

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МИКРОСКОПА

© 2011 г. **Виноградова О. А.***, канд. техн. наук; **Зверев В. А.****, доктор техн. наук;
Фролов Д. Н.*, канд. техн. наук

* НПП “Фокус”, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: fronda@list.ru

Выполнен анализ соответствия параметров объективов микроскопа рекомендованному ряду унифицированных значений, определены требования к параметрам объективов и окуляров из условия согласования их со свойствами глаза. Определены условия когерентного и некогерентного освещения наблюдаемого предмета, представлены результаты исследования влияния степени когерентности освещения на качество изображения, как основы для оптимального согласования параметров осветительной оптической системы с параметрами наблюдательной оптической системы микроскопа. Показано, что низкую эффективность использования светового потока, формируемого осветительной системой микроскопа, можно увеличить на порядок, если построить осветительную систему на основе применения системы переменного увеличения. Получено соотношение, определяющее возможность выбора оптимальной системы параметров объективов микроскопа.

***Ключевые слова:** световые микроскопы, система освещения, степень когерентности освещения, разрешающая способность глаза, кривая Анжюльфа, мира Фуко.*

Коды OCIS: 180.0180

Поступила в редакцию 09.04.2010

На протяжении всего прошлого века непрерывно расширялась область применения световых микроскопов. Новые требования определяли не только появление различных модификаций приборов, но и приводили к изменению их функциональных схем, обусловленных применением новых оптических явлений. В результате появились фазово-контрастные, интерференционные, поляризационные и люминесцентные микроскопы, микроскопы спектрального локального анализа и т. д. В настоящее время оптическими фирмами мира разработана и выпускается многочисленная номенклатура микроскопов, различающихся параметрами и конструктивным оформлением, оснащённостью различными функциональными устройствами и т. п. При этом к числу нормируемых относятся параметры, касающиеся общих габаритов и технических характеристик приборов, которые, тем не менее, оказывают существенное влияние на их разработку и эксплуатацию [1, 2]. Важно отметить, что принципиальная схема построения микроскопов, содержащая освети-

тельную и наблюдательную системы, остается неизменной.

В основу анализа параметров элементов оптической системы микроскопа положен принцип обоснованности их значений. Критерием обоснованности будем считать факт согласования значений параметров отдельных элементов оптической системы. Одним из наиболее эффективных путей увеличения серийности производства и повышения качества выпускаемых микроскопов является унификация параметров оптических элементов микроскопа на основе согласования их параметров.

Вполне очевидно, что параметры любой оптической системы должны быть согласованы с параметрами приемника излучения. В рассматриваемом случае таким приемником будем считать глаз наблюдателя. В угловой мере разрешающая способность глаза равна $\phi' = \frac{\delta'}{f_0'} = \frac{\psi\lambda}{d'}$, где d' – диаметр световых пучков лучей, падающих на зрачок глаза и формирующих изображение на его сетчатке; ψ – коэффициент, определяе-

мый предельной величиной контраста наблюдаемого изображения; λ – длина волны света. Чтобы определить разрешающую способность микроскопа вместе с глазом, нужно знать свойства глаза и знать, как сказываются его дефекты. Последние можно охарактеризовать кривыми Арньюльфа, представленными на рис. 1. По оси ординат отложена величина $\psi d' = \psi \lambda$, а по оси абсцисс – диаметр зрачка d' . Различные кривые соответствуют разным контрастам γ миры Фуко, равным

$$\gamma = \frac{I_1 - I_2}{I_1}, \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – интенсивности двух участков миры, причем I_1 – интенсивность более яркого участка. Исследования, выполненные А. Арньюльфом [3, 4] в Оптическом институте в Париже, показали, что визуальная разрешающая способность глаза при различных диаметрах выходного зрачка микроскопа различна и для миры Фуко с контрастом, равным единице, для ряда значений диаметра выходного зрачка определяется соотношениями:

$$\text{при } d' = 0,7 \text{ мм } \delta' = \frac{1,03\lambda}{2n' \sin \sigma'},$$

$$\text{при } d' = 2 \text{ мм } \delta' = \frac{2,5\lambda}{2n' \sin \sigma'},$$

$$\text{при } d' = 3 \text{ мм } \delta' = \frac{3,45\lambda}{2n' \sin \sigma'},$$

$$\text{при } d' = 4 \text{ мм } \delta' = \frac{5\lambda}{2n' \sin \sigma'}.$$

Кривую $\psi = \psi(d')$, показанную на рис. 1, можно аппроксимировать выражением вида:

$$\psi = 1,03 + 2,68 (d' - 0,7)^2 \times (1 - 0,456d' + 0,06d'^2). \quad (2)$$

Падение разрешающей способности глаза при $d' < 0,75$ мм определяется, в частности, так называемыми энтоптическими [энто... (от греческого *entós* – внутри) – часть сложных слов, означающая “внутренний”] явлениями, которые сильно ухудшают видение и действительно наблюдаются при малых величинах выходных зрачков (при больших увеличениях изображения предмета) оптических систем приборов.

Естественное стремление сделать видимое увеличение изображения сколь угодно большим ограничивается визуальной разрешающей

способностью, определяемой размером выходного зрачка, равным

$$d' = 2f'_M n \sin \sigma = 2f'_{OK} n' \sin \sigma', \quad (3)$$

где f'_M – фокусное расстояние оптической системы объектива и окуляра микроскопа в целом, равно $f'_M = f'_{OK}/V_0$; f'_{OK} – фокусное расстояние окуляра; V_0 – поперечное увеличение изображения, образованного объективом, равно

$$V_0 = \frac{n \sin \sigma}{n' \sin \sigma'}; \quad n \sin \sigma (n' \sin \sigma') - \text{передняя (задняя)}$$

числовая апертура объектива микроскопа. Принято считать [5], что диаметр выходного зрачка d' не должен быть меньше 0,5 мм и больше 1 мм. Угловое (видимое) увеличение изображения, образованного оптической системой, фокусное расстояние которой равно f' , определяется формулой $\Gamma = L/f'$, где L – расстояние от наблюдаемого изображения до зрачка глаза наблюдателя. Таким образом, при $L = 250$ мм (нормальное расстояние [5]) предельные значения полезного углового (видимого) увеличения изображения, образованного оптической системой микроскопа, определяются диапазоном

$$500 A \leq \Gamma_M \leq 1000 A,$$

где $A = n \sin \sigma$.

Объектив является наиболее ответственным элементом оптической системы микроскопа, так как от его числовой апертуры и характера коррекции aberrаций зависят разрешающая способность и качество изображения наблюдаемого предмета. Проведенная в России в середине шестидесятых годов прошлого столетия ра-

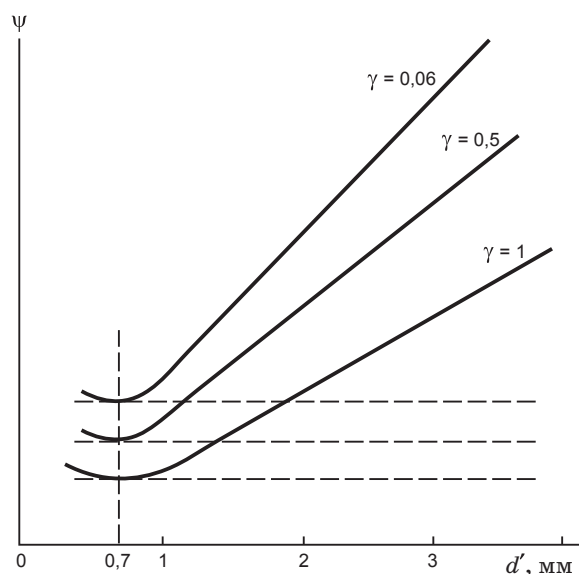


Рис. 1. Кривая зависимости $\psi = \psi(d')$.

бота по унификации параметров объективов и окуляров дала следующие результаты [6, 7]:

– объективы для новых моделей микроскопа должны разрабатываться для двух длин тубуса: 160 мм и “бесконечность”;

– высота всех вновь разрабатываемых объективов должна быть равной 45 мм;

– поперечные увеличения изображения, образованного объективами (для проходящего света), и фокусные расстояния объективов (для отраженного света), а также угловые увеличения изображения, образованного окулярами, должны изменяться по закону геометрической прогрессии со знаменателем 1,6. Это соответствует ряду ГОСТ 6636-69 “Нормальные линейные размеры”.

Значения поперечного увеличения изображения, образованного планахроматическими, планахроматическими и ахроматическими объективами разработанных в последующие годы комплектов для проходящего света и фокусные расстояния объективов для отраженного света, как правило, соответствуют рекомендованной закономерности. Однако значения передней числовой апертуры “средних” и “сильных” объективов эту закономерность нарушают. В результате этого задняя числовая апертура объективов изменяется от 0,0125 до 0,03, что определяет потребность в достаточно широком наборе фокусных расстояний окуляров. Если бы задняя числовая апертура всего набора объективов была бы одной и той же, например, при $n' = 1$ равной 0,02, то при $d' = 1$ мм $f'_{\text{ОК}} = 25$ мм ($\Gamma_0 = 10^\times$). В соответствии с рекомендованной закономерностью этот окуляр можно дополнить вторым окуляром при $\Gamma_0 = 16^\times$; при этом $f'_{\text{ОК}} = 15,6$ мм. При $d' = 0,5$ мм фокусное расстояние окуляра $f'_{\text{ОК}} = 12,5$ мм ($\Gamma_0 = 20^\times$). Если принять $\Gamma_0 = 25,6^\times$, то $d' \approx 0,4$ мм. Итак, при неизменной величине задней числовой апертуры вполне достаточно трех типоразмеров окуляров. Кроме того, при одной и той же величине задней числовой апертуры объективов и при одном и том же диаметре полевой диафрагмы освещенность изображения будет неизменной. Понимание проблем освещения наблюдаемых с помощью микроскопа объектов и влияние освещения предмета на качество его изображения является весьма важным для анализа проблемы согласования параметров наблюдательной и осветительной оптических систем микроскопа.

Для оценки влияния осветительной системы микроскопа на разрешающую способность рассмотрим два небольших близко расположенных

отверстия $P_1(X_1, Y_1)$ и $P_2(X_2, Y_2)$ в плоскости предмета. Комплексная степень когерентности света, освещающего эти отверстия, определяется формулой [7]:

$$\mu(P_1, P_2) = \frac{2J_1(u_{12})}{u_{12}}, \quad (4)$$

$$u_{12} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} n'_s \sin \sigma'_s,$$

где $n'_s \sin \sigma'_s$ – задняя числовая апертура конденсора (пучков лучей, освещающих предмет), λ_0 – средняя длина волны квазимонохроматического света. Пусть $P(X, Y)$ – любая другая точка в плоскости предмета, а P' – ее изображение, образованное объективом. Будем считать, что в изображении предмета, образованном объективом микроскопа, аберрации отсутствуют. Тогда распределение интенсивности в плоскости изображения предмета, обусловленное светом, приходящим только из точки P_1 , представляет собой пятно Эри, центром которого является изображение P'_1 точки P_1 . Следовательно, интенсивность $I^{(1)}(P')$, обусловленная светом, который приходит в точку P' только из точки P_1 , с точностью до постоянного множителя равна:

$$I^{(1)}(P') = \left(\frac{2J_1(v_1)}{v_1} \right)^2, \quad (5)$$

$$v_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2} n_0 \sin \sigma_0,$$

где $n_0 \sin \sigma_0$ – передняя числовая апертура объектива микроскопа.

Относительное распределение интенсивности света в плоскости изображения, обусловленное светом, приходящим только из точки P_2 , определяется аналогичным выражением вида:

$$I^{(2)}(P') = \left(\frac{2J_1(v_2)}{v_2} \right)^2, \quad (6)$$

$$v_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2} n_0 \sin \sigma_0.$$

Таким образом, если два отверстия освещаются с помощью конденсора, то интенсивность $I(P')$ в плоскости изображения, образованного объективом микроскопа, определяется суперпозицией двух частично когерентных пучков световых лучей. Интенсивность каждого из пучков определяется выражениями (5) и (6), а комплексная степень когерентности – соотношением (4). Предположим, что точка P' достаточно близка к геометрическим изображениям точек

P_1 и P_2 . При этом интенсивность $I(P')$ определяется формулой:

$$I(P') = \left(\frac{2J_1(v_1)}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{2J_1(v_2)}{v_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{2J_1(mv_{12})}{mv_{12}} \right) \left(\frac{2J_1(v_1)}{v_1} \right) \left(\frac{2J_1(v_2)}{v_2} \right), \quad (7)$$

где $m = \frac{n'_s \sin \sigma'_s}{n_0 \sin \sigma_0}$,

$$v_{12} = \frac{u_{12}}{m} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} n_0 \sin \sigma_0. \quad (8)$$

Из соотношения (7) следует ряд важных выводов. Так, если mv_{12} является отличным от нуля корнем уравнения $J_1(mv_{12}) = 0$, то соотношение (7) принимает вид:

$$I(P') = \left(\frac{2J_1(v_1)}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{2J_1(v_2)}{v_2} \right)^2. \quad (9)$$

Таким образом, если задняя числовая апертура конденсора равна передней числовой апертуре объектива микроскопа (то есть, если $m = 1$), а расстояние между геометрическими изображениями отверстий равно радиусу одного из темных колец в безабберационном изображении точки (в пятне Эри), образованном объективом, распределение интенсивности в плоскости изображения такое же, как и при некогерентном освещении отверстий P_1 и P_2 . Если числовая апертура конденсора очень мала ($m \rightarrow 0$), то $2J_1(mv_{12})/mv_{12} \approx 1$ и соотношение (7) принимает вид:

$$I(P') = \left[\frac{2J_1(v_1)}{v_1} + \frac{2J_1(v_2)}{v_2} \right]^2. \quad (10)$$

При этом для любого расстояния между отверстиями распределение интенсивности остается таким же, как и в случае полностью ко-

герентного освещения. Формула (7) позволяет исследовать зависимость распределения интенсивности в плоскости изображения, образованного объективом микроскопа, от отношения m числовых апертур. Расстояние $P'_1 P'_2$, приведенное к плоскости предмета, определим выражением вида: $P_1 P_2 = \frac{\psi \lambda_0}{2n_0 \sin \sigma_0}$. При этом интенсивность в точке, расположенной посередине между точками P'_1 и P'_2 , равна

$$I(P') = 2 \left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}\pi\psi\right)}{\frac{1}{2}\pi\psi} \right]^2 \left[1 + \frac{2J_1(\pi m \psi)}{\pi m \psi} \right]. \quad (11)$$

Относительную величину разности интенсивностей в точках P' и P'_1 или P'_2 определим соотношением вида:

$$i(P') = \frac{I(P'_j) - I(P')}{I(P'_j)},$$

где $j = 1, 2$. Раскрыв входящие в это выражение величины, получаем:

$$i(P') = 1 - \frac{2 \left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}\pi\psi\right)}{\frac{1}{2}\pi\psi} \right]^2 \left[1 + \frac{2J_1(\pi m \psi)}{\pi m \psi} \right]}{1 + 2 \frac{2J_1(\pi m \psi)}{\pi m \psi} \cdot \frac{2J_1(\pi \psi)}{\pi \psi} + \left[\frac{2J_1(\pi \psi)}{\pi \psi} \right]^2}. \quad (12)$$

Отсюда следует, что при $J_1(0,5\pi\psi) = 0$ величина $i(P') = 1$. Заметим, что $J_1(0,5\pi\psi) = 0$ при $0,5\pi\psi = 3,832$, то есть при $\psi = 2,440$. При $m = 0$ выражение (12) можно представить в виде:

$$i(P') = 1 - 4 \left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}\pi\psi\right)}{\frac{1}{2}\pi\psi} \right]^2 \cdot \left[1 + \frac{2J_1(\pi\psi)}{\pi\psi} \right]^{-2}.$$

В этом случае $i(P') = 0$ при $\pi\psi = 4,77$, то есть при $\psi = 1,5183$. Положив в выражении (12) величину $m = 1$, получаем:

$$i(P') = 1 - 2 \left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}\pi\psi\right)}{\frac{1}{2}\pi\psi} \right]^2 \left[1 + \frac{2J_1(\pi\psi)}{\pi\psi} \right] \left/ \left[1 + 3 \left[\frac{2J_1(\pi\psi)}{\pi\psi} \right]^2 \right] \right.$$

При $\pi\psi = 3,378$ величина $i(P') = 0$.

При $\pi\psi = 3,832$ ($\psi = 1,22$) величина $J_1(\pi\psi) = 0$.

При этом

$$i(P') = 1 - 2 \left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}\pi\psi\right)}{\frac{1}{2}\pi\psi} \right]^2 = 0,268.$$

Итак, при $\psi = 2,440$ независимо от величины m контраст изображения, определяемый

отношением $\tau = \frac{I(P'_j) - I(P')}{I(P'_j) + I(P')}$, равен 1. При $m = 0$

(при когерентном освещении предмета) и при $\psi = 1,5183$ контраст изображения $\tau = 0$. Положив $m = 1$ (полагая освещение предмета некогерентным), находим, что контраст изображения $\tau = 0$ при $\psi = 1,075$.

Изменяя в формуле (12) величину m в диапазоне от 0 до 3 с интервалом, равным 0,1, с помощью программы *MathCad* выполнено вычисление координат зависимости $\psi = \psi(m)$ для четырех значений контраста $i(P') = 0; 0,150; 0,268; 0,350$. Результаты вычислений представлены в виде кривых на рис. 2. Из вида кривых следует, что максимальная разрешающая способность достигается при $m \approx 1,5$.

Вполне очевидно, что параметры осветительного устройства должны быть согласованы с параметрами наблюдательной части микроскопа. Световой поток, формируемый осветительным устройством, должен заполнять телесный угол, определяемый передней числовой апертурой объектива, в пределах наблюдаемой поверхности предмета. Таким образом, оптические параметры осветительного устройства должны быть таковы, чтобы формируемый им световой поток был равен

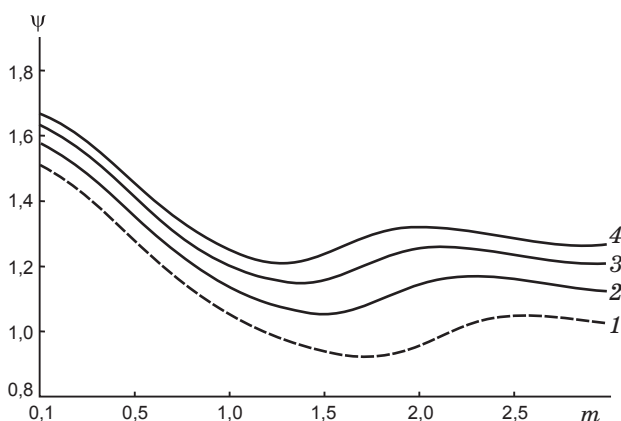


Рис. 2. Зависимость коэффициента ψ от величины отношения числовых апертур m для четырех значений контраста $i(P')$. 1 – 0; 2 – 0,150; 3 – 0,268; 4 – 0,350.

$$d\Phi_s = d\Phi_{p_{\max}} = \pi L_0 n_p^2 \sin^2 \sigma_{p_{\max}} dS_{p_{\max}}, \quad (13)$$

где $\pi \sin^2 \sigma_{p_{\max}}$ – телесный угол, соответствующий максимальной величине апертурного угла $\sigma_{p_{\max}}$ объективов комплекта; $dS_{p_{\max}}$ – наибольшая площадь наблюдаемой поверхности. При этом при круглой форме наблюдаемой поверхности инвариант Лагранжа–Гельмгольца принимает вид:

$$J_{\max} = y_{p_{\max}} \cdot n_p \sin \sigma_{p_{\max}}. \quad (14)$$

Тогда каждый объектив комплекта будет использовать лишь часть светового потока [8], равную

$$\eta = (J_i / J_{\max})^2,$$

где $J_i = y_{pi} n_{pi} \sin \sigma_{pi}$.

Однако создать универсальное осветительное устройство приемлемых сложности и габаритов, удовлетворяющее условию (14), практически невозможно. Поэтому в осветительных устройствах микроскопов применяют конденсоры со съёмными фронтальными или дополнительно вводимыми линзами. Так, например, для освещения наблюдаемой поверхности при применении объективов слабого увеличения ($V_0 = -4^\times$ и $V_0 = -10^\times$) в конструкции апланатического конденсора Бимам Р-11 предусмотрена возможность выведения из хода лучей фронтальной линзы. При этом диаметр освещаемой поверхности предмета достигает $2y_p = 4,5$ мм, а выходная числовая апертура $A_{\text{кон}} = 0,30$. В этом случае $J_{\max} = (4,5/2)0,30 = 0,675$.

Значения эффективности использования светового потока в микроскопе “БИМАМ” при применении соответствующего объектива, приведены в табл. 1.

При работе с объективами слабых увеличений ($V_0 = -3,5^\times$ и $V_0 = -9^\times$) в конструкции апланатического конденсора КОН-3 предусмотрена возможность введения в ход лучей еще одной линзы [10]. При этом максимальная величина задней числовой апертуры $A_{\text{кон}} = 0,35$, а максимальный диаметр освещаемой поверхности предмета $2y_p = 5$ мм. В этом случае $J_{\max} = (5/2)0,35 = 0,875$. Значения эффективности использования светового потока в микроскопе

Таблица 1. Значения эффективности использования светового потока в микроскопе “БИМАМ”

Объектив	4×0,12 ОХ-4-1	10×0,30 ОХ-10-1	25×0,50 ОХ-25-1	40×0,65 ОХ-40-2	100×1,25 ми ОХ-100-1
η	0,16	0,16	0,071	0,047	0,028

Таблица 2. Значения эффективности использования светового потока в микроскопе “БИОЛАМ”

Объектив	3,5×0,10 ОМ-3	9×0,20 ОМ-2	20×0,40 ОМ-27	40×0,65 ОХ-1	90×1,25 ми ОМ-41
η	0,086	0,052	0,042	0,028	0,020

“БИОЛАМ” при применении соответствующих объективов приведены в табл. 2.

Из анализа величин, приведенных в таблицах, следует, что эффективность использования светового потока в микроскопах весьма низка. Эффективность использования светового потока можно существенно повысить, если применить в схеме осветительного устройства оптическую систему переменного увеличения [9, 10].

Заметим, что при освещении падающим светом (при наблюдении в отраженном свете) оптическая схема осветительного устройства, по сути дела, повторяет оптическую схему наблюдательного канала микроскопа, а следовательно, эффективность использования светового потока в этом случае определяется лишь различием значений инварианта $J_p = y_p n_p \sin \sigma_p$ в применяемом комплекте объективов микроскопа. Как уже отмечалось, задняя числовая апертура объективов в комплекте изменяется от 0,0125 до 0,03. При этом при смене объективов возможно изменение освещенности в плоскости полевой диафрагмы окуляра примерно в шесть раз. При одном и том же окуляре такое же изменение освещенности будет и на сетчатке глаза. Без больших проблем можно получить комплект объективов с одной и той же задней числовой апертурой, равной, например, 0,02, если согласиться с уменьшением длины тубуса и окулярного поля для высокоапертурных объективов примерно в 1,5 раза. Если масштабным изменением конструктивных параметров объективов привести длину тубуса к принятой, то соответственно увеличатся aberrации образованного изображения и линейное поле наблюдаемого предмета. Вполне очевидно, что в этом случае разработка конструкции и расчет таких объективов превратится в весьма серьезную проблему. Задачу согласования параметров объективов можно попытаться решить, положив в основу следующие соображения.

Для конкретного комплекта объективов микроскопа величина окулярного поля $2y_{ок} = 2y'_p = \text{const}$. Вполне очевидно, что при $J = \text{const}$ для этого комплекта объективов имели бы набор точек $V_{об}, n_p \sin \sigma_p$, определяющих их параметры и лежащих на прямой:

$$JV_{об} = y'_p n_p \sin \sigma_p. \quad (15)$$

В том случае, когда зависимость $V_{об} = V_{об}(n_p \sin \sigma_p)$ имеет нелинейный характер, инвариант $J \neq \text{const}$, а следовательно, для формирования изображения объективами такого комплекта требуется различная величина светового потока. Пусть зависимость $V_{об} = V_{об}(n_p \sin \sigma_p)$ мало отличается от линейной, но при этом не проходит через точку с координатами $V_{об} = 0, n_p \sin \sigma_p = 0$ и определяется уравнением прямой вида:

$$V_{об} = kn_p \sin \sigma_p - a. \quad (16)$$

Положив $V_{об} = 0$ и обозначив при этом $\sin \sigma_p = \sin \sigma_{p0}$, получаем $a = kn_p \sin \sigma_{p0}$. Это позволяет уравнение (16) представить в виде:

$$V_{об} = kn_p (\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}). \quad (17)$$

Отсюда следует, что $k = V_{об}/[n_p(\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0})]$. Положив в этом выражении $\sin \sigma_p = \sin \sigma_{p\max}$, а $V_{об\max} = V_{об}(\sin \sigma_{p\max})$, и подставив его в выражение (17), получаем

$$V_{об} = \frac{\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}}{\sin \sigma_{p\max} - \sin \sigma_{p0}} V_{об\max}.$$

При этом

$$\begin{aligned} J &= n_p y_p \sin \sigma_p = n_p \frac{y'_p}{V_{об}} \sin \sigma_p = \\ &= n_p y'_p \frac{\sin \sigma_{p\max} - \sin \sigma_{p0}}{\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}} \frac{\sin \sigma_p}{V_{об\max}}. \end{aligned}$$

При $\sin \sigma_p = \sin \sigma_{p\max}$:

$$J = J_0 = n_p y'_p \frac{\sin \sigma_{p\max}}{V_{об\max}}.$$

Пусть $\Delta J = J - J_0$. Тогда

$$\frac{\Delta J}{J_0} = \frac{\sin \sigma_{p0}}{\sin \sigma_{p\max}} \frac{\sin \sigma_{p\max} - \sin \sigma_p}{\sin \sigma_p - \sin \sigma_{p0}}. \quad (18)$$

Из формулы (18) следует, что при $\sigma_{p0} = 0$ отношение $\Delta J/J_0 = 0$. Таким образом, для соблюдения условия $J = \text{const}$ необходим линейный характер взаимосвязи параметров $V_{об} = V_{об}(n_p \sin \sigma_p)$, причем линия в системе координат $(V_{об}, n_p \sin \sigma_p)$ может иметь любой наклон, но должна проходить через точку $(0, 0)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. ИСО 8038-85, 8040-86, ГОСТ 3489-93, ГОСТ 3-4024-78.
2. Рагузин Р.М., Фролов Д.Н. О необходимости изменения отдельных норм и стандартов на микроскопы // Оптический журнал. 1993. Т. 64. № 6. С. 70–72.
3. Франсон М. Фазово-контрастный и интерференционный микроскопы / Пер. с фр. М.: ГИФ-МЛ, 1960. 180 с.
4. Мартин Л. Техническая оптика / Пер. с англ. М.: ГИФ-МЛ, 1960. 424 с.
5. Михель К. Основы теории микроскопа. М.: Гостехиздат, 1955. 276 с.
6. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
7. Андреев Л.Н. Об унификации оптических характеристик объективов и окуляров микроскопа // ОМП. 1974. № 11. С. 47–48.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
9. Виноградова О.А. Анализ и оптимизация параметров осветительного устройства микроскопа // Автореф. канд. дисс. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2001. 23 с.
10. Виноградова О.А., Зверев В.А., Точилина Т.В., Хои Рамин. Система переменного увеличения в осветительном устройстве микроскопа // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 10. С. 24–28.