

## -2. Линзы и лазер Оборудование

### Условие

### Задание 11-2. Линзы и лазер

**Оборудование:** собирающая и рассеивающая линзы на держателях, экран на держателе, лазер на держателе, источник питания для лазера, мерная лента, линейка (30 – 40см), транспортир.

*Внимание!!!* Лазер включайте только на время измерений. При длительном включении лазер может перегореть.\*

### Часть 1. Рассеивающая линза и лазер

**1.1** Расположите вдоль одной прямой лазер, рассеивающую линзу и экран. Включите лазер, пронаблюдайте образование освещённого пятна на экране. Сделайте схематический рисунок экспериментальной установки с указанием хода лучей и обозначением необходимых физических величин. Получите уравнение зависимости  $D(l_1)$ :  $D$  – линейный размер освещённого пятна на экране,  $l_1$  – расстояние между рассеивающей линзой и экраном. Используйте так же следующие обозначения:  $F_p$  – фокусное расстояние рассеивающей линзы,  $\delta$  – диаметр поперечного сечения лазерного луча.

**1.2** Исследуйте зависимость  $D(l_1)$  экспериментально. Результаты эксперимента представьте таблично и графиком линеаризованной зависимости.

**1.3** По экспериментальным данным определите диаметр поперечного сечения лазерного луча  $\delta$ , и фокусное расстояние рассеивающей линзы  $F_p$ . Результаты запишите в виде:  $F_p = \langle F_p \rangle \pm \Delta F_p$ ,  $\delta = \langle \delta \rangle \pm \Delta \delta$ .

### Часть 2. Две линзы и лазер

**2.1** Расположите вдоль одной прямой лазер, рассеивающую и собирающую линзы (на некотором расстоянии друг от друга) и экран. Включите лазер, получите освещённое пятно на экране наименьшего диаметра. Сделайте схематический рисунок экспериментальной установки с указанием хода лучей и обозначением необходимых физических величин. Получите уравнение зависимости  $f_1(l_2)$ :  $f_1$  – расстояния между собирающей линзой и экраном,  $l_2$  – расстояния между рассеивающей и собирающей линзой. Используйте так же следующие обозначения:  $F_c$  – фокусное расстояние собирающей линзы,  $F_p$  – фокусное расстояние рассеивающей линзы. \*Подсказка: уравнение может быть получено в неявном виде. Для собирающей линзы справедливо уравнение  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ , где  $F$  - фокусное расстояние,  $d$  - расстояние от предмета до линзы,  $f$  - расстояние от изображения до линзы.\*

**2.2** Исследуйте зависимость  $f_1(l_2)$  экспериментально. Результаты эксперимента представьте таблично и графиком линеаризованной зависимости.

**2.3** По результатам эксперимента определите фокусное расстояние собирающей линзы  $F_c$ . Результаты запишите в виде:  $F_c = \langle F_c \rangle \pm \Delta F_c$ ,

### Часть 3. Поворот собирающей линзы (пункты 3.1 и 3.2 теоретические)

**3.1** Сделайте рисунок: покажите ход параллельного пучка лучей падающего на собирающую линзу вдоль главной оптической оси. На рисунке укажите фокусы линзы. (Достаточно показать ход двух крайних лучей пучка с одной и другой стороны от главной оптической оси).\*

**3.2** Сделайте рисунок: покажите ход параллельного пучка лучей падающего на собирающую линзу под углом  $30^\circ$  к главной оптической оси. На рисунке обозначьте расстояние  $f_3$  от оптического центра до побочного фокуса линзы, в котором сходится пучок лучей. Получите соотношение между  $f_3$  и фокусным расстоянием  $F_c$ .

**3.3** Расположите вдоль одной прямой лазер собирающую линзу и экран. Перемещая экран, получите освещённое пятно наименьшего диаметра. Измерьте расстояние  $F_c$ .

**3.4** Поверните линзу относительно лазерного луча на угол  $30^\circ$ . Перемещая экран, получите на экране освещённое пятно наименьшего диаметра в данном случае. Измерьте расстояние  $f_3$  от оптического центра линзы до пятна на экране.

**3.5** Соотнесите результат п. 3.4 с результатом п.3.2. Дайте объяснение полученным результатам. Какие параметры нужно учесть, чтобы теория была близка к эксперименту.

## Решение

### Задание 11-2. Линзы и лазер

#### Решение Часть 1.

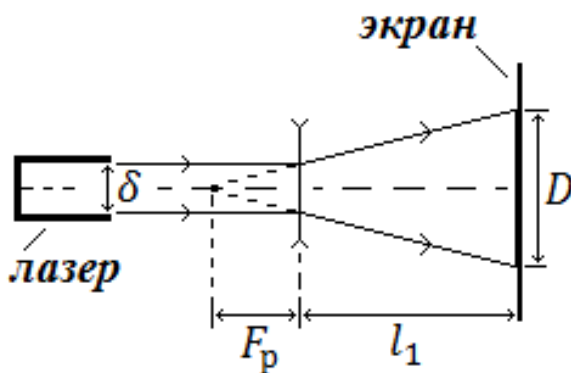
#### 1.1

Из подобия треугольников получим:

$$\frac{\delta}{F_p} = \frac{D}{F_p + l_1}. \quad (1)$$

После преобразований получим:

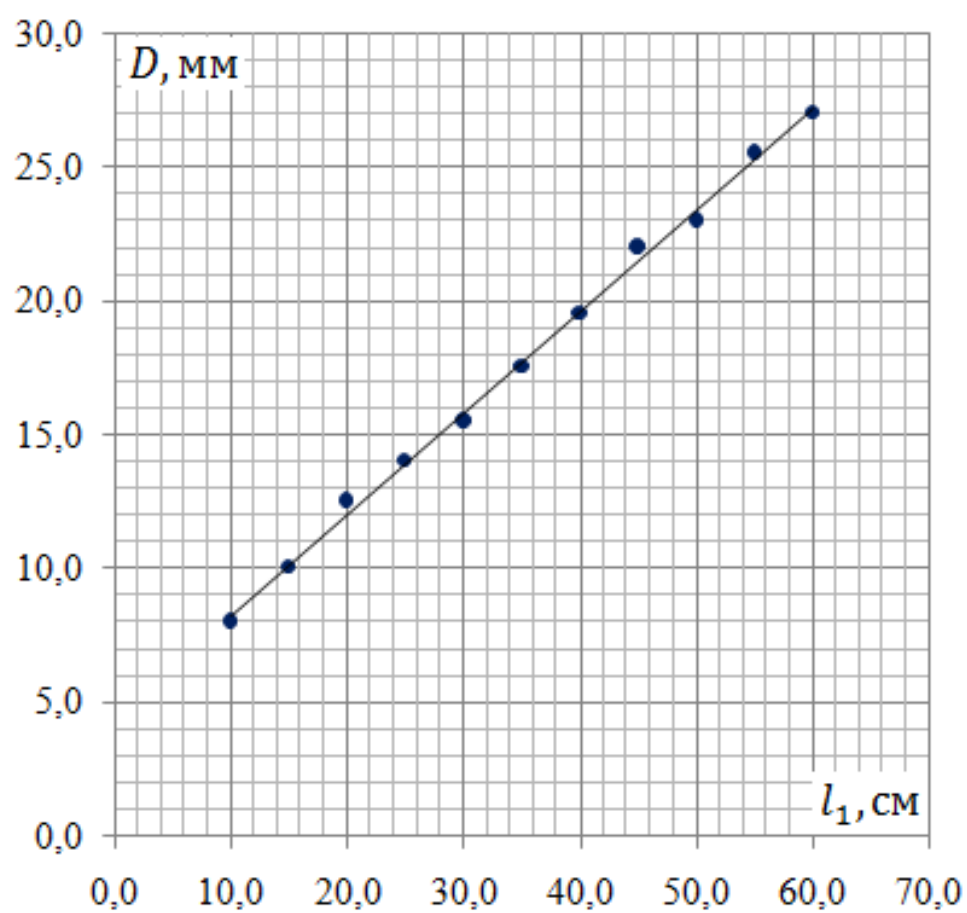
$$D = \delta + \frac{\delta}{F_p} l_1. \quad (2)$$



**1.2** Результаты эксперимента представлены в таблице 1 и на графике 1. Уравнение (2) представляет собой линеаризованную зависимость  $D(l_1)$ , поэтому построен график по уравнению (2).

Таблица 1.

|        | $l_1$ , см            | $D$ , мм                 |
|--------|-----------------------|--------------------------|
|        | 10,0                  | 8,0                      |
|        | 15,0                  | 10,0                     |
|        | 20,0                  | 12,5                     |
|        | 25,0                  | 14,0                     |
|        | 30,0                  | 15,5                     |
|        | 35,0                  | 17,5                     |
|        | 40,0                  | 19,5                     |
|        | 45,0                  | 22,0                     |
|        | 50,0                  | 23,0                     |
|        | 55,0                  | 25,5                     |
|        | 60,0                  | 27,0                     |
| Сред.  | 35,0                  | 17,7                     |
| Дисп.  | 250                   | 36,0                     |
| Ковар. |                       | 94,8                     |
|        | $\langle a_1 \rangle$ | $\langle \delta \rangle$ |
|        | 0,379                 | 4,4                      |
|        | $\Delta a_1$          | $\Delta \delta$          |
|        | 0,012                 | 0,5                      |



\*\*График 1. Зависимость  $D(l_1)$ \*\*

2023-2024 учебный год

1.3 Введём в уравнении (2) обозначение:

$$a_1 = \frac{\delta}{F_p}. \quad (3)$$

Используя МНК определим  $\langle a_1 \rangle$  и  $\langle \delta \rangle$  (таблица 1, третья строчка снизу) и абсолютные погрешности  $\Delta a_1$  и  $\Delta \delta$  (таблица 1, последняя строчка). Из (3) получим:

$$\langle F_p \rangle = \frac{\langle \delta \rangle}{\langle a_1 \rangle} = \frac{4,4 \text{ мм}}{0,379 \frac{\text{мм}}{\text{см}}} = 11,6 \text{ см}. \quad (4)$$

$$\varepsilon_{F_p} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a_1}{\langle a_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta}{\langle \delta \rangle}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,012 \frac{\text{мм}}{\text{см}}}{0,379 \frac{\text{мм}}{\text{см}}}\right)^2 + \left(\frac{0,5 \text{ мм}}{4,4 \text{ мм}}\right)^2} = 0,12 = 12\%, \quad (5)$$

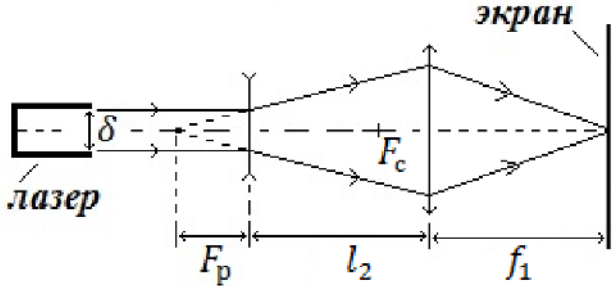
$$\Delta F_p = \langle F_p \rangle \cdot \varepsilon_{F_p} = 11,6 \text{ см} \cdot 0,12 = 1,4 \text{ см}. \quad (6)$$

$$\varepsilon_\delta = \frac{\Delta \delta}{\langle \delta \rangle} = \frac{0,5 \text{ мм}}{4,4 \text{ мм}} = 0,11 = 11\%. \quad (7)$$

$$F_p = (11,6 \pm 1,4) \text{ см}, \quad \delta = (4,4 \pm 0,5) \text{ мм}.$$

## Часть 2

### 2.1

|                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Применяя уравнение тонкой линзы (указано в подсказке), получим:</p> $\frac{1}{F_c} = \frac{1}{F_p + l_2} + \frac{1}{f_1} \quad (8).$ <p>Из (8) получим:</p> $\frac{1}{f_1} = \frac{1}{F_c} - \frac{1}{F_p + l_2} \quad (9).$ |  <p style="text-align: center;">Рисунок 2</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Применяя уравнение тонкой линзы (указано в подсказке), получим:

$$\frac{1}{F_c} = \frac{1}{F_p + l_2} + \frac{1}{f_1}. \quad (8)$$

Из (8) получим:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{F_c} - \frac{1}{F_p + l_2}. \quad (9)$$

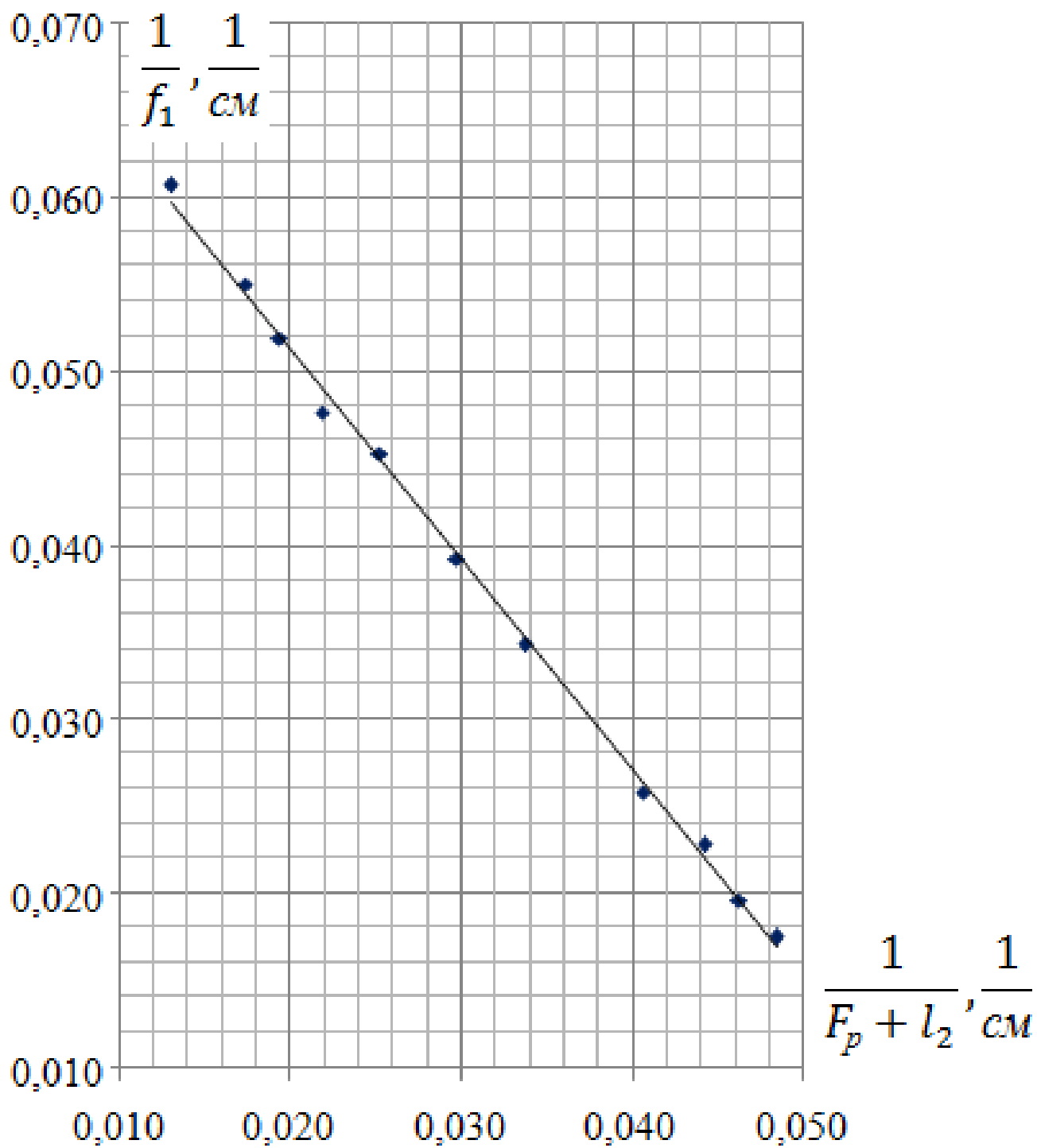
**2.2** Результаты эксперимента представлены в таблице 2 и на графике 2. Уравнение (9) представляет собой линеаризованную зависимость  $f_1(l_2)$  в виде  $\frac{1}{f_1} \left( \frac{1}{F_p + l_2} \right)$ .

2023-2024 учебный год

**Таблица 2.**

| $l_2$ , см | $f_1$ , см | $\frac{1}{F_p + l_2}, \frac{1}{\text{см}}$ | $\frac{1}{f_1}, \frac{1}{\text{см}}$ |
|------------|------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| 65,0       | 16,5       | 0,0131                                     | 0,0606                               |
| 46,0       | 18,2       | 0,0174                                     | 0,0549                               |
| 40,0       | 19,3       | 0,0194                                     | 0,0518                               |
| 34,0       | 21,0       | 0,0219                                     | 0,0476                               |
| 28,0       | 22,1       | 0,0253                                     | 0,0452                               |
| 22,0       | 25,5       | 0,0298                                     | 0,0392                               |
| 18,0       | 29,2       | 0,0338                                     | 0,0342                               |
| 13,0       | 38,8       | 0,0407                                     | 0,0258                               |
| 11,0       | 44,0       | 0,0442                                     | 0,0227                               |
| 10,0       | 51,2       | 0,0463                                     | 0,0195                               |
| 9,0        | 57,3       | 0,0485                                     | 0,0175                               |
| Сред.      |            | 0,0309                                     | 0,0381                               |
| Дисп.      |            | 0,000143                                   | 0,000209                             |
| Ковар.     |            |                                            | -0,000173                            |
|            |            | $\langle a_2 \rangle$                      | $\langle b_2 \rangle$                |
|            |            | -1,2                                       | 0,0754                               |
|            |            | $\Delta a_2$                               | $\Delta b_2$                         |
|            |            | 0,04                                       | 0,0012                               |

\*\*График 2. Линеаризованная зависимость  $f_1(l_2)$ \*\*



**2.3** Введём в уравнении (9) обозначение:

$$b_2 = \frac{1}{F_c}. \quad (10)$$

Используя МНК определим  $\langle b_2 \rangle$  (таблица 2, третья строчка снизу) и абсолютную погрешность  $\Delta b_2$  (таблица 1, последняя строчка).

Из (10) получим:

$$\langle F_c \rangle = \frac{1}{\langle b_2 \rangle} = \frac{1}{0,0754 \frac{1}{\text{см}}} = 13,3 \text{ см.} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{F_c} = \varepsilon_{b_2} = \frac{\Delta b_2}{\langle b_2 \rangle} = \frac{0,0012 \frac{1}{\text{см}}}{0,0754 \frac{1}{\text{см}}} = 0,016 = 1,6\%, \quad (12)$$

$$\Delta F_c = \langle F_c \rangle \cdot \varepsilon_{F_c} = 13,3 \text{ см} \cdot 0,016 = 0,2 \text{ см.} \quad (13)$$

$$F_c = (13,3 \pm 0,2) \text{ см,}$$

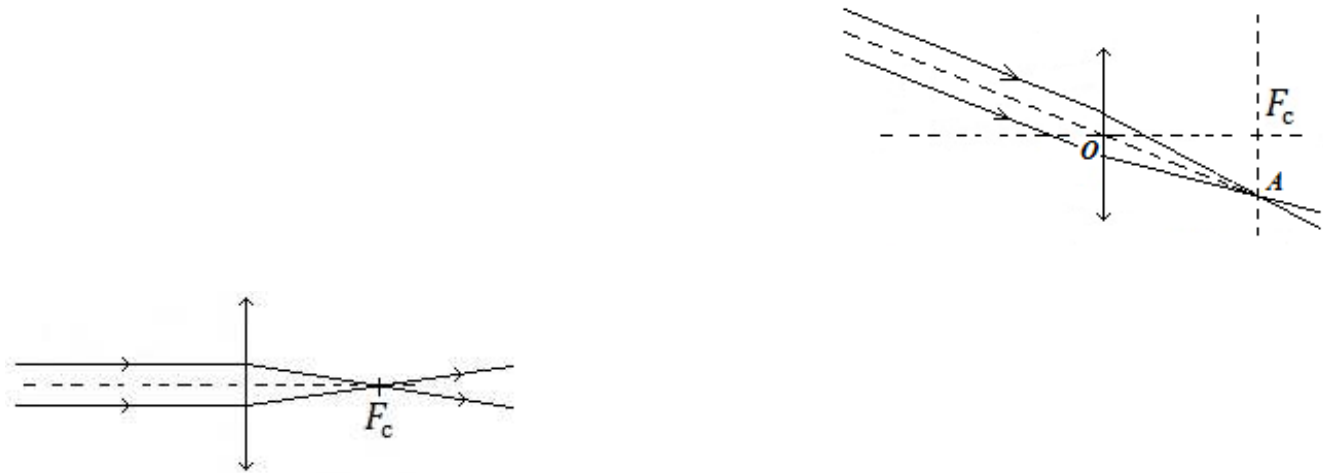
2023-2024 учебный год

### Часть 3.

**3.1** Смотри рисунок 3. **3.2** Смотри рисунок 4.  $f_3 = \text{OA}$  (14). Из прямоугольного треугольника  $\text{OF}_c\text{A}$  получаем:

$$f_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} F_c = 1,15 F_c \quad (15)$$

**3.3**  $F_c = (14,5 \pm 0,1) \text{ см.}$  **3.4**  $f_3 = (10,2 \pm 0,1) \text{ см.}$



**3.5** В соответствии с п. 3.2 мы должны были бы получить  $f_3$  больше чем  $F_c$  в 1,15 раза, а в реальности получили меньше в 1,42 раза. Это несоответствие теории с экспериментом вызвано тем, что в п. 3.2 при построении мы пользовались свойством параксиальных лучей, но лучи, которые распространяются под углом к главной оптической оси больше чем  $10^\circ$  нельзя считать параксиальными. Для верного построения хода лучей необходимо учитывать диаметр пучка, радиусы поверхностей линзы, её толщину в центре, показатель преломления линзы, угол падения лучей на поверхность линзы. Если учесть все эти параметры, то мы получим теоретическое значение  $f_3$  близкое к экспериментальному.