



Бабинцев Владимир Александрович
Ассистент кафедры общей физики Московского физико-технического института (государственного университета) (МФТИ).



Бабинцева Елена Николаевна
Учитель физики гимназии г. Троицка.

Осенние забавы юных физиков

На фоне стального, клубящегося облаками неба, под косыми лучами неяркого солнца ярко-алым, лимонно-жёлтым и бледно-зелёным вспыхивают кроны деревьев. Во влажном тихом воздухе, кружась, порхают листья. Мерный стук капель нескончаемого морсящего дождя располагает к размышлениям. Давайте посмотрим вокруг, какие загадки принесла с собой осень, и попробуем объяснить привычные явления природы с помощью законов физики.

«Тёмная осенняя ночь»

Если поздним вечером или ночью выйти из дома, то можно заметить, что темнота бывает разная. Летом и зимой не так темно, как осенью. Осенью часто, как говорят, не видно ни зги. Смотришь в окно, и возникает ощущение, словно стоишь на краю чёрной бездонной пропасти. Чем же объяснить разницу в световых ощущениях? Это психический эффект или он имеет физическое объяснение?

Решение. Световые ощущения создаёт свет от внешних источников, попадающий к нам в зрачок. Внеш-

ние источники обыкновенно имеют малый угловой размер и могут осветить какой-либо участок пространства только при условии *рассеяния света* на частицах среды, заполняющих этот участок. Например, эффективно рассеивают свет капельки тумана, образуя светящиеся круги вокруг фонарей.

Снег состоит из кристалликов льда, которые зеркально отражают свет внешних источников. Поскольку кристаллики расположены хаотично, отражение от участка поверхности снежного покрова, со-

стоящего из большого количества кристалликов, имеет *диффузный* характер (т. е. в отражённом свете с одинаковой вероятностью можно обнаружить лучи, идущие под любым углом к поверхности от 0° до 90°).

Диффузно отражённый от каждого участка заснеженной поверхности свет не только обязательно (есть свет всех направлений) попадёт в зрачок, но и осветит все окружающие предметы.

Почва, так же как и снег, состоит из мелких частиц. Различные ма-

териалы (асфальт, бетон, нешлифованный камень и т. п.) – шероховатые. Поэтому рассуждения, которые были проведены для снега, могут в полной мере быть отнесены к данным поверхностям. Отличие лишь в том, что от свежеснеженного снега отражается около 99% света (видимого диапазона), а от других материалов значительно меньше. В таблице указан спектральный коэффициент отражения от различных материалов для некоторых длин волн видимого диапазона.

Материалы	0,4 мкм	0,5 мкм	0,6 мкм	0,7 мкм
Глина жирная	8%	12%	17%	20%
Суглинок сухой	15%			
Чернозём сухой	70%			
Земля жёлтая	8%	18%	32%	53%
Земля коричневая	8%	12%	17%	20%
Земля красная	6%	7%	18%	28%
Песок жёлтый	15%	27%	36%	44%
Листва свежая зелёная	10%	21%	32%	40%
Листва сухая жёлтая	4%	8%	22%	37%
Листва сухая	4%	8%	15%	23%
Солома	10%	20%	27%	33%
Трава свежая	4%	8%	19%	20%
Трава сухая	10%	18%	27%	30%
Бетон	45%			
Кирпич красный	52%			
Кирпич белый	67%			

Как видно, в большинстве случаев отражается не больше трети – четверти падающего света. Именно поэтому летней ночью примерно в 3 – 4 раза темнее, чем зимой.

Что же происходит осенью? Часто бывает, что отражающие поверхности покрыты плёнкой воды (см. рис. 1).

От поверхности плёнки свет отражается зеркально, и только малая его часть попадает в зрачок. Тот свет, который проникнет внутрь воды, рассеется диффузно, но выйти из воды может только небольшая часть этого света. Впервые, диффузно рассеянный

свет также отразится от границы раздела «вода-воздух», во-вторых, для углов больших критического возникает явление полного внут-

реннего отражения. Таким образом, поверхность, покрытая водяной плёнкой, рассеивает намного меньше света.

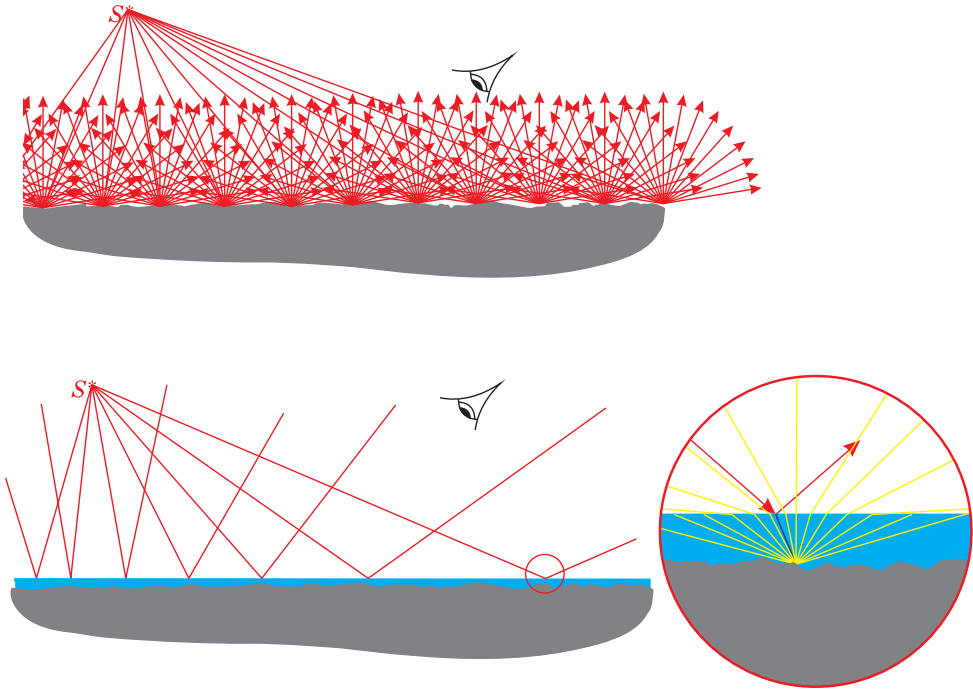


Рис. 1

«Фонарь среди ветвей»

Прогуливаясь поздним осенним вечером, иногда можно заметить интересное явление: если смотреть через крону деревьев на источник света (фонарь), то можно заметить круги из веточек (см. рис. 2). Летом это явление практически невозможно из-за наличия листвы. Объясните явление и найдите условие, при котором оно наблюдается.

Решение. Представим веточки отражающими цилиндрами. Чтобы перпендикуляр к отражающей поверхности лежал в плоскости падающего и отражённого лучей SBE , нужно чтобы ось цилиндра лежала в плоскости, перпендикулярной линии SE , соединяющей источник и глаз. (см. рис. 3). Рассмотрим падение све-



Рис. 2

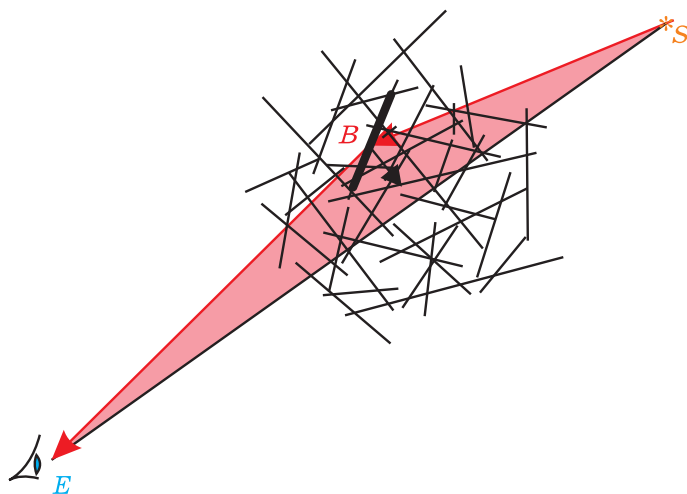


Рис. 3

та от *протяжённого* источника на один из таких цилиндров. Для наглядности представим цилиндр многогранной призмой (если желаете, с бесконечным числом граней). Каждая из граней представляет собой кусочек плоского зеркала. Фонарь отражается в каждом из этих зеркалец. Для примера на рисунке 4 показаны три изображения в соседних гранях S_1 , S_2 , S_3 . Изображение фонаря будет видно только там, куда попадут

лучи, «испущенные» изображением фонаря и прошедшие через плоскость «своего» зеркальца. На рисунке области видимости изображений фонаря закрашены различными цветами (соответствующими цвету зеркальца).

Из рисунка следует важный вывод: центральная точка ветки для наблюдателя будет светиться, если он будет находиться не слишком близко от неё. Действительно, есть

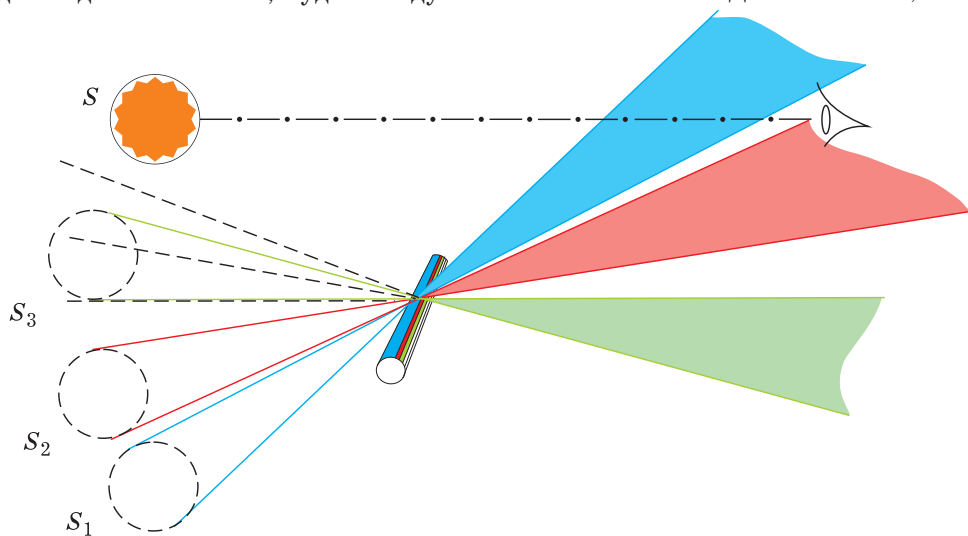


Рис. 4



максимальный угол между направлением на фонарь и направлением на центральную точку ветки, который ограничивает область видимости отражения. Чем ближе ветка к фонарю, тем меньше этот угол, тем меньше область видимости. С другой стороны, чем дальше веточка, тем меньше света на неё падает и меньше отражается.

Рассмотрим теперь с помощью нашей модели многогранной призмы вопрос о размере области свечения веток. Проведём от крайних точек изображения фонаря (в поперечном направлении) лучи к глазу наблюдателя (см. рис. 5). Эти лучи, пересекая поверхность зеркальца, ограничат область «свечения» веточки.

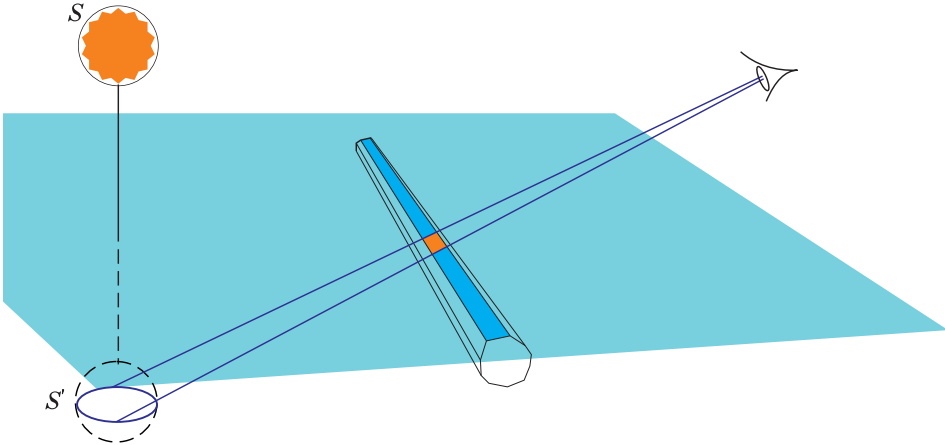


Рис. 5

Очевидно, что величина углового размера светящихся элементов будет совпадать с величиной углового размера фонаря.

В этом легко убедиться, посмотрев на фотографию (рис. 2). В заключение хотим заметить, что образование кругов может наблюдаться не только у фонаря в ветках дерева, но и во многих других случаях, когда неточный источник освещает совокупность протяжённых неоднородностей, ориентированных хаотически. В качестве примера на рисунке 6 показана по-

царапанная ложка, отразившая свет ламп фотовспышки и осветительной.



Рис. 6

«Пузыри на лужах»

Почему осенью не бывает пузырей на лужах? Каково условие их пропадаания?

Решение. Рассмотрим, как появляется пузырь на поверхности лужи. Капля, ударяясь о поверхность

воды, ведёт себя подобно твёрдому телу: углубляется в лужу, выталкивая воду вверх по бокам. Такое поведение капли обусловлено тем, что молекулы воды, входящие в каплю, чтобы изменить своё состояние,

должны получить информацию о столкновении с лужей. Эта информация в виде скачка давления передаётся со скоростью звука c . Вытолкнутая по бокам вода может сомкнуться над местом падения капли в виде водяного купола, образовав пузырь.

Сила, с которой капля воздействует на поверхность лужи, может быть оценена из II закона Ньютона:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m v c}{D}. \quad (1)$$

Здесь мы оценили время взаимодействия Δt как время прохождения звуковой волны вдоль диаметра D капли. Масса сферической капли

воды диаметра D плотности ρ

$$m = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho.$$

Подставив в (1), получим:

$$F = \frac{1}{6} \pi D^2 \rho c.$$

Для капли диаметром 1 мм, падающих со скоростью 10 м/с, получим силу около 10 Н, что при воздействии на площадку порядка нескольких мм² даёт огромное давление. Это давление существует микросекунды в ограниченной области (на рисунке 7 область показана штриховкой), однако этого достаточно, чтобы сообщить начальную скорость порции воды.

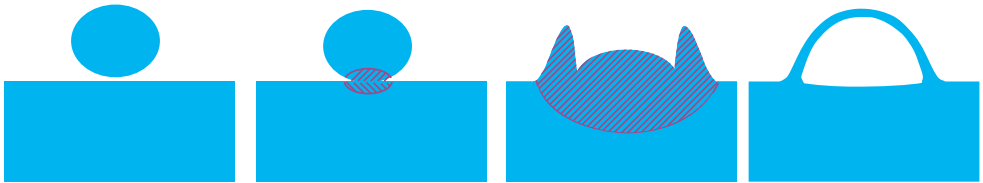


Рис. 7

Динамика явления сложна. Приведённые рисунки дают только самые общие представления о его механизме. Тем не менее, возможно сделать некоторые простые энергетические оценки. Кинетическая энергия упавшей капли идёт на работу по образованию водяного купола и возбуждению волн на поверхности лужи, а также частично переходит в тепло.

Работа по созданию купола складывается из работы по созданию двух новых водных поверхностей и из работы по поднятию элементов плёнки на некоторую высоту. Сравним эти два слагаемых. Энергетический смысл коэффициента поверхностного натяжения σ — это работа по изотермическому растяжению плёнки на единицу площади. Поэтому

$$A_1 = 2\sigma 2\pi R^2.$$

Здесь учтено, что у плёнки две поверхности. Для оценки второго слагаемого будем считать, что центр масс плёнки поднят на высоту $R/2$ над поверхностью лужи. Конечно, это завышенная оценка. Центр масс расположен ниже, т. к. большая масса водяного купола находится ближе к поверхности лужи. Итак, оценка работы по поднятию плёнки даёт

$$A_2 = mgh = \rho 2\pi R^2 \delta g \frac{R}{2}.$$

Здесь объём плёнки считался из предположения, что её толщина много меньше радиуса капли: $\delta \ll R$ (что соответствует наблюдениям пузырей на луже), как произведение площади поверхности плёнки $2\pi R^2$ на её толщину δ . Зададимся вопросом, при каких условиях работой A_2 можно пренебречь по сравнению с A_1 ?

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{4\sigma\pi R^2}{\rho\pi R^3 \delta g} = \frac{4\sigma}{\rho R \delta g} \gg 1 \rightarrow \delta \ll \frac{4\sigma}{\rho R g} \approx 3 \text{ мм}.$$

В оценочную формулу подставили коэффициент поверхностного натяжения воды для температуры 20 °С, равный 0,072 Н/м, и «обычный» радиус пузыря 1 см. По наблюдениям, толщина водяной плёнки пузырей много меньше трети их радиуса, поэтому работой по поднятию плёнки можно пренебречь (тем более, если помните, оценка A_2 была явно завышена).

Что касается работы по возбуждению волн, то опять обратимся к жизненному опыту. Амплитуда таких волн обычно составляет несколько миллиметров, что значительно меньше $R/2$. Поэтому можно ожидать, что энергия, идущая на возбуждение волн, не больше энергии идущей, на поднятие водяного купола, и ею также можно пренебречь по сравнению с A_1 .

Переходом механической энергии во внутреннюю при ударе капли о поверхность лужи пренебрегать нельзя из-за того, что (как уже было сказано) при ударе развиваются огромные давления. Пусть $(1-\alpha)$ — доля начальной кинетической энергии, перешедшей во внутреннюю, тогда закон сохранения энергии можно записать так:

$$\alpha \frac{mv^2}{2} = 4\pi R^2 \sigma. \quad (2)$$

Оценим скорость, которую будет иметь капля радиуса r . При падении с большой высоты скорость капли устанавливается постоянной. При этом сила тяжести уравновешивается силой сопротивления воздуха (величина которой зависит от величины скорости):

$$mg = F_{\text{сопр.}}$$

Величина силы сопротивления пропорциональна произведению избыточного давления в передней части капли и площади её поперечного сечения. Избыточное давление легко находится из уравнения Бернулли, если рассмотреть линию тока, начи-

нающуюся в бесконечности, а заканчивающуюся на передней поверхности капли ($v = 0$):

$$\frac{\rho_0 v^2}{2} + P_a = \Delta P + P_a \rightarrow \Delta P = \frac{\rho_0 v^2}{2},$$

где $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха. Таким образом, условие равновесия капли в воздушном потоке можно преобразовать так:

$$mg = \frac{\rho_0 v^2}{2} \pi r^2 \rightarrow \frac{v^2}{2} = \frac{mg}{\rho_0 \pi r^2} = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g}{\rho_0 \pi r^2} = \frac{4r \rho g}{3 \rho_0}.$$

Теперь можно использовать этот результат для подстановки в закон сохранения энергии (2):

$$\alpha \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \frac{4r \rho g}{3 \rho_0} = 4\pi R^2 \sigma \rightarrow R = \frac{2\rho r^2}{3} \sqrt{\frac{\alpha g}{\sigma \rho_0}}.$$

Мы получили оценочную зависимость радиуса пузыря от радиуса капли дождя. Нам неизвестен параметр α . Его нужно взять из наблюдений. Вспомните лето. Когда начинается летний дождь, следы от капель отчётливо видны на сухой земле и других поверхностях. Их диаметр порядка половины сантиметра, значит, радиус 2,5 мм. Характерный радиус пузырей на луже 1 см. Подставив эти летние воспоминания в формулу, получим $\alpha = 0,75$. Т. е. около 25% кинетической энергии капли превращается во внутреннюю! Окончательно получаем формулу

$$R = \rho r^2 \sqrt{\frac{g}{3\sigma\rho_0}}.$$

С её помощью можно ответить на главный вопрос задачи. Пузыри исчезнут, когда их радиус (согласно формуле) станет соизмерим с диаметром капли $2r = R$. В этом случае вытесненная вода сольётся с упавшей каплей и водяного купола не образуется. Это будет наблюдаться при радиусах капель, меньших, чем

$$r_{\text{кр}} = \frac{2}{\rho} \sqrt{\frac{3\sigma\rho_0}{g}} \approx 0,5 \text{ мм.}$$

Осенью (по сравнению с летом) температура воздуха понижается, при этом давление насыщенного пара резко уменьшается (например, при $t = 23^\circ\text{C}$ $p_{\text{нас}} = 21$ мм рт. ст., а при $t = 7^\circ\text{C}$ $p_{\text{нас}} = 7,5$ мм рт. ст.). По-

этому даже при высокой относительной влажности абсолютная влажность воздуха, т. е. масса водяного пара в 1 м^3 , достаточно низкая. Дефицит водяного пара приводит к тому, что при его конденсации образуются мелкие капли, которые, выпадая в виде дождя, уже не могут создавать пузыри.

Калейдоскоп Калейдоскоп Калейдоскоп

О Ломоносове.

История русской науки показывает, что её вершинам, её гениям свойственна особая широта задач и результатов, связанная, однако, с удивительной почвенностью и реальностью и вместе с тем с простотой подхода к решениям. Эти черты, этот стиль работы, которые мы встречаем и у Менделеева, и у Павлова, особенно выразительны у Ломоносова.

С.И. Вавилов

Время – лучший судья всех научных теорий. Правильность замечательных мыслей, высказанных впервые гениальным русским учёным Михаилом Васильевичем Ломоносовым, подтвердило всё развитие физики на протяжении почти двухсот лет, прошедших с его времени (написано в 1950 г. – *ред.*)

Б.Б. Кудрявцев

Этот гениальный человек делает своими познаниями честь настолько же Императорской академии, как и всей нации.

Л. Эйлер

Ломоносовские термины

Переведя с немецкого языка на русский курс физики своего учителя К. Вольфа, М. В. Ломоносов столкнулся с бедностью русского научного языка: в нём отсутствовали нужные термины. «Принуждён я был, – писал он, – искать слов для наименования некоторых физических инструментов (приборов – *ред.*), действий и натуральных вещей...». В результате он впервые ввёл много новых для русского языка терминов, которые вошли в фундамент современной научной терминологии и которыми все привычно пользуются. 300-летие со дня рождения М.В. Ломоносова даёт повод вспомнить, кому обязана наука, что её язык обогатился такими терминами, как термометр, барометр, манометр, насос, зажигательное стекло, атмосфера, упругость, равновесие тел, преломление лучей, магнитная стрелка, полюс магнита, земная ось, удельный вес... Ведь это именно его – первого русского академика – заслуга!