

Бабинцев Владимир Александрович
*Ассистент кафедры
 общей физики МФТИ.*



Бабинцева Елена Николаевна
Учитель физики гимназии г. Троицка.

Забавы юных физиков. Воспоминания об ушедшем лете

Данная статья является продолжением статьи «Летние забавы юных физиков», опубликованной в «Потенциале» №7. Предложенные задачи касаются привычных всем объектов, поэтому попробовать себя в рассуждениях может каждый.

1. **Исчезающая тень и расстояние до Солнца.** Представьте, что в жаркий летний день вы вышли погулять по городу. Нестерпимо яркий диск Солнца сияет в голубом небе. Хочется найти хоть кусочек тени, чтобы спрятаться от жары. Но кажется, что тень тоже испугалась жары и спряталась... Вот, например, между столбами висит тонкий провод, тени от столбов какие-то размытые, но они есть, а от провода тени совсем не видно! Как такое может быть?

Разобравшись в явлении, попробуйте оценить максимальную длину тени на поверхности земли от фабричной трубы высотой 44 м, диаметром у основания $D_1 = 12$ м, у вершины – 7 м.

В приложении к школьным задачникам по физике в таблицах астрономических величин обычно указывают размер Земли, а вот размер Солнца не всегда. Как можно рассчитать эту величину, сделав необходимые измерения тени от предметов и зная (из таб-



лицы), что расстояние до Солнца 150 миллионов км?

Решение. От каждой точки на поверхности Солнца падают лучи. На рис. 1 показаны лучи от точек *A, B, C, D, E, F*. Если бы Солнце находилось бесконечно далеко, то углом

между этими лучами можно было бы пренебречь. Реально угол *AZF* составляет порядка половины градуса.

Это означает, что нельзя считать солнечный свет параллельным пучком лучей. Это, в свою очередь, приводит к явлению полутени: часть

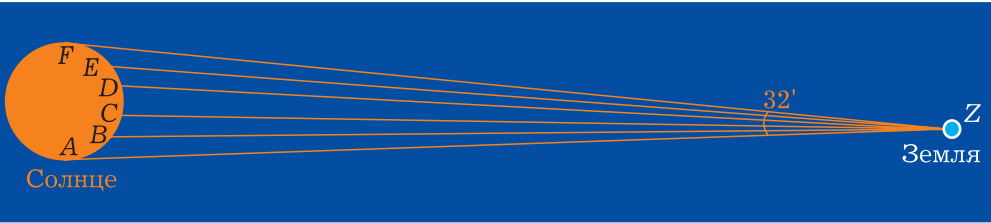


Рис. 1

лучей уже не освещает плоскость за предметом, а часть ещё освещает (рис. 2). Наблюдая за возникновением полутени от высокого предмета (например, крыши здания) можно точно измерить угол δ (обычная геометрическая задачка), а потом, умножив δ (в радианах) на 150 000 000 км, вычислить диаметр Солнца!

Когда Солнце стоит высоко, тень короткая. Самая длинная тень, как и положено, на закате. Её длина равна $L = D_1/\delta \approx 1 \text{ км} / 375 \text{ м}$. Задача решена, но нужно сразу оговориться, что эту тень мы сможем увидеть с трудом, потому что на закате освещённость, которую даёт прямой свет от Солнца, меньше освещённости, которую даёт рассеянный свет от неба и соседних предметов.

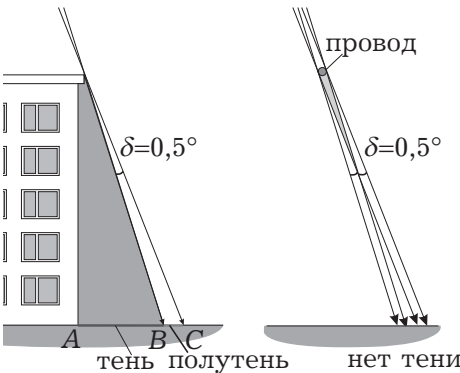


Рис. 2

Для решения задачи про трубу достаточно заметить, что задача аналогична задаче с проводом. Область существования тени определяется диаметром трубы и углом падения на неё лучей (рис. 3).

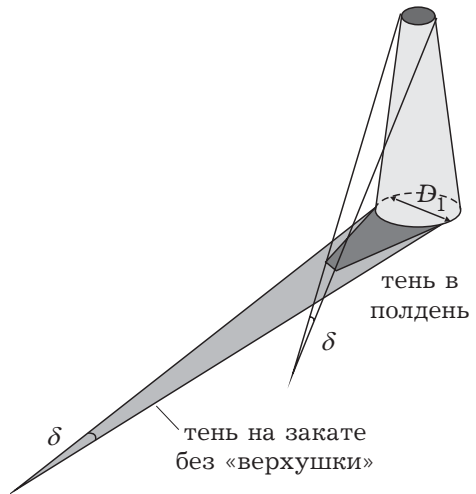


Рис. 3

Действительно, энергия, приходящая от Солнца на 1 м^2 перпендикулярной поверхности, примерно равна 1 кДж в секунду. Но чем ближе светило к горизонту, тем на большую площадь распределяется эта энергия (рис. 4), тем меньше освещённость земной поверхности.

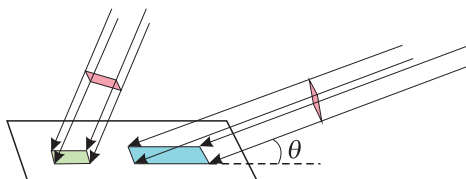


Рис. 4

В пределе при θ , стремящемся к нулю, освещённость также будет стремиться к нулю. Между тем рассеянный свет от неба на закате практически не ослабевает. Солнечный свет, рассеянный воздухом и поверхностями окружающих предметов, распространяется по всем направлениям практически одинаково. Попадая в область тени, он делает её менее контрастной. При определённом угле падения лучей θ^* освещённость земли

прямым и рассеянным солнечным светом совпадут, и тень исчезнет.

2. Нижняя граница облаков.

Одним из верных признаков наступившего лета является появление на небосводе кучевых облаков. В безмятежной голубизне плывут стада ослепительно белых, курчавых облаков хорошей погоды (так ещё иногда называют кучевые облака). Поэтов и прозаиков они вдохновляют на создание гениальных литературных произведений, но и людям с техническим складом ума облака могут дать пищу для размышлений. Вот, например, вы никогда не обращали внимания на то, что какой бы замысловатой ни была форма облаков, нижняя граница у них всегда плоская? Выскажите, пожалуйста, предположение о причинах такого положения дел. Чтобы разобраться в явлении, следует вначале, пожалуй, ответить на вопрос: почему кучевые облака обычно появляются летом после обеда, а зимой их не бывает совсем?

Разобравшись, оцените высоту нижней границы облаков. Для оценки вам понадобится таблица давлений насыщенных паров:

$T, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{нас}}, \text{Па}$	$T, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{нас}}, \text{Па}$	$T, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{нас}}, \text{Па}$
0	610,8	10	1227,1	20	2336,8
2	705,4	12	1401,5	22	2642,4
4	812,9	14	1597,4	24	2982,4
6	934,6	16	1817,0	26	3360,0
8	1072,1	18	2062,6	28	3778,5

Кроме того, известно, что обычно на 100 м подъёма температура воздуха падает на $0,7 ^\circ\text{C}$.

Решение. Ни для кого не секрет, что облака состоят из капелек воды. Эти капельки появляются в результате конденсации водяных паров из воздуха на пылинках, песчинках, заряженных ионах и других цен-

трах конденсации. Условием устойчивого существования капельки является достаточное количество паров воды в окружающем её воздухе. Если паров недостаточно, то к капле «прилипают» меньше молекул, чем вылетает из неё, и капля испаряется. Баланс между «прилипающими» и улетающими молекулами (дина-

мическое равновесие) наступает, когда давление паров воды становится равным давлению насыщенного пара. Это давление зависит от температуры. Температура, при которой водяной пар, находящийся в данный момент в воздухе, станет насыщенным, называется точкой росы. Название говорит само за себя: при опускании температуры ниже точки росы выпадает роса. Если тёплый приземный воздух поднимается на некоторую высоту, то он охлаждается, и может случиться так, что на этой высоте его температура окажется равной точке росы. Начнётся образование облака. Эта высота и будет определять нижнюю границу облаков (рис. 5).

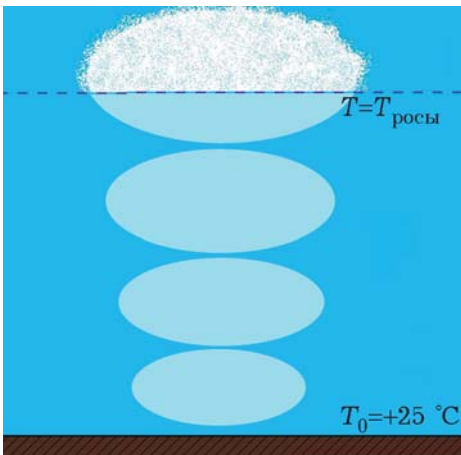


Рис. 5

Плотность нагретого вблизи земной поверхности воздуха меньше, чем того, что расположен выше. В принципе, есть возможность того, что эти слои меняются местами (лёгкий воздух уйдёт вверх, а тяжёлый вниз), поскольку это энергетически выгодно. Однако сложившаяся ситуация напоминает опыт с деревянным кубиком, плотно прижатым ко дну сосуда: если вода не проникает под нижнюю грань, сила Архимеда не действует, и кубик не

всплывает. В нашей модели холодный воздух не подтекает под слой тёплого (считаем, что не наблюдается прохождения фронта). Поэтому нет причин к перемещению тёплого воздуха вверх. В отличие от кубика газ не сохраняет форму и может перемещаться вверх отдельными порциями. Вот как это происходит.

Различные участки земной поверхности по-разному нагреваются солнечными лучами. Ночью температура всех участков примерно одинаковая. Днём же, по мере увеличения высоты Солнца над горизонтом, температура «более чёрных» участков и южных склонов начинает расти быстрее, чем других. Изменяется распределение давления. Появляются ветерки. Движение воздуха имеет не только горизонтальную, но и вертикальную составляющую, что и даёт толчок к конвективному «всплыванию» тёплого слоя. Причинами появления вертикальной составляющей могут быть «наползание» более нагретого воздуха из области высокого давления на более прохладный воздух в области низкого давления или движение воздуха вдоль склона холма (вы, наверное, замечали, что над вершинами холмов кучевые облака появляются чаще). Наибольшая температура достигается после полудня, поэтому именно после полудня можно любоваться сверкающими громадами кучевых облаков, вершины которых расположены иногда так высоко, что состоят не из капелек, а из льдинок (вы сразу заметите их различие по внешнему виду).

Кучевые облака чаще всего наблюдаются в жаркое время года, потому что зимой, осенью и весной тусклое солнышко не способно развить достаточную неоднородность в температуре различных участков земной поверхности, чтобы инициировать всплывание порций тёп-

лого воздуха (их ещё называют *термиками*).

Попытаемся сделать количественную оценку высоты нижней границы кучевых облаков (рис. 5). На этой высоте приземные пары становятся насыщенными. Их давление становится равным давлению насыщенных паров. Можно было бы определить с помощью таблицы давление насыщенных паров, соответствующее приземной температуре (например, $T_0 = +25^\circ\text{C}$, $p_{0\text{нас}} = 3200\text{ Па}$). При относительной влажности φ около 50%, характерной для лета, давление паров $p_0 = \varphi \cdot p_{0\text{нас}} = 1600\text{ Па}$. Далее посмотреть по таблице температуру, соответствующую давлению насыщенных паров p_0 ($T_{\text{росы}} = +14^\circ\text{C}$). И, наконец, вычислить высоту нижней границы облаков:

$$h = \frac{25^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C}}{0,007^\circ\text{C}/\text{м}} \approx 1570\text{ м.}$$

Попробуем учесть тот факт, что

термик «всплывает», попутно расширяясь и охлаждаясь. При этом давление водяного пара уменьшается (а не остаётся постоянным, как мы считали). Поскольку конвекция происходит быстро, будем считать, что тепло не успевает передаваться. Адиабатический процесс идеального газа описывается уравнением Пуас-

сона $pV^{C_p} = \text{const}$, где $C_p = 4R$ и $C_V = 3R$ – молярные теплоёмкости водяного пара (трёхатомная молекула). Перепишем его с помощью уравнения состояния идеального газа в координатах p , T и построим «по точкам» на одном графике с зависимостью насыщенного пара от температуры (рис. 6). Точка пересечения графиков даёт более точную оценку температуры точки росы $T'_{\text{росы}} = +11,5^\circ\text{C}$. Соответственно и высота нижней границы будет другая:

$$h' = \frac{25^\circ\text{C} - 11,5^\circ\text{C}}{0,007^\circ\text{C}/\text{м}} = 1930\text{ м.}$$

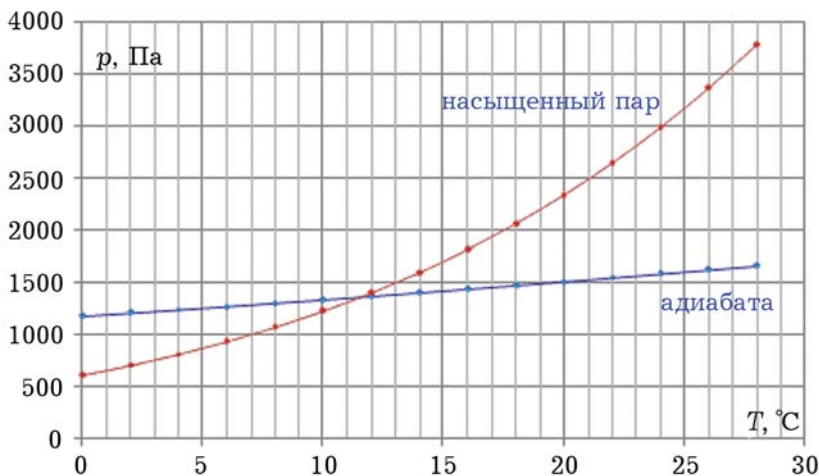


Рис. 6

3. Сквозняк в электричке. Для отдыха летом не обязательно ехать к тёплому морю. Можно отлично отдохнуть, выбравшись за

город, где прохладой манят рощи и водоёмы. Однако чтобы выбраться из каменных джунглей и вдохнуть глоток чистого воздуха, нужно

электричкой). Едем в электричке, окна открыты настежь во избежание духоты. Электричка тормозит перед платформой, при этом начинает ощутимо дуть в окна, расположенные в задней части вагона. Электричка разгоняется после остановки – ветер дует в передние окна! Что всё это значит? Ответ достаточно прост. Разобравшись с феноменом, вы без труда сможете посчитать, какая масса наружного воздуха поступает в салон электропоезда при его торможении с ускорением 2 м/с^2 . Для расчётов, кроме ускорения, вам нужно прикинуть длину салона (15–20 м) и знать плотность ($1,3 \text{ кг/м}^3$) атмосферного воздуха.

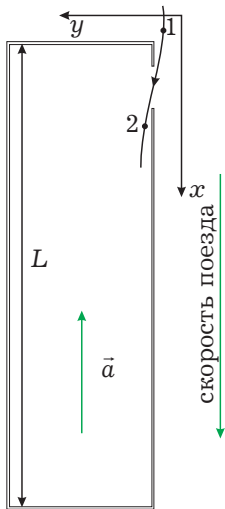


Рис. 7

Решение. Проще рассуждать в системе отсчёта, связанной с поездом. На воздух, как и на любые другие тела, внутри салона действует сила инерции. Предположим, что электричка тормозит. Тогда эта сила направлена вперёд по ходу поезда. Под её действием воздух придёт в движение в том же направлении, в заднем конце сало-

на образуется разрежение. При открытых форточках, под действием разности давлений воздух будет заходить внутрь салона через задние окна. (Для ускоряющейся электрички можно провести аналогичные рассуждения и показать, что воздух будет заходить через передние окна.)

После того как мы поняли причину явления, можно попробовать описать его количественно. Представим для начала, что открыто всего одно заднее окно салона (рис. 7).

Давление за окном (в точке 1) – атмосферное, внутри салона (точка 2) оно меньше атмосферного на величину $\rho a L/2$. Действительно, задача с электричкой очень похожа на множество стандартных школьных задач с ускоряющимся лифтом (только в данном случае ускорение горизонтальное). Как вы, наверное, помните, для решения подобных задач можно формально считать, что ускорение свободного падения увеличилось (или уменьшилось, в зависимости от направления вектора ускорения) на величину ускорения. В физике есть общий принцип эквивалентности ускорения и однородного гравитационного поля. В нашем случае, руководствуясь этим принципом и пренебрегая изменением плотности воздуха, можно посчитать давление в салоне по «гидростатической» формуле. Итак, $p_1 = p_a$, а $p_2 = p_a - \rho a L/2$. Рассмотрим струю внешнего воздуха, проникающую через заднее окно внутрь. Запишем уравнение Бернулли для точек 1 и 2:

$$p_a + \frac{\rho v_x^2}{2} = p_a - \frac{\rho a L}{2} + \frac{\rho (v_x^2 + v_y^2)}{2}.$$

Здесь был учтён тот факт, что сила, возникающая из-за разности давлений, может изменить только

перпендикулярную к окну составляющую скорости v_y набегающего потока воздуха, а продольная составляющая v_x остаётся без изменения. Из данного уравнения можно найти выражение для перпендикулярной составляющей скорости:

$$v_y = \sqrt{aL}.$$

Именно v_y определяет объёмный расход воздуха через форточку поперечным сечением S (рис. 8).

За малое время Δt в вагон поступит воздух из наклонного параллелепипеда $ABCD A_1 B_1 C_1 D_1$ с высотой $BH = v_y \Delta t$. Объём наклонного параллелепипеда можно вычислить, умножив площадь основания на высоту, поэтому объёмный расход воздуха через окно будет равен:

$$q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S v_y \Delta t}{\Delta t} = S \sqrt{aL}.$$

Если подставить характерные значения $S=0,2 \text{ м}^2$, $L=15 \text{ м}$ и $a=2 \text{ м/с}^2$, то получим $q \approx 1,1 \text{ м}^3/\text{с}$. За десять секунд торможения в салон поступит около 11 кубометров свежего воздуха! Теперь массу легко найти, умножив объём на плотность.

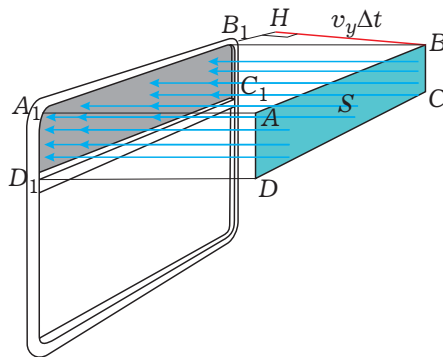


Рис. 8

Калейдоскоп Калейдоскоп Калейдоскоп

Сапоги-«сороходы»

Солдаты некоторых частей английской и американской армий, служащие в местах с илистой, грязевой почвой, обуты в необычные, неувязающие в ней сапоги. Их придумал английский изобретатель, который, несомненно, хорошо знал (наверное, ещё со школы) о действии атмосферного давления. Он вшил в сапог трубку с клапаном, пропустив её от подошвы до верха голенища.

Обычно, когда идущий по грязи человек приподнимает ногу, грязь, облепляя обувь, не пропускает воздух в образующуюся под подошвой полость. Давление в ней оказывается значительно меньше атмосферного, действующего на ногу сверху, и сделать шаг вперёд тяжело. В специальных же сапогах (с трубкой) как только под подошвой возникает «вакуум», атмосферный воздух открывает клапан и попадает в полость. Давления на сапог сверху и снизу выравниваются, и ноги довольно легко и быстро переступают по вязкой жиже.