

УДК 681.784.83

В. Н. Боровицкий

ТОВ «Інформаційні програмні системи»
ул. Боженко, 15, 03680 Киев, Украина

Энергетический расчет цифрового микроскопа

Предложена методика энергетического расчета цифрового микроскопа, которая позволяет рассчитать отношение сигнал/шум в выходном цифровом сигнале с учетом излучательных характеристик источника излучения, потерь излучения в коллективе, конденсоре, микрообъективе с тубусной линзой, а также с учетом накопления носителей зарядов в фоточувствительных элементах цифровой камеры и цифровой фильтрации изображений.

Ключевые слова: цифровой микроскоп, цифровая камера, источник излучения, фоточувствительный элемент, энергетический расчет.

Энергетический расчет является важным этапом проектирования новых оптико-электронных систем (ОЭС) и оценки качества уже существующих систем [1]. Сущность энергетического расчета заключается в вычислении показателей энергетической разрешающей способности (ЭРС), которая характеризует способность ОЭС различать малые изменения амплитуды входного оптического сигнала на основе анализа выходного электрического сигнала как аналогового, так и цифрового [2]. Известными показателями ЭРС являются пороговый поток, пороговая облученность, отношение сигнал/шум и другие показатели, которые характеризуют соотношение между полезной (информационной) и шумовой составляющими выходного сигнала [1, 2]. В настоящее время методики энергетического расчета для ОЭС различного вида достаточно подробно рассмотрены в литературе, а некоторые из этих методик стандартизированы [1, 2]. Однако для некоторых типов сравнительно новых ОЭС в силу ряда исторических причин методики энергетического расчета не проработаны достаточно подробно. К таким ОЭС относятся цифровые микроскопы. Цифровой микроскоп (ЦМ) является ОЭС для получения увеличенных цифровых изображений объектов малого размера [3]. В большинстве случаев, ЦМ собирается путем установки цифровой камеры на фототубус оптического микроскопа, который содержит осветительный канал для проходящего и (или) отраженного излучения и изображающий канал (рис. 1). Изображающий канал ЦМ формирует увеличенное изображение объектов в плоскости матричного

фотоприемника цифровой камеры [3, 4]. Цифровые изображения считываются с цифровой камеры, обрабатываются, записываются на носитель информации или пересылаются по компьютерным сетям при помощи персональных компьютеров [3]. Быстрый прогресс в области цифровой фототехники с повсеместным распространением персональных компьютеров сделали цифровые микроскопы одним из самых перспективных инструментов в промышленности, научных исследованиях и медицине [3, 5].

Ранее в оптической микроскопии проблема оценки ЭРС не являлась актуальной по следующим причинам. Во-первых, оптические микроскопы проектировались для визуального наблюдения изображений человеком-наблюдателем [4]. Глаз человека имеет большой динамический диапазон, а использование мощных источников излучения, таких как галогенные и дуговые лампы, всегда позволяло получить освещенности, намного превышающие пороговую освещенность глаза человека [4]. Во-вторых, осветительный канал микроскопа является сложной оптической системой, в которой используется принцип освещения по Келеру [4], к преимуществам которого следует отнести однородность освещенности поверхности наблюдаемого образца, возможность изменения как поля зрения, так и апертуры осветительного канала. Расчет таких осветительных систем связан со значительными математическими сложностями, что так же сдерживало развитие методик энергетического расчета. В-третьих, даже при фотографировании через оптический микроскоп человек-оператор вместо выполнения сложных расчетов в большинстве случаев предпочитал сделать набор пробных снимков и экспериментально подобрать наилучшие параметры съемки [6]. Поэтому даже в монографиях по микрофотографии отсутствует упоминание о методиках энергетического расчета [6].

В настоящее время проблема оценки ЭРС в цифровой микроскопии является актуальной. Во-первых, цифровая камера (ЦК) для микроскопии является очень чувствительным фотоприемным устройством: собственные шумы ЦК оцениваются десятками — сотнями носителей зарядов, а максимальное количество носителей зарядов в одном фоточувствительном элементе (ФЧЭ) — нескольких миллионов [7–10], т.е. ЦК работает с очень малыми световыми потоками. Правильная эксплуатация таких ЦК уже не возможна без достаточно точного задания параметров осветительного и изображающего каналов (рис. 1) [7–10]. Очевидно, что без энергетического расчета ЦМ эти параметры не могут быть определены. Во-вторых, информация о параметрах полезной и шумовой составляющих выходного сигнала ЦМ необходима для применения цифровых методов повышения качества изображения [11]. Например, данные об отношении сигнал/шум требуются для определения характеристик оптимальных пространственных фильтров [11]. При этом ЭРС как способность различать малые изменения входного оптического сигнала и пространственная разрешающая способность, т.е. способность различать объекты малого размера, оказываются взаимосвязанными [11]. В-третьих, автоматизация микроскопов, а именно управление приводами фокусировки, перемещения наблюдаемых образцов, смены микрообъективов и светофильтров, также требует сведений о полезной и шумовой составляющих выходного сигнала ЦМ [3]. Таким образом, энергетический расчет является важной процедурой в процессе управления автоматизированным ЦМ.

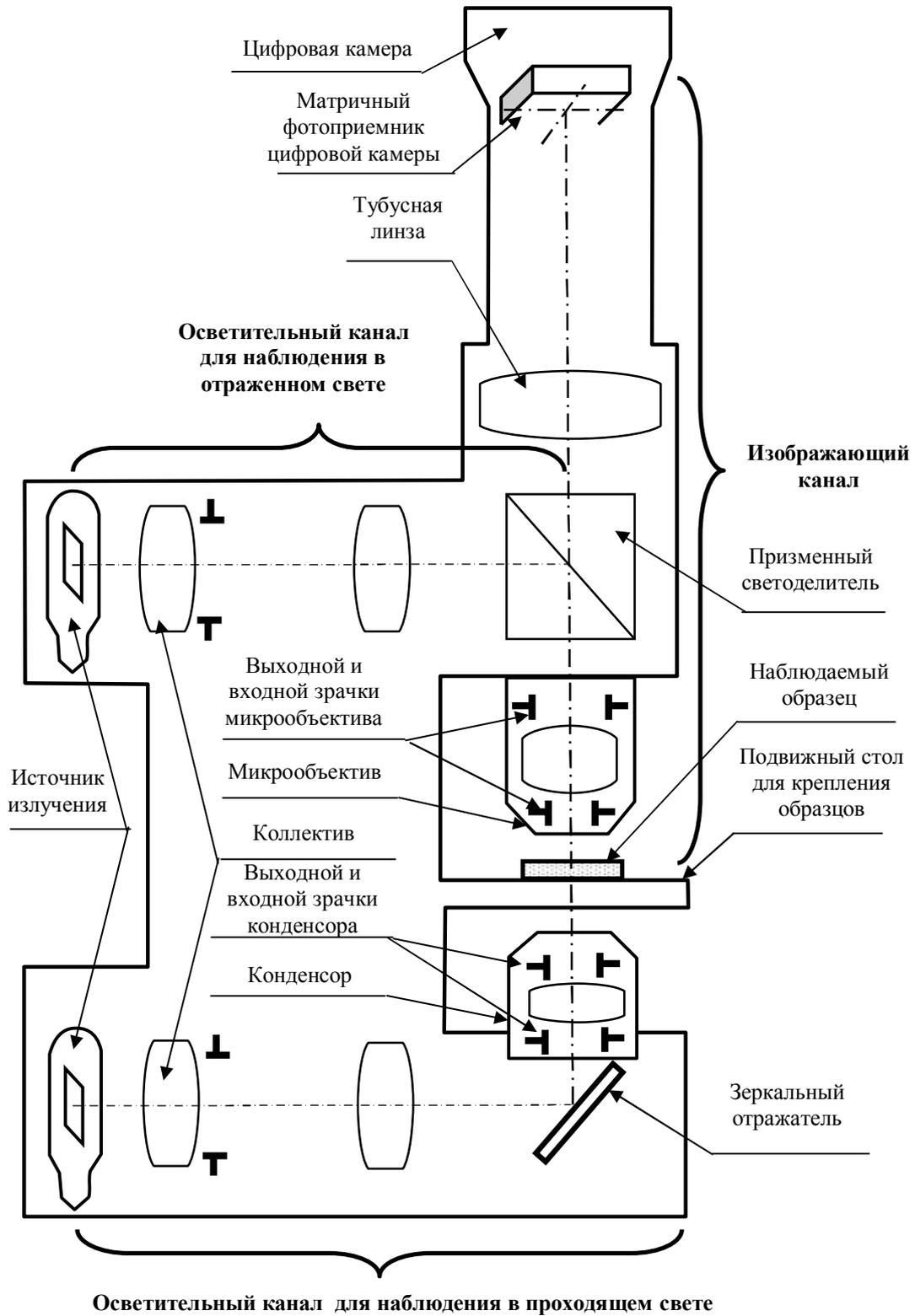


Рис. 1. Оптическая схема цифрового микроскопа

Методика энергетического расчета ЦМ имеет ряд отличий от известных методик энергетического расчета типовых ОЭС [1, 4]. Во-первых, в отличие от типовых ОЭС, ЦМ имеет специфическое фотоприемное устройство — ЦК с высокой чувствительностью и большим количеством ФЧЭ малого размера [7–10]. Во-вторых, в ЦМ используется специфический способ освещения — освещение по Келеру [4]. В-третьих, для повышения качества цифровых изображений в ЦМ, осуществляется специфическая цифровая обработка изображений — цифровое интегрирование сигналов, объединение сигналов соседних ФЧЭ, автоматическая регулировка усиления и др. [7–10]. Все эти особенности не учитываются в полной мере в известных методиках энергетического расчета типовых ОЭС [1]. Поэтому в настоящее время разработка методики энергетического расчета ЦМ является актуальной задачей, которая имеет практическую инженерную ценность.

Целью данной работы является разработка методики энергетического расчета, пригодной для ЦМ. Искомая методика — это математический аппарат, который позволит по информации о ЦМ и наблюдаемом образце получить данные о соотношении между полезной и шумовой составляющими в выходном сигнале ЦМ. Поставленная цель может быть достигнута решением следующих задач:

1) определением освещенности в передней фокальной плоскости конденсора, в которую коллектив осветительного канала проецирует изображение источника излучения [1] (рис. 2,а);

2) расчетом освещенности на поверхности наблюдаемого образца, т.е. в плоскости предмета изображающего канала, которую создает конденсор (рис. 2) [4]. По полученным данным можно определить лучистость поверхности наблюдаемого образца, рассматривая ее как вторичный излучатель;

3) вычислением освещенности в плоскости изображения изображающего канала, которая совмещена с плоскостью ФЧЭ ЦК [1, 2]. Эта освещенность создается оптической системой изображающего канала ЦМ, которая состоит из микрообъектива и тубусной линзы (рис. 1, 2);

4) определением амплитуды полезной составляющей, среднеквадратического отклонения шумовой составляющей и отношения сигнал/шум в выходном сигнале ЦМ [1, 2]. При расчете этих величин необходимо учитывать спектральный состав излучения и спектральные характеристики ЦК [1, 2].

Следует подчеркнуть, что решение задачи 4) подробно описано в литературе, посвященной расчетам ОЭС с многоэлементными фотонными приемниками излучения [1, 2]. Решение задач 1)–3) в общем случае является сложным, в виду того, что это требует вычисления многомерных интегралов [1, 12]. Это является одной из причин того, что в полном объеме решение этих задач применительно к ЦМ в литературе не приводится [1–7]. Для упрощения вычислений примем следующие допущения, которые наиболее часто принимаются в инженерной практике [1, 2]:

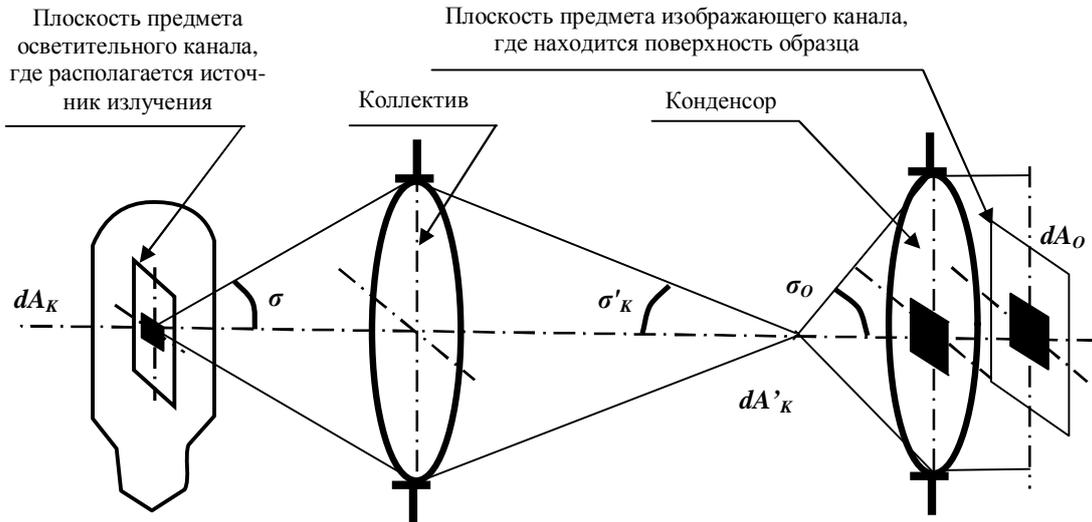
— энергетический расчет производится для осевой точки в плоскости изображения изображающего канала ЦМ (рис. 2);

— источник излучения имеет осесимметричную индикатрису излучения, которая аппроксимируется функцией косинус в степени P ;

— осветительный и изображающий каналы ЦМ являются осесимметричными центрированными оптическими системами с круглыми диафрагмами [12];

— ЦК является фотонным фотоприемным устройством с известной спектральной характеристикой квантового выхода. ЦК имеет двумерную периодическую структуру ФЧЭ прямоугольной формы [2, 5]. Собственные шумы ЦК пренебрежимо малы по сравнению с уровнем фотонного шума [7–10].

а) Осветительный канал



б) Изображающий канал

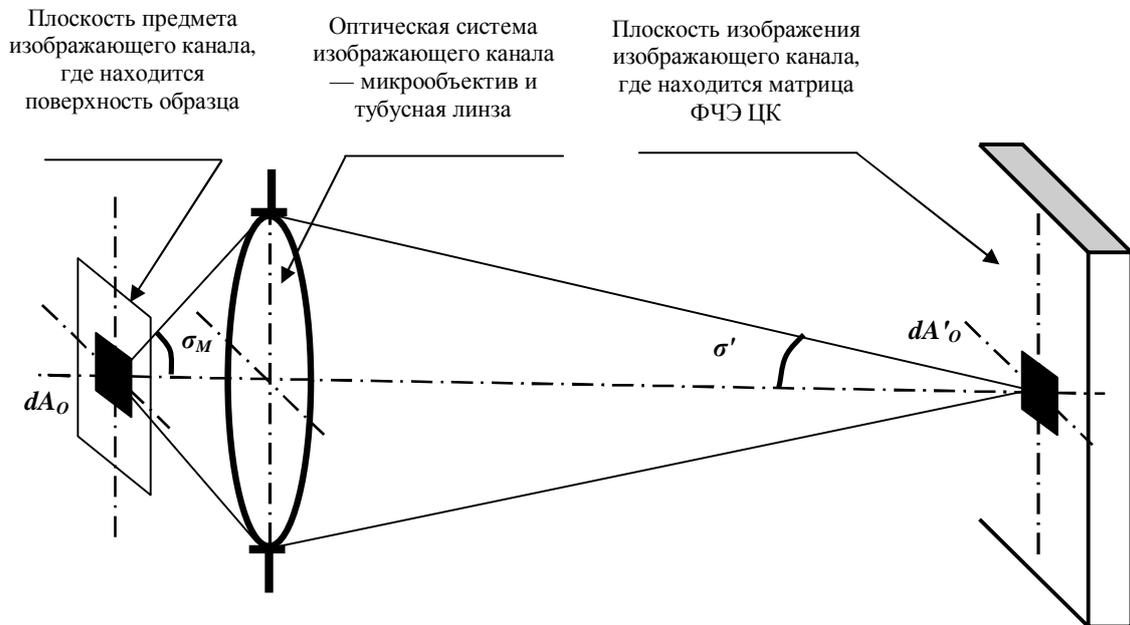


Рис. 2. Схемы осветительного и изображающего каналов цифрового микроскопа:
 а) осветительный канал, в котором используется освещение по Келеру;
 б) изображающий канал — проекционная оптическая система

Согласно методике расчета ОЭС с многоэлементными фотонными приемниками излучения величины полезной составляющей, среднеквадратического отклонения шумовой составляющей и отношения сигнал/шум в выходном сигнале могут быть записаны в следующем обобщенном виде [1, 2]:

$$u_M = \frac{2^M}{N_C} \cdot N_E = \frac{2^M}{N_C} \cdot x_E \cdot y_E \cdot \Delta t \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_E(\lambda)}{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda}\right)} \cdot q(\lambda) \cdot d\lambda =$$

$$= \frac{2^M}{N_C} \cdot K_K \cdot K_O \cdot K_M \cdot x_E \cdot y_E \cdot \Delta t \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M(\lambda)}{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda}\right)} \cdot \tau(\lambda) \cdot \tau_S(\lambda) \cdot \tau_F(\lambda) \cdot q(\lambda) \cdot d\lambda; \quad (1)$$

$$\sqrt{u_n^2} = \frac{2^M}{N_D} \cdot \sqrt{\frac{N_E}{m}} =$$

$$= \frac{2^M}{N_C} \cdot \sqrt{\frac{K_K \cdot K_O \cdot K_M \cdot x_E \cdot y_E \cdot \Delta t}{m} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M(\lambda)}{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda}\right)} \cdot \tau(\lambda) \cdot \tau_S(\lambda) \cdot \tau_F(\lambda) \cdot q(\lambda) \cdot d\lambda}; \quad (2)$$

$$\mu = \frac{u_M}{\sqrt{u_n^2}} = \frac{\frac{2^M}{N_D} \cdot N_E}{\frac{2^M}{N_D} \cdot \sqrt{\frac{N_E}{m}}} =$$

$$= \sqrt{K_K \cdot K_O \cdot K_M \cdot x_E \cdot y_E \cdot \Delta t \cdot m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{M(\lambda)}{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda}\right)} \cdot \tau(\lambda) \cdot \tau_S(\lambda) \cdot \tau_F(\lambda) \cdot q(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (3)$$

где u , $(u_n^2)^{0.5}$, μ — амплитуда полезной составляющей, среднеквадратическое отклонение шумовой составляющей, выраженные в цифровой форме, и отношение сигнал/шум в выходном цифровом сигнале ЦМ соответственно;

M , N_D , N_E — разрядность аналого-цифрового преобразователя ЦК, максимальное количество носителей заряда в ФЧЭ и полезная составляющая выходного сигнала выраженная количеством носителей заряда соответственно;

x_E , y_E , Δt , m — размеры ФЧЭ, время накопления заряда, количество кадров при выполнении цифрового интегрирования [7–10] соответственно;

λ_1 , λ_2 , $q(\lambda)$ — диапазон длин волн оптического излучения, в котором работает ЦК и квантовый выход ФЧЭ как функция от длины волны соответственно;

$E_E(\lambda)$, $M(\lambda)$ — эффективная освещенность ФЧЭ и светимость источника излучения как функции длины волны оптического излучения, соответственно. Спектральные характеристики галогенных или дуговых ламп могут быть описаны

с достаточной точностью формулой Планка, для светодиодов спектральные характеристики являются паспортными данными [4];

$\tau(\lambda)$, $\tau_S(\lambda)$, $\tau_F(\lambda)$ — спектральные коэффициенты пропускания оптического тракта ЦМ наблюдаемого образца и оптического фильтра соответственно;

λ , c , h — длина волны оптического излучения, скорость света в вакууме и постоянная Планка соответственно;

K_K , K_O , K_M — коэффициенты потерь излучения в коллективе, конденсоре, образующие осветительный канал, и в микрообъективе с тубусной линзой, которые составляют изображающий канал ЦМ, соответственно (рис. 1, 2).

Формулы (1)–(3) позволяют рассчитать количество, полезную (1) и шумовую (2) составляющие выходного цифрового сигнала ЦМ. Полезная будет пропорциональна количеству носителей зарядов, сгенерированным в ФЧЭ попавшим в него оптическим излучением. Если учесть допущение о том, что генерации отдельных носителей заряда являются статистически независимыми процессами, то их распределение может быть рассчитано как распределение Пуассона [2]. При этом среднеквадратическое отклонение шумовой составляющей будет пропорционально корню квадратному от количества этих носителей зарядов (2). Формулы (1)–(3) содержат коэффициенты потерь излучения в элементах оптико-электронного тракта ЦМ — K_K , K_O , K_M (3). Именно расчет коэффициентов потерь излучения отражает специфику энергетического расчета для каждого конкретного типа ОЭС [1]. Расчет коэффициентов K_K , K_O , K_M (1)–(3) является самым сложным и трудоемким в энергетическом расчете ЦМ.

Рассмотрим прохождение оптического излучения через оптико-электронный тракт ЦМ, состоящий из осветительного и изображающего канала (рис. 1). Сущность освещения по Келеру состоит в том, что изображение источника излучения — тела накала лампы или матрицы светодиодов — проецируется в переднюю фокальную плоскость конденсора при наблюдении в проходящем свете (рис. 1) [4]. Плоскость апертурной диафрагмы коллектива проецируется в плоскость предмета, где находится поверхность наблюдаемого образца (рис. 2). Эта плоскость оптически сопряжена с плоскостью изображения изображающего канала, где при визуальном наблюдении располагается полевая диафрагма окуляра. В ЦМ в плоскости изображения изображающего канала располагаются плоскость ФЧЭ ЦК (рис. 1) [3, 6]. ЦК преобразует оптическое излучение, попадающее на ФЧЭ, в электрический сигнал, который после аналого-цифрового преобразования превращается в последовательность цифровых отсчетов. Из этих отсчетов составляется цифровое изображение в виде матрицы целых чисел. В случае цветного цифрового изображения каждый элемент цифрового изображения будет содержать отсчеты всех цветовых каналов.

Определим значение коэффициента K_K (1), который отражает взаимосвязь между светимостью поверхности источника излучения и освещенностью в передней фокальной плоскости конденсора ЦМ (рис. 2,а). На основании принятых допущений эта освещенность может быть рассчитана как величина, пропорциональная оптическому потоку, который выходит из осевой точки плоскости предмета коллектива и проходит через его апертурную диафрагму коллектива [12]. С учетом формы индикатрисы источника излучения выражение для расчета искомой освещенности может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned}
 E'_K(\lambda) &= \frac{d\Phi_K(\lambda)}{dA'_K} = \frac{\int_{\Omega_K} L(\lambda) \cdot dA_K \cdot l(\Omega) \cdot d\Omega}{dA'_K} = \frac{L(\lambda) \cdot dA_K \cdot \int_{\Omega_K} l_K(\Omega) \cdot d\Omega}{dA'_K} = \\
 &= \frac{M(\lambda)}{\int_{4\pi} l_K(\Omega) \cdot d\Omega} \cdot dA_K \cdot \int_{\Omega_K} l_K(\Omega) \cdot d\Omega = M(\lambda) \cdot \frac{dA_K}{dA'_K} \cdot \frac{\int_{\Omega_K} l_K(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_K(\Omega) \cdot d\Omega} = \\
 &= M(\lambda) \cdot \frac{dA_K}{\beta_K^2 \cdot dA_K} \cdot \frac{\int_{\Omega_K} l_K(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_K(\Omega) \cdot d\Omega} = M(\lambda) \cdot \frac{1}{\beta_K^2} \cdot \frac{\int_{\Omega_K} l_K(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_K(\Omega) \cdot d\Omega} = \\
 &= M(\lambda) \cdot \frac{1}{\beta_K^2} \cdot \frac{\eta_K(P, NA_K)}{\eta_K(P, n_K)},
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $E'_K(\lambda)$ — энергетическая освещенность в осевой точке передней фокальной плоскости конденсора как функция от длины волны;

dA_K, dA'_K — элементарные площадки в осевой точке плоскостей предмета и изображения коллектива соответственно;

$d\Phi_K$ — энергетический поток оптического излучения, выходящий из элементарной площадки dA_K и проходящий через апертурную диафрагму;

$d\sigma, d\Omega$ — элементарный линейный и телесный углы соответственно; их взаимосвязь определяется следующей формулой:

$$d\Omega = 2\pi \cdot \sin(\sigma) \cdot d\sigma;$$

Ω_K, σ_K — апертурные телесный и линейный углы в пространстве предмета коллектива соответственно;

$L(\lambda)$ — максимальное значение яркости источника излучения как функция от длины волны;

$l(\Omega)$ — индикатриса источника излучения как нормированная функция яркости источника излучения от величины телесного угла Ω . Согласно принятым допущениям об индикатрисе излучения, ее можно записать в следующем виде:

$$l_K(\Omega) = l_K(\Omega(\sigma)) = \cos^P(\sigma);$$

P — параметр формы индикатрисы источника излучения;

β_K, NA_K — линейное увеличение коллектива и числовая апертура коллектива соответственно

$$NA_K = n_K \cdot \sin(\sigma_K);$$

n_K — показатель преломления в пространстве предмета коллектива;

$\eta_K(P, NA_K)$ — коэффициент использования потока излучения как функция от показателя P и величины числовой апертуры коллектива NA_K :

$$\begin{aligned}
 \eta_K(P, NA_K) &= \int_{\Omega_K} l_K(\Omega) \cdot d\Omega = \int_0^{\sigma_K} l_K(\Omega(\sigma)) \cdot d\Omega(\sigma) = \\
 &= \int_0^{\sigma_K} l_K(\sigma) \cdot \cos(\sigma) \cdot 2\pi \cdot \sin(\sigma) \cdot d\sigma = 2\pi \cdot \int_0^{\sigma_K} \cos^P(\sigma) \cdot \cos(\sigma) \cdot \sin(\sigma) \cdot d\sigma = \\
 &= -2\pi \cdot \int_0^{\sigma_K} \cos^{P+1}(\sigma) \cdot d(\cos(\sigma)) = \frac{2\pi}{P+2} \cdot (\cos^{P+2}(0) - \cos^{P+2}(\sigma_K)) = \\
 &= \frac{2\pi}{P+2} \cdot \left(1 - \left(1 - \sin^2(\sigma_K)\right)^{\frac{P+2}{2}}\right) = \frac{2\pi}{P+2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{NA_K}{n_K}\right)^{\frac{P+2}{2}}\right) = \\
 &= \frac{2\pi}{P+2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{NA_K}{n_K}\right)^{0,5 \cdot P+1}\right).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Обратим внимание, что величина коэффициента η_K (5) при максимальном значении числовой апертуры $NA_K = n_K$, равно коэффициенту преломления среды в пространстве предмета коллектива, будет равна:

$$\eta_K(P, n_K) = \frac{2\pi}{P+2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{n_K}{n_K}\right)^{0,5 \cdot P+1}\right) = \frac{2\pi}{P+2} \cdot (1 - 0) = \frac{2\pi}{P+2}. \tag{6}$$

Анализ зависимостей (4)–(6) показывает, что искомый коэффициент K_K (1)–(3) может быть рассчитан следующим образом:

$$\begin{aligned}
 K_K &= \frac{E'_K(\lambda)}{M(\lambda)} = \frac{1}{\beta_K^2} \cdot \frac{\eta_K(P, NA_K)}{\eta_K(P, n_K)} = \\
 &= \frac{1}{\beta_K^2} \cdot \frac{\frac{2\pi}{P+2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{NA_K}{n_K}\right)^{0,5 \cdot P+1}\right)}{\frac{2\pi}{P+2}} = \frac{1}{\beta_K^2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{NA_K}{n_K}\right)^{0,5 \cdot P+1}\right).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Выполним расчет коэффициента использования излучения конденсором K_O . Этот коэффициент характеризует взаимосвязь между освещенностью в осевой точке плоскости предмета изображающего канала ЦМ и освещенностью в передней фокальной плоскости конденсора (рис. 2). Освещенность в осевой точке плоскости предмета может быть рассчитана как интеграл элементарных освещеннос-

тей (рис. 2,а) [4], которые создаются элементарными световыми трубками, выходящими из осевой точки передней фокальной плоскости конденсора и попадающими в плоскость предметов (рис. 2,а) [12]. Выражение для расчета освещенности в осевой точке плоскости предметов изображающего канала запишется следующим образом [12]:

$$\begin{aligned}
 E_o'(\lambda) &= \frac{d\Phi_o(\lambda)}{dA_o} = \frac{\int_{\Omega_o'} L_o(\lambda) \cdot dA_p \cdot l_o(\Omega') \cdot d\Omega'}{dA_o} = \\
 &= \frac{L_o(\lambda) \cdot dA_p \cdot \int_{\Omega_o'} l_o(\Omega') \cdot d\Omega'}{dA_o} = \frac{\frac{M_o(\lambda)}{\int_{\Omega_o'} l_o(\Omega') \cdot d\Omega'} \cdot dA_p \cdot \int_{\Omega_o'} l_o(\Omega') \cdot d\Omega'}{dA_o} = \\
 &= E'_K(\lambda) \cdot \frac{\int_{\Omega_o'} l_o(\Omega') \cdot d\Omega'}{\int_{4\pi} l_o(\Omega') \cdot d\Omega'} = E'_K(\lambda) \cdot \frac{\eta_o(P, NA_o)}{\eta_o(P, n_o)},
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $E_o'(\lambda)$ — освещенность в осевой точке плоскости предмета изображающего канала как функция от длины волны;

$M_o(\lambda)$, $L_o(\lambda)$ — светимость и яркость входного зрачка конденсора соответственно;

dA_o , dA_p — элементарные площадки в осевых точках плоскости предмета изображающего канала ЦМ и передней фокальной плоскости конденсора соответственно;

n_o , NA_o — показатель преломления в пространстве между конденсором и поверхностью наблюдаемого образца и числовая апертура конденсора соответственно;

$\eta_o(P, NA_o)$ — коэффициент использования потока излучения конденсором как функция от показателя P и величины числовой апертуры коллектива NA_o .

При вычислении коэффициента K_o необходимо учесть тот факт, что выходной зрачок конденсора может рассматриваться как вторичный излучатель, светимость которого прямо пропорциональна освещенности передней фокальной плоскости конденсора и обратно пропорциональна квадрату увеличения зрачков [12]. Индикатриса излучения этого вторичного излучателя может быть рассчитана с использованием инварианта Гельмгольца, который записывается для проекционной оптической системы следующим образом [12]:

$$n_K \cdot \sin(\sigma_K) = \beta_K \cdot n'_K \cdot \sin(\sigma'_K), \tag{9}$$

где σ'_K — задний апертурный угол коллектива; n'_K — показатель преломления в пространстве изображения коллектива.

Для расчета индикатрисы излучения выходного зрачка конденсора выполним пересчет значений индикатрисы излучения в плоскости изображения коллектива.

Для того, чтобы провести перерасчет, выполним такие математические преобразования:

$$\sin(\sigma) = \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \sin(\sigma'),$$

где σ, σ' — линейные углы в пространствах предмета и изображения коллектива (рис. 2а) соответственно;

n_K — показатель преломления в пространстве предмета коллектива.

Таким образом, выражение для расчета $\cos^P(\sigma)$ с учетом (9) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \cos^P(\sigma) &= \left(\sqrt{1 - \sin^2(\sigma)} \right)^P = \left(\sqrt{1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \sin^2(\sigma')} \right)^P = \\ &= \left(\sqrt{1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot (1 - \cos^2(\sigma'))} \right)^P = \\ &= \left(\sqrt{1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma')} \right)^P = \\ &= \left(\left(1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right) + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma') \right)^{0,5 \cdot P}. \end{aligned} \quad (10)$$

Обратим внимание на то, что при больших линейных увеличениях $\beta_K > 1$ имеет место явление сжатия индикатрисы излучения — индикатриса излучения выходного зрачка конденсора будет более узкой по сравнению с индикатрисой источника излучения (10). Это явление необходимо учесть при расчете коэффициента использования потока излучения конденсором $\eta_O(P, NA_O)$. Значение этого коэффициента может быть получено интегрированием потока элементарных световых трубок в пространстве изображения конденсора. Подробный вывод выражения для расчета $\eta_O(P, NA_O)$ методом интегрирования с заменой переменной приводится в Приложении

$$\begin{aligned} \eta_O(P, NA_K) &= \int_{\Omega'_O} l_K(\Omega') \cdot d\Omega' = \int_0^{\sigma'_O} l_O(\Omega'(\sigma')) \cdot d\Omega'(\sigma') = \\ &= \left[1 - \left(1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_O}{n_O} \right)^2 \right) / \left(\left(1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right) \right)^{0,5 \cdot P + 1} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

$$= \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1},$$

где Ω'_0 , σ'_0 — задние телесный и линейный апертурные углы конденсора при расчете в обратном ходе луча соответственно.

Обратим внимание, что величина коэффициента η_0 при максимальном значении числовой апертуры $NA_0 = n_0$, равном коэффициенту преломления, может быть получена подстановкой этого показателя преломления в формулу (11):

$$\begin{aligned} \eta_0(P, n_0) &= \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} \cdot \\ &\left[1 - \frac{1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{n_0}{n_0}\right)^2}{\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 \right)} \right]^{0,5 \cdot P + 1} = \\ &= \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} \cdot \quad (12) \\ &\cdot \left[1 - \frac{1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2}{\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 \right)} \right]^{0,5 \cdot P + 1}. \end{aligned}$$

Анализ формул (8)–(12) позволяет записать искомый коэффициент K_0 (1) в виде, аналогичном (7):

$$\begin{aligned} K_0 &= \frac{1}{\beta_0^2} \cdot \frac{E_0'(\lambda)}{E_K'(\lambda)} = \frac{1}{\beta_0^2} \cdot \frac{\eta_0(P, NA_0)}{\eta_0(P, n_0)} = \\ &= \frac{1}{\beta_0^2} \cdot \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K}\right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_O}{n_O} \right)^2 \right) / \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right) \right]^{0,5 \cdot P + 1} \\
 & \cdot \left(\frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} \right)^{-1} \\
 & \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right) / \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right) \right]^{0,5 \cdot P + 1} \right]^{-1} = \quad (13) \\
 & = \frac{1}{\beta_O^2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_O}{n_O} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right)^{0,5 \cdot P + 1}}{\left(1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right)^{0,5 \cdot P + 1}},
 \end{aligned}$$

где β_O — линейное увеличение в зрчках конденсора [12].

Обратим внимание, что математический аппарат для расчета коэффициента потерь излучения в изображающем канале ЦМ K_M будет повторять формулы расчета коэффициента K_K . Это обусловлено тем, что коллектив и изображающий канал ЦМ являются проекционными оптическими системами, которые имеют определенные соотношения между передними и задними апертурными углами (9) (рис. 2). При нахождении коэффициента K_M необходимо учесть две особенности работы изображающего канала ЦМ. Во-первых, излучение, прошедшее через наблюдаемый образец и прошедшее через апертурную диафрагму микрообъектива будет содержать как прошедшую, так и рассеянную составляющие. Во-вторых, индикатриса прошедшей составляющей будет сжатой относительно индикатрисы источника излучения, что учтено в формуле (10). Очевидно, что освещенная конденсором поверхность наблюдаемого образца будет рассматриваться как вторичный источник излучения, светимость которого прямо пропорциональна освещенности создаваемой конденсором (рис. 1, 2). Таким образом, выражение для расчета искомого коэффициента K_M в случае прошедшего излучения может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 E'_M(\lambda) &= \frac{d\Phi_M(\lambda)}{dA'_M} = \frac{\int_{\Omega_M} L_M(\lambda) \cdot dA_K \cdot l_M(\Omega) \cdot d\Omega}{dA'_M} = \\
 &= \frac{dA_M}{dA'_M} \cdot \left(M_M(\lambda) \cdot \frac{\int_{\Omega_M} l_M(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_M(\Omega) \cdot d\Omega} \right) = \frac{dA_M}{\beta_M^2 \cdot dA_M} \cdot \left(M_M(\lambda) \cdot \frac{\int_{\Omega_M} l_M(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_M(\Omega) \cdot d\Omega} \right) = \\
 &= \frac{1}{\beta_M^2} \cdot M_M(\lambda) \cdot \frac{\int_{\Omega_M} l_M(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_M(\Omega) \cdot d\Omega} = M_M(\lambda) \cdot \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \frac{\eta_M(P, NA_M)}{\eta_M(P, n_M)},
 \end{aligned} \tag{14}$$

где $E'_M(\lambda)$ — энергетическая освещенность в осевой точке плоскости изображения изображающего канала ЦМ как функция от длины волны;

$L_M(\lambda)$, $M_M(\lambda)$ — энергетические яркости и светимости прошедшего излучения как функции от длины волны соответственно ;

dA_M , dA'_M — элементарные площадки в осевых точках плоскости предмета и плоскости изображения изображающего канала ЦМ (рис. 2,б) соответственно;

$d\Phi_M(\lambda)$ — энергетический поток оптического излучения, попадающий на элементарную площадку в плоскости изображения изображающего канала ЦМ;

Ω_M , σ_M — телесный и линейный апертурные углы в пространстве предмета изображающего канала ЦМ соответственно;

$l_M(\Omega)$ — индикатриса прошедшей составляющей излучения поверхности наблюдаемого образца, как нормированные функция яркости источника излучения от величины телесного угла Ω ;

β_M , NA_M — линейное увеличение и числовая апертура изображающего канала ЦМ

$$NA_M = n_M \cdot \sin(\sigma_M);$$

n_M — показатель преломления в пространстве предметов изображающего канала ЦМ;

$\eta_M(P, NA_M)$ — коэффициент использования потока прошедшего излучения как функция от показателя P и величины числовой апертуры изображающего канала ЦМ.

Отношения коэффициентов в формуле (14) будут определяться аналогично выражениям (5), (6)

$$\frac{\eta_M(P, NA_M)}{\eta_M(P, n_M)} = \frac{1 - \left(1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_M}{n_M} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right)^{0,5 \cdot P + 1}}{1 - \left(1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right)^{0,5 \cdot P + 1}}. \quad (15)$$

Аналогично выражениям (7), (14) будет рассчитываться и коэффициент потерь излучения K_M для прошедшего излучения:

$$\begin{aligned} K_M &= \frac{E'_M(\lambda)}{M_M(\lambda)} = \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \frac{\eta_M(P, NA_M)}{\eta_M(P, n_M)} = \\ &= \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_M}{n_M} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right)^{0,5 \cdot P + 1}}{1 - \left(1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right)^{0,5 \cdot P + 1}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Если поверхность наблюдаемого образца является вторичным излучателем с большим рассеянием, т.е. индикатриса такого вторичного излучателя является широкой, то коэффициент K_M рассчитывается полностью аналогично формуле (7):

$$\begin{aligned} E'_{MS}(\lambda) &= \frac{d\Phi_{MS}(\lambda)}{dA'_M} = \frac{\int_{\Omega_M} L_{MS}(\lambda) \cdot dA_K \cdot l_{MS}(\Omega) \cdot d\Omega}{dA'_M} = \\ &= \frac{dA_M}{dA'_M} \cdot \left(M_{MS}(\lambda) \cdot \frac{\int_{\Omega_M} l_{MS}(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_{MS}(\Omega) \cdot d\Omega} \right) = \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \left(M_{MS}(\lambda) \cdot \frac{\int_{\Omega_M} l_{MS}(\Omega) \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} l_{MS}(\Omega) \cdot d\Omega} \right) = \end{aligned} \quad (17)$$

$$= M_{MS}(\lambda) \cdot \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \frac{\eta_{MS}(P_S, NA_M)}{\eta_{MS}(P_S, n_M)},$$

где $d\Phi_{MS}(\lambda)$, $E_{MS}'(\lambda)$, $L_{MS}(\lambda)$, $M_{MS}(\lambda)$ — энергетический поток оптического излучения, попадающий на элементарную площадку в плоскости изображения изображающего канала ЦМ, энергетическая освещенность в осевой точке плоскости изображения изображающего канала ЦМ, энергетические яркости и светимости составляющих рассеянного излучения как функции от длины волны соответственно;

$I_S(\Omega)$ — индикатриса рассеянной составляющей излучения поверхности наблюдаемого образца как нормированные функции яркости источника излучения от величины телесного угла Ω ;

P_S — параметр формы индикатрисы рассеянной составляющей излучения;

$\eta_{MS}(P_S, NA_M)$ — коэффициент использования потока рассеянной составляющей излучения как функция от показателя P_S и величин числовой апертуры изображающего канала ЦМ. Отношения этих коэффициентов, которые определяют относительные части прошедших и рассеянных составляющих, будут определяться аналогично выражениям (5), (6):

$$\frac{\eta_S(P_S, NA_M)}{\eta_S(P_S, n_M)} = \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{NA_M}{n_M} \right)^{0,5 \cdot P_S + 1} \right). \quad (18)$$

Аналогично выражению (7) будет рассчитываться и коэффициент потерь излучения K_M для рассеянного излучения:

$$K_{MS} = \frac{E_{MS}'(\lambda)}{M_{MS}(\lambda)} = \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \frac{\eta_{MS}(P_S, NA_M)}{\eta_{MS}(P_S, n_M)} = \frac{1}{\beta_M^2} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{NA_M}{n_M} \right)^{0,5 \cdot P_S + 1} \right). \quad (19)$$

Особо следует подчеркнуть, что полученные формулы (17), (19) могут использоваться совместно, так как излучение освещенной поверхности наблюдаемого образца может содержать составляющие прошедшего и рассеянного излучения [4, 6].

Подстановка полученных выражений (4)–(19) для расчета всех коэффициентов потерь излучения K_K , K_O , K_M в общее выражение (1)–(3) позволяет получить основную формулу для осуществления инженерного расчета полезной составляющей и отношения сигнал/шум в выходном цифровом сигнале ЦМ. Предложенный аппарат (1)–(19) может использоваться и для энергетического расчета ЦМ, работающего в отраженном свете с непрозрачными объектами. В этом случае роль конденсора будет играть микрообъектив в обратном ходе лучей, а в формулах (1)–(3) необходимо заменить спектральный коэффициент пропускания наблюдаемого объекта на спектральный коэффициент отражения поверхности (рис. 1) [4, 6].

Выводы

Предложен математический аппарат для выполнения энергетического расчета ЦМ, который содержит аналитические выражения для определения потерь излучения во всех основных компонентах осветительного и изображающего каналов ЦМ — коллективе, конденсоре, микрообъективе с тубусной линзой.

Основным преимуществом предложенного математического аппарата является:

1) получение данных об амплитуде полезной составляющей цифрового сигнала на выходе цифровой камеры и отношении сигнал/шум;

2) предложенная методика энергетического расчета требует минимального количества простых вычислений — пересчета спектральных характеристик и расчета трех коэффициентов потерь. Применение типовых методик энергетического расчета потребовало бы вычислений двумерных интегралов по площади входных зрачков коллектива, конденсора, микрообъектива в дополнение к пересчету спектральных характеристик;

3) для энергетического расчета используются минимальное количество параметров — яркость и цветовая температура источника излучения, цифровые апертуры и линейные увеличения коллектива, конденсора и микрообъектива, основные параметры цифровой камеры. Это позволяет широко использовать данную методику для энергетического расчета ЦМ без наличия информации о конструктивных особенностях его оптической системы.

Приложение. Вывод формулы для вычисления коэффициента потерь излучения в конденсоре цифрового микроскопа (рис. 2,а):

$$\begin{aligned}
 \eta_o(P, NA_K) &= \int_{\Omega_o'} l_K(\Omega') \cdot d\Omega' = \int_0^{\sigma_o'} l_o(\Omega'(\sigma')) \cdot d\Omega'(\sigma') = \\
 &= \int_0^{\sigma_o'} l_o(\sigma') \cdot \cos(\sigma') \cdot 2\pi \cdot \sin(\sigma') \cdot d\sigma' = 2\pi \cdot \int_0^{\sigma_o'} l_o(\sigma') \cdot \cos(\sigma') \cdot \sin(\sigma') \cdot d\sigma' = \\
 &= 2\pi \cdot \int_0^{\sigma_o'} \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma') \right)^{0,5 \cdot P} \cdot \cos(\sigma') \cdot \sin(\sigma') \cdot d\sigma' = \\
 &= -2\pi \cdot \int_0^{\sigma_o'} \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma') \right)^{0,5 \cdot P} \cdot \cos(\sigma') \cdot d(\cos(\sigma')) = \\
 &= -2\pi \cdot \int_0^{\sigma_o'} \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma') \right)^{0,5 \cdot P} \cdot \frac{1}{2} \cdot d(\cos^2(\sigma')) =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -\pi \cdot \int_{\cos(0)}^{\cos(\sigma_o')} \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot Y \right)^{0,5 \cdot P} \cdot dY = \\
 &= -\pi \cdot \frac{1}{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \int_{\cos^2(0)}^{\cos^2(\sigma_o')} \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot Y \right)^{0,5 \cdot P} \cdot \\
 &\quad \cdot d \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot Y \right) = \\
 &= \pi \cdot \frac{1}{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \frac{1}{0,5 \cdot P + 1} \cdot \left[\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot 1 \right)^{0,5 \cdot P + 1} - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma_o') \right)^{0,5 \cdot P + 1} \right] = \\
 &= \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \left[\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \cos^2(\sigma_o) \right)^{0,5 \cdot P + 1} \right] = \\
 &= \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \left[\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot (1 - \sin(\sigma_o')) \right)^{0,5 \cdot P + 1} \right] = \\
 &= \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} \cdot
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 - \frac{\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{NA_O^2}{n_O^2} \right) \right)^{0,5 \cdot P + 1}}{\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1}} \right] = \\
 & = \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} \cdot \\
 & \cdot \left[1 - \frac{\left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 - \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_O}{n_O} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1}}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right] = \\
 & = \frac{\pi}{(0,5 \cdot P + 1) \cdot \left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \cdot \left(\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 \right)^{0,5 \cdot P + 1} \cdot \\
 & \cdot \left[1 - \frac{\left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \cdot \frac{NA_O}{n_O} \right)^2}{\left(1 - \beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2 + \left(\beta_K \cdot \frac{n'_K}{n_K} \right)^2} \right]^{0,5 \cdot P + 1}
 \end{aligned}$$

1. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1989. — 360 с.
2. Holst G.C. Sampling, aliasing, and data fidelity for electronic imaging systems, communications, and data acquisition. — Bellingham: SPIE Press, 1998.
3. Hand W.G. A practical Guide to Digital Microscopy // Photonics Spectra — 2001. — N 11. — P. 100–104.
4. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы / Под ред. Н. И. Полякова. — Ленинград: Машиностроение, 1967. — 512 с.
5. Venatati B.L. In search of ultimate Image Sensor // Photonics Spectra. — 2001, Sept. — P. 132–136.
6. Бергер И. и др. Практическая микрофотография / Пер. с нем. К. Ф. Плитта, М. Р. Шпольского / Под ред. А. М. Розенфельда. — М.: Мир, 1977. — 320 с.

7. Axio Cam HRc. The camera that challenges your microscope. Product description. — Göttingen: Carl Zeiss Light Microscopy, 2003. — 8 p.
8. Leica Digital Camera Systems. Technical Data. — Heerburg: Leica Microsystems Ltd., 2002. — 12 p.
9. Digital eclipse DXM 1200F. Ultra high quality digital cameras for photographic use. Product description. — Kawasaki: Nikon Co, 2003. — 5 p.
10. Digital camera Olympus PD70. Product description. — Tokyo: Olympus Optical, Co, 2003. — 4 p.
11. *Василенко Г.И., Тараторкин А.М.* Восстановление изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
12. *Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П.* Теория оптических систем. — М.: Машиностроение, 1973. — 488 с.

Поступила в редакцию 27.02.2004