
**ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА, ФОТОНИКА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 535.36

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
В ПРОГРАММЕ РАСЧЕТА И СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
«ZEMAX» С ЦЕЛЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СВЕТОРАССЕЯНИЯ
У МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

© 2021 г. А.В. Тертышников¹, Е.В. Осипов^{2,*}, Н.А. Денискин²,
К.В. Дрыкин²

¹ ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. Академика Е.К. Федорова», Москва, Россия

² ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: Egorosipov3440@gmail.com

Описана схема фотометрической установки, рассмотрены ее компоненты, принцип ее работы, указаны погрешности, возникающие при измерении коэффициента светорассеяния. В программной среде «Zemax» смоделирована модель установки, предназначенная для измерения коэффициента светорассеяния в математических моделях оптических систем. Произведен анализ коэффициента светорассеяния для различных моделей объективов.

ВВЕДЕНИЕ

При прохождении света через оптическую систему происходит отражение части светового потока от поверхностей линз, их торцов и внутренних частей оправы. Часть отраженного света после многократных отражений накладывается на изображение в виде рассеянного света. Рассеянный свет создает дополнительную вредную засветку изображения снимаемых предметов. Рассеянный свет вызывает не только общее уменьшение контраста, но и обуславливает непропорциональную передачу деталей яркости. Таким образом, рассеянный свет снижает функцию модуляции оптической системы.

На этапе разработки оптической системы нельзя с высокой точностью определить значение коэффициента светорассеяния. На сегодняшний день измерение величины светорассеяния производится только после полной сборки и юстировки оптического изделия на специальной предназначенной для этого фотометрической установке, поэтому разработчик оптической системы не может быть уверенным в том, насколько разрабатываемое им изделие соответствует предъявляемым к нему требованиям технического задания. Расчет светорассеяния - это достаточно трудоемкая работа, требую-

щая большого объема времени для ее выполнения. Цель работы: создание аналога фотометрической установки в программе «Zemax» для измерения коэффициента светорассеяния на математической модели требуемого объектива.

В программной среде «Zemax» была смоделирована установка, предназначенная для измерения коэффициента светорассеяния. С помощью созданной модели возможно измерить коэффициент светорассеяния оптических систем в видимом и инфракрасном диапазонах. Данные, полученные при измерении светорассеяния на модели установки, с точностью до $\pm 1\%$ в видимом спектральном диапазоне совпадают с данными измерений, проведенных на реальной установке измерения светорассеяния (аналога).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приведем краткое описание установки для измерения светорассеяния, описание ее работы, а также приведем описание результатов, получаемых при измерении коэффициента светорассеяния.

На рис. 1 показана схема установки для измерения светорассеяния [ГОСТ 24724-81].

На рис. 1 показаны: 1 – фотометрический шар; 2 – коллиматор, предназначен для создания парал-

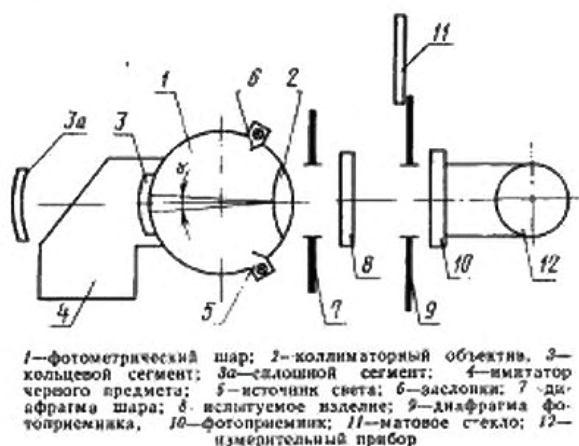


Рис. 1. Схема установки для измерения светорассеяния

лельного пучка лучей на входе в объектив; 3 – Кольцевой сегмент (с различными диаметрами) в шаре, для короткофокусных объективов ($f' = \leq 30$ мм) диаметр отверстия может быть 120 мм, а для объективов с $f' \geq 50$ мм диаметр берется от 20 до 40 мм, при диаметре шара 1 м; 4 – имитатор черного тела; 5 – источник света, на практике источником света в шаре диаметром 1 м являются лампы накаливания мощностью 60 Вт; 6 – заслонки; 7 – диафрагма, ограничивающая пучки света, выходящие из коллиматора, диаметр диафрагмы равен диаметру объектива; 8 – испытуемое изделие; 9 – диафрагма приемник; 10 – фотоприемник; 11 – матовое стекло; 12 – измерительный прибор.

Фотометрический шар 1 – основная часть установки с двумя диаметрально противоположными отверстиями. В первом отверстии шара (выходном) устанавливаются съемный коллиматорный объектив 2, за которым помещают испытуемое изделие 8.

Перед вторым отверстием шара (входным) помещают имитатор черного тела 4, в которое вставляют кольцевые или сплошные сменные сегменты, внутренняя поверхность которых образует продолжение поверхности шара.

Диаметры отверстий кольцевых сегментов должны позволять получать угловые размеры черного предмета $\varphi_{\text{уг}} > 30'$. Для юстировки испытуемого изделия в комплекте установки предусмотрен сегмент с черным перекрестием на внутренней белой поверхности. Внутренние поверхности шара и сегментов окрашены белой матовой краской с коэффициентом отражения от 0.85 до 0.9. Отверстие имитатора черного тела 4 установлено вплотную к входному отверстию шара 1. Внутренняя поверхность имитатора 4 должна быть окрашена черной

матовой эмалью. Яркость черного предмета 4 не должна превышать 0.001 яркости внутренней поверхности фотометрического шара 1.

Фокусное расстояние коллиматорного объектива 2 должно быть равно внутреннему диаметру шара. Световой диаметр коллиматорного объектива 2 или диаметр отверстия шара 1 должен превышать диаметр входного отверстия изделия 8 не менее чем на 10%. Рассеяние коллиматорного объектива должно быть минимальным. Конструкцией крепления коллиматорного объектива 2 должна быть обеспечена возможность быстрого удаления объектива из шара и установки его на шаре.

В качестве коллиматорного объектива 2 допускается использовать однолинзовый объектив, рассчитанный на минимум сферической аберрации, рабочее относительное отверстие которого не превышает 1:5. Коэффициент рассеяния определяют с использованием коллиматорного объектива 2, если фокусное расстояние удовлетворяет неравенству:

$$10f' > D_{\text{ш}},$$

где $D_{\text{ш}}$ – диаметр шара.

Если $10f' \leq D_{\text{ш}}$, то коэффициент рассеяния определяется без применения коллиматорного объектива.

Внутренняя поверхность шара 1 освещается лампами накаливания или лампами дневного света 5, помещенными в специальные гнезда. Не допускается попадание прямых лучей от источников света в выходное отверстие шара, в связи с чем применяют заслонки. Питание источников света 5 осуществляют от аккумуляторных батарей или от сети стабилизированного напряжения с точностью стабилизации напряжения $\pm 1\%$.

Источники света 5 должны быть расположены симметрично относительно выходного отверстия шара. В установке должна быть предусмотрена возможность изменять число включенных источников света для регулирования яркости внутренней поверхности шара. Непосредственно за коллиматорным объективом должна быть расположена диафрагма 9, ограничивающая выходящий из шара 1 пучок лучей. Держатель фотоприемника на специализированной установке при определении коэффициента рассеяния в центре поля зрения должен иметь возможность юстировочного перемещения вдоль оптической оси.

Измерения выполняют следующим образом. Испытуемый объектив ставится перед коллиматором, ограничивается диафрагмой 7. Изображение чер-

ного тела (кольцевого сегмента) попадает на приемник 10, диаметр этого изображения ограничивается диафрагмой 9, после чего мощность сигнала снимается с приемника оптического излучения 12. При повторном измерении необходимо закрыть кольцевой сегмент, таким образом на приемнике мы получим равномерное распределение белого фона создаваемого объективом и измеряем его мощность.

Далее вычислим коэффициент светорассеяния – k .

$$k = \frac{E_{\text{ч.т.}}}{E_{\phi}} \cdot 100\%.$$

Измерения на данной установке проходят в ручном режиме, поэтому существует множество погрешностей присущей данной установке:

- Погрешность несовпадения диаметра диафрагмы 7 и диаметра зрачка объектива;
- Погрешность несовпадения диаметра диафрагмы 9 и диаметра изображения черного тела;
- Черное тело (кольцевой сегмент), коллиматор, объектив, приемник и диафрагмы должны быть отъюстированы по одной оси, что на практике довольно трудно достижимо.

Программа «Zemax» позволяет произвести трассировку лучей от источника излучения до

приемника и снять с него показания, измеренные в ваттах. Для этого необходимо перейти в меню Non – Sequential mode. Данное меню позволяет производить не последовательную трассировку лучей.

На рис. 2 показано окно Non – Sequential Component Editor.

Первые две строчки определяют источник излучения – колонки Z, X, Y position определяют местоположение источника, колонки Tilt about X, Y, Z определяют наклон источников, колонка Layout gaus определяет количество отображаемых лучей, колонка Analysis gaus показывает количество лучей, анализируемых приемником, колонка Power задает мощность источника излучения, колонка wavenumber определяет длину волны излучения.

Третья строка отображает сферу – фотометрический шар, так же в колонках Z, X, Y position – местоположение сферы, в колонках Tilt about X, Y, Z – наклон сферы, в «колонке» материал ставим – mirror, так как лучи для попадания на приемник должны отражаться от стенок шара, в колонке radius выставляем значение радиуса сферы – 500 мм.

Четвертая строка определяет диафрагму, расположенную после коллиматора и перед объективом,

Plot Scale	Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z
	1 Source No..	SOURCE	0	0	0.000	350.000	350.000	143.000	0.000	0.000
	2 Source No..		0	0	0.000	-350.000	350.000	217.000	0.000	180.000
	3 Sphere Integrating S..		0	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4 Standard ..		0	0	0.000	0.000	-485.000	0.000	0.000	0.000
	5 Annulus		0	0	0.000	0.000	550.000	0.000	0.000	0.000
144.500	6 Standard ..		0	0	0.000	0.000	475.000	0.000	0.000	0.000
145.000	7 Standard ..		0	0	0.000	0.000	500.000	0.000	0.000	0.000
25.970	8 Standard ..	surfaces 1-2	0	0	0.000	0.000	551.500	0.000	0.000	0.000
19.895	9 Standard ..	surfaces 3-4	0	0	0.000	0.000	560.000	0.000	0.000	0.000
12.482	10 Standard ..	surfaces 5-6	0	0	0.000	0.000	575.950	0.000	0.000	0.000
15.678	11 Standard ..	surfaces 8-9	0	0	0.000	0.000	598.400	0.000	0.000	0.000
16.913	12 Standard ..	surfaces 9-10	0	0	0.000	0.000	600.900	0.000	0.000	0.000
19.191	13 Standard ..	surfaces 11-12	0	0	0.000	0.000	609.000	0.000	0.000	0.000
20.008	14 Standard ..	surfaces 13-14	0	0	0.000	0.000	615.900	0.000	0.000	0.000
17.839	15 Standard ..	surfaces 15-16	0	0	0.000	0.000	625.400	0.000	0.000	0.000
	16 Annulus		0	0	0.000	0.000	670.000	0.000	0.000	0.000
0.000	17 Detector ..	RIGHT DETECT	0	0	0.000	0.000	671.028	0.000	0.000	0.000

Material	X Half Width	Y Half Width	# X Pixels	# Y Pixels	Data Type	Color	Smoothing	Scale
-	20000	200000	50.000	2	0	10.000		
-	20000	200000	50.000	2	0	10.000		
MIRROR	500.000	0						
ABSORB	0.000	0.000	110.000	0.000				
ABSORB	300.000	300.000	33.000					
F2	4395.000	0.000	144.500	144.500	25.000	1000.000	0.000	144.500
K9	984.000	0.000	145.000	145.000	30.000	-1811.300	0.000	145.000
TK21	77.620	0.000	27.000	27.000	8.100	0.000	0.000	25.970
TK21	39.720	0.000	22.244	22.244	8.700	85.110	0.000	19.895
LF5	157.400	0.000	15.411	15.411	4.250	18.707	0.000	12.482
TF10	-18.450	0.000	12.612	15.678	2.500	-2443.000	0.000	15.678
TK21	-2443.000	0.000	15.678	16.912	7.850	-29.790	0.000	16.913
TK21	-105.440	0.000	18.247	19.189	6.500	-42.460	0.000	19.191
TK14	0.000	0.000	19.782	20.006	7.800	-45.190	0.000	20.008
TK14	58.340	0.000	18.063	18.063	5.650	0.000	0.000	17.839
ABSORB	150.000	150.000	4.500					
ABSORB	40.000	40.000	150	150	0	0	0	0

Рис. 2. Окно Non – Sequential Component Editor

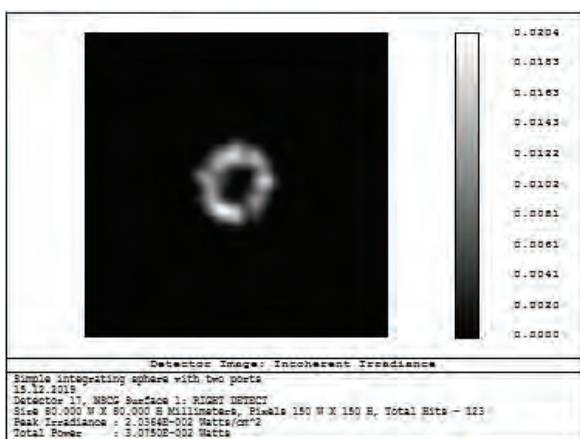


Рис. 3. Изображение черного тела на приемнике

в «колонке» материал ставим – absorb, диаметр отверстия выставляем равным диаметру объектива.

Следующие строки задают коллиматор и исследуемый объектив.

Предпоследняя строка задает диафрагму перед приемником, последняя строка задает приемник.

Для того что бы найти черную точку в изображении используем Detector viewer, искомая черная точка показана на рис. 3.

Как видно из рис. 3, на приемник пришло $3 \cdot 10^{-2}$ Вт. Теперь сравним этот результат с величиной пришедшей энергии на приемник (без черного тела). На рис. 4 показано изображение приемника без черного тела.

Как видно из рис. 4, на приемник пришло $6.9 \cdot 10^{-2}$ Вт. Тогда коэффициент светорассеяния:

$$k = \frac{E_{\text{ч.т.}}}{E_{\phi}} \cdot 100\% = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{6.9 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\% = 43\%$$

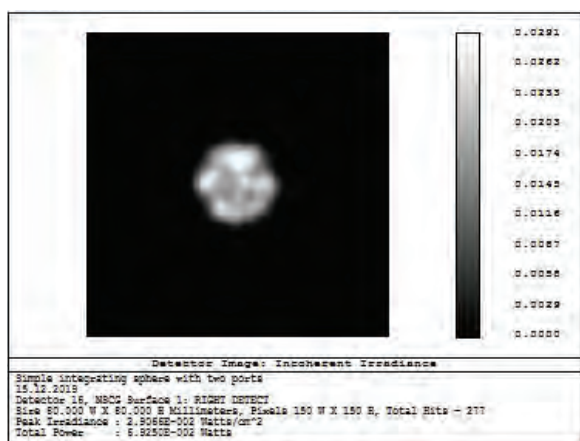


Рис. 4. Изображение приемника без черного тела

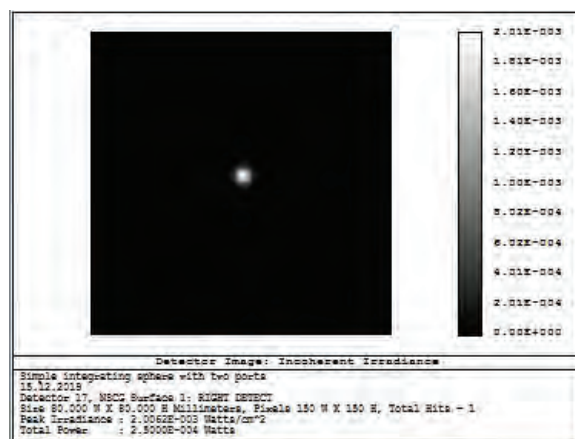


Рис. 5. Изображение черного тела на приемнике при уменьшенной диафрагме

Необходимо уменьшить диафрагму приемника излучения, так при уменьшенной диафрагме изображение черного тела на приемнике показано на рис. 5, изображение приемника без черного тела показано на рис. 6.

$$k = \frac{E_{\text{ч.т.}}}{E_{\phi}} \cdot 100\% = \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\% = 1.25\%$$

Что сходится с данными для испытуемого объектива, полученными на реальной установке.

Изображение самой созданной установки в программе «Zemax» показаны на рис. 7.

Приведем изображения установки и данных с приемника для исследуемого объектива с фокусом $f' = 1260$ мм – рисунки 8, 9, 10.

$$k = \frac{E_{\text{ч.т.}}}{E_{\phi}} \cdot 100\% = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{4.2 \cdot 10^{-2}} \cdot 100\% = 1.19\%$$

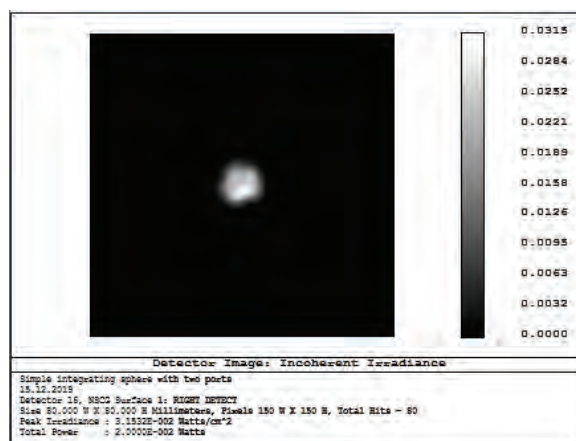


Рис. 6. Изображение приемника без черного тела

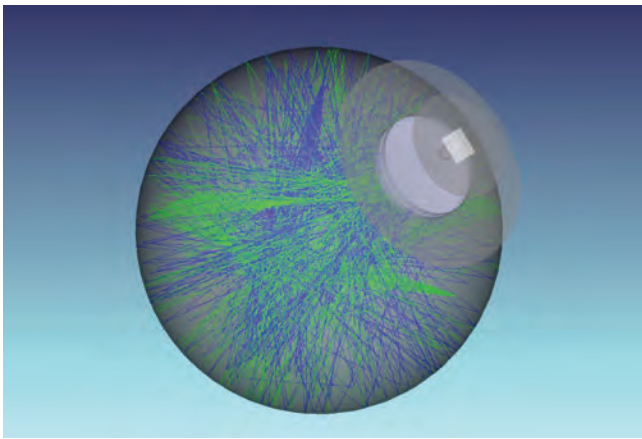


Рис. 7. Изображение созданной установки в программе «Zemax» при количестве трассируемых лучей – 20000

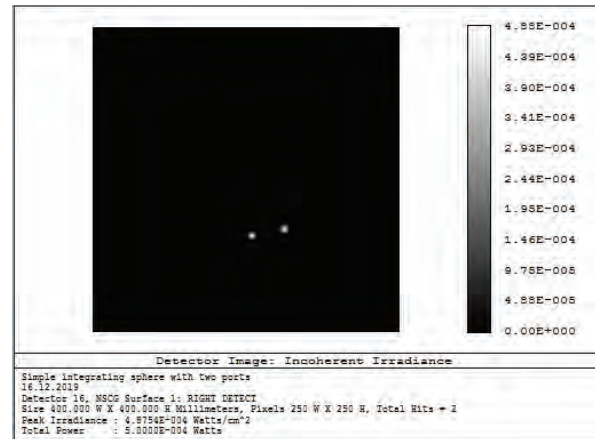


Рис. 9. Изображение черного тела на приемнике у объектива с фокусом $f' = 1260$ мм

ВЫВОДЫ

В программе расчета и синтеза оптических систем «Zemax» была разработана модель фотометрической установки для измерения коэффициента светорассеяния. Установлено, что результаты измерений на смоделированной установке близки к результатам измерений, полученным на реально существующей установке. Модель позволяет устранить целый ряд погрешностей, связанных с неточностью оборудования и человеческим фактором, а проверить величину светорассеяния оптической системы на этапе ее проектирования. Программа расчета и синтеза оптических систем «Zemax» позволяет использовать в своей среде файлы, созданные в программах «Solidworks» и

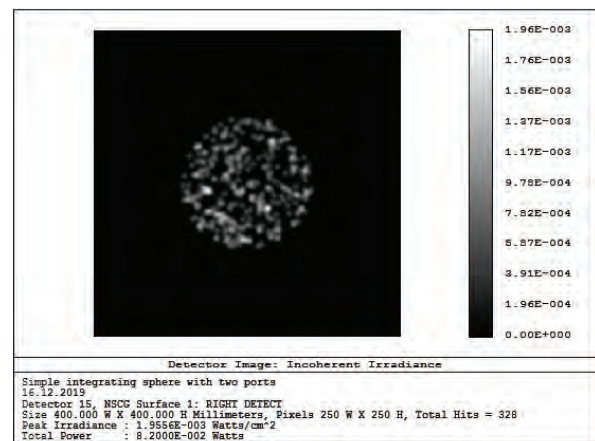


Рис. 10. Изображение приемника без черного тела у объектива без черного тела

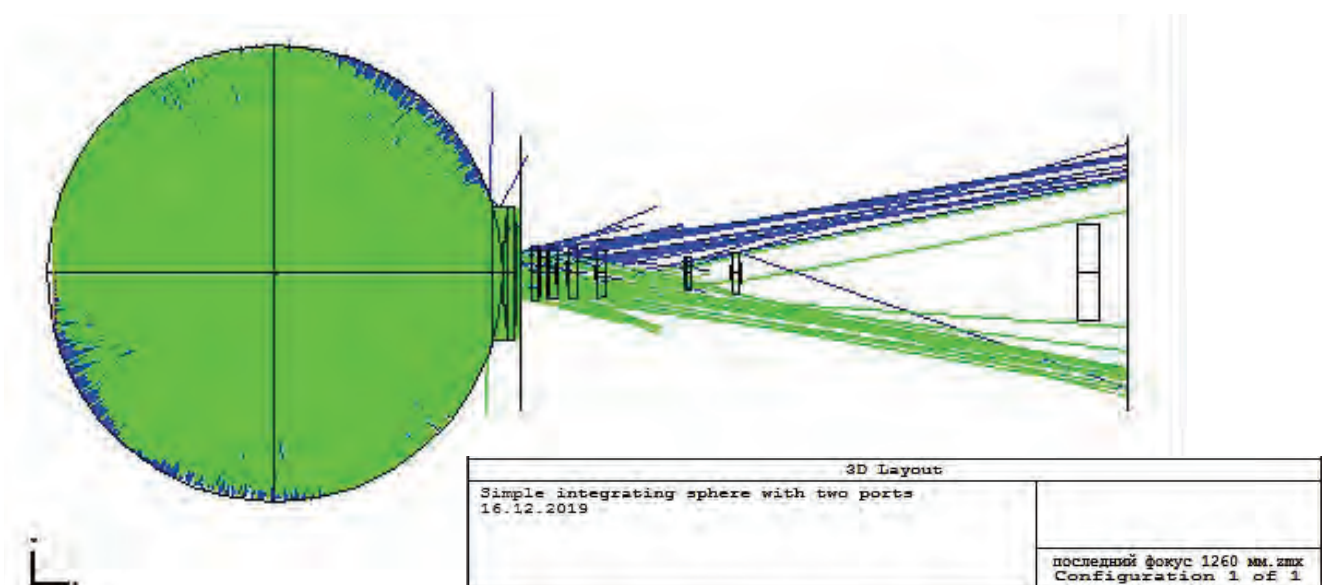


Рис. 8. Фотометрическая установка с объективом $f' = 1260$ мм

«КОМПАС», что дает возможность проверить светорассеяние моделей оптических систем в сборке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокшианский В.Б., Карасик В.Е. Расчет характеристик фоточувствительных приборов с зарядовой связью. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 54 с.
2. Тарасов А.В., Якушенко Ю.Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. – М.: Логос, 2014, 374 с.
3. Руководство пользователя пакетом программ «ZEMAX». Пер. с англ. А.Э. Наджиш. Москва, 2015, 774 с.
4. Крынин Л.И. Проектирование конструкции объективов. – СПб: НИ ИТМО, 2018, 296 с.
5. Mark Noeholson *How to Compile a User-Defined Surface [Electronic resource]* / Mark Nicholson. – Zemax Knowledge Base. – Mode of access: [http://www.zemax.com/support/knowledge base/how-to-compile-a-user-defined surface](http://www.zemax.com/support/knowledge%20base/how-to-compile-a-user-defined-surface). – Data of access: 05.11.2019.
6. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы [Nonmetallic structural materials]. Moscow, Moscow State Industrial University Publ., 2019.
7. Spectrology – Spectroscopy & Optical Sensing Solutions. *Sampling Optics Define the Measurement*. Salmonberry St. Wesley Chapel [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.spectrology.com/sampling-optics/>. – Data of access: 05.11.2019