

Загадка плоского стекла

Л. АШКИНАЗИ

И он показал Харберту прибор, заменивший ему линзу. Это были два стекла, снятые с часов инженера и Спилета. Наполнив их водой и скрепив их края с помощью глины, Сайрес Смит сделал настоящее зажигательное стекло, которое сосредоточило лучи солнца на охапке сухого мха и воспламенило его.

Жюль Верн. Таинственный остров

Мы видим мир через оконное стекло и на вопрос, искажает ли это стекло картинку, улыбнемся и ответим – конечно, нет. А теперь посмотрим на ситуацию подробнее, начав со школьного учебника.

Все мы знаем, что такое линза. Объектив фотоаппарата и микроскопа – это линзы, лупа и очки – тоже линзы, и даже на передней панели радиостанции (рис.1 и 2) мы видим линзы. При этом одна относится к более редкой категории «асферической оптики», впрочем, такое бывает и в очках – видели на рецептах слово «цилиндр»? Увеличивать, уменьшать, отдалять, приближать, переворачивать – все, что ухитряется делать линза с изображениями, ей удастся потому, что луч света, проходящий через линзу, попадает на переднюю и заднюю ее поверх-

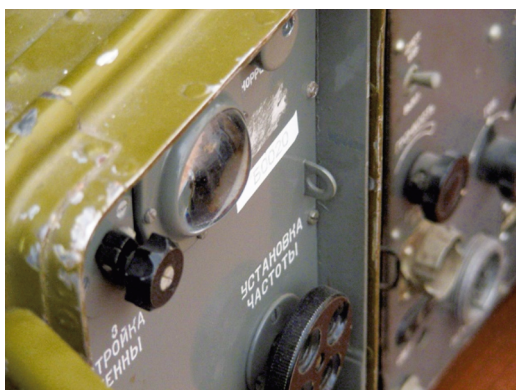


Рис. 1



Рис. 2

ности, наклоненные к оси линзы под разными углами – рисунок 3, ситуация 1, луч 1. Кроме, разумеется, случая, когда луч проходит через центр линзы и, в первом приближении, падает на обе поверхности под одинаковыми углами. Тогда он не поворачивается и, соответственно, не смещается – ситуация 1, луч 2.

Если же у нас не линза, а плоский лист стекла, то углы наклона поверхностей к оси одинаковы и поворот луча, который происходит при входе из воздуха в стекло, в точности компенсируется поворотом в противоположную сторону при выходе – ситуация 2, луч 3. В результате при прохождении луча через плоское стекло он просто смещается вбок и радостно летит себе дальше. Кроме, разумеется, ситуации, когда он падает на поверхность по нормали, т.е. перпендикулярно. Тогда он не поворачивается и, соответственно, не смещается – ситуация 2, луч 4. Поэтому иногда говорят и пишут, что плоский лист прозрачного материала не изменяет того, что мы видим. Действительно, достаточно посмотреть в окно, чтобы в этом убедиться.

Однажды слушатели задали мне вопрос – а искажает ли изображение иллюминатор? Причем такой, в котором стекло не плоское, а выпуклое. Попутно заметим, что такое стекло выдерживает большее давление, нежели плоское, если это давление – с выпуклой стороны. Например, как в случае иллюминатора батискафа. Это ситуация 3, где штриховой линией показано, как стекло деформируется при давлении, и видно, что все слои «работают на сжатие». В отличие от ситуации 4, когда все слои «работают на

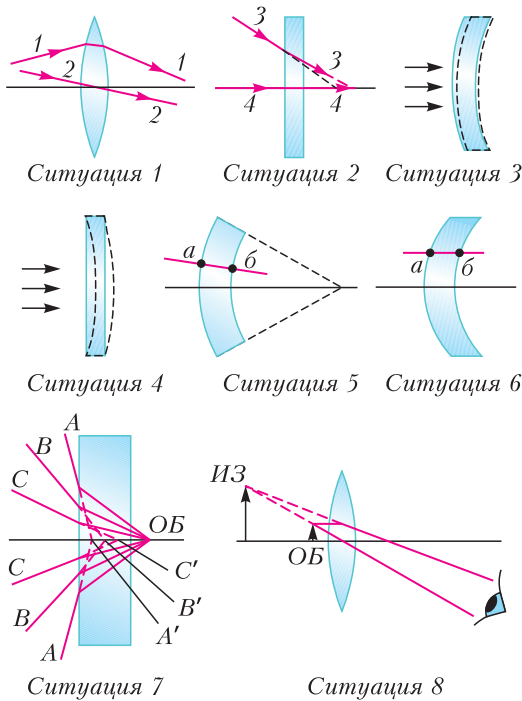


Рис. 3

растяжение». Стекла, как и многие другие материалы, выдерживают «на сжатие» большие нагрузки, нежели «на растяжение».

Заметим, прежде всего, что выпуклый иллюминатор может быть устроен по-разному. Если толщина «по радиусу» в пределах иллюминатора одинакова, то сами радиусы оказываются различны, их разность как раз и равна толщине линзы. А центры, из которых, прочерчены радиусы, совпадают – ситуация 5. Другой вариант – радиусы одинаковы, но прочерчены из разных центров – ситуация 6. Точки «равного наклона» *a* и *б* в первом случае расположены на одном радиусе, а во втором – на одном и том же расстоянии от оси. Реальная геометрия иллюминатора зависит от технологии изготовления, а таких технологий несколько. В частности, если лист размягчается и изгибается на оправке, то это ситуация 5, а если иллюминатор штампуются, размещаясь между двумя формами – пуансоном и матрицей, то скорее всего это ситуация 6.

Однако ни в том, ни в другом случае луч, пришедший в точку *a*, совершенно не обязан попадать в точку *б*! Так будет вести себя только тот луч, который показан на рисунке,

а другие лучи, пришедшие в точку *a* с разных направлений, придут на вторую поверхность не в точку *б*, а в другие точки с другим наклоном. Иными словами, изогнутый лист оптически ведет себя не как плоский лист, т.е. заведомо искажает изображение. Но обычное плоское оконное стекло, с которого мы начали разговор, оно-то ведет себя хорошо?

Посмотрим на ситуацию повнимательнее. Пусть у нас есть плоский прозрачный лист, по одну сторону от него, причем вплотную к нему, находится объект *ОБ*, а наблюдение ведется с противоположной стороны – ситуация 7. Объект мы наблюдаем благодаря тому, что в наш прибор (глаз, фотоаппарат и др.) попадает либо собственное излучение объекта, либо рассеянное им излучение других источников. То, где мы видим объект, определяется именно этими лучами – мозг получает сигнал от глаз и восстанавливает ход лучей и говорит, что объект находится там, где пересекаются продолжения лучей, пришедших в глаз. Вот почему лупа и «увеличивает» – лучи, идущие от близко расположенного к ней объекта, расходятся веером, а их продолжения пересекаются на большем расстоянии от оси и объект *ОБ* кажется увеличенным. Но это, конечно, только изображение *ИЗ* (его еще называют «мнимым») – ситуация 8.

Из ситуации 7 на рисунке 3 ясно, что лучи света, исходящие от объекта более широким веером, после преломления в плоском стекле расходятся еще шире, а их продолжения пересекаются ближе к наблюдателю. Продолжения лучей группы *C* пересекаются в точке *C'*, продолжения лучей группы *B* – в точке *B'*, продолжения лучей группы *A* – в точке *A'*. Таким образом, чем более широкий веер лучей мы перехватываем, тем ближе нам будет казаться объект. Правда, эта «лупа» будет слабая, причем плохая – поскольку она будет собирать лучи всех групп, изображение будет размытым. Чем ближе глаз или объектив фотоаппарата будет находиться к объекту, тем более широкий веер лучей мы перехватим и тем ближе нам будет казаться объект. Эффект будет ослабевать при удалении объекта от стекла, поскольку при фиксированном размере зрачка изображение далекого объекта формируется более узким пучком лучей.

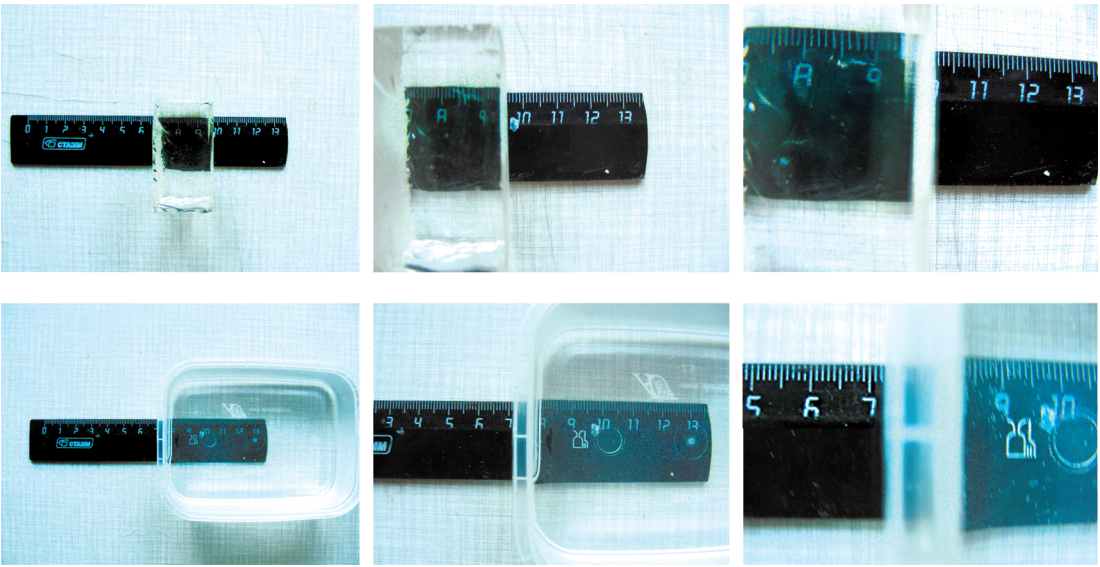


Рис. 4

На рисунке 4 показан реальный эксперимент – черная линейка фотографировалась при приближении аппарата к объекту с расстояний от 25 см до 0,5 см через слой воды (коэффициент преломления 1,33, толщина 4 см) и через слой стекла (коэффициент преломления 1,5, толщина 4,5 см). Мы видим, что линейка, видимая через воздух, от кадра к кадру в обоих случаях кажется шире – потому, что она рассматривается фотоаппаратом с все меньшего расстояния. Линейка, видимая через воду или через стекло, естественно, тоже увеличивается, но она увели-

чивается сильнее. Причем для стекла эффект больше, чем для воды. Другими словами, толстый плоский слой воды или стекла работает как лупа, но плохая – слабая и дающая размытое изображение.

Мораль этой истории такова. Некоторые физические задачи кажутся нам простыми потому, что мы решаем их для каких-то, принимаемых «по умолчанию», условий. Но для других условий ответ может оказаться совсем другим. Так, мир, рассматриваемый через толстое стекло, может быть не похож на мир за окном.