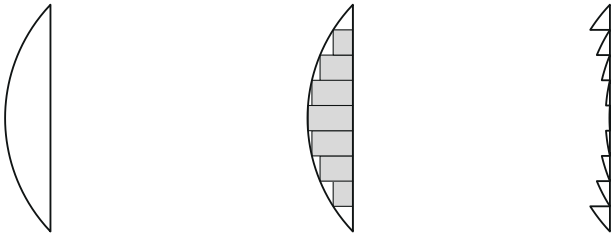
# Оптический «сэндвич»

**Задача 2.** [ВсОШ 2025/26, региональный этап, 10 класс, задача 2 (практический тур)] «Оптический «сэндвич»».

**Оборудование.** Фонарик, установка для фиксации фонарика, две одинаковые линзы Френеля, экран, четыре канцелярских зажима, мерная лента, шприц 5 мл с глицерином (показатель преломления глицерина $n_г = 1{,}47$), 10 салфеток для поддержания чистоты. Ножницы и скотч — по требованию.

**Задание.** Линза Френеля может быть изготовлена следующим образом: из сегмента прозрачного шара вырезают плоские «неработающие» части. Оставшиеся части переносят на одну плоскость, как показано на рисунке. Оптические свойства такой линзы почти идентичны свойствам обычной линзы, т. к. все кольца имеют одинаковую оптическую силу и расположены в одной плоскости.



*«Обычная» линза и линза Френеля*

Рассмотрим тонкую линзу, у которой одна сторона плоская, а другая имеет радиус кривизны $R$. В воздухе её оптическая сила рассчитывается по формуле

$$D = \pm\frac{n-1}{R},$$

где $n$ — показатель преломления материала линзы; знак «плюс» соответствует плоско-выпуклой линзе, а знак «минус» — плоско-вогнутой.

Если между двумя линзами Френеля капнуть немного жидкости, а затем прижать их друг к другу с помощью зажимов, то получившийся «сэндвич» тоже будет обладать свойствами тонкой линзы.

1. Определите фокусное расстояние одной линзы $F_0$. Приведите схему установки и опишите метод нахождения фокусного расстояния.
2. 2a) Измерьте фокусное расстояние $F_1$ «сэндвича», в котором линзы Френеля прижаты плоскими сторонами. 2b) Измерьте фокусное расстояние $F_2$ «сэндвича», в котором ребристая сторона одной линзы прижата к плоской стороне другой.
3. Найдите радиус кривизны неплоской поверхности линзы Френеля.
4. Определите показатель преломления пластика, из которого изготовлены линзы Френеля.
5. Определите фокусное расстояние $F_3$ «сэндвича», в котором линзы Френеля прижаты рёбристыми сторонами.

*В этой задаче погрешности оценивать не нужно. Небольшие пятна глицерина можно протереть сухой салфеткой. Если пролили много — попросите у организаторов влажную тряпку. Приклеивать скотч к линзам Френеля запрещено!*

▲ **Решение. Что происходит.** Экспериментальная задача на тонкие линзы. Главное свойство: оптические силы тонких линз, сложенных вплотную, складываются. Глицерин в «сэндвиче» — тоже линза: между плоскими сторонами — плоский слой (сила ноль), в канавках ребристой стороны — плоско-вогнутая глицериновая линза Френеля с тем же радиусом $R$. Меряем два фокусных расстояния, а остальное считаем.

**Обозначения.** $D = 1/F$ — оптическая сила; $F_0$ — одной линзы; $n$ — показатель пластика; $R$ — радиус кривизны ребристой (сферической) поверхности; $L$ — расстояние фонарик–экран.

**Пункт 1. Симметричный метод Бесселя** (рис. 2). Линзу и экран ставим в зажимы, фонарик — на зажимы-«ножки», ось фонарика перпендикулярна линзе и экрану; мерную ленту клеим к столу. Предмет — светящееся тело фонарика. Подбираем расстояние $L$ фонарик–экран так, чтобы резкое изображение получалось, когда линза *ровно посередине*.

Тогда $a = b = L/2$, и формула тонкой линзы

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F_0} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{L/2} + \frac{1}{L/2} = \frac{4}{L} = \frac{1}{F_0}, \qquad F_0 = \frac{L}{4}.$$

Это и наименьшее $L$, при котором вообще есть резкое изображение ($a + b \geq 4F_0$): найти его удобно, сдвигая экран, пока два положения линзы с резким изображением не сольются в одно. На авторской установке $F_0 \approx 21{,}3$ см ($L \approx 85$ см).

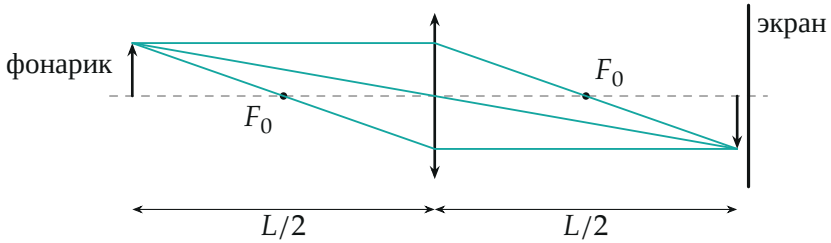



*Рис. 2. Метод Бесселя: линза посередине, предмет и изображение на расстоянии $2F_0$ от неё — $L = 4F_0$. Лучи: параллельный оси — через фокус, через центр — без преломления, через фокус — параллельно.*

**Пункт 2.** Тем же методом меряем фокусные расстояния «сэндвичей» (рис. 3). Капаем глицерин, прижимаем вторую линзу зажимами по краям, следим, чтобы линзы не изогнулись (слой одной толщины), лишнее вытираем. На авторской установке

$$F_1 \approx 10{,}6 \text{ см}, \qquad F_2 \approx 19{,}1 \text{ см}.$$

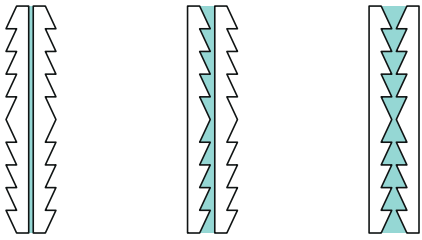


*Рис. 3. Сечения «сэндвичей» (рёбра увеличены): а) плоскими сторонами — слой глицерина плоский; б) ребристой к плоской — глицерин заполняет канавки одной линзы; в) ребристыми сторонами — канавки обеих.*

**2а. Почему $F_1 \approx F_0/2$.** Плоский слой глицерина — плоскопараллельная пластинка, её оптическая сила ноль. Силы двух линз складываются:

$$D_1 = \frac{2}{F_0} \quad \Rightarrow \quad F_1 = \frac{F_0}{2} = 10{,}65 \text{ см}$$

— совпадает с измеренным 10,6 см: это проверка метода.

**Пункт 3. Радиус кривизны.** В случае б) глицерин в канавках — линза Френеля из глицерина с той же поверхностью радиуса $R$, но вогнутая (рис. 4): её сила $-\frac{n_г-1}{R}$. Три тонкие линзы вплотную:

$$\frac{1}{F_2} = \frac{2}{F_0} - \frac{n_г - 1}{R} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{n_г - 1}{\frac{2}{F_0} - \frac{1}{F_2}} = \frac{0{,}47}{\frac{2}{21{,}3} - \frac{1}{19{,}1}} \text{ см} \approx 11{,}3 \text{ см}.$$

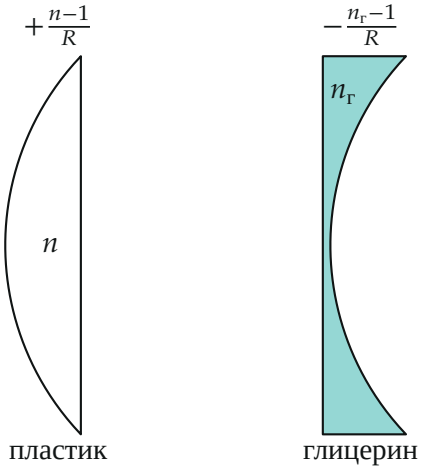



*Рис. 4. Эквивалентная схема пункта 3: линза Френеля работает как плосковыпуклая линза из пластика ($+\frac{n-1}{R}$), а глицерин в её канавках — как плосковогнутая глицериновая линза с тем же $R$ ($-\frac{n_г-1}{R}$).*

**Пункт 4. Показатель пластика.** Из формулы условия для плоско-выпуклой линзы $\frac{1}{F_0} = \frac{n-1}{R}$:

$$n = 1 + \frac{R}{F_0} = 1 + \frac{11{,}3}{21{,}3} \approx 1{,}53.$$

**Пункт 5. Рёбрами друг к другу.** Глицерин заполняет канавки обеих линз — две плоско-вогнутые глицериновые линзы (двояковогнутая). На столе резкого изображения не получить: фокус слишком длинный. Считаем:

$$\frac{1}{F_3} = \frac{2}{F_0} - \frac{2(n_г - 1)}{R}.$$

Подставив $\frac{n_г-1}{R} = \frac{2}{F_0} - \frac{1}{F_2}$ из пункта 3, получаем через одни измерения:

$$\frac{1}{F_3} = \frac{2}{F_2} - \frac{2}{F_0} \quad \Rightarrow \quad F_3 = \left(\frac{2}{19{,}1} - \frac{2}{21{,}3}\right)^{-1} \text{ см} \approx 92 \text{ см}.$$

**Второй способ.** Каждая линза с глицерином в канавках — линза с перепадом показателей $n - n_г$ на сферической поверхности: сила $\frac{n-n_г}{R}$. Для в) $D_3 = \frac{2(n-n_г)}{R} = \frac{2 \cdot 0{,}061}{11{,}3 \text{ см}}$, $F_3 \approx 92$ см. Для б) $D_2 = \frac{n-n_г}{R} + \frac{n-1}{R}$ — даёт обратно $F_2 = 19{,}1$ см.

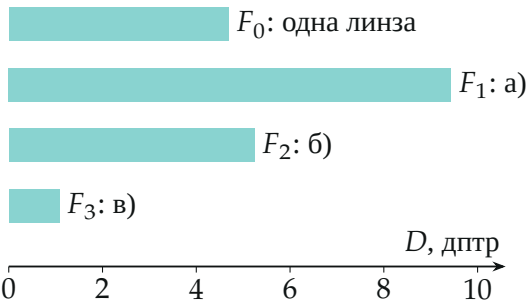



*Рис. 5. Оптические силы: одна линза 4,7 дптр; плоскими сторонами — вдвое больше; канавки с глицерином уменьшают силу: в) — всего 1,1 дптр.*

**Обратите внимание.** Глицерин «гасит» ребристую сторону не полностью: $n_г = 1{,}47$ близко к $n = 1{,}53$, но не равно, поэтому у в) остаётся

малая, но положительная сила, $F_3 \approx 92$ см, а не бесконечность.

**Проверка.** Размерности: $R$ — (безразмерное)/(1/см) = см. $F_1 = F_0/2$ подтвердилось опытом. Независимо (python): $R = 11{,}31$ см, $n = 1{,}531$, $F_3 = 92{,}5$ см; второй способ даёт тот же $F_3$ и возвращает $F_2 = 19{,}1$ см.

Смысл: жидкость в канавках линзы Френеля — рычаг управления её силой: чем ближе показатель жидкости к пластику, тем слабее линза.

**Ответ.** 1) $F_0 = L/4 \approx 21{,}3$ см (метод Бесселя); 2) $F_1 \approx 10{,}6$ см, $F_2 \approx 19{,}1$ см; 3) $R = (n_\text{г} - 1)\left(\frac{2}{F_0} - \frac{1}{F_2}\right)^{-1} \approx 11{,}3$ см; 4) $n = 1 + R/F_0 \approx 1{,}53$; 5) $F_3 = \left(\frac{2}{F_2} - \frac{2}{F_0}\right)^{-1} \approx 92$ см (значения — авторской установки).