

**Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.**

УДК 681.7.013.7

О.В. Печинская, Е.Д. Сангаджиева, Н.М. Скорнякова

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: [ZhukovaOV@mpei.ru](mailto:ZhukovaOV@mpei.ru)*

**ГЛУБИНА РЕЗКО ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА И ГЛУБИНА  
РЕЗКОСТИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ОСНАЩЁННЫХ АДАПТЕРОМ  
ШАЙМПФЛЮГА**

**АННОТАЦИЯ**

В работе изложены два подхода к определению глубины резко изображаемого пространства в оптических системах с адаптером Шаймпфлюга: относительно предмета и изображения. Получены соотношения, позволяющие оценить изменение ГРИП в зависимости от угла наклона оси объектива. Определена точность установки объектива как функция угла наклона оси объектива и заданных параметров регистрации изображения.

**АДАПТЕР ШАЙМПФЛЮГА, ГЛУБИНА РЕЗКОСТИ, ГЛУБИНА РЕЗКО  
ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА, ТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ ОБЪЕКТИВА**

**ВВЕДЕНИЕ**

Адаптер Шаймпфлюга представляет собой механическое устройство, устанавливаемое между камерой и объективом, с помощью которого можно наклонять объектив относительно камеры и наоборот. Некоторые адаптеры также имеют функцию сдвига в плоскости, перпендикулярной оптической оси, что позволяет, смещать центр поля зрения объектива относительно центра матрицы. К неоспоримым достоинствам адаптеров Шаймпфлюга можно отнести то, что они позволяют использовать различные объективы камеры в каком угодно сочетании. Кроме того, адаптеры, как правило, имеют больший диапазон углов наклона, нежели объективы с функцией tilt&shift.

Распространённое заблуждение, что применение объективов с функцией наклона вообще и адаптера Шаймпфлюга в частности, позволяет повысить глубину резкости. При съёмке с наклоном объектива и/или матрицы глубина резкости всегда будет меньше, чем в классической системе той же конфигурации. Более того, в системах с наклоном объектива и/или матрицы существует несколько подходов к определению глубины резко изображаемого пространства (ГРИП) и глубины резкости. В настоящей работе изложено несколько подходов к определению ГРИП, а также получены аналитические зависимости, позволяющие оценить, как изменяется ГРИП при изменениях наклона объектива или матрицы.

Важным аспектом при решении инженерно-технических и научных задач является анализ допустимых точностей установки компонентов системы. В настоящей работе проведён анализ точности установки объектива и/или матрицы как функции угла наклона.

**ГЛУБИНА РЕЗКО ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА**

В классических оптических системах для предмета на конечном расстоянии глубина резко изображаемого пространства фотографического объектива определяется,

как расстояние между передним и задним планами и может быть выражена через параметры объектива и приемлемого для данной задачи качества изображения [1]

$$\Delta = -\frac{2pD\delta'\beta}{D^2\beta^2 - (\delta')^2}, \quad (1)$$

здесь  $p$  – положение плоскости наведения,  $D$  – диаметр входного зрачка объектива,  $\beta$  – линейное увеличение,  $\delta'$  – допустимый кружок рассеяния из-за расфокусировки. Глубина резкости при фото- или видеосъёмке определяется диафрагменным числом объектива и величиной допустимого кружка рассеяния

$$\Delta = \pm \frac{f'}{D} \delta'. \quad (2)$$

Определение ГРИП в оптических системах оснащённых адаптером Шаймпфлюга, который позволяет осуществлять наклон объектива или матрицы относительно оптической оси не так однозначно. Один подход основан, как и классический, на величине допустимого кружка рассеяния и соответствующем *смещении плоскости изображения*. Область резко изображаемого пространства тогда заключена между двумя пересекающимися плоскостями (рис. 1). Возможен также и другой подход, когда ГРИП определяется величиной допустимого кружка рассеяния и *параллельным смещением плоскости наведения* и ГРИП определяется расстоянием от переднего до заднего плана (рис. 4).

### 1-ый способ задания ГРИП

В оптических системах, оснащённых адаптером Шаймпфлюга, область резко изображаемого пространства ограничивается двумя пересекающимися плоскостями и представляет собой клин, ребро которого – так называемая *шарнирная линия*. На рисунке 1 изображена оптическая система с наклоном матрицы относительно нормали к оптической оси на угол  $\alpha$ , плоскость наилучшей фокусировки (ПНФ) теперь наклонена к плоскости матрицы на угол  $\Psi$ . ПНФ проходит через точки  $C_1$  и  $C_2$ . Точка  $C_1$  – проекция линии пересечения плоскости изображения (ПИ) с плоскостью объектива (ПО) – линии *Шаймпфлюга*; точка  $C_2$  – проекция линии пересечения передней фокальной плоскости объектива (ПФП) и плоскости, параллельной ПИ и проходящей через ось вращения объектива, (ППИ) – *шарнирной линии*. Для систем с наклоном объектива задача определения ГРИП может быть решена аналогично с соответствующим переходом от системы координат, связанной с объективом, к системе координат, связанной с матрицей.

При смещении ПИ ближе к объективу (ближняя плоскость изображения БПИ) и дальше от объектива (далняя плоскость изображения ДПИ) в диапазоне  $\Delta$ , в пределах которого изображение не превышает размеров допустимого кружка рассеяния  $\delta'$ , точки  $C_1^B$  и  $C_1^D$  пересечения БПИ и ДПИ с ПО задают новые положения плоскостей наилучшей фокусировки: ПНФБ и ПНФД соответственно. Данные плоскости ограничивают область резко изображаемого пространства. Поскольку плоскости ПНФБ и ПНФД не параллельны друг другу ГРИП удобно характеризовать не расстоянием между плоскостями, а углами наклона ПНФБ и ПНФД к плоскости, параллельной плоскости матрицы: углы  $\varphi_B$  и  $\varphi_D$  на рисунке 1, в общем случае  $\varphi_B \neq \varphi_D$ . Плоский угол при вершине клина  $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_D$ .

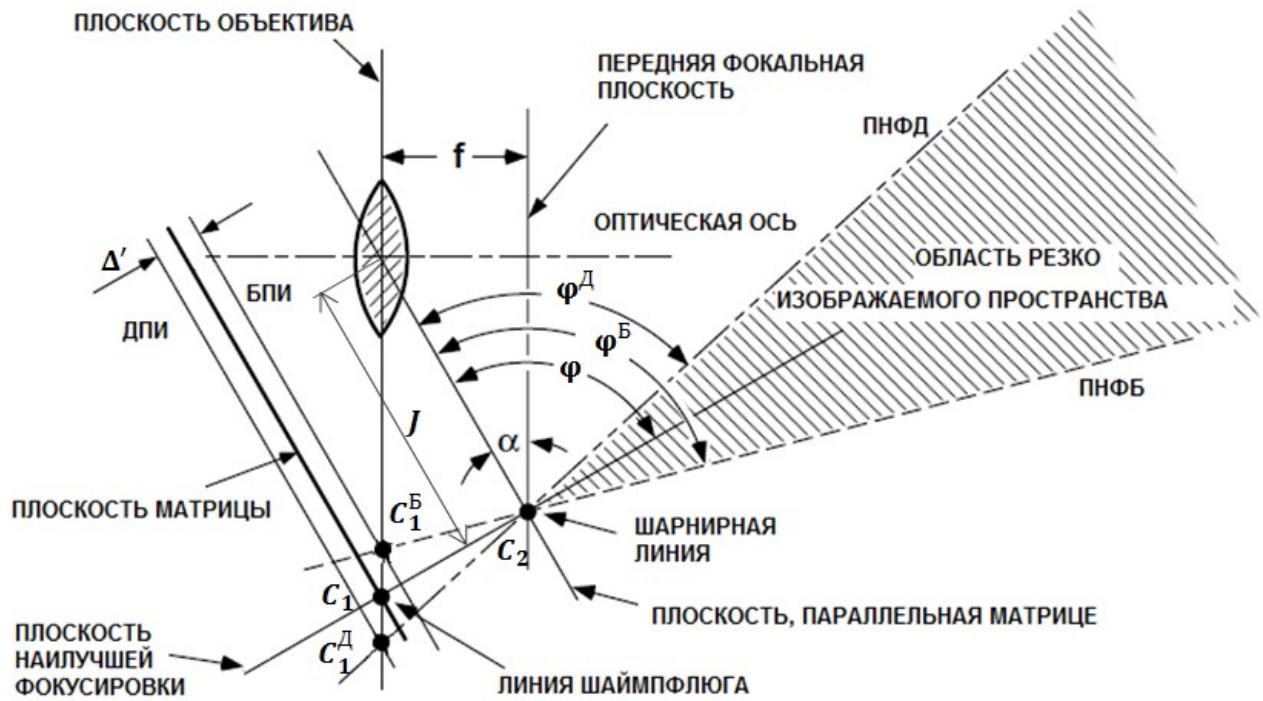


Рис. 1. К определению ГРИП в оптической системе с наклоном объектива и/или матрицы (способ 1)

Величины углов определяются конфигурацией оптической системы и допустимым кружком рассеяния:

,  
(3)

где  $D$  – кратчайшее расстояние от оси вращения объектива до ПНФ,  $A = C_1 C_2$  – расстояние от оси вращения объектива до ПИ (либо от *шарнирной линии* до *линии Шаймпфлюга*),  $b = \frac{f}{D}$ , знак «–» в знаменателе соответствует углу  $\varphi^B$ , знак «+» – углу  $\varphi^H$ . Расстояние  $D$  не всегда удобно определить, можно записать выражение (3) через расстояние от оси вращения объектива до *шарнирной линии*  $J$ :

(4)

Область резко изображаемого пространства симметрична относительно ПНФ, т.е.  $\varphi^B = \varphi^H$ , когда  $\cos(\varphi - \alpha) = 0$ . Как было сказано выше, область резко изображаемого пространства определяется клином с плоским углом при вершине  $\Delta\varphi = \varphi^B - \varphi^H$ , и с учётом

$$I = \frac{f}{\sin \alpha}; A = \frac{f}{\sin(\varphi - \alpha)},$$

$\Delta\varphi$  является функцией углов наклона плоскости матрицы и плоскости наилучшей фокусировки

$$\Delta\varphi(\varphi, \alpha) = \arctg \left[ \frac{k\delta'J \sin(\varphi - \alpha)}{fA \left( 1 - \frac{k\delta'J \sin(\varphi - \alpha) \cos(\varphi - \alpha)}{f^2} \right)} \right] + \arctg \left[ \frac{k\delta'J \sin(\varphi - \alpha)}{fA \left( 1 + \frac{k\delta'J \sin(\varphi - \alpha) \cos(\varphi - \alpha)}{f^2} \right)} \right] \quad (5)$$

Величины углов  $\varphi$  и  $\alpha$  взаимосвязаны, зависимость  $\varphi(\alpha)$  может быть найдена, используя геометрические соотношения и формулу Гаусса для сопряжённых осевых точек предмета и изображения:

$$\alpha^P / \tan \alpha^P = a / \tan \alpha (\varphi - \alpha); \quad 1/a^P - 1/a = 1/f^P \Rightarrow \varphi(\alpha) = \arctg((\cos \alpha + 1) / \sin \alpha) + \alpha - \pi/2 \quad (6)$$

Таким образом, угол  $\Delta\varphi$  между плоскостями, ограничивающими область резко изображаемого пространства, является функцией одного аргумента  $\alpha$  при известных параметрах регистрации изображения: допустимого размера кружка рассеяния  $\delta$ , фокусного расстояния  $f$  и диафрагменного числа объектива  $k$ :

$$\Delta\varphi(\alpha) = \arctg \left[ \frac{k\delta'J(\alpha) \sin(\varphi(\alpha) - \alpha)}{fA(\alpha) \left( 1 - \frac{k\delta'J(\alpha) \sin(\varphi(\alpha) - \alpha) \cos(\varphi(\alpha) - \alpha)}{f^2} \right)} \right] + \arctg \left[ \frac{k\delta'J(\alpha) \sin(\varphi(\alpha) - \alpha)}{fA(\alpha) \left( 1 + \frac{k\delta'J(\alpha) \sin(\varphi(\alpha) - \alpha)}{f^2} \right)} \right] \quad (7)$$

Графики, иллюстрирующие положение ближнего и дальнего планов, плоскости наилучшей фокусировки, а также зависимость угла при вершине клина от угла поворота объектива, представлены на рисунке 3. Расчёт выполнен для широкоугольного объектива с фокусным расстоянием 24 мм, диафрагменным числом 22 кружка рассеяния  $\delta = 0,3$  мм. Интервал  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  соответствует стандартному диапазону углов наклона для адаптера Шаймпфлюга, интервал  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  - полному диапазону возможных углов наклона объектива.

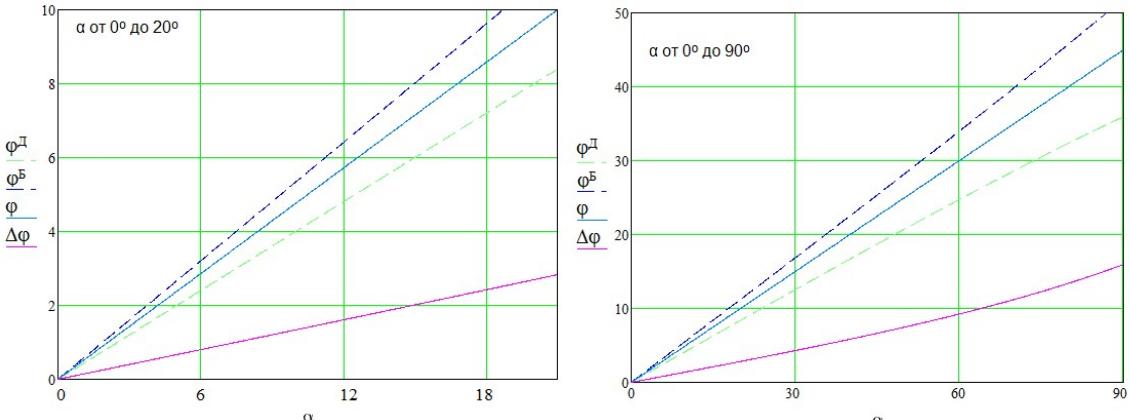


Рис. 2. Графики зависимостей  $\varphi_D(\alpha)$ ,  $\varphi_B(\alpha)$ ,  $\varphi(\alpha)$ ,  $\Delta\varphi(\alpha)$  в пределах  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  (слева) и  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  (справа). По осям координат отложены углы в градусах.

При больших углах наклона становится заметной нелинейность зависимости  $\Delta\varphi(\alpha)$ , т.е. изменение раствора клина области резко изображаемого пространства не пропорционально наклону матрицы. Как и в классических оптических системах, при уменьшении диаметра входного зрачка (более закрытая диафрагма) глубина резкости увеличивается. На рисунке 3 приведены графики зависимости  $\Delta\varphi(\alpha)$  для различных диафрагменных чисел.

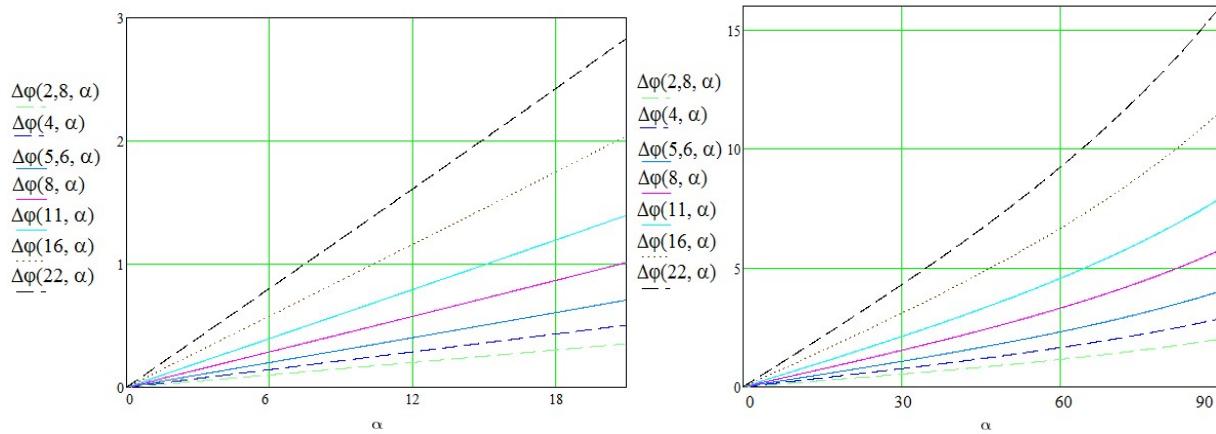


Рис. 3. Графики зависимостей  $\Delta\varphi(\alpha)$  для различных диафрагменных чисел  $k=2.8; 4; 5.6; 8; 11; 16; 22$  в пределах  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  (слева) и  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  (справа). По осям координат отложены углы в градусах.

## 2-ой способ задания ГРИП

Альтернативный подход к определению глубины резко изображаемого пространства в оптических системах с адаптером Шаймпфлюга заключается в следующем: «предметы, находящиеся в пределах некоторого расстояния  $K$  либо  $L$  отображаются достаточно резко, чтобы считаться сфокусированными» [2]. ГРИП может отсчитываться в направлении перпендикулярном плоскости наведения ( $L$ ), а также вдоль прямой, соединяющей ось вращения объектива с заданной точкой ПНФ ( $K$ ). Величины  $K$  и  $L$  могут быть выражены через расстояние  $F$  до точки наведения  $O$ , расстояние до линии Шаймпфлюга  $D$ , световой диаметр объектива  $D_{\text{об}}$  и допустимый размер пятна рассеяния из-за расфокусировки  $\delta$ :

$$, . \quad (8)$$

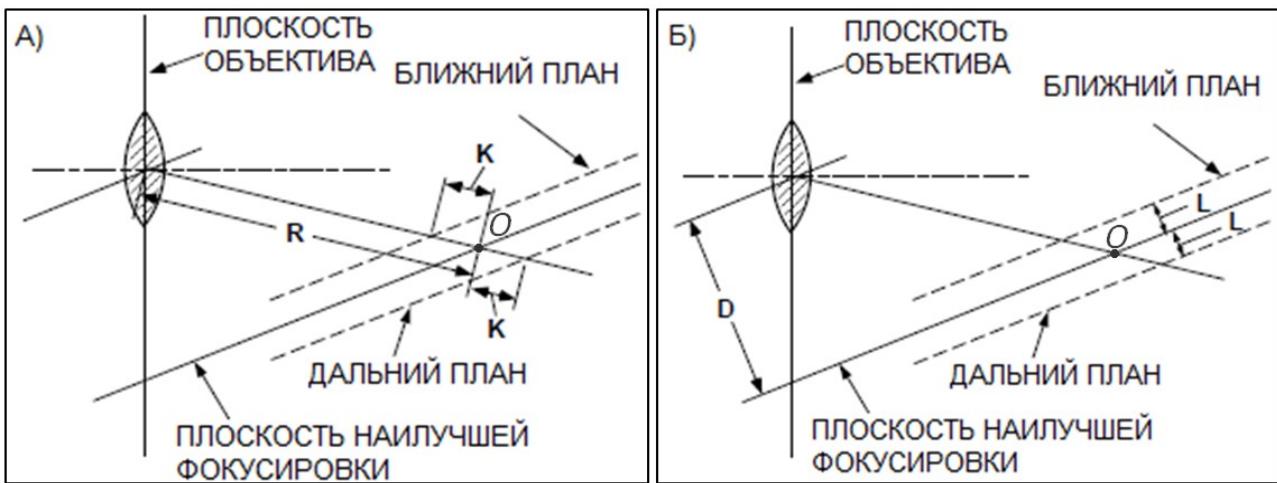


Рис. 4. К определению ГРИП в оптической системе с наклоном объектива и/или матицы (способ 2)

Как видно на рисунке 4,  $L$  не зависит от степени удалённости точки наблюдения от объектива. Поскольку расстояние до линии Шаймпфлюга

$$D = \frac{f \sin \varphi(\alpha)}{\sin \alpha}, \quad L = \frac{f \sin \varphi(\alpha)}{\sin \alpha} \frac{\delta'}{D_{\text{об}}}. \quad (9)$$

Величину  $L$  можно считать самым близким аналогом ГРИП в классических системах.

Величина  $K$  однозначно определяется расстоянием наведения  $F$  и уменьшается с приближением точки наблюдения к объективу до некоторого минимального значения  $K_{\min}$ , когда  $R = D$ . Тогда

$$K_{\min} = L = \frac{f \sin \varphi(\alpha)}{\sin \alpha} \frac{\delta'}{D_{\text{об}}}. \quad (10)$$

В общем, зависимость  $L(\alpha)$  носит нелинейный характер, хотя в диапазоне  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  нелинейностью можно пренебречь, более того  $L$  практически не изменяется. На величину  $L$ , характеризующую глубину резкости, большее влияние оказывает изменение диафрагменного числа (см. рис. 5). Ожидаемо, при уменьшении диафрагмы, значение  $L$  возрастает. Для значений фокусного расстояния 24 мм и 50 мм зависимости  $L(\alpha)$  совпадают.

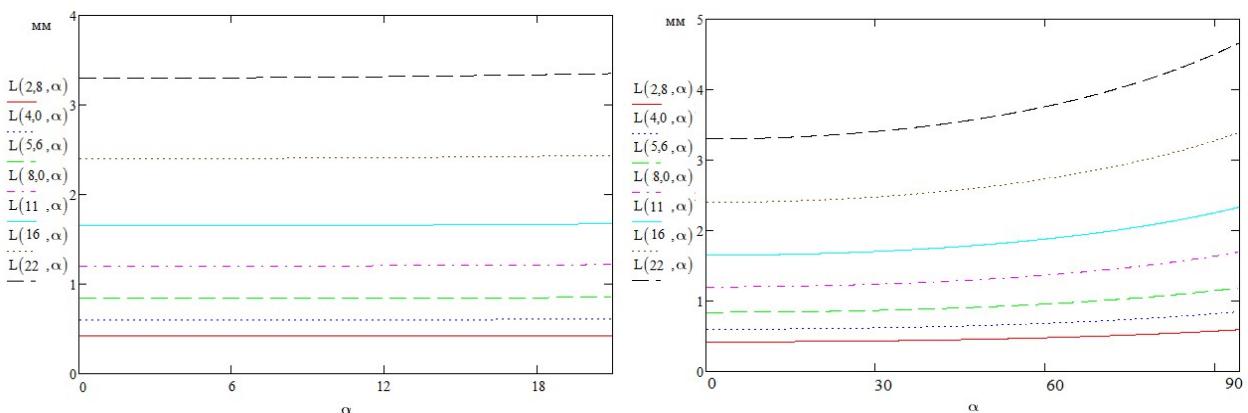


Рис. 5. Графики зависимостей  $L(\alpha)$  для различных диафрагменных чисел  $k=2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22$  в пределах  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  (слева) и  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  (справа).

## ТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ ОБЪЕКТИВА

Вернёмся к первому способу задания глубины резко изображаемого пространства. Допуск на установку объектива или матрицы, точнее плоскости, их характеризующей, определяется не только параметрами регистрации, величиной допустимого кружка рассеяния, но и допустимым отклонением  $\Delta\varphi$ . Другими словами, чем меньшее допустимое изменение размеров зоны резко изображаемого пространства  $d(\Delta\varphi)$ , тем жёстче допуск  $d(\alpha)$ . По определению

$$\frac{d(\Delta\varphi(\alpha))}{d\alpha(\alpha)} = \Delta\varphi'(\alpha) \quad . \quad (11)$$

Предположим, в качестве примера, что допустимое отклонение  $\Delta\varphi$  не должно превышать 10% от расчётного значения  $d(\Delta\varphi) < 0.1 \cdot \Delta\varphi$ . Тогда допуск на установку определяется отношением

$$d\alpha(\alpha) = \frac{\pm 0.1 \Delta\varphi(\alpha)}{\Delta\varphi'(\alpha)} \quad . \quad (12)$$

Выражение, задающее зависимость  $d\alpha(\alpha)$  в явном виде слишком громоздко, поэтому не приведено. Графически зависимость показана на рисунке 6. Приведены графики допустимых отклонений положения объектива или матрицы (по модулю, т.к. отклонения симметричны) от расчётного для различных диафрагменных чисел. Графики почти совпадают и расходятся только вблизи  $\alpha = 90^\circ$ , что с практической точки зрения не имеет значения. Так же было установлено, что изменение фокусного расстояния и размера допустимого кружка рассеяния не оказывает существенного влияния на величину  $d\alpha$ . В интервале углов  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  зависимость можно считать линейной  $d\alpha(\alpha)$ .

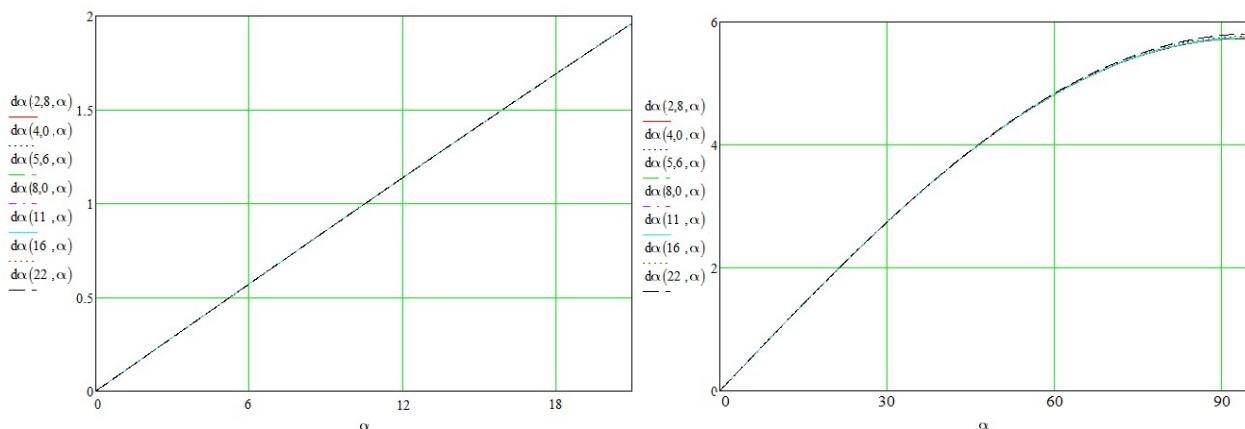


Рис. 6. Графики допустимых отклонений положения объектива от расчётного в зависимости от угла наклона  $\alpha = 0^\circ \dots 20^\circ$  (слева) и  $\alpha = 0^\circ \dots 90^\circ$  (справа). Графики получены для различных диафрагменных чисел  $k=2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22$ . По осям координат отложены углы в градусах.

Таким образом, можно сказать, что допуск на положение объектива либо матрицы определяется только углом наклона  $\alpha$ , величиной допустимого отклонения  $\Delta\varphi$  и не зависит

от характеристик объектива: фокусного расстояния  $f$  и диафрагменного числа  $k$ . Для заданного допустимого отклонения 10% допуски не являются экстремальными при условии качественной механики, но может оказаться, что их трудно выдержать при ручной настройке, особенно при малых значениях углов наклона  $\alpha$ . В пределах 8° - стандартный диапазон для тилт-объективов – допуск не превышает 1°.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глубина резко изображаемого пространства в оптических системах с адаптером Шаймпфлюга может задаваться как параллельным смещением плоскости изображения, так и параллельным смещением плоскости наведения. В первом случае, область резко изображаемого пространства становится клиновидной, во втором определяется расстоянием между параллельными плоскостями. В обоих случаях величина, характеризующая размер области резко изображаемого пространства является функцией параметров регистрации изображения, в том числе взаимных наклонов плоскостей матрицы и объектива.

Допуск на угловое положение объектива не зависит от параметров объектива, таких как фокусное расстояние и диафрагменное число. Влияние величины кружка допустимого рассеяния так же пренебрежимо мало. Определяющими факторами являются номинальное положение объектива и/или матрицы и допустимое значение изменения ширины зоны резко изображаемого пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апенко М.И., Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Задачник по прикладной оптике. М.: «Высшая школа», 2003. 591 с.
2. Harold M. Merklinger Focusing the View Camera, Published by the author: Harold M. Merklinger P. O. Box 494 Dartmouth, Nova Scotia Canada, B2Y 3Y8. Internet Edition (v. 1.6.1) 8 Jan 2007. 146 p.

O.V. Pechinskaya, E.D. Sangadzhieva, N.M. Skornyakova

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: [ZhukovaOV@mpei.ru](mailto:ZhukovaOV@mpei.ru)*

## DEPTH OF FIELD AND DEPTH OF FOCUS FOR THE TILTED LENS

*Image-based and object-based depths of object for the optical systems with Schiempfug adapter are described in the report. The relations between depth of object and lens (sensor) tilt angle are obtained. Lens position accuracy is determined as a function of the lens (sensor) tilt angle and specified image capturing options.*

SCHIEMPFLUG ADAPTER, DEPTH OF FOCUS, DEPTH OF FIELD, LENS POSITION ACCURACY