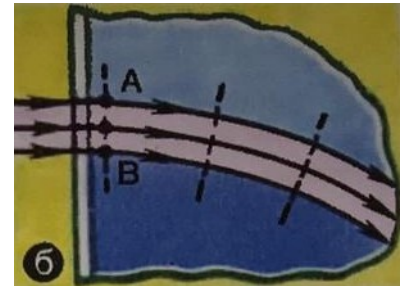


Рис. 3

3 Радиус кривизны светового луча

Пусть световой пучок диаметра D входит горизонтально в среду, показатель преломления которой уменьшается в направлении снизу вверх. В точке A , отвечающей верхнему краю пучка, он равен $n - \Delta n$ ($\Delta n \ll n$), а в точке B , отвечающей нижнему краю, равен n . Обозначим через R радиус кривизны пучка сразу после того, как он вошел в среду. Можно считать, что $R \gg D$ на рисунке выбираем достаточно малым, чтобы полагать, что показатель преломления в A' такой же, как и в A .

Дугу AA' световой луч проходит за время

$$t_1 = \frac{\psi(R + D)}{v_A},$$

а дугу BB' за время

$$t_2 = \frac{\psi R}{v_B}.$$

Эти времена равны:

$$\frac{\psi(R+D)}{v_A} = \frac{\psi R}{v_B}. \quad (1)$$

Так как

$$v_A = \frac{c}{n - \Delta n}, \quad v_B = \frac{c}{n},$$

где c – скорость света в вакууме, то равенство (1) можно переписать после сокращения общих множителей в следующем виде:

$$(R+D)(n - \Delta n) = Rn. \quad (2)$$

Раскрывая скобки и пренебрегая слагаемым Δn , как величиной второго порядка малости, получаем:

$$R = \frac{n}{\Delta n/D}. \quad (3)$$

Отношение $\Delta n/D$ характеризует быстроту изменения показателя преломления с расстоянием; его называют градиентом показателя преломления. В данном случае речь идет о градиенте показателя преломления в вертикальном направлении (в горизонтальном направлении показатель преломления не меняется, значит, в этом направлении его градиент равен нулю). Из формулы (3) видно, что чем больше градиент показателя преломления $\Delta n/D$, тем меньше радиус кривизны пучка R и, следовательно, тем круче изгибается световой пучок.

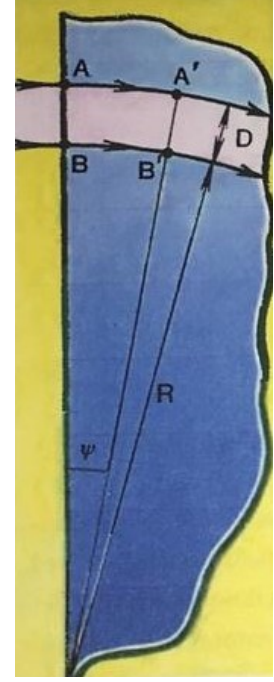


Рис. 4

4 Миражи

Иногда вблизи земной поверхности из-за сильного нагревания или охлаждения возникают большие градиенты показателя преломления воздуха. Тогда шарообразность Земли можно не учитывать. Если градиент n направлен вертикально, то можно воспользоваться формулой $nr \sin \beta = n_0 r_0 \sin \alpha_0$, полагая в ней $\beta = \alpha$, $r = r_0$. В результате получится $n \sin \alpha = n_0 \sin \alpha_0 = \text{const}$.

Допустим ради определенности, что световой луч распространяется вверх под малым углом к горизонту, а показатель преломления $n = n(z)$ убывает с высотой z . Может случиться, что на некоторой высоте угол α обратится в 90° . Тогда касательная к лучу станет горизонтальной. Высота $z = h$ на которой это может произойти, определится из соотношения $n(h) = n_0 \sin \alpha_0$.

Так как показатель преломления возрастает вниз, то, достигнув высоты $z = h$ луч в дальнейшем должен загнуться книзу. На указанной высоте происходит нечто аналогичное полному отражению. Такое явление может возникнуть при сильно аномальном распределении плотности воздуха по высоте и является причиной различного рода миражей, наблюдаемых в атмосфере. Обычно наблюдается верхний или нижний мираж.

Многие миражи, особенно сверхдальные, когда изображение переносится за тысячи километров, являются весьма сложными оптическими явлениями. Для их объяснения недостаточно рассмотрения только рефракции света в атмосфере; физический механизм таких миражей значительно сложнее. Возможно, что при определенных условиях в атмосфере образуются гигантские воздушные линзы, своеобразные светопроводы, вторичные миражи (миражи от миражей). Возможно также, что определенную роль в возникновении миражей играет ионосфера (слой ионизованных газов на высоте около 100 км), которая может отражать световые волны.

5 Нижний мираж

Нижний мираж наблюдается в пустынях и степях в теплое время года. Если воздух у самой поверхности земли сильно нагрет и, следовательно, его плотность относительно мала, то показатель преломления у поверхности будет меньше, чем в более высоких воздушных слоях. Изменение показателя преломления воздуха n с высотой h вблизи земной поверхности для рассматриваемого случая показано на рисунке.

В соответствии с установленным выше правилом, световые лучи вблизи поверхности земли будут в данном случае изгибаться так, чтобы их траектория была обращена выпуклостью.

Пусть в точке A находится наблюдатель. Световой луч от некоторого участка голубого неба попадет в глаз наблюдателя, испытав указанное искривление. А это означает, что наблюдатель увидит соответствующий участок небосвода не над линией горизонта, а ниже ее. Ему будет казаться, что он видит воду, хотя на самом деле перед ним изображение голубого неба. Представим теперь что у линии горизонта находятся холмы, пальмы или иные объекты. Благодаря отмеченному выше искривлению лучей наблюдатель увидит их перевернутыми и воспримет как отражения соответствующих объектов в несуществующей воде. Так возникает иллюзия, представляющая собой «озерный» мираж.

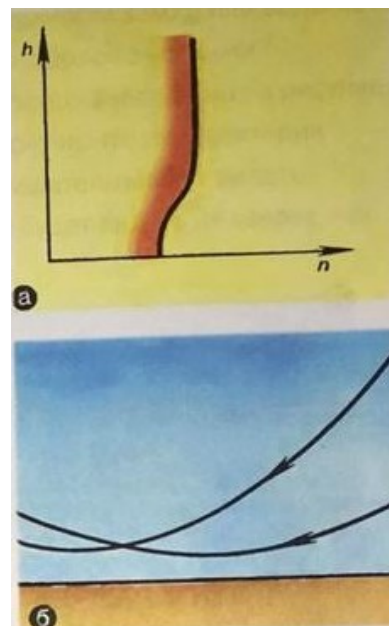


Рис. 5

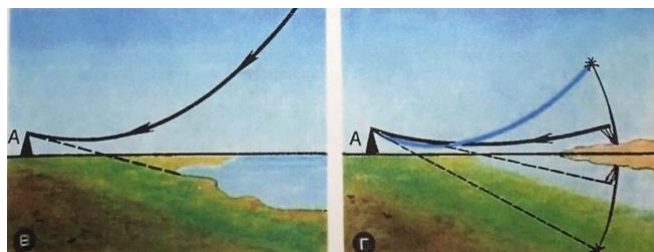


Рис. 6

6 Верхний мираж

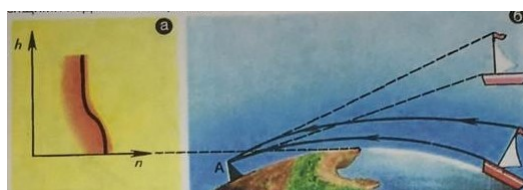


Рис. 7

Теперь предположим, что воздух у самой поверхности земли или воды не нагрет, а напротив, заметно охлажден по сравнению с более высокими воздушными слоями, изменение n с высотой h показано качественно на рисунке. Световые лучи в рассматриваемом случае изгибаются так, что их траектория обращена выпуклостью вверх. Поэтому теперь

наблюдатель может видеть объекты, скрытые от него за горизонтом, причем он будет видеть их вверху, как бы висящими над линией горизонта.

Верхний мираж может давать как прямое, так и перевернутое изображение. Прямое изображение возникает, когда показатель преломления воздуха уменьшается с высотой относительно медленно. При быстром уменьшении показателя преломления образуется перевернутое изображение. В этом просто убедиться, если рассмотреть гипотетический случай – показатель преломления воздуха на некоторой высоте h_1 , уменьшается скачком. Лучи от объекта, прежде чем попасть к наблюдателю А испытывают полное внутреннее отражение от границы BC ниже которой в данном случае находится более плотный, а выше – менее плотный воздух. Видно, что верхний мираж дает перевернутое изображение объекта в действительности переход совершается постепенно. Однако если он совершается достаточно резко, верхний мираж даст перевернутое изображение.

7 Двойные и тройные миражи

Допустим, что показатель преломления воздуха уменьшается с высотой сначала быстро, а затем медленно. В этом случае световые лучи в области I будут искривляться сильнее, чем в области II . В результате возникают два изображения. Световые лучи 1, распространяющиеся в пределах воздушной области I (те самые, которые сильно искривляются), формируют перевернутое изображение объекта. Лучи 2, распространяющиеся в основном в пределах области II , искривляются в меньшей степени и формируют прямое изображение.

Теперь представим себе, что существуют три последовательные воздушные области: первая (у самой поверхности), где показатель преломления уменьшается с высотой медленно, следующая, где показатель преломления уменьшается быстро, и, наконец, третья, где показатель преломления снова уменьшается медленно. В этом случае возможен тройной мираж. На рисунке представлено рассматриваемое изменение показателя преломления с высотой; цифрами I, II, III обозначены соответствующие воздушные области (начиная от приповерхностной). Лучи 1 формируют нижнее прямое изображение объекта, они распространяются в пределах воздушной области I . Лучи 2 формируют перевернутое изображение; попадая в воздушную область II , эти лучи испытывают достаточно сильное искривление. Наконец, лучи 3 формируют верхнее прямое изображение объекта. Двойной

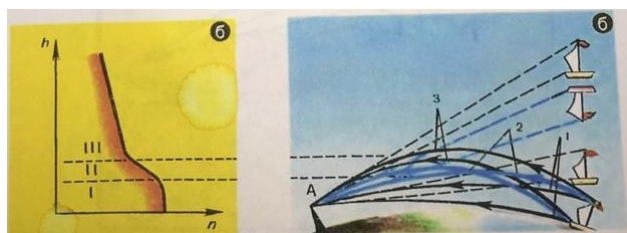


Рис. 8

мираж может возникнуть также в случае, когда у самой поверхности воздух сильно нагрет, выше охлажден, а еще выше снова нагрет. Показатель преломления воздуха с высотой сначала возрастает, а затем начинает уменьшаться. В данном случае ход световых лучей от объекта к наблюдателю может иметь вид, показанный на рисунке (через А обозначен наблюдатель). На рисунке выделены две воздушные области: область, где показатель преломления растет с высотой (она окрашена в розовый цвет), и область, где показатель преломления с высотой уменьшается (она окрашена в желтый цвет). Все световые лучи в пределах розовой области обращены выпуклостью вниз, тогда как лучи в желтой области

обращены выпуклостью вверх (траектория луча всегда обращена выпуклостью в сторону менее плотного воздуха). Судя по рисунку, наблюдатель увидит два изображения объекта — одно выше линии горизонта, а другое (перевернутое) ниже. Первое изображение формируют лучи 1, а второе — лучи 2. Под влиянием ветра и вертикальных воздушных потоков слой холодного воздуха может искажаться, изменять толщину, перемещаться по высоте. Поэтому как верхнее, так и нижнее изображения будут изменяться со временем, создавая картину сменяющих друг друга видений. Так возникает знаменитая «Фата-Моргана» (явление, состоящее из нескольких форм миражей, при котором отдалённые объекты видны многократно и с разнообразными искажениями).

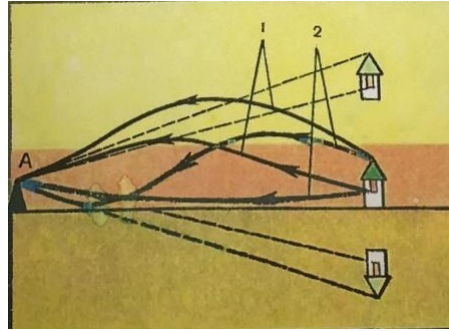


Рис. 9

8 Задача

Задача 1. Определить при каких градиентах температуры воздуха возможен нижний мираж.

Показатель преломления, а с ним и плотность воздуха ρ должны увеличиваться с высотой h (т.е. $\frac{d\rho}{dh} > 0$). Воспользуемся уравнением состояния

$$\rho = \frac{\mu P}{RT},$$

где P — давление, μ — относительная молекулярная масса воздуха, а R — универсальная газовая постоянная. Из него находим:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dh} = \frac{1}{P} \frac{dP}{dh} - \frac{1}{T} \frac{dT}{dh}.$$

При механическом равновесии воздуха $\frac{dP}{dh} = -\rho g$, где g — ускорение свободного падения. В результате получаем

$$\frac{dT}{dh} < \frac{\mu g}{R}.$$

Используя соотношение $c_p - c_v = \frac{R}{\mu}$, этому условию можно придать вид

$$\frac{dT}{dh} < -\frac{g}{c_p - c_v} \approx -0.025 \frac{K}{m}.$$

Здесь c_p и c_v — удельные теплоемкости воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме. Такое распределение температур конвективно неустойчиво, так как для конвективной устойчивости необходимо

$$\frac{dT}{dh} > -\frac{g}{c_p} \approx -0.01 \frac{K}{m}.$$