

Демонстрации и опыты



Майер Валерий Вильгельмович
Доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и дидактики физики, декан физического факультета Глазовского государственного педагогического института.



Вараксина Екатерина Ивановна
Старший преподаватель кафедры физики и дидактики физики Глазовского государственного педагогического института.

Мираж в неравномерно нагретой воде

В статье предложены учебные экспериментальные исследования миража в неравномерно нагретой воде. Рассмотрены варианты эксперимента, позволяющие исследовать мираж в домашней и школьной лабораториях, дано качественное объяснение наблюдаемым явлениям, перечислены задания для самостоятельной проработки.

Не может быть, чтобы вы не читали о миражах. Эти удивительные явления атмосферной оптики обычно описываются в книгах путешественников, которые переплывают моря и пересекают пустыни. Возможно, вы сами становились свидетелями подобных захватывающих зрелищ. Если это не так, то сейчас вы имеете возможность воспроизвести мираж в лабораторных условиях и детально исследовать в динамике его появление, изменение с течением времени и исчезновение. Приступим!

1. Оптически неоднородная вода

В природных условиях миражи возникают, когда свет проходит через слои неравномерно нагретого воздуха. С ростом температуры показатель преломления воздуха уменьшается, и скорость света в нём увеличивается. Поэтому при прохождении света через такую *оптически неоднородную* среду лучи искривляются, изгибаясь в сторону от меньших к бóльшим значениям показателя преломления. Криволинейное распространение света приводит к тому, что предметы видны не там, где они находятся на самом деле, а это и есть мираж.

Прямое моделирование миража первым предпринял выдающийся американский физик Роберт Вуд. Системой газовых горелок он нагрел длин-

ный металлический лист, покрытый песком, и действительно увидел мираж, подобный тому, который наблюдается в пустынях и на раскалённом асфальте. Пионерские опыты Вуда воспроизводить в наши дни нет необходимости: использованная им экспериментальная установка сложна, громоздка и небезопасна.

Показатель преломления воды значительно больше, чем воздуха. Поэтому следует ожидать, что неравномерный нагрев воды позволит получить среду с бóльшим *градиентом* показателя преломления, то есть с более высокой быстротой изменения показателя преломления от точки к точке среды. Проверим это.

Подберите тонкостенный химический стакан цилиндрической формы высотой не менее 100 мм и диаметром не менее 50 мм. Стеклянные стенки стакана должны быть прозрачными, ровными и содержать как можно меньше дефектов. Посмотрите сквозь боковую поверхность стакана на удалённые предметы: если изображения сильно искажены, то замените стакан другим.

На электроплитку с закрытой спиралью поставьте отобранный стакан, налейте в него прокипячённую или отстоявшуюся воду и включите плитку в сеть. Глядя сквозь стакан, вы увидите, что изображения предметов сильно сжаты в горизонтальном направлении и почти не искажены в вертикальном. Объясняется это, разумеется, тем, что стакан с водой представляет собой цилиндрическую линзу.

По мере нагревания воды вы обнаружите непрерывно изменяющиеся небольшие искажения изображений предметов, наблюдаемых сквозь стакан. Однако, даже доведя воду до кипения, ничего подобного



миражу увидеть вы не сможете. Значит, в стакане не удалось получить *слоисто-неоднородную* среду, которая необходима для появления миража. Причина в том, что температура воды в стакане на всех уровнях почти одна и та же. Бесспорно, вы уже догадались, что за это ответственна *конвекция*, благодаря которой нагреваемая снизу вода быстро перемешивается и приобретает примерно одинаковую температуру по всему объёму.



Рис. 1. Экспериментальная установка для наблюдения миража в стакане с водой

Выйти из положения можно, если нагревать вертикальную стенку сосуда с водой. Однако и в этом случае исключить конвекцию, а следовательно, и сравнительно быстрое перемешивание горячей воды с холодной, не удастся, хотя увидеть боковой мираж в подобном опыте вполне реально.

Остаётся одно... нагревать воду сверху! Проще и безопаснее всего использовать для этой цели бытовой кипятильник.

Опустите кипятильник в стакан с водой так, чтобы он находился в верхней части стакана. Включите его. Осторожно прикасаясь к стенке стакана, убедитесь, что вода вокруг кипятильника нагревается, а внизу остается холодной. Поскольку горячая вода имеет меньшую плотность, чем холодная, то конвекция не происходит. Нижние слои воды нагреваются только за счёт теплопроводности и диффузии. Оба эти процесса идут сравнительно медленно, в результате под кипятильником возникает неравномерно нагретый и, следовательно, оптически неоднородный слой воды. Это сразу обнаруживается наблюдением сквозь него удалённых предметов.

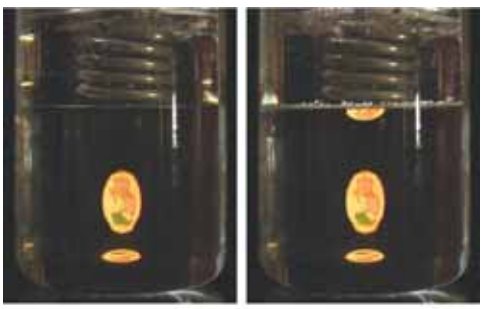
Вода вокруг кипятильника быстро закипает. При бурном кипении слой воды под кипятильником интенсивно перемешивается возникающими течениями, что явно не способствует появлению миража. Как предотвратить это нежелательное явление?

Надо поставить в стакан горизонтальную перегородку! Из дюраля или латуни толщиной около 0,3 мм по внутреннему диаметру стакана вырежьте пластинку в форме круга с двумя диаметрально противоположными полосками шириной 20 мм и длиной 60 мм. Полоски изогните так, чтобы получились держатели, позволяющие расположить круглую перегородку на нужной глубине в стакане.

Теперь по фотографии, представленной на рис. 1, соберите основную часть экспериментальной установки и приготовьтесь к первым наблюдениям миража.

2. Мираж в стакане с водой

В первых опытах в качестве объекта наблюдения лучше всего использовать небольшую настольную лампу, свет которой ослаблен регулятором напряжения или матовым экраном. Но подойдёт и любой другой достаточно ярко освещённый предмет. Стакан с водой и перегородкой поставьте на подъёмный столик на расстоянии 1-2 м от объекта наблюдения. Сядьте на стул на расстоянии примерно 1 м от стакана и смотрите сквозь него на объект. Изменяйте высоту подъёмного столика, на котором расположен стакан с водой, и положение объекта наблюдения, передвигая его по вертикали до тех пор, пока вы не увидите объект сквозь



а *б*

Рис. 2. Мираж в стакане с водой: *а* – кипятильник выключен, *б* – кипятильник включён и вода кипит

воду в стакане возле его дна.

На рис. 2*а* приведена фотография, показывающая, что именно вы долж-

ны наблюдать. Обратите внимание на сильно сжатое по вертикали ещё одно изображение объекта – его появление обусловлено преломлением света на искривлённой стеклянной поверхности возле дна внизу стакана.

Включите кипятильник и внимательно смотрите сквозь стакан. Когда вода начнёт закипать, кроме находящегося внизу стакана изображения предмета вы увидите, что под перегородкой сначала появляется незначительный блеск, а затем всё отчётливее становится видно второе изображение предмета (рис. 2 *б*).

Итак, вы убедились, что нагревая воду сверху, действительно можно получить мираж.

3. Экспериментальная установка для исследования миража

В принципе все рассмотренные в статье явления вы сможете пронаблюдать, используя описанную выше простейшую экспериментальную установку. Однако лучше устранить искажения, вызванные цилиндрической формой оптически неоднородной среды в химическом стакане с водой.

Этого можно достичь, если использовать склеенную из стекла плоскопараллельную кювету внешними размерами $60\times100\times100$ мм. Из дюраля или латуни толщиной около 0,3 мм вырежьте полоску шириной 50 мм и длиной 220 мм. Сделав поперечные надрезы, отогните края полоски шириной по 10 мм и загните полоску так, чтобы она приняла П-образную форму. В кювету налейте отстоявшуюся или прокипячённую воду так, чтобы уровень её оказался несколько выше будущей перегородки. Аккуратно введите в кювету изогнутую полоску так, чтобы она повисла на отогнутых краях горизонтально и снизу её не осталось воздушных пузырьков. Долейте воду в кювету и погрузите в неё кипятильник таким образом, чтобы он почти соприкоснулся с получившейся горизонтальной перегородкой (рис. 3).

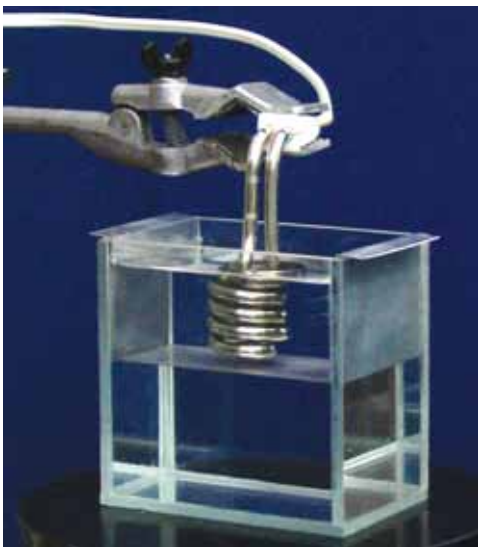


Рис. 3. Более удобная экспериментальная установка для исследования миража

4. Мираж в плоской стеклянной кювете с водой

Чтобы детально исследовать мираж, в качестве объекта наблюдения используйте хорошо освещённый круг диаметром около 40 мм, расположенный на тёмном фоне. Оптимальные расстояния от него до кюветы с неравномерно нагретой водой и от кюветы до глаза вы легко подберёте экспериментально, пользуясь рекомендациями, данными выше в п. 2.

Глядя на белый круг через кювету с водой, включите кипятильник. Вскоре вы заметите появление миража возле горизонтальной перегородки. Постепенно вода закипает,

появившийся мираж опускается вниз и отрывается от перегородки. Вслед за этим появляется второй мираж (рис. 4). При дальнейшем кипении воды в верхней части кюветы иногда можно наблюдать появление третьего миража. Далее он сливается со вторым, а первый мираж начинает сливаться с искажённым изображением предмета. По мере того, как вода прогревается в нижней части кюветы всё более равномерно, наблюдается постепенное слияние всех миражей с изображением предмета. Фотографии, приведённые на рис. 4, лишь отдалённо передают красоту этого оптического явления.

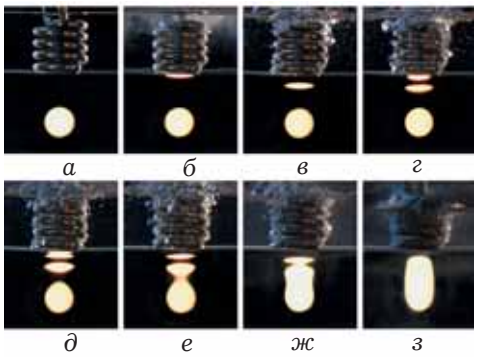


Рис. 4. Мираж в неравномерно нагретой жидкости: *а* – кипятильник выключен, *б, в, г* – кипятильник нагревается и вода над перегородкой постепенно закипает; *д, е, ж, з* – кипятильник включён, вода над перегородкой бурно кипит

5. Объяснение наблюдаемых явлений

Представьте, что по холодной пустыне вдалеке уныло бредёт караван, а сверху в силу погодных аномалий появляется слой нагретого воздуха, температура которого постепенно повышается. Тогда вы сможете наблюдать явления, подобные приведённым на фотографиях (рис. 5). На них вверху вы видите тонкую горизонтальную перегородку, а над ней – нижний виток кипятильника. В условиях опыта после включения кипятильника ничего не менялось. Следует особо подчеркнуть, что все фотографии получены при неизменной настройке фотоаппарата.

В этом опыте, фотографии которого приведены на рис. 5, вы увидите, что вначале появляется *перевёрнутый* мираж, представляющий собой сильно сжатое по вертикали изображение объекта наблюдения. По мере того, как перевёрнутый мираж, опускаясь вниз, становится все более похожим на объект, выше него появляется *прямой* мираж. Почему так происходит?

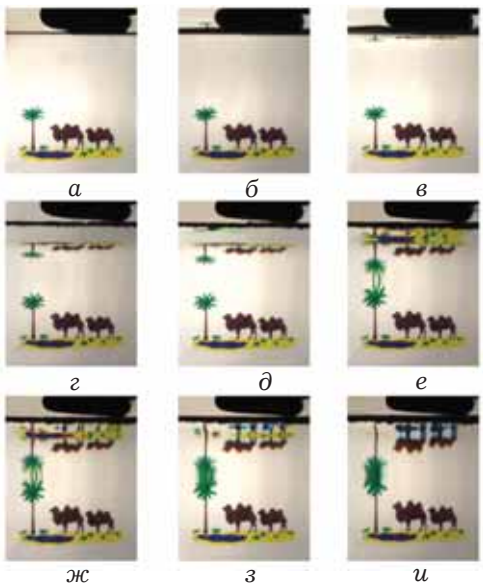


Рис. 5. Получение миража предмета неправильной формы: *а* – среда оптически однородна; *б* – при включении кипятильника слева от него сверху от перегородки появляется прямой мираж, который вскоре исчезает; *в, г* – формирование перевёрнутого миража; *д-з* – появление и исчезновение прямого миража



Тепло от нагревателя распространяется сверху вниз. Поэтому наибольший перепад температур и соответственно максимальный градиент показателя преломления возникает на границе между горячей и холодной водой. Упрощённо можно считать, что выше этой границы расположена оптически менее плотная среда. Поэтому, если свет падает на границу раздела этих сред снизу из оптически более плотной среды, то наблюдается полное внутреннее отражение (рис. 6). Свет от этой границы отражается, как от обычного плоского зеркала, в результате возникает мнимое перевёрнутое изображение $A'B'$ предмета AB. Не следует только забывать, что резкой границы все же нет, поэтому хотя свет и отражается от оптически неоднородной среды, но не скачком, а плавно, распространяясь криволинейно (лучи *3* и *4*).

Пока граница между горячей и холодной водой не дошла до лучей 1 и 2, идущих от предмета непосредственно в глаз, наблюдается неискажённое изображение предмета в том месте, где он и расположен.

При продолжающейся работе кипятильника граница между горячей и холодной водой опускается всё ниже. Поверх неё вплоть до перегородки оказывается расположенным относительно толстый слой воды, температура которого растёт снизу вверх сравнительно медленно. Градиент показателя преломления в этом слое существенно меньше, поэтому световые лучи искривляются слабее. Важно, что луч 6, идущий выше, искривляется меньше, чем луч 5, идущий в этом слое ниже. Поэтому лучи, вышедшие из различных точек предмета, на пути в глаз не пересекаются и, следовательно, дают прямое мнимое изображение $A''B''$ предмета AB (рис. 6).

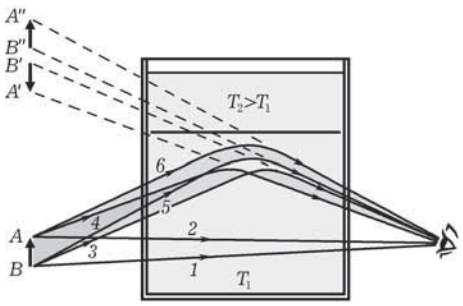


Рис. 6. К объяснению возникновения прямого и перевёрнутого миражей

6. Эффектная демонстрация миража в воде

Из проведённых опытов следует несколько выводов. Мираж – это не иллюзия и не обман зрения. Мы действительно видим реально существующий предмет, но вследствие криволинейного распространения света не там, где он расположен и не таким, каков он есть на самом деле. При этом сам предмет может находиться вообще за пределами поля зрения.

Убедиться в этом можно на опыте, расположив непрозрачный лист бумаги позади кюветы с водой вплотную к ней так, чтобы он скрывал от нас сам предмет. Этот лист будет моделировать, например, горизонт.

Где-то далеко за горизонтом морскую гладь рассекает невидимый нами огромный корабль...

Поскольку при удалении от земной поверхности плотность воздуха убывает, свет, идущий от корабля, распространяется криволинейно и огибает Землю. В результате корабль виден парящим в воздухе. Примерно так всё и происходит в естественных условиях.

На рис. 7 приведена серия фотографий искусственного миража, полученная при перемещении точки наблюдения (фотоаппарата) снизу вверх. Хорошо видно, что когда перевёрнутый мираж сливается с прямым изображением предмета, сверху появляется сильно искажённый прямой мираж.

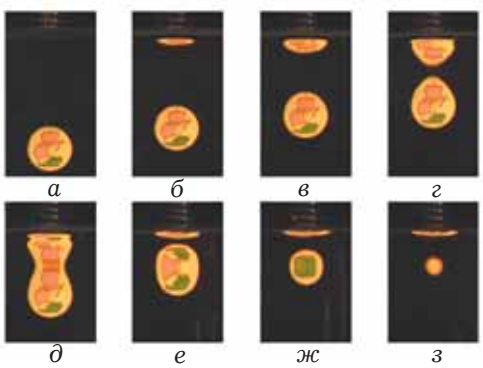


Рис. 7. Мираж в кювете с водой: от *а* к *з* точка наблюдения перемещается вверх

Любопытно, заметили ли вы, что в действительности миражи расположены вовсе не в плоскости объекта наблюдения, как это упрощённо показано на рис. 6?

7. Для самостоятельного исследования

1. Миннарт М. Свет и цвет в природе. – М.: Наука, 1969. – 360с. (С. 60-92).

2. Тарасов Л.В. Физика в природе. – М.: Просвещение, 1988. – 352 с. (С. 33-44).

Советуем познакомиться с этими книгами, в которых подробно рассмотрено явление миража, объяснены различные виды миражей, на доступном уровне изложена теория миражей.

3. Майер В.В. Свет в оптически неоднородной среде: учебные исследования. – М.: Физматлит, 2007. – 232 с.

Здесь вы найдёте большое количество экспериментов с искусственными миражами и сможете изучить особенности криволинейного распространения света в оптически неоднородных средах.

4. *Кювета из стекла.* Научитесь резать стекло, из стекла толщиной 4 мм вырежьте стеклорезом стенки и дно прямоугольной кюветы и склейте кювету подходящим герметиком.

5. *Использование диффузии.* Оптически неоднородная среда для моделирования миража в жидкости может быть получена не только путём неравномерного нагревания, но и с помощью диффузии. Рекомендуем попробовать насыщенные растворы поваренной соли и мочевины в качестве одной оптически однородной жидкости и воду в качестве другой.

6. *Демонстрация миража.* Очень эффектна демонстрация искусственного миража в большой аудитории, осуществляемая посредством видеокамеры и телевизора или компьютерного проектора. Соберите соответствующую экспериментальную установку.

7. *Градиент показателя преломления.* Разработайте способ оценки градиента показателя преломления в неравномерно нагретой воде. Попробуйте использовать для этого пучок света от полупроводникового лазера.