

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853:535

В. В. Майер, Е. И. Вараксина, К. М. Курбоналиев
ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ ГАЛИЛЕЯ
В ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ БАКАЛАВРИАТА
Дидактическое исследование: методический этап

Представлен методический этап дидактического исследования трубы Галилея, целью которого является создание лабораторной работы физического практикума бакалавриата.

Ключевые слова: труба Галилея, дидактическое исследование, методический этап, общая физика, педагогический вуз, лабораторный эксперимент, школьная физика, ученический проект.

V. V. Mayer, E. I. Varaksina, K. M. Kurbonaliev
THE STUDY OF GALILEO'S TELESCOPE
IN THE UNDERGRADUATE PHYSICS WORKSHOP
Didactic research: a methodological stage

The methodological stage of the didactic study of the Galileo telescope is presented. The purpose of the stage is to create a laboratory work of a bachelor's degree physics workshop.

Keywords: Galileo telescope, didactic research, methodological stage, general physics, pedagogical university, laboratory experiment, school physics, student project.

Введение

В работе [1] подробно рассмотрены дидактический, физический и технический этапы исследования трубы Галилея в качестве объекта учебного исследования в средней школе и педагогическом вузе. В настоящей статье представлен методический этап дидактического исследования трубы Галилея.

Как известно, этот этап включает разработку системы школьного физического эксперимента, состоящей из: «1) демонстрационных опытов; 2) фронтальных лабораторных работ; 3) экспериментальных задач; 4) работы физического практикума; 5) экспериментов для проектной деятельности; 6) домашних опытов; 7) занимательных опытов» [2]. Здесь мы выбрали наиболее сложный вид учебного эксперимента с трубой Галилея, а именно, лабораторную работу физического практикума педагогического вуза [3, 4]. Такой выбор обусловлен тем обстоятельством, что выполнение лабораторной работы по учебному исследованию трубы Галилея обеспечит будущим учителям физики успешное создание в школе условий для всех перечисленных выше видов учебного эксперимента с этим простым и поучительным прибором [5]. Существенно, что в этой лабораторной работе результаты измерений обрабатывают и оценку погрешностей производят общепринятыми в физическом практикуме методами, которые подробно обсуждаются во многих учебных пособиях, например, в [4, 6]. Теоретической основой нашей работы по-прежнему является фундаментальный труд А. И. Тудоровского «Теория оптических приборов» [7, 8].

ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ ГАЛИЛЕЯ

Лабораторная работа

Зрительная труба Галилея состоит из собирающей и рассеивающей линз, установленных в трубе с непрозрачной стенкой так, что задний фокус собирающей линзы совпадает с передним фокусом рассеивающей.

1. Цели работы. Ознакомьтесь с содержанием предстоящей работы. Сформулируйте и запишите цели обучения, развития и воспитания, которые вы перед собой ставите.

2. Оборудование для выполнения эксперимента. Перечислите и изучите *основное оборудование*, предназначенное для сборки и исследования зрительной трубы Галилея (рис. 1): *1* — собирающая длиннофокусная линза с крепежом, извлеченная из объектива школьного проекционного аппарата ФОС–115; *2* — рассеивающая короткофокусная линза с крепежом, в качестве которой взята линза № 3 из школьного набора для фронтальных опытов; *3* — труба или стержень для установки линз; *4* — линейка с миллиметровыми делениями. Выясните, какое *вспомогательное оборудование* вам потребуется.

3. Пучок света в зрительной трубе Галилея. Оптическая схема трубы Галилея, объективом L_1 и окуляром L_2 которой являются собирающая и рассеивающая линзы, приведена на рис. 2. Точечный источник света S лежит на оптической оси зрительной трубы в

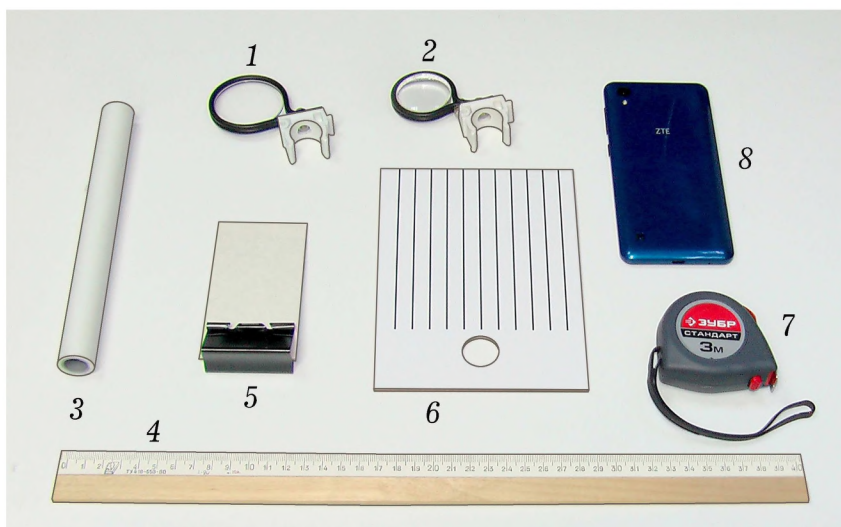


Рис. 1. Основное оборудование для учебного исследования зрительной трубы Галилея в лабораторной работе физического практикума

бесконечности. Падающий на объектив трубы параллельный пучок света собирается в заднем фокусе объектива F_1 , который является изображением S' источника S . В этой же точке находится передний фокус окуляра F_2 . Поэтому в зрачок аккомодированного на бесконечность глаза G входит выходящий из окуляра параллельный пучок света, который оптической системой глаза собирается в лежащее на сетчатке изображение S'' источника S .

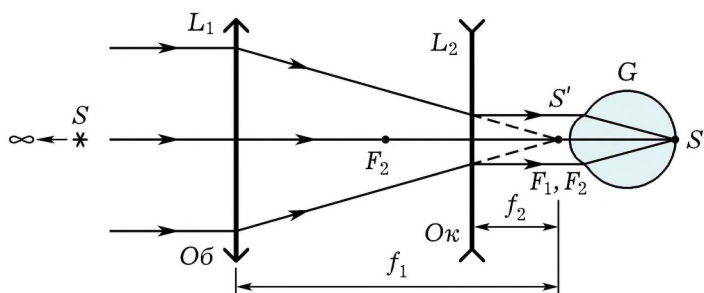


Рис. 2. Оптическая схема трубы Галилея

Оптическая система, преобразующая входящие в нее параллельные пучки света в параллельные выходящие пучки, называется

телескопической. Поперечное сечение, общее для всех входящих в систему световых пучков, называется *зрачком в пространстве предметов* или *входным зрачком*. Поперечное сечение, общее для всех выходящих из системы пучков, называют *выходным зрачком* или *зрачком в пространстве изображений* [5].

Пользуясь рис. 2 и выведенной ниже формулой (2), докажите, что увеличение трубы Галилея равно отношению диаметров D_1 и D_2 ее входного и выходного зрачков:

$$\Gamma = \frac{D_1}{D_2}. \quad (1)$$

4. Элементарная теория зрительной трубы Галилея. Ход световых лучей в оптической системе *зрительная труба Галилея-глаз наблюдателя* показан на рис. 3.

Вначале представим, что зрительная труба состоит из одного объектива L_1 . Луч 1 идет из точки S_1 бесконечно удаленного предмета по оптической оси системы. Все лучи пучка, параллельные лучу 1 , выходят из точки S_1 предмета и после преломления в объективе L_1 трубы собираются в ее заднем фокусе F_1 в точке S'_1 .

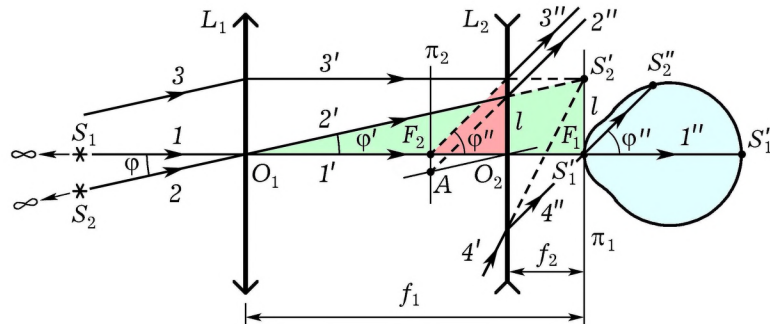


Рис. 3. К выводу формулы для увеличения трубы Галилея

Луч 2 параллельного пучка, выходящего из точки S_2 предмета, идущий в оптический центр объектива O_1 , не преломляется. Для простоты возьмем такой параллельный ему луч 3 , который проходит через передний фокус F_1 объектива (на схеме не показан). Он также выходит из S_2 и преломляется объективом параллельно оптической оси трубы. Если бы не было окуляра, то этот луч $3'$ пришел бы в действительное изображение S'_2 точки S_2 . Таким образом, в задней фокальной плоскости объектива π_1 получают действительные изображения S'_1 и S'_2 точек S_1 и S_2 лежащего в бесконечности предмета. Обозначим длину отрезка $S'_1S'_2$ через l .

На пути светового пучка, выходящего из объектива, поместим окуляр L_2 так, чтобы его передний фокус совпал с задним фо-

кусом объектива (напомним, что передний фокус рассеивающей линзы находится за линзой). В этом случае созданные объективом изображения S'_1 и S'_2 являются для окуляра мнимыми источниками света. Параллельный пучок света, идущий от источника S_1 по оптической оси трубы, после объектива становится сходящимся в точке S'_1 , а после окуляра вновь превращается в параллельный и собирается на сетчатке глаза в точку S''_1 (см. рис. 2 и 3). Вышедшие из объектива лучи $2'$, $3'$ и $4'$ идут из точки S_2 предмета и собираются в ее изображении S'_2 . Из окуляра они выходят параллельным пучком $2''$, $3''$, $4''$ и на сетчатке глаза собираются в точку S''_2 .

Итак, если без трубы Галилея угол зрения на точки S_1 и S_2 предмета составляет $\varphi = \varphi'$, то через трубу глаз видит те же точки под углом φ'' . Из выделенного на рис. 3 треугольника видно, что для параксиальных лучей $\varphi' = l/f_1$ и $\varphi'' = l/f_2$. Отсюда увеличение трубы Галилея

$$\Gamma = \frac{\varphi''}{\varphi'} = \frac{f_1}{f_2}. \quad (2)$$

Пользуясь оптическими схемами, представленными на рис. 3 и рис. 2, нарисуйте простой и понятный даже школьникам ход лучей в трубе Галилея и, сделайте вывод формулы (2) для ее увеличения.

5. Определение увеличения зрительной трубы методом фотографирования. Соберите модель зрительной трубы Галилея (рис. 4.1), используя оборудование, предназначенное для выполнения лабораторной работы, часть которого показана на рис. 1.

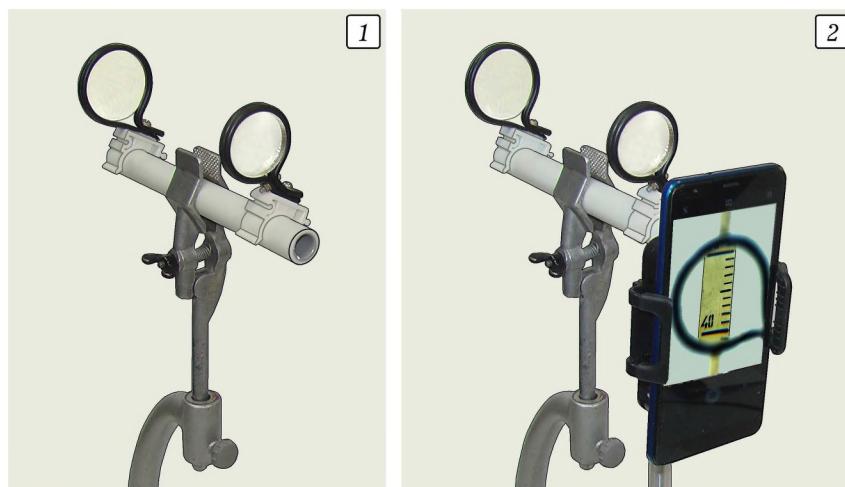


Рис. 4. Собранная модель зрительной трубы Галилея и фотографирование полученного с ее помощью изображения демонстрационной линейки

Демонстрационную линейку с сантиметровыми делениями закрепите в штативе вертикально на расстоянии 1,5–3,0 м от трубы. Перемещая окуляр относительно объектива, наведите зрительную трубу на линейку так, чтобы резко были видны ее деления. Штатив с закрепленным на нем вертикально смартфоном передвиньте так, чтобы объектив камеры смартфона оказался рядом с окуляром трубы. На дисплее смартфона получите резкое увеличенное изображение линейки и сфотографируйте его.

Передвиньте штатив со смартфоном перпендикулярно оси зрительной трубы на такое расстояние, чтобы на его дисплее получилось резкое изображение линейки, созданное непосредственно объективом смартфона, и сфотографируйте его (рис. 4.2). Загрузите в компьютер фотографии двух изображений линейки, сделанных с одного и того же расстояния от линейки и при одинаковом увеличении камеры смартфона. Распечатайте на принтере эти фотографии для отчета.

6. Обработка результатов эксперимента. Чтобы вычислить увеличение зрительной трубы, в любом графическом редакторе расположите сделанные фотографии рядом. На фотографии, полученной через трубу, выберите произвольный отрезок и занесите измеренное по увеличенному изображению линейки значение его длины L в табл. 1. Длину l этого же отрезка измерьте по фотографии линейки, сделанной непосредственно камерой смартфона, и получившееся значение также занесите в таблицу. Такие измерения для разных отрезков увеличенного изображения линейки проведите не менее $N = 5$ раз, занося получаемые значения в табл. 1. Для каждого измерения вычислите увеличение зрительной трубы по очевидной формуле:

$$\Gamma = \frac{l}{L}. \quad (3)$$

Таблица 1
Результаты измерений и вычислений

N	L , см	l , см	Γ	$\Delta\Gamma$	$\Delta\Gamma^2$	$\sigma_{\text{ср}}$
Средние значения						

Обработайте результаты непосредственных измерений так, чтобы были заполнены все колонки табл. 1. Необходимую для этого *стандартную погрешность* (или среднеквадратичную погрешность среднего арифметического значения серии измерений) най-

дите по формуле:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\Gamma_i)^2} = \sqrt{\frac{(\Delta\Gamma)_{\text{ср}}^2}{N-1}}.$$

Выберите значение *доверительной вероятности* или *надежности* α , например, $\alpha = 0,95$. Для числа N выполненных измерений по специальной таблице [6] найдите коэффициент Стьюдента $t_\alpha(N)$. Определите доверительный интервал $\Delta\Gamma = t_\alpha(N)\sigma_{\text{ср}}$ и запишите полученное значение увеличения трубы с абсолютной $\Delta\Gamma$ и относительной ε погрешностью: $\Gamma = \Gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\Gamma$ и $\varepsilon = \Delta\Gamma/\Gamma_{\text{ср}}$.

7. Экспериментальное обоснование справедливости формулы для увеличения зрительной трубы Галилея. Вначале стандартным методом определите фокусное расстояние объектива. Для этого достаточно включить фонарик смартфона и объективом получить резкое изображение этого источника на белом экране. Измерив расстояния a и b от объектива до источника и экрана, по формуле собирающей линзы вычислите фокусное расстояние объектива (рис. 5.1).

Чтобы оценить фокусное расстояние окуляра, в качестве которого используется рассеивающая линза, к объективу зрительной трубы со стороны окуляра прислоните экран с изображенной на нем решеткой b (рис. 1). Смотрите сквозь окуляр на решетку с расстояния не менее полуметра и приближайте окуляр к решетке до тех пор, пока наблюдаемая через окуляр картина не уменьшится в 2 раза по сравнению с той, которая видна вне поля зрения окуляра. Пользуясь рис. 5.2, докажите, что в этом случае решетка находится примерно в задней фокальной плоскости окуляра.

Оценив описанным способом фокусное расстояние окуляра и зная фокусное расстояние объектива, вычислите по формуле (2) примерное значение увеличения зрительной трубы Галилея и сделайте соответствующий вывод.

8. Оценка увеличения зрительной трубы методом визуального наблюдения. Проверьте полученный в предыдущем пункте результат. Для этого через трубу одним глазом посмотрите на установленную на расстоянии не менее 1,5 м вертикально линейку с сантиметровыми делениями. Второй глаз не зажимайте, а держите открытым (если это мешает наблюдениям, перекройте открытый глаз ладонью). Перемещая окуляр, получите резкое изображение линейки.

Одновременно вторым глазом смотрите на масштабную линейку мимо трубы, при необходимости убрав ладонь, перекрывающую поле зрения. Слегка поворачивая штатив со зрительной трубой вокруг

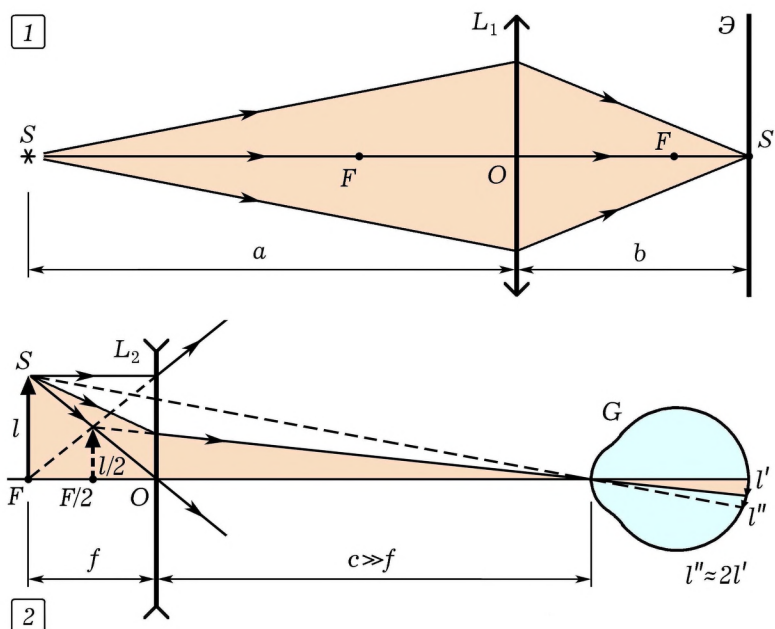


Рис. 5. К определению фокусных расстояний собирающей и рассеивающей линз трубы Галилея

вертикальной оси, добейтесь, чтобы изображение шкалы, видимое через трубу, оказалось рядом с изображением, видимым невооруженным глазом. Оцените увеличение зрительной трубы как отношение размеров изображений, полученных с помощью и без трубы. Сравните найденное значение с тем, которое получено в предыдущем пункте. Сделайте и запишите вывод из этого опыта.

9. Оценка увеличения зрительной трубы методом измерения входного и выходного зрачков. Внимательно изучите оптическую схему трубы Галилея, на которой показаны входной и выходной зрачки этого прибора (рис. 6). Напомним, что размер входного зрачка определяется диаметром D_1 оправы AB объектива трубы, а размер выходного — диаметром D_2 изображения $A'B'$ этой оправы в окуляре.

Вычислите расстояние b между окуляром L_2 и плоскостью выходного зрачка $A'B'$ зрительной трубы. В этой плоскости над трубой горизонтально расположите линейку с миллиметровыми делениями. Камерой смартфона сделайте фотографию, на которой одновременно видны выходной зрачок трубы и деления линейки. По фотографии определите диаметр D_2 выходного зрачка. Диаметр

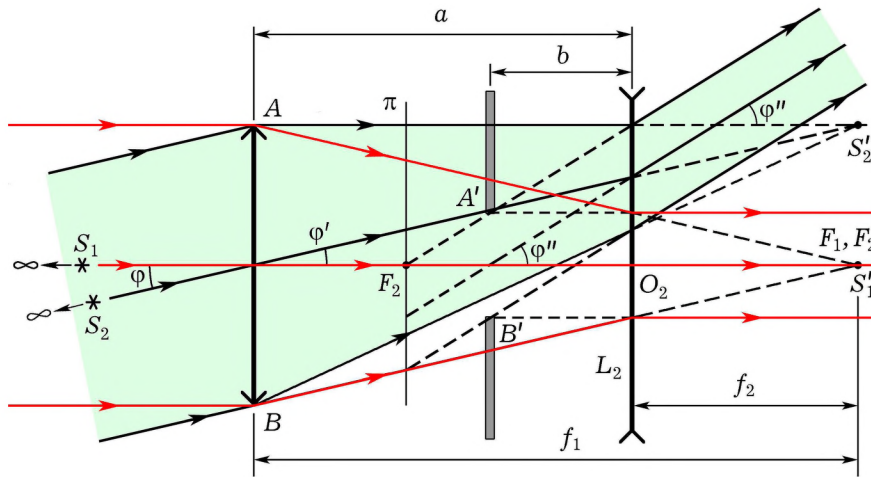


Рис. 6. Оптическая схема трубы Галилея, на которой показаны входной AB и выходной $A'B'$ зрочки

входного зрочка D_1 определите, измерив диаметр оправы объектива непосредственно линейкой. Вычислите увеличение зрительной трубы по формуле (1) и сделайте выводы.

10. Дополнительные вопросы. 1) Дайте определение увеличения оптического прибора, вооружающего глаз. 2) Что собой представляет простейшая зрительная труба? 3) Сформулируйте критерий Рэлея разрешающей способности оптического прибора. 4) Что такое и чему равно полезное увеличение зрительной трубы? 5) Труба Галилея собрана из двух очковых стекол $+0,5$ дптр и -25 дптр; каково увеличение этого оптического прибора?

11. Заключение. Запишите результаты выполненного эксперимента, укажите его особенности, перечислите встретившиеся трудности, сделайте самооценку своей деятельности и определите, насколько удалось достичь поставленные перед собой цели.

ИЗУЧЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ ГАЛИЛЕЯ

Ожидаемые результаты лабораторной работы

1. Цели работы. Перед выполнением работы можно поставить перед собой, например, такие цели: 1) *обучения*: научиться строить ход лучей в трубе Галилея и выводить формулу для увеличения этого оптического прибора; 2) *развития*: совершенствовать экспериментальные умения; 3) *воспитания*: получить подтверждение

доказательной силы эксперимента, для чего убедиться в совпадении увеличений зрительной трубы, полученных разными методами.

2. Оборудование для выполнения эксперимента. *Основное оборудование:* 1) собирающая длиннофокусная линза с крепежом; 2) рассеивающая короткофокусная линза с крепежом; 3) труба или стержень для установки линз; 4) измерительная линейка с миллиметровыми делениями. *Вспомогательное оборудование:* 5) белый экран; 6) экран с решеткой; 7) рулетка с миллиметровыми делениями; 8) смартфон; 9) три штатива с муфтами и лапками; 10) демонстрационная линейка с сантиметровыми делениями. На рис. 1 показана только часть оборудования.

3. Пучок света в зрительной трубе Галилея. Идущий по оси трубы параллельный пучок света, выйдя из трубы, остается параллельным ее оси (рис. 2). Из геометрии: отношение диаметров этих пучков равно увеличению трубы:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{f_1}{f_2} = \Gamma.$$

4. Элементарная теория зрительной трубы Галилея. Ход лучей в трубе Галилея (рис. 3) станет значительно прозрачнее, если ограничиться преломлением в объективе и окуляре только того луча, который проходит через передний фокус объектива (рис. 7). В этом случае вывод формулы для увеличения трубы очевиден.

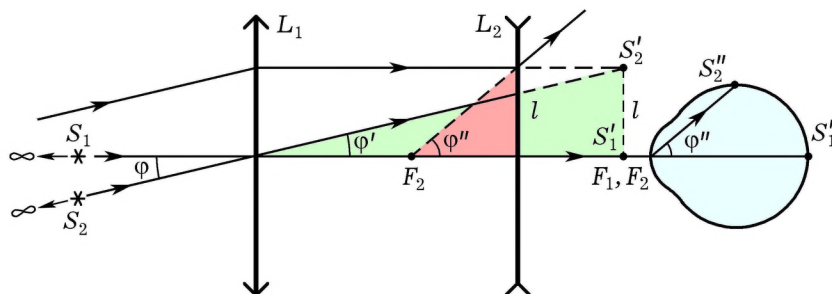


Рис. 7. Упрощенный ход лучей в трубе Галилея (передний фокус объектива на оптической схеме не обозначен)

5. Определение увеличения зрительной трубы методом фотографирования. В отчете должны быть представлены рядом фотографии демонстрационной линейки, сделанные камерой смартфона через трубу и без трубы (рис. 8).

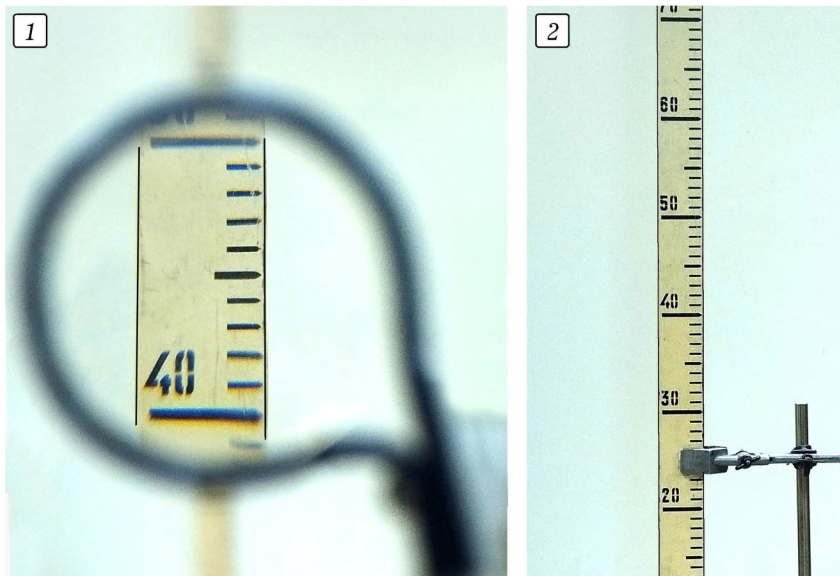


Рис. 8. Метод фотографирования в определении увеличения зрительной трубы

6. Обработка результатов эксперимента. В табл. 2 приведены возможные результаты непосредственных измерений и вычислений.

Таблица 2
Результаты измерений и вычислений

N	$L, \text{ см}$	$l, \text{ см}$	Γ	$\Delta\Gamma$	$\Delta\Gamma^2$	$\sigma_{\text{ср}}$
1	1	2,8	2,80	0,05	0,003	0,028
2	2	6,0	3,00	0,15	0,023	
3	3	9,0	3,00	0,15	0,023	
4	4	11,5	2,88	0,03	0,001	
5	5	14,2	2,84	0,01	0,000	
6	6	16,8	2,80	0,05	0,003	
7	7	19,5	2,79	0,06	0,004	
8	8	22,5	2,81	0,04	0,002	
9	9	25,2	2,80	0,05	0,003	
10	10	27,8	2,78	0,07	0,005	
Средние значения			2,85	0,07	0,007	

Обработка этих данным методом Стьюдента дает значения: $\Gamma = 2,85 \pm 0,06$ и $\varepsilon = 0,02$.

7. Экспериментальное обоснование справедливости формулы для увеличения зрительной трубы Галилея. Измерение фокусного расстояния объектива f_1 методом получения действительного изображения точечного источника, лежащего на его оси, дает значение $f_1 = 240 \pm 5$ мм.

Для оценки фокусного расстояния f_2 короткофокусного рассеивающего окуляра сквозь него с расстояния вытянутой руки смотрят на сетку из параллельных полос. Передвигают окуляр относительно сетки до тех пор, пока не получится уменьшенное в 2 раза изображение сетки (рис. 9). Расстояние между окуляром и сеткой в этом случае примерно равно фокусному расстоянию окуляра: $f_2 = 90 \pm 2$ мм.



Рис. 9. Измерение фокусного расстояния окуляра

Выполненные оценки фокусных расстояний объектива и окуляра, позволяют определить примерное значение увеличения зрительной трубы Галилея: $\Gamma = f_1/f_2 = 2,7 \pm 0,1$.

8. Оценка увеличения зрительной трубы методом визуального наблюдения. Обучающиеся без предварительной тренировки, как правило, с большим трудом определяют увеличение зрительной трубы при одновременном наблюдении одним глазом через трубу увеличенного изображения и другим — мимо трубы нормального изображения шкалы линейки. Важность этого метода в том, что он непосредственно использует определение увеличения оптического прибора, вооружающего глаз, как отношения углов зрения на предмет через оптический прибор и без прибора.

9. Оценка увеличения зрительной трубы методом измерения входного и выходного зрачков. Фокусные расстояния объектива и окуляра зрительной трубы определены в п.7: $f_1 = 240$ мм и $f_2 = 90$ мм. Если труба настроена на бесконечность, то ее длина, то есть расстояние между объективом и окуляром, должна быть равна $a = f_1 - f_2 = 150$ мм (рис. 6).

Тогда расстояние от окуляра до выходного зрачка трубы согласно формуле линзы

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f_2}$$

равно:

$$b = \frac{af_2}{a + f_2} = 56 \text{ мм.}$$

На этом расстоянии от окуляра между ним и объективом нужно расположить линейку с миллиметровыми делениями и сделать фотографию поля зрения. Если труба будет направлена на белый фон, то на снимке получатся только изображение линейки, окуляра и объектива трубы в окуляре, то есть выходного зрачка (рис. 10).

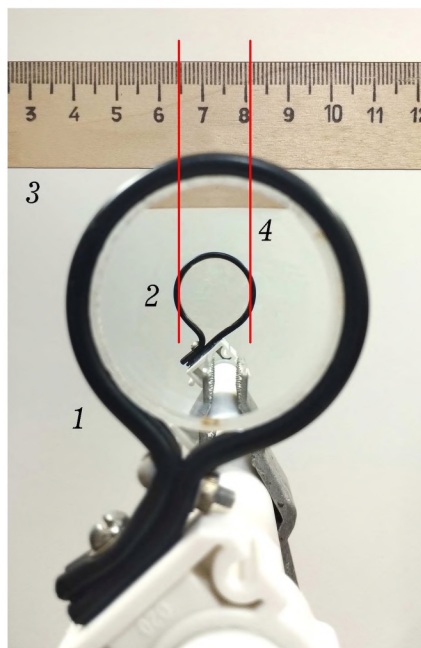


Рис. 10. Измерение диаметра выходного зрачка трубы Галилея: 1 — окуляр; 2 — изображение объектива, созданное окуляром; 3 — измерительная линейка; 4 — параллельные прямые, проведенные на фотографии для измерения диаметра выходного зрачка

10. Дополнительные вопросы.

1) *Увеличение оптического прибора, вооружающего глаз* — это отношение линейного размера изображения предмета на сетчатке глаза, полученного с помощью оптического прибора, к линейному размеру изображения на сетчатке, полученного без оптического прибора. Эквивалентное определение: это отношение тангенса угла зрения на предмет через прибор к тангенсу угла зрения на предмет без оптического прибора.

2) *Простейшая зрительная труба* — это труба Кеплера, состоящая из двух собирающих линз: длиннофокусного объектива и короткофокусного окуляра, передний фокус которого совпадает с задним фокусом объектива.

3) *Критерий Рэлея разрешающей способности оптического прибора*: две светящиеся точки предмета находятся на пределе разрешения, если максимум интенсивности дифракционной картины от одной

точки совпадает с первым минимумом интенсивности дифракционной картины от другой точки.

4) *Полезное увеличение оптического прибора, вооружающего глаз* — такое увеличение, при котором все точки, разрешенные объективом прибора, будут разрешены и глазом. Полезное увеличение телескопа не превышает 3000.

5) *Если труба Галилея собрана из двух очковых стекол $D_1 = +0,5$ дптр и $D_2 = -25$ дптр, то ее увеличение равно: $\Gamma = f_1/f_2 = D_2/D_1 = 50$.*

11. Заключение. Важной частью лабораторной работы является заключение, которое должно быть строго индивидуальным, раскрывать физическую сущность выполненного исследования, показывать полученные результаты, отражать отношение студента к проделанной работе. Формальная отписка, что цель работы достигнута, так как увеличение зрительной трубы Галилея найдено, неприемлема.

Авторы выражают благодарность И. А. Васильеву за помощь в работе.

Исследование выполнено на базе Федеральной инновационной площадки «Школа учебного физического эксперимента» по проекту «Методология создания и внедрения современных учебных физических приборов и опытов для урочной и внеурочной деятельности по физике в средней школе и в педагогическом вузе» (ХУИА-2024-0030) при финансовой поддержке Министерства просвещения РФ в рамках госзадания, № НИОКТР 1023040600021-1-5.3.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майер В. В., Курбоналиев К. М. Учебная модель трубы Галилея. Дидактическое исследование: Физический этап // Учебная физика. — 2022. — № 3. — С. 17–27.
2. Вараксина Е. И. Основные этапы научного исследования учебного физического эксперимента // Учебная физика. — 2022. — № 3. — С. 61–67.
3. Князев С. И. Физический практикум по оптике. Часть 3. — Свердловск, 1962. — 448 с.
4. Лабораторные занятия по физике: Учебное пособие / Под ред. Л. Л. Гольдина. — Л.–М.: Наука, 1983. — 704 с.
5. Поль Р. В. Оптика и атомная физика. — М.: Наука, 1966. — 552 с.
6. Кравченко Н. С., Ревинская О. Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. — 88 с.
7. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Т. 1. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. — 662 с.
8. Тудоровский А. И. Теория оптических приборов. Т. 2. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1952. — 568 с.

Глазовский государственный
инженерно-педагогический
университет имени В. Г. Короленко

Поступила в редакцию 01.03.24.