

**Вопросы к практическим занятиям по дисциплине**  
**Методы и приборы для измерения параметров оптических систем**  
**связи и сенсорных систем. Часть 1**

1. Задачи и способы осуществления входного контроля.
2. Особенности приемосдаточных испытаний волоконно-оптических линейных трактов.
3. Приборы и методика измерения числовой апертуры оптических волокон.
4. Приборы и методика измерения хроматической дисперсии оптических волокон.
5. Приборы и методика измерения поляризационно-модовой дисперсии оптических волокон.
6. Приборы и методика измерения межмодовой дисперсии оптических волокон.
7. Приборы и методика измерения длины волны отсечки оптических волокон.
8. Приборы и методика измерения длины волны нулевой дисперсии оптических волокон.
9. Приборы и методика измерения параметров оптических разветвителей.
10. Приборы и методика измерения параметров мультиплексоров и демультиплексоров в волновой области.
11. Приборы и методика измерения параметров оптических усилителей.
12. Причины возникновения и способы уменьшения ширины мертвой зоны рефлектометра.
13. Способы увеличения динамического диапазона рефлектометра.
14. Способы улучшения разрешающей способности рефлектометра.
15. Способы уменьшения времени измерения рефлектограммы.
16. Методические погрешности рефлектометрических измерений.
17. Классификация методов и приборов для измерений, выполняемых в процессе строительства волоконно-оптических телекоммуникационных систем.
18. Классификация методов и приборов для измерений, выполняемых в процессе эксплуатации волоконно-оптических телекоммуникационных систем.
19. Методы и приборы для измерения оптической мощности.
20. Принцип действия, схемы и конструкции измерительных источников излучения.
21. Методы и приборы для измерения затухания в проходящем свете.
22. Методы и приборы для измерения параметров качества связи в линейных цифровых трактах волоконно-оптических телекоммуникационных систем: коэффициента ошибок, ширины глаз-диаграммы,  $Q$  – фактора, энергетического запаса.
23. Метод обратного рэлеевского рассеяния и френелевские отражения.
24. Схема и параметры оптического рефлектометра, рефлектограмма.
25. Измерение по рефлектограмме длины оптического волокна, расстояний до неоднородностей.
26. Измерение по рефлектограмме вносимого затухания между точками линейного тракта, коэффициента затухания на однородных участках линейного волоконно-оптического тракта.
27. Измерение по рефлектограмме потерь в локальных неоднородностях. Методические погрешности при односторонних измерениях.
28. Динамический диапазон результатов рефлектометрических измерений. Зависимость от параметров рефлектометра и параметров оптического волокна.
29. Мертвая зона для результатов рефлектометрических измерений. Зависимость от параметров рефлектометра и параметров оптического волокна.
30. Разрешающая способность рефлектометрических измерений. Зависимость от параметров рефлектометра и параметров оптического волокна.
31. Методы поверки приборов для измерения оптической мощности и затухания.
32. Методы поверки рефлектометрических приборов.

**Практические занятия по дисциплине**  
**Методы и приборы для измерения параметров оптических систем**  
**связи и сенсорных систем**  
**часть 2**

**Ход занятия.**

В ходе проведения занятия необходимо рассмотреть ряд качественных задач и далее решить несколько расчетных задач по мере возрастания их сложности. Прежде чем приступить к решению задач, необходимо повторить основные понятия и определения.

**Пример качественных задач:**

1. Что такое когерентные и некогерентные электромагнитные волны?
2. Что представляют собой когерентные источники в опыте Юнга?
3. В максимумах интерференционной картины от двух когерентных источников освещенность в 4 раза превышает освещенность от одного. Нет ли здесь нарушения закона сохранения энергии?

**Примеры решения расчетных задач:**

**Задача 1.**

В опыте Юнга два когерентных источника  $S_1$  и  $S_2$  расположены на расстоянии  $d = 1$  мм друг от друга. На расстоянии  $L = 1$  м от источника помещается экран. Найдите расстояние между соседними интерференционными полосами вблизи середины экрана (точка А), если источники посылают свет длины волны  $\lambda = 600$  нм.

**Решение:**

Интерференционная картина на экране состоит из чередующихся темных и светлых полос, параллельных щелям  $S_1$  и  $S_2$ . Интерференционная картина симметрична относительно центральной полосы, проходящей через точку А (рис. 1). Центральная полоса светлая, она соответствует разности хода  $\Delta = 0$ .

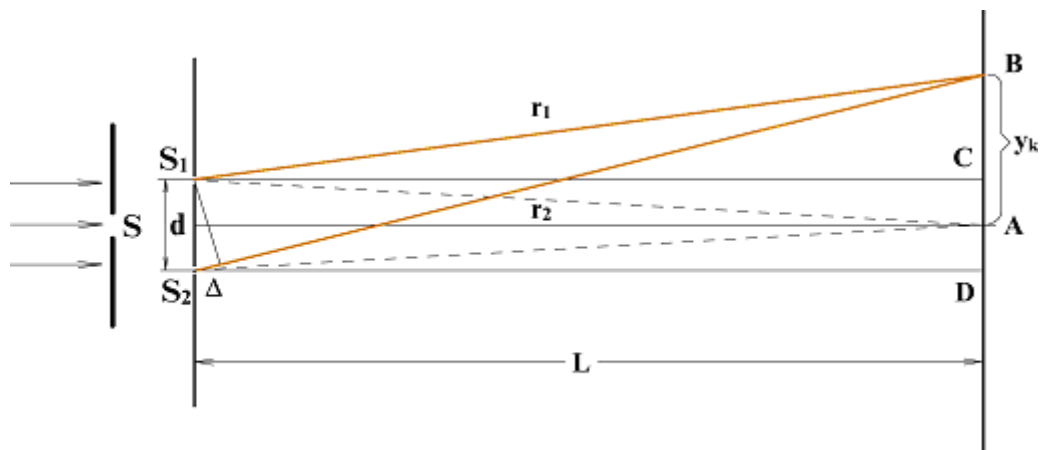


Рис. 1

В точках интерференционных максимумов оптическая разность хода

$$\Delta = k\lambda, \text{ где } k=0, 1, 2, \dots; \quad (1)$$

Условие интерференционных минимумов имеет вид:

$$\Delta = k\lambda + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}; \quad (2)$$

Предположим, что в точке В находится k-й максимум на расстоянии  $y_k$  от центральной полосы. Ему соответствует разность хода  $\Delta = r_2 - r_1 = k\lambda$ .

Из треугольника  $S_1BC$  видно, что  $r_1^2 = L^2 + \left(y_k - \frac{d}{2}\right)^2$ , а из треугольника  $S_2BD$

видно, что  $r_2^2 = L^2 + \left(y_k + \frac{d}{2}\right)^2$ .

Из двух последних уравнений получим:

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 + r_1)(r_2 - r_1) = \left(y_k + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(y_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Учтём, что  $r_2 \approx r_1 \approx L$ ;  $r_2 - r_1 = \Delta$ . Тогда  $2L \cdot \Delta = 2y_k \cdot d$ , откуда:

$$y_k = \frac{\Delta}{d} \cdot L; \quad (3)$$

Используя для максимумов условие (1), получим:

$$y_{k_{\max}} = \frac{k\lambda}{d} \cdot L;$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  соответствуют интерференционным максимумам, расположенным выше точки А, а максимумам, расположенным ниже точки А, соответствуют  $k = -1, -2, -3, \dots$ . Точке А соответствует центральный максимум ( $k = 0$ ).

Используя условие интерференционных минимумов (2), можно найти их расстояния от центральной полосы по формуле (3):

$$y_{k_{\min}} = (2k+1) \frac{\lambda L}{2d};$$

Расстояние между соседними интерференционными максимумами (минимумами) называется шириной полосы и соответствует изменению  $k$  на единицу, то есть :

$$\Delta y = y_{k+1} - y_k = \frac{\lambda L}{d} = 0,6 \text{ мм};$$

Ширина темных и светлых полос одинакова.

*Ответ:*

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d} = 0,6 \text{ мм};$$

## Задача 2.

В опыте Юнга интерференционная картина по мере удаления от середины размывается, и при  $k = 4$  полосы исчезают. Почему?

*Решение:*

В опыте Юнга интерференционная картина представляет чередование интерференционных максимумов и минимумов в виде полос, параллельных щелям  $S_1$  и  $S_2$ . В центре интерференционной картины расположена светлая полоса ( $k = 0$ ). По обе стороны от центральной полосы расположены максимумы  $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$  порядков интерференции. Разность хода между интерферирующими волнами по мере удаления от центральной полосы увеличивается. При этом по мере удаления от центра ухудшается видность и четкость интерференционной картины, полосы размываются и исчезают, по условию последний максимум наблюдается при  $k = 4$ . Исчезновение полос означает, что колебания, пришедшие от двух источников  $S_1$  и  $S_2$ , некогерентны. Пока их разность хода не превышала  $4 \lambda$ , они были когерентны. Следовательно, максимальная разность хода, при которой наблюдается интерференция, будет равна:

$$l_{\text{ког}} = m_{\text{max}} \lambda = 4 \lambda ;$$

Величина  $l_{\text{ког}}$  называется длиной когерентности. Если оптическая разность хода превышает длину когерентности, интерференционная картина не наблюдается.

### Задача 3.

Покажите, что при преломлении в призме с малым преломляющим углом  $\alpha$  и показателем преломления  $n$  луч отклоняется на угол  $\delta \approx (n - 1)\alpha$  независимо от угла падения, если угол падения также мал. Призма находится в воздухе,  $n_0 = 1$ .

*Решение:*

По построению  $\delta$ -внешний угол треугольника DCB (рис. 2), он равен сумме внутренних углов, не смежных с ним:

$$\delta = \varphi - \beta + \beta_1 - \varphi_1;$$

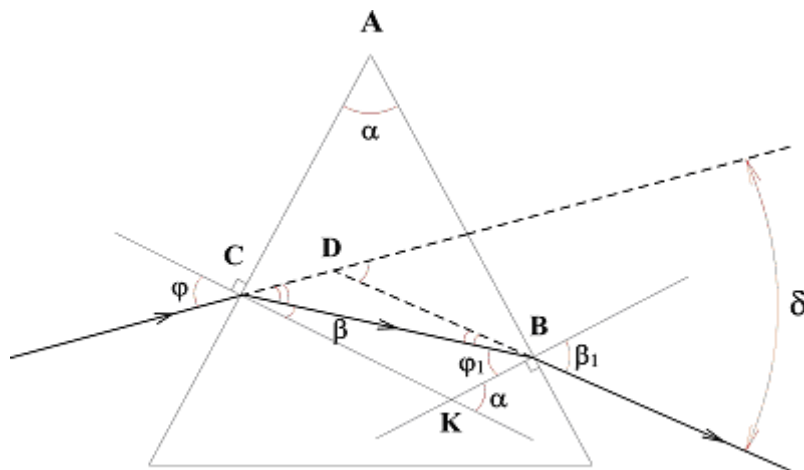


Рис.2

Согласно закону преломления,

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin \beta} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \varphi_1}.$$

По условию угол  $\varphi$ , а значит и  $\beta$  малы, то есть  $\sin \varphi \approx \varphi$ ,  $\sin \beta \approx \beta$ , (выраженному в радианах), тогда  $n\beta = \varphi$ ,  $n\varphi_1 = \beta_1$ . Подставив значения  $\varphi$  и  $\beta_1$  в формулу для  $\delta$ , получим :

$$\delta = \varphi - \beta + \beta_1 - \varphi_1 = n\beta - \beta + n\varphi_1 - \varphi_1 = (n - 1)(\beta + \varphi_1).$$

Из треугольника СВК:  $\beta + \varphi_1 = \alpha$  ( $\alpha$ - внешний угол, равный преломляющему углу призмы по построению). Таким образом,

$$\delta \approx \alpha(n - 1).$$

#### Задача 4.

Найдите число полос интерференции  $N$ , получающихся с помощью бипризмы, если показатель преломления бипризмы  $n = 1,5$ , преломляющий угол  $\alpha = 2 \cdot 10^{-3}$  рад, длина волны источника  $\lambda = 600$  нм. Расстояние от источника до бипризмы равно  $a = 1$  м, расстояние от бипризмы до экрана равно  $b = 4$  м.

*Решение:*

Лучи от источника  $S$ , падающие на бипризму, после преломления отклоняются от первоначального направления на угол  $\delta \approx \alpha(n-1)$  (см. Задача 3). Продолжение этих лучей до точки пересечения дает изображение двух мнимых источников  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 3). Они являются когерентными источниками, поэтому в области перекрытия АВ когерентных волн, распространяющихся от этих источников, на экране наблюдается интерференционная картина в виде чередующихся темных и светлых полос, как и в опыте Юнга. Центральный максимум интерференционной картины ( $k = 0$ ) проходит через точку  $O$  экрана. Максимумы более высоких порядков находятся на расстоянии  $y_k$  от центра (см. Задача 1).

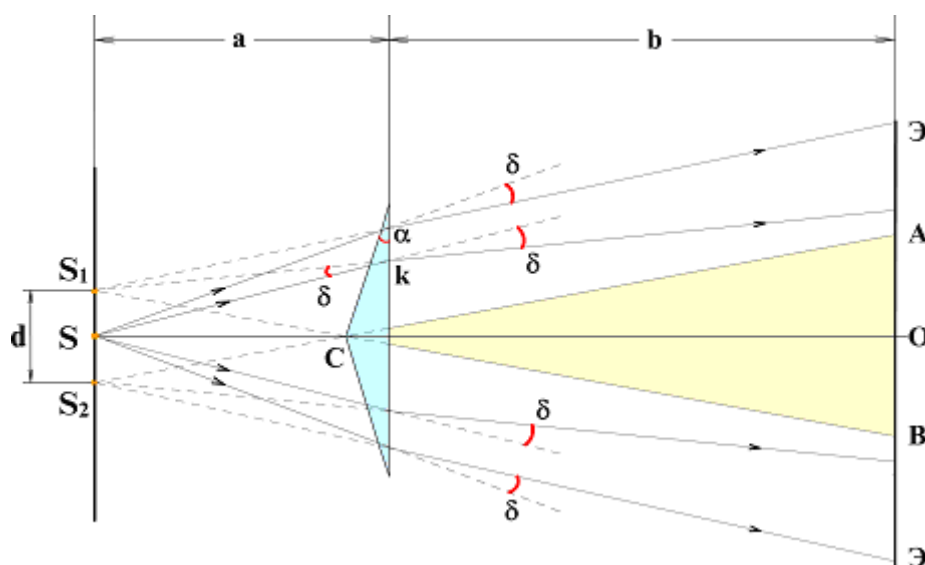


Рис.3

Ширина полосы :

$$\Delta y = \frac{\lambda L}{d} .$$

Здесь  $L = a + b$  расстояние от источников до экрана,  $d$  - расстояние между мнимыми источниками. Из треугольника  $SS_1K$ :



$$S_1S = d/2 \approx a \cdot \delta \approx a \cdot \alpha(n-1), \quad d \approx 2 \cdot a \cdot \alpha(n-1).$$

Тогда ширина интерференционной полосы:

$$\Delta y = \frac{\lambda \cdot (a+b)}{2a \cdot \alpha(n-1)}.$$

Число интерференционных полос в области интерференции  $AB$  равно:

$$N = \frac{AB}{\Delta y}.$$

Величину области перекрытия  $AB$  найдем из подобных треугольников  $CS_1S$  и  $COB$ :

$$AB = \frac{b \cdot d}{a} = 2b \cdot \alpha(n-1).$$

Число наблюдаемых полос интерференции будет равно:

$$N = \frac{4ab\alpha^2(n-1)^2}{\lambda(a+b)} \approx 5.$$

Ответ:  $N = \frac{4ab\alpha^2(n-1)^2}{\lambda(a+b)} \approx 5.$

### Задача 5.

В опыте Ллойда (рис. 4) световая волна, исходящая непосредственно из источника  $S$  (узкой щели), интерферирует с волной, отраженной от зеркала  $3$ . В результате на экране  $\mathcal{E}$  образуется система интерференционных полос. Расстояние от источника до экрана  $L = 100$  см. При некотором положении источника ширина интерференционной полосы на экране  $\Delta y = 0,25$  мм, а после того как источник отодвинули от плоскости зеркала на  $h = 0,6$  мм, ширина полос уменьшилась в  $\eta = 1,5$  раза. Найдите длину  $\lambda$  световой волны.

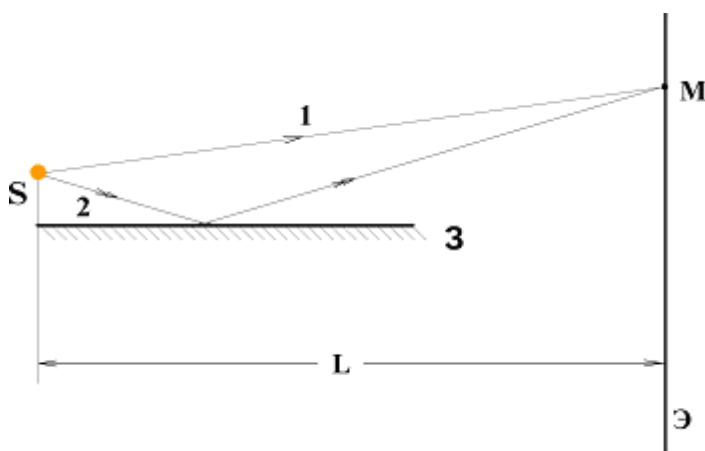


Рис. 4

*Решение:* В точке  $M$  интерферируют две когерентные волны 1 и 2, исходящие из источника  $S$ . По построению волну 2 можно считать исходящей из источника  $S'$  являющегося мнимым изображением источника  $S$  в зеркале  $3$ . Они симметрично расположены относительно плоскости зеркала, обозначим расстояние между ними  $SS' = d$ . Если зеркало  $S$  отодвинуть на  $h$ , то новое расстояние между  $S_1S'_1$  равно  $d_1 = d + 2h$  (рис. 5). Для определения длины волны  $\lambda$  используем выражение для ширины полосы из опыта Юнга, применив его для двух расстояний между источниками.

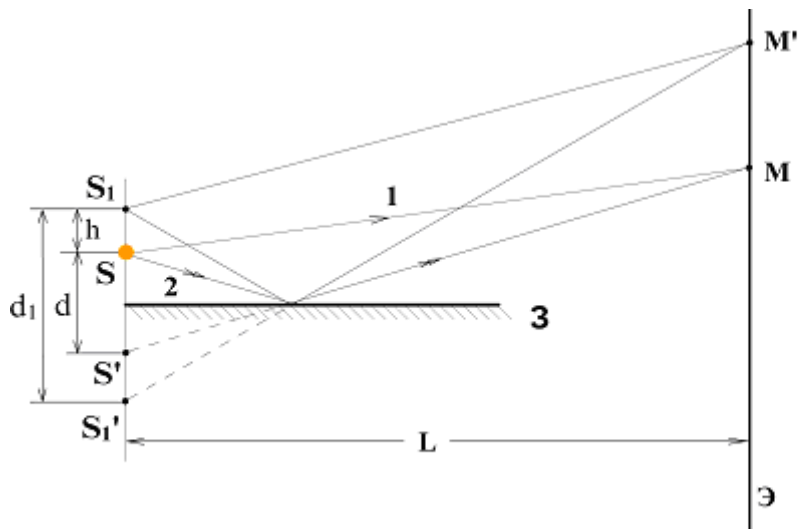


Рис.5

$$\Delta y = \lambda L / d; (4).$$

$$\Delta y_1 = \frac{\lambda L}{d_1} = \frac{\lambda L}{d + 2h}; (5).$$

По условию  $\Delta y = \eta \Delta y_1$ , тогда  $\frac{\lambda L}{d} = \eta \frac{\lambda L}{d + 2h}$ . Выразим отсюда

$$d = \frac{2h}{\eta - 1}; (6)$$

Подстановка (6) в (4) дает:

$$\lambda = \frac{2h\Delta y}{L(\eta - 1)} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 600 \text{ нм};$$

Ответ:  $\lambda = \frac{2h\Delta y}{L(\eta - 1)} = 600 \text{ нм}.$

### Задача 6.

На рис. 6 показана схема интерферометра для измерения показателей преломления прозрачных веществ. Здесь  $S$  - узкая щель, освещаемая монохроматическим светом  $\lambda = 589$  нм,  $K$  - коллиматор, дающий параллельный пучок лучей, 1 и 2 - две одинаковые трубки с воздухом, длина каждой из которых  $\ell = 10,0$  см,  $D$  - диафрагма с двумя щелями  $S_1$  и  $S_2$ . Когда воздух в трубке 1 заменили аммиаком, то интерференционная картина на экране  $\mathcal{E}$  сместилась вверх на  $N = 17$  полос. Показатель преломления воздуха  $n = 1,000277$ . Определите показатель преломления аммиака.

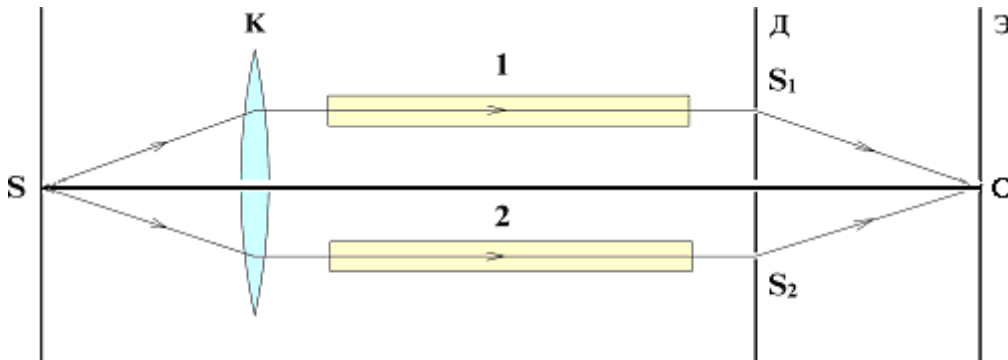


Рис. 6

*Решение:* Волны, распространяющиеся от щелей  $S_1$  и  $S_2$ , являются когерентными. На экране  $\mathcal{E}$  наблюдается интерференционная картина чередующихся темных и светлых полос. Центральная светлая полоса проходит через точку  $O$  и соответствует оптической разности хода  $\Delta = 0$ , если трубки 1 и 2 заполнены воздухом. Если в трубке 1 воздух заменить аммиаком, показатель преломления  $n_1$  которого больше  $n$ , то центр интерференционной картины сместится вверх на  $N$  полос в точку, соответствующую разности хода, равной нулю, то есть

$$(n_1 - n)\ell = N\lambda.$$

Отсюда

$$n_1 = N \frac{\lambda}{\ell} + n = 1,000377.$$

Заметим, что интерференционный метод определения показателя преломления является высокоточным методом.

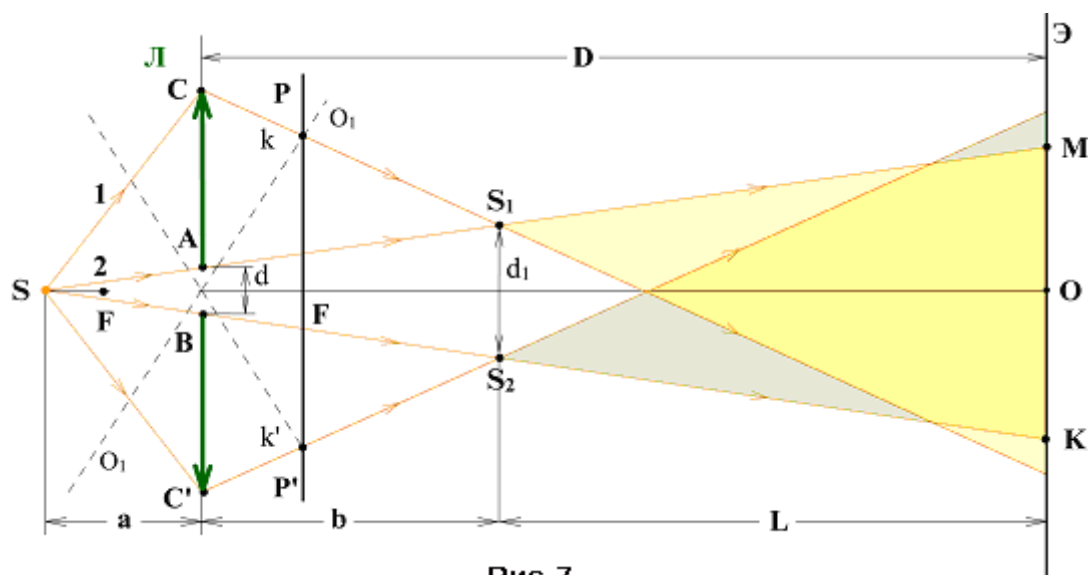
*Ответ:*  $n_1 = N \frac{\lambda}{\ell} + n = 1,000377$  .

### Задача 7.

Собирающая линза с фокусным расстоянием  $F = 10$  см разрезана пополам и половинки раздвинуты на расстояние  $d = 0,5$  мм (билинза Бийе). Оцените число интерференционных полос на экране, расположенном за линзой на расстоянии  $D = 60$  см, если перед линзой имеется точечный источник монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 500$  нм, удаленный от нее на расстояние  $a = 15$  см.

*Решение:*

Каждая из половинок билинзы Бийе дает изображение источника  $S$ . Верхняя половина дает изображение  $S_1$ , нижняя дает изображение  $S_2$  (рис. 7). Чтобы получить изображение  $S_1$ , выберем два луча: первый луч  $SC$  после преломления в линзе пересечет фокальную плоскость  $PP$  в точке  $K$ , получившейся от пересечения с фокальной плоскостью побочной оптической оси  $O_1O_1$ , параллельной лучу  $SC$ . Вторым лучом  $SA$  проходит, не преломляясь, через точку  $A$  до пересечения с первым лучом в точке  $S_1$ , являющейся изображением  $S$  в верхней половине билинзы Бийе. Аналогично построим изображение  $S_2$ .



Источники  $S_1$  и  $S_2$  когерентны, поэтому в области пересечения световых волн от этих источников на экране получим интерференционную картину как в опыте Юнга.

Число полос на экране будет равно :

$$N = \frac{MK}{\Delta y}$$

Ширина полосы  $\Delta y = \frac{\lambda \cdot L}{d_1}$  (см. Задача 1), где  $L = D - b$ . Величину  $b$  найдем из формулы линзы  $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}$ , откуда  $b = \frac{F \cdot a}{a - F}$ , где  $a$  - расстояние от источника  $S$  до линзы,  $b$  - расстояние от линзы до изображения  $S_1$ ,  $F$  - фокусное расстояние линзы.

Из подобия треугольников  $SAB$  и  $SS_1S_2$  получим:

$$\frac{d_1}{d} = \frac{a+b}{a} = \frac{a + \frac{Fa}{a-F}}{a}$$

откуда  $d_1 = \frac{d \cdot a}{a - F}$ .

Подставляя  $d_1$  и  $L$  в формулу для  $\Delta y$ , получим:

$$\Delta y = \frac{\lambda}{d \cdot a} (D \cdot a - D \cdot F - a \cdot F)$$

Треугольники  $SAB$  и  $SMK$  подобны, отсюда величина области перекрытия волн

$$MK = \frac{d}{a} \cdot (a + D)$$

Тогда число наблюдаемых полос

$$N = \frac{MK}{\Delta y} = \frac{d^2(a+D)}{\lambda(Da - DF - aF)} = 25$$

Ответ:  $N = \frac{d^2(a+D)}{\lambda(Da - DF - aF)} = 25$ .