



Объективы с дифракционно-ограниченным разрешением

И. П. Шишкин, А. П. Шкадаревич
НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Беларусь

Рассмотрены оптические характеристики трех классических объективов: 6-линзового «Гелиос», 4-линзового «Индустар» и 3-линзового «Таир» с точки зрения применения в современных цифровых камерах.

Ключевые слова: объективы, формат сенсора, цифровая камера

Статья получена: 09.03.2021
Принята к публикации: 27.04.2021

ВВЕДЕНИЕ

Критерий дифракционного ограничения является наиболее удобным способом сравнения различных оптических схем объективов. Для дальнейших расчетов будем использовать известные формулы [1].

Предельное разрешение объектива ограничено дифракционным критерием Релея

$$x = 1,22\lambda \frac{f'}{D},$$

где x – минимальный размер пиксела в мкм, f'/d – апертура, λ – рабочая длина волны в мкм.

С другой стороны, требуемое разрешение объектива для заданного размера пиксела можно вычислить по формуле

$$N = \frac{1}{2x},$$

где N – пространственная частота в штр/мм, x – размер пиксела в мкм.

Для расчета разрешения камеры в пикселах используем выражение

$$R = \frac{S}{x^2},$$

где R – разрешение камеры в пикселах, S – площадь сенсора в мм², x – размер пиксела в мкм.

Diffraction-Limited Resolution Lenses

I. P. Shishkin, A. P. Shkadarevich
STC "LEMT" Belomo, Minsk, Belarus

There are considered an optical performances of three classical lenses: Gelios, Industar and Tair, which are applicable for modern digital cameras.

Keywords: camera lens, sensor format

Received on: 09.03.2021

Accepted on: 27.04.2021

INTRODUCTION

The diffraction limiting criterion is the most convenient way to compare different optical designs of objectives. For further calculations, we will use the well-known formulas [1].

The limiting lens resolution is limited by the Rayleigh diffraction criterion

$$x = 1,22\lambda \frac{f'}{D},$$

where x is the minimum pixel size in microns, f'/d is the aperture, λ is the operating wavelength in microns.

On the other hand, the required lens resolution for a given pixel size can be calculated using the formula

$$N = \frac{1}{2x},$$

where N is the spatial frequency in lines/mm, x is the pixel size in microns.

To calculate the camera resolution in pixels, use the expression

$$R = \frac{S}{x^2},$$

where R is the camera resolution in pixels, S is the sensor area in mm², x is the pixel size in μm .

CLASSIC LENSES: GELIOS, INDUSTAR, TAIR

Before embarking on the development of any lens, it is necessary to determine which of the existing schemes could provide the given technical charac-

«ГЕЛИОС», «ИНДУСТАР», «ТАИР»

Прежде чем приступить к разработке любого объектива, нужно определить, какая из существующих схем могла бы обеспечить заданные технические характеристики. Часто для решения поставленной задачи достаточно использовать простую и известную схему объектива, а не заниматься разработкой оригинальной.

Вид объективов и графики оптической передаточной функции показаны на рис. 1, а их основные параметры оценим при одинаковых условиях:

- дифракционно-ограниченное разрешение;
- отсутствие виньетирования.

Параметры объективов представлены в табл. 1. Объективы рассчитаны для формата сенсора 1/3", который в последнее время широко применяется во многих технических устройствах.

Несмотря на то, что полученные в ходе расчета результаты вполне очевидны и ожидаемы, (например, объектив «Гелиос» [2], состоящий из шести линз, имеет лучшее разрешение в сравнении с объективами «Индустар» [3] и «Таир» [4]), на основе этих базовых данных можно сделать предварительную оценку и выбрать оптимальную схему объектива для камеры любого назначения. Пользуясь методом масштабирования конструктивных параметров объектива, можно получить требуемое сочетание величин углового поля, относительного отверстия и разрешения для любого формата сенсора.

При соблюдении компромисса между определенными параметрами объектива достигается улучшение приоритетных. Например, уменьшая угловое поле или допуская виньетирование по полю, можно повысить разрешение, пропорционально увеличив светосилу объектива и, наоборот, снижая требования к разрешению и дисторсии, можно расширить угловое поле объектива.

teristics. Often, to solve the problem, it is enough to use a simple and well-known lens scheme, and not to develop an original one.

The view of the lenses and the graphs of the optical transfer function are shown in Fig. 1, and we will estimate their main parameters under the same conditions:

- diffraction-limited resolution;
- no vignetting.

The parameters of the lenses are presented in Table 1. The lenses are designed for the 1/3" sensor format, which has recently been widely used in many technical devices.

Despite the fact that the results obtained during the calculation are quite obvious and expected (for example, the Gelios lens [2], consisting of six lenses, has a better resolution in comparison with the Industar [3] and Tair [4]), based on this basic data, you can make a preliminary assessment and select the optimal lens design for a camera for any purpose. Using the method of scaling the design parameters of the lens, it is possible to obtain the required combination of angular field, relative aperture and resolution for any sensor format.

When a compromise is observed between certain lens parameters, priority improvement is achieved. For example, by decreasing the angular field or allowing vignetting across the field, you can increase the resolution by proportionally increasing the lens aperture and vice versa, by reducing the requirements for resolution and distortion, you can expand the angular field of the lens.

GELIOS LENS

The optical design of the Gelios lens remains one of the most widespread, despite more than a century of history since its creation by the German engineer Gauss. It should be noted that most modern lenses are, to one degree or another, a modification

Таблица 1. Параметры объективов

Table 1. Lens parameters

Тип Type	Фокус, мм Focus, mm	Относительное отверстие Relative aperture	Разрешение, лин/мм Resolution, lin/m	Разрешение камеры, Мп Camera resolution, Mp	Пиксел, мкм Pixel, µm	Формат Format	Поле, ° Field, °	Дисторсия, % Distortion, %
«Гелиос» Gelios	6	F/4	167	2	3	1/3"	56	1
«Индустар» Industar	6	F/8	100	0,7	5	1/3"	56	3,5
«Таир» Tair	15	F/8	100	0,7	5	1/3"	21	2,5

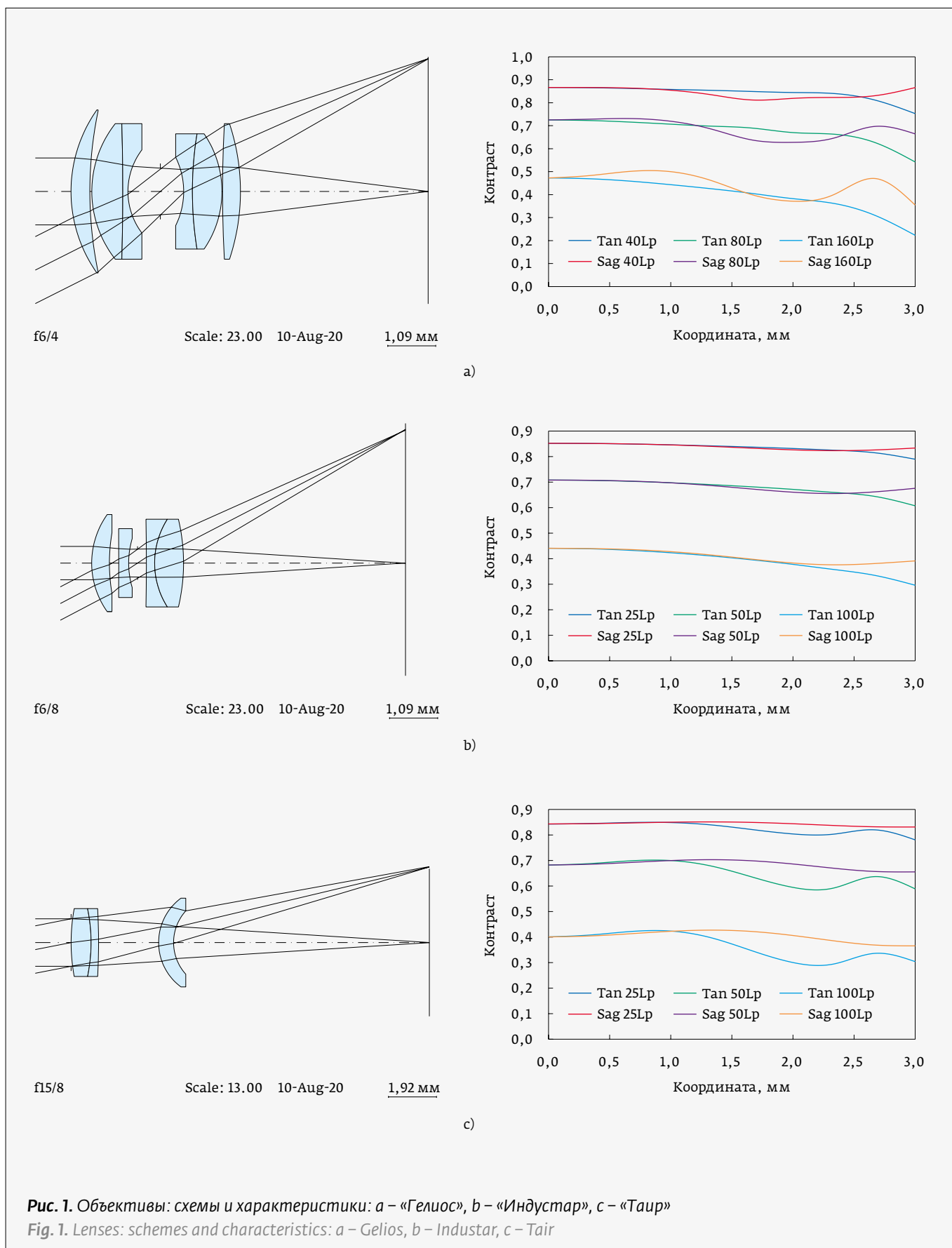


Рис. 1. Объективы: схемы и характеристики: а – «Гелиос», б – «Индустар», с – «Таир»

Fig. 1. Lenses: schemes and characteristics: a – Gelios, b – Industar, c – Tair

ОБЪЕКТИВ «ГЕЛИОС»

Оптическая схема объектива «Гелиос» остается одной из самых распространенных, несмотря на более чем вековую историю со времени его создания немецким инженером Гауссом. Нужно отметить, что большинство современных объективов являются в той или иной степени модификацией этого объектива. И было бы целесообразно рассмотреть характеристики объектива с точки зрения применения с цифровыми сенсорами для мобильных устройств.

Рассмотрим сначала семейство объективов «Гелиос» с фиксированным фокусным расстоянием 21 мм для форматов сенсора от 1/3" до APS-C при условии дифракционно-ограниченного разрешения и при отсутствии виньетирования.

Варианты объективов «Гелиос» с различными комбинациями формата сенсора, углового поля, апертуры и разрешения показаны в табл. 2. На рис. 2 представлены графики зависимости углового поля объектива от апертуры, график зависимости разрешения от формата сенсора.

Рассмотрим семейство объективов «Гелиос» для фиксированного формата сенсора 1/3". Варианты объектива «Гелиос» с различными комбинациями

Таблица 2. Объектив «Гелиос» с различными комбинациями формата сенсора, углового поля, апертуры и разрешения

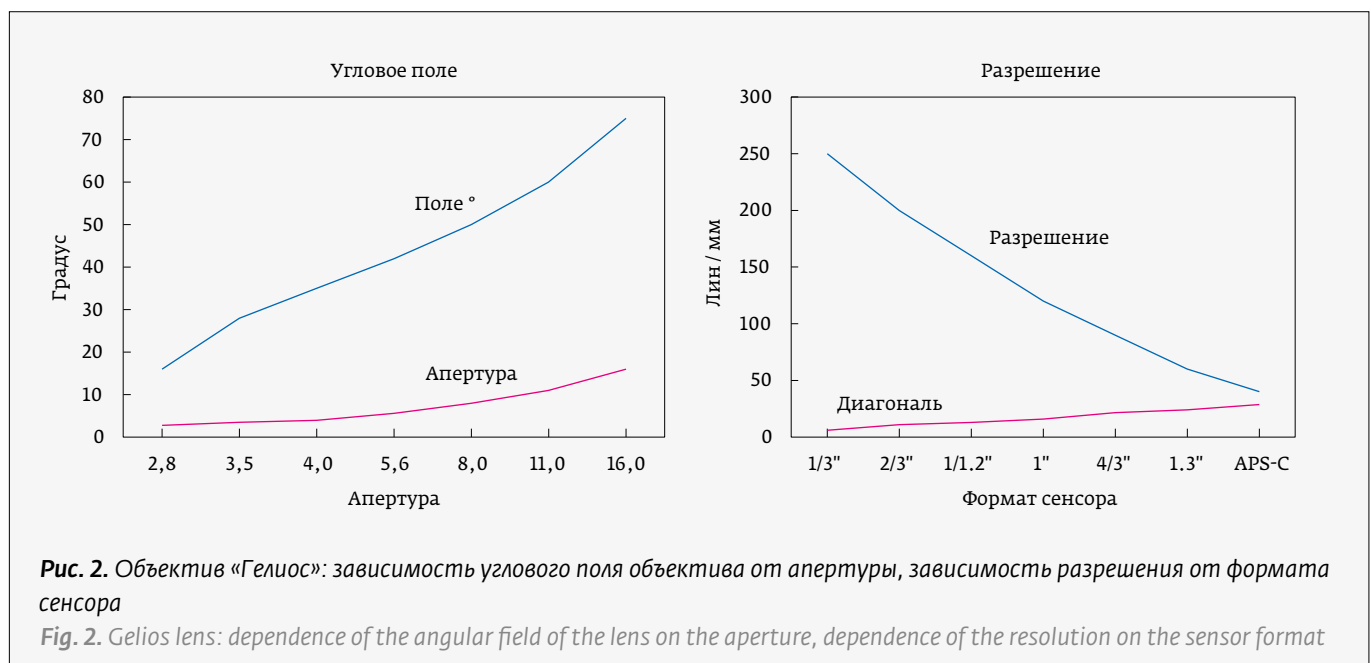
Table 2. Gelios lens with various combinations of sensor format, angular field, aperture and resolution

Поле, ° Field °	Апертура, F# Aperture, F#	Разрешение, лин/мм Resolution, lin/m	Диагональ, мм Diagonal, mm	Формат сенсора Sensor format	Пиксел, мкм Pixel, µm
16	2,8	250	6,0	1/3"	2
28	3,5	200	11,0	2/3"	2,5
35	4,0	160	13,0	1/1.2"	3
42	5,6	120	16,0	1"	3,75
50	8,0	90	21,6	4/3"	5
60	11,0	60	24,0	1.3"	7,5
75	16,0	40	28,8	APS-C	10

of this lens. And it would be advisable to consider the characteristics of the lens from the point of view of application with digital sensors for mobile devices.

Let us first consider the Gelios family of 21 mm fixed focal length lenses for sensor formats from 1/3" to APS-C, subject to diffraction-limited resolution and in the absence of vignetting.

Variants of Gelios objectives with various combinations of sensor format, angular field, aperture and resolution are shown in Table 2. Figure 2 shows the graphs of the dependence of the angu-



фокусных расстояний, углового поля, апертуры и разрешения показаны в табл. 3.

На графиках рис. 3 представлены зависимости разрешения от фокусного расстояния и углового поля от апертуры объектива «Гелиос».

ОБЪЕКТИВ «ИНДУСТАР»

Варианты объектива «Индустар» с различными комбинациями фокусных расстояний, углового поля, апертуры и разрешения показаны в табл. 4.

На графиках рис. 4 представлены зависимости разрешения от фокусного расстояния и углового поля от апертуры объектива «Индустар».

ОБЪЕКТИВ «ТАИР»

Варианты объектива «Таир» с различными комбинациями фокусных расстояний, углового поля, апертуры и разрешения показаны в табл. 5.

На графиках рис. 5 представлены зависимости разрешения от фокусного расстояния и углового поля от апертуры объектива «Таир» для сенсора 1/3".

Результаты проведенного исследования сведены в табл. 6. Пользуясь таблицей, можно подо-

Таблица 3. Объектив «Гелиос»: зависимости характеристик от рабочих параметров

Table 3. Gelios lens: dependence of characteristics on operating parameters

Фокус f' , мм Focus f' , mm	Апертура, F# Aperture, F#	Разрешение, лин/мм Resolution, lin/m	Пиксел, мкм Pixel, μm	Поле, ° Field, °
12	2,8	250	2	28
8	3,5	200	2,5	42
6	4,0	160	3	54
4	5,6	120	3,75	75

Таблица 4. Объектив «Индустар»: зависимости характеристик от рабочих параметров

Table 4. Industar lens: dependences of characteristics on operating parameters

Фокус f' , мм Focus f' , mm	Апертура, F# Aperture, F#	Разрешение, лин/мм Resolution, lin/m	Пиксел, мкм Pixel, μm	Поле, ° Field, °
16	4,0	200	2,5	21
12	4,5	180	3	28
8	5,6	150	3,75	42
6	8,0	100	5	56

lar field of the lens on the aperture, the graph of the dependence of the resolution on the sensor format.

Let us consider the Gelios lens family for a fixed sensor format 1/3". The Gelios lens options with differ-

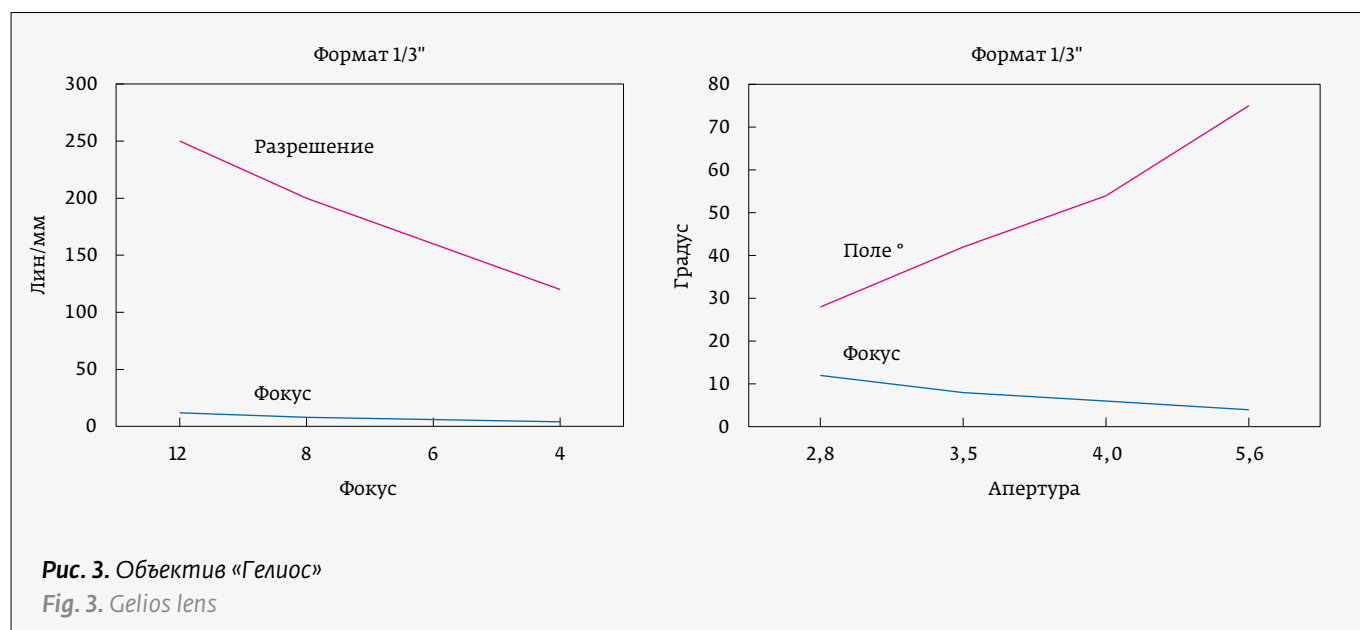


Таблица 5. Объектив «Таир»: зависимости характеристик от рабочих параметров

Table 5. Tair lens: dependence of characteristics on operating parameters

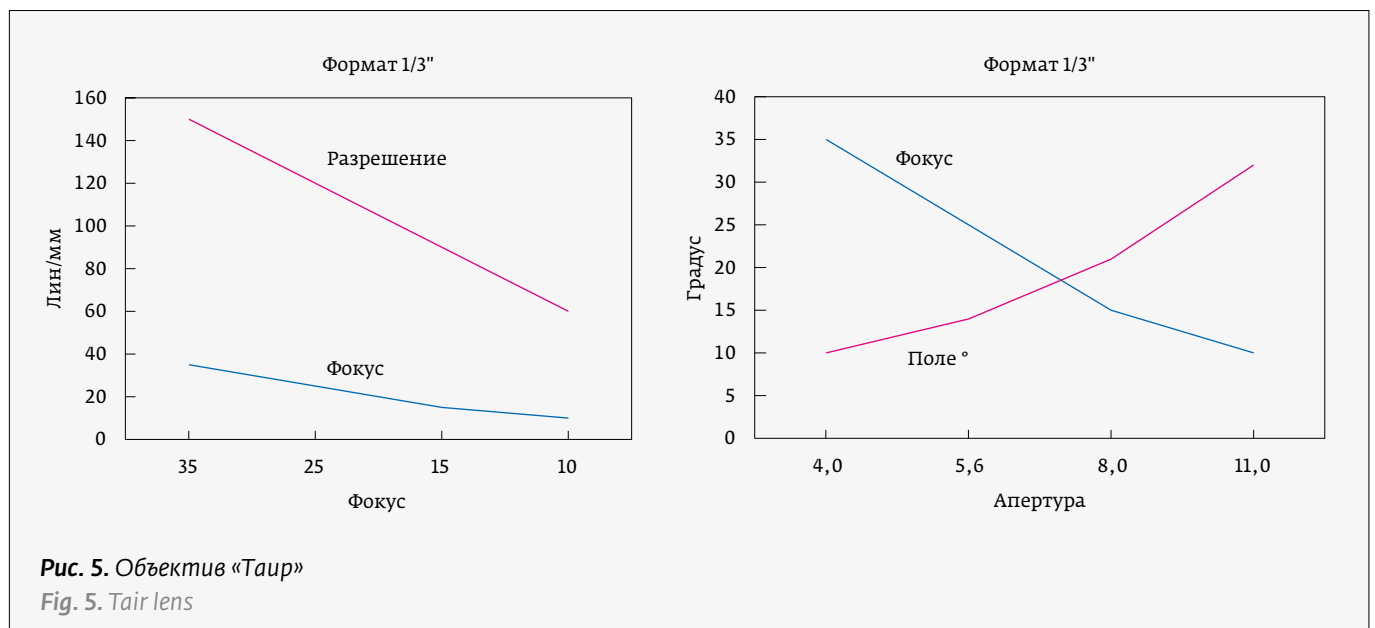
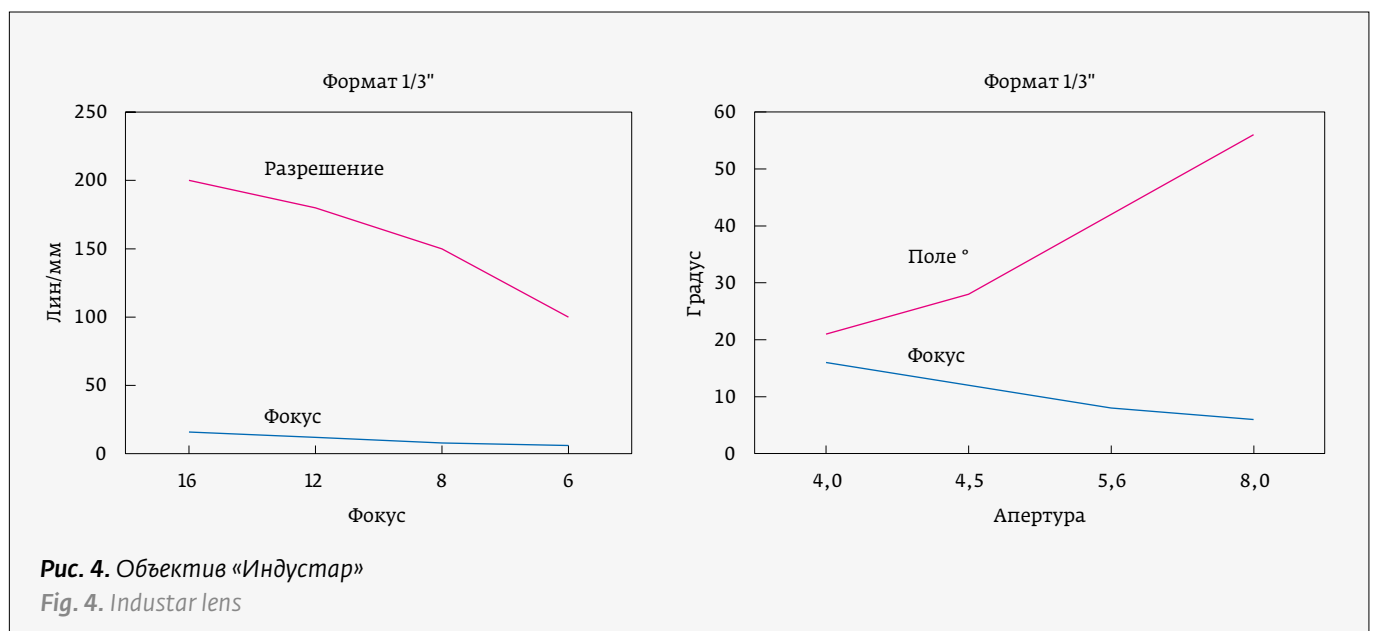
Фокус f' , мм Focus f' , mm	Апертура, F# Aperture, F#	Разрешение, лин / мм Resolution, lin / m	Пиксел, мкм Pixel, μm	Поле, ° Field, °
35	4,0	150	3	10
25	5,6	120	3,75	14
15	8,0	90	5	21
10	11,0	60	7,5	32

ent combinations of focal lengths, angular field, aperture and resolution are shown in Table 3.

The graphs in Fig. 3 show the dependence of the resolution on the focal length and the angular field on the Gelios lens aperture.

INDUSTAR LENS

Industar lens options with various combinations of focal lengths, angular field, aperture and resolution are shown in Table 4.





брать вариант сенсора и объектива с требуемыми параметрами: фокусным расстоянием, апертурой, полем зрения, форматом и разрешением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Классические объективы при правильном выборе сенсора обеспечивают дифракционно-ограниченное разрешение и могут успешно применяться в современных цифровых устройствах различного назначения. Оптимальную схему объектива для камеры любого назначения можно выбрать при соблюдении компромисса между определенными параметрами объектива. Пользуясь методом масштабирования конструктивных параметров объектива, можно получить требуемое сочетание величин углового поля, относитель-

The graphs in Fig. 4 show the dependence of the resolution on the focal length and the angular field on the Industar lens aperture.

TAIR LENS

Tair lens options with various combinations of focal lengths, angular field, aperture and resolution are shown in Table 5.

The graphs in Fig. 5 show the dependence of the resolution on the focal length and the angular field on the Tair lens aperture for a 1/3" sensor.

The results of the study are summarized in Table 6. Using the table, you can select the version of the sensor and lens with the required parameters: focal length, aperture, field of view, format and resolution.

Таблица 6. Результаты исследований

Table 6. Research results

Формат сенсора Sensor format	Диagonalь, мм Diagonal, mm	Фокус f' , мм Focus f' , mm	Тип Type	Поле Field	Апертура, F# Aperture, F#	Пиксел, мкм Pixel, μm	Разрешение камеры, Мп Camera resolution, Mp	Разрешение, лин / мм Resolution, lin / m
1/3"	6	8	«Гелиос» Gelios	40°	3,5	2,5	2,8	200
1/3"	6	12	«Гелиос» Gelios	28°	2,8	2	4,3	250
1/3"	6	21	«Гелиос» Gelios	16°	2,8	2	4,3	250
2/3"	11	21	«Гелиос» Gelios	28°	3,5	2,5	9,3	200
2/3"	11	52	«Индустар» Industar	12°	4	2,7	8	180
1"	16	21	«Гелиос» Gelios	42°	5,6	3,75	8,75	133
1.1"	17.8	75	«Индустар» Industar	12°	4	2,7	12	140
4/3"	21.6	21	«Гелиос» Gelios	54°	8	5	9	100
1.3"	24	21	«Гелиос» Gelios	60°	11	7,5	4,3	67

ного отверстия и разрешения для любого формата сенсора.

REFERENCES

1. Zakaznov N. P., Kiryushin S. I., Kuzichev V. I. *Teoriya opticheskikh sistem.* – М.: Mashinostroyeniye.1992. 448 p.
Заказнов Н. П., Кирышин С. И., Кузичев В. И. *Теория оптических систем.* – М.: Машиностроение.1992. 448 с.
2. URL: <http://www.zenitcamera.com/archive/lenses/helios-44.html>.
3. URL: <https://radojuva.com/2011/05/obzor-industar-50-2-otzuvu/>.
4. URL: <http://www.zenitcamera.com/archive/lenses/tair-3.html>.

ОБ АВТОРАХ

Шишкин Игорь Петрович, к. т.н, shipoflens@mail.ru, НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, Минск, Республика Беларусь.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Шкадаревич Алексей Петрович, д. т. н., НТЦ «ЛЭМТ», БелОМО, Минск, Республика Беларусь.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива. Разработка и исследования выполнена за счет собственных средств НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONCLUSION

With the right choice of sensor, classic lenses provide diffraction-limited resolution and can be successfully used in modern digital devices for various purposes. The optimal lens layout for any camera application can be selected by making a compromise between the specific lens parameters. Using the method of scaling the design parameters of the lens, it is possible to obtain the required combination of angular field, relative aperture and resolution for any sensor format.

ABOUT AUTHORS

Shishkin Igor Petrovich, Candidate of Technical Sciences, shipoflens@mail.ru, RTC "LEMT" BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.
ORCID ID: 0000-0002-4592-1060
Shkadarevich Alexey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, RTC «LEMT» BelOMO, Minsk, Republic of Belarus.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors. Development and research are carried out at the expense of RTC "LEMT" BELOMO.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest.



**Откройте для себя
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ**

Компактные инфракрасные спектрометрические модули, охватывающие диапазоны длин волн 1350-1650 нм, 1550-1850 нм и 1750-2150 нм.

Применения:

- Контроль продуктов питания и сельскохозяйственной продукции
- Распознавание химических веществ и материалов
- Обнаружение влаги
- Сортировка пластика

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS
www.hamamatsu.com

Представительство Hamamatsu Photonics в России и СНГ
Тел: +7 (495) 258-85-18, E-mail: info@hamamatsu.ru