

УДК 681.7.037

Синтез оптической системы преобразователя пучка лазерного излучения на основе асферических линз из полимерных материалов

© 2020 г. **А. С. ЕКИМЕНКОВА**, АСПИРАНТ; **М. К. ОРЕХОВА**, АСПИРАНТ;
А. О. ВОЗНЕСЕНСКАЯ, КАНД. ТЕХН. НАУК; **В. Н. ВАСИЛЬЕВ**, ДОКТОР ТЕХН. НАУК

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: asekimenkova@itmo.ru

Поступила в редакцию 02.07.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-11-88-94

Для решения широкого круга технологических задач требуется преобразование профиля лазерного пучка. Одним из таких приложений является генерирование плоскостного пучка с равномерным распределением интенсивности. Традиционно применяемые коллимационные системы не позволяют добиться изменения профиля лазерного пучка. Для достижения высокого качества гомогенизации излучения целесообразно использовать линзы с асферическими поверхностями высших порядков, производство которых из оптического стекла требует дорогостоящих технологий и оборудования. Методика изготовления линз из полимерных оптических материалов позволяет выполнить поверхности любой сложности. В данной работе представлен синтез оптической системы преобразователя пучка лазерного излучения на основе асферической полимерной оптики с использованием программного обеспечения ZEMAX. Приведены сравнительный анализ характеристик качества систем из полимерной и стеклянной оптики и рекомендации по рациональному выбору материалов.

Ключевые слова: преобразователь лазерного излучения, асферическая оптика, оптические полимерные материалы, моделирование оптических систем, оптимизация.

Код OCIS: 250.2080

ВВЕДЕНИЕ

Источники лазерного излучения получили широкое применение в оптических приборах и технологических комплексах различного назначения благодаря своим особым характеристикам, таким как высокая когерентность, узкая направленность, высокая мощность, узкий спектральный диапазон излучения. Для многих медицинских и технологических приложений требуются как коллимация лазерного пучка, так и получение равномерности распределения его интенсивности.

Распределение интенсивности излучения в сечении лазерного (гауссова) пучка описыва-

ется уравнением (1), предложенным Фредом Дики и его коллегами в работе [1]

$$I(r) = g\left(\frac{r}{R}\right), \quad (1)$$

где r — зрачковая координата, R — радиус перетяжки лазерного пучка.

Оптические системы (ОС) для коллимации лазерного излучения зачастую представляют собой перевернутую двухкомпонентную схему Галилея, выполненную из сферической стеклянной оптики. Такие системы не позволяют получать равномерное распределение излучения в сечении лазерного пучка. Для решения

данной задачи возможно использовать более сложные виды оптических поверхностей, такие как асферические поверхности свободной формы “*freeform*”, массивы микролинз и другие системы.

Устройство преобразователя лазерного излучения основано на законе сохранения энергии для плоских входного и выходного фронтов [2]

$$I_{in}dw = I_{out}dW, \quad (2)$$

где $dw = 2\pi r dr_{in}$ — элемент входной области, r_{in} — радиус входного пучка, $dW = 2\pi R dr_{out}$ — элемент выходной области, r_{out} — радиус выходного пучка. Уравнение (2) является основным для проектирования ОС лазерных преобразователей.

В работе [3] авторами предложена система гомогенизатора лазерного излучения на основе асферических поверхностей высокого порядка. Производство и метрологический контроль асферических компонентов из оптического стекла нетривиальны и требуют дорогостоящих технологий и оборудования. В настоящей работе предложена модель ОС преобразователя пучка лазерного излучения (ППЛИ) на основе асферической оптики, выполненной из современных полимерных оптических материалов.

Отличительной особенностью полимеров является возможность изготовления сложных оптических поверхностей благодаря технологии литья пластмасс под давлением. Данный процесс представляет собой впрыскивание расплавленного пластика под высоким давлением в подготовленную литьевую форму, при этом масса полимера равномерно заполняет объем и кристаллизуется, приобретая требуемую форму [4]. Используя данную технологию возможно осуществить массовое производство полимерных элементов с обеспечением высокого качества оптической поверхности, невысокой себестоимости и небольшой массы изделий.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Наиболее распространенными полимерными материалами, применяемыми в лазерной технике, являются полиметилметакрилат (ПММА),

полистирол, полиуретан, эпоксиполимеры и их модификации, поликарбонат (ПК) [5]. Из представленной группы полимеров можно выделить ПММА, обладающий высокими лазерной стойкостью и оптической прозрачностью. В работе [5] приведены сравнительные значения порогов лазерного разрушения различных оптических материалов, в частности, объемная стойкость модифицированного ПММА составляет 0,42 отн. ед., стекла К8 — 0,58 отн. ед. При этом поверхностная стойкость полимеров значительно выше, чем у стекла: ПММА — 0,84 отн. ед., К8 — 0,12 отн. ед. Вторым по частоте использования является ПК, который несколько уступает ПММА в лазерной прочности (объемная стойкость 0,20 отн. ед., поверхностная — 0,38 отн. ед.), но также относится к группе самых востребованных полимеров в лазерных системах [6].

Оптический полиэстер — материал, который сравнительно недавно был введен для применения в оптике, в настоящее время активно внедряется в лазерные технологии. В качестве примера можно привести полимер ОКР4 компании *Gas Chemicals Co* [7]. Данный полимер обладает высоким показателем преломления ($n \geq 1,6$), характеризуется коэффициентом дисперсии $v_D < 27$ (флинт), низким двулучепреломлением, отличается высокой термо- и химической стойкостью, что является важным фактором в области лазерной техники [8].

Представленные материалы являются термопластами, что означает наличие возможности проводить их многократный нагрев и охлаждение. Данная категория полимеров отличается от термореактивных пластмасс оптического класса стойкостью к большим перепадам температур и коррозии. Кроме этого, ударная вязкость (способность полимеров лучше поглощать механическую энергию) при ударной нагрузке и в процессе деформации термопластов выше, чем у стекла [9].

Плотность полимерных материалов значительно ниже, чем у стекла. Благодаря этому свойству масса оптических компонентов, отлитых из термопластиков, значительно меньше, чем у соответствующей стеклянной оптики. Кроме того, с полимерными линзами рационально использовать пластиковые оправы, поскольку коэффициенты линейного

расширения материалов оправы и линзы близки по своим значениям, отклонение температуры от номинального значения не будет приводить к деформации или смещению линзы в зазоре. Таким образом, увеличение количества пластиковых элементов в ОС приведет к еще большему снижению массы прибора.

Следует отметить, что существенная особенность полимеров заключается в малой стойкости к высоким температурам, которую необходимо учитывать при проектировании систем на их основе. Увеличение температуры ОС влечет за собой возникновение термооптических аберраций — изменение конструктивных параметров оптических элементов (воздушных промежутков, толщины и радиусов кривизны линз), показателя преломления материалов, что, в целом, приводит к нарушению геометрии светового пятна и качества ОС [10–11].

Первичным результатом воздействия концентрированного потока энергии является изменение температуры поверхности полимерных линз, при котором небольшая часть потока излучения поглощается, вызывая нагрев [12]. В целях диагностирования условий применения источника лазерного излучения

целесообразно воспользоваться формулой, определяющей максимальную температуру в центре тела при нагреве его лазерным излучением в стационарном режиме [13]

$$T = \frac{PA}{\pi r_0 k} + T_0, \quad (3)$$

где P — мощность лазерного излучения, A — коэффициент поглощения материала, r_0 — радиус облученной области, k — теплопроводность материала, T_0 — начальная температура тела.

Для ОС ППЛИ основными параметрами при выборе материала оптических компонентов являются показатель преломления, коэффициент дисперсии, коэффициент пропускания, эксплуатационная температура и тепловое расширение материала. Оптические и механические свойства наиболее распространенных полимерных материалов и стекла К8 приведены в табл. 1, 2 [14]. Несмотря на то, что температурные характеристики полимеров невыгодно отличаются от стекла, плотность пластика практически в 1,5 раза ниже, а оптические свойства материалов соизмеримы и не уступают друг другу.

Таблица 1. Оптические свойства полимеров

Материал	Показатель преломления (на длине волны 633 нм)	Число Аббе	Пропускание, %	Двулучепреломление, по шкале от 1 до 10
ПММА	1,491	57	96	4
Поликарбонат	1,585	30	89	7
Полиэстер	1,607	27	94	2
Полистирол	1,590	31	90	10
Стекло К8	1,516	64	92	1

Таблица 2. Механические свойства полимеров

Материал	Коэффициент теплового расширения, $\times 10^{-6}/\text{град}$	Плотность, г/см ³	Максимальная температура эксплуатации, град	Водопоглощение, %
ПММА	60	1,8	85	0,3
Поликарбонат	68	1,25	120	0,2
Полиэстер	72	1,22	125	0,15
Полистирол	50	1,05	75	0,1
Стекло К8	7,1	2,51	> 400	0

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На первоначальном этапе расчета ОС ППЛИ выполнялась минимизация угловой расходимости лазерного пучка за счет устранения сферической аберрации. При этом, благодаря малому угловому полю 2ω аберрации внеосевых пучков малы и не требуют устранения. Компенсация сферической аберрации во всей системе происходит через определение конструктивных параметров оптических компонентов, имеющих близкие значения сферической аберрации по модулю и противоположные по знаку. Фокусное расстояние первого отрицательного компонента значительно меньше фокусного расстояния второго положительного. В связи с этим первую линзу следует выполнить из полимера с более низким показателем преломления, чем у материала второй линзы. Для лучшей коррекции хроматической аберрации целесообразно использовать материалы с различными коэффициентами дисперсии [15].

В настоящей работе отрицательный и положительный компоненты ОС ППЛИ выполнены из полимеров ПММА ($n = 1,492$, $\nu = 57$) и ОКР4 ($n = 1,608$, $\nu = 27$). Численные значения приведены для длины волны 633 нм.

Используя формулу (3), определены максимальные температуры нагрева выбранных полимерных материалов (табл. 3).

Максимальный нагрев компонента из ПММА составит 29,6 °С, в то время как температура компонента из полиэстера увеличится на 0,8 °С. Данные температуры учтены в тепловом анализе при моделировании.

Синтез ОС ППЛИ выполнен с использованием пакета программ ZEMAX. Источником лазерного излучения служит He-Ne лазер компании Thorlabs HNL050RB [16] со следующими характеристиками: диаметр перетяжки лазерного пучка 0,81 мм, угловая расходимость $3'$, мощность излучения 5 Вт, длина вол-

ны излучения 633 нм. Для контроля распределения интенсивности излучения во время прохождения лучей через ОС добавлены два детектора типа *Detector Rect* — плоский прямоугольный детектор с произвольным количеством пикселей.

Исходная двухлинзовая ОС выполнена из плоско-вогнутого и плоско-выпуклого компонентов (рис. 1). Радиусы кривизны сферических поверхностей, осевое расстояние между компонентами, видимое увеличение Γ телескопической системы определены с использованием формул параксиальной оптики и представлены в табл. 4.

На следующем этапе расчета с целью достижения равномерного распределения интенсивности излучения лазерного пучка выполнена оптимизация исходной ОС. Оптимизационная модель реализована в непоследовательном режиме трассировки лучей программы ZEMAX и приведена на рис. 2. В качестве переменных

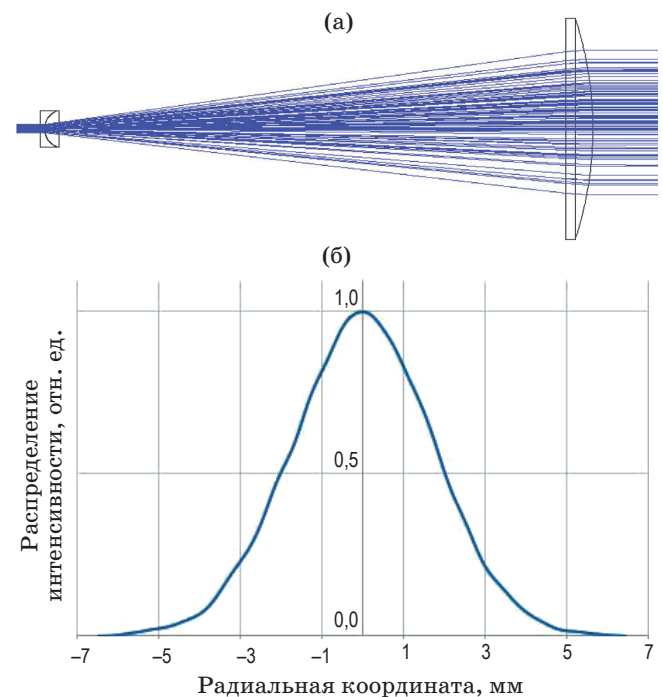


Рис. 1. Оптическая схема исходной ОС ППЛИ (а) и поперечное сечение интенсивности излучения (б).

Таблица 3. Расчет максимальной температуры нагрева в центре полимерных линз

Материал	T_0 , град	T_0 , К	P , Вт	A , m^{-1}	r_0 , м	k , Вт/мК	T , К	T , град
ПММА	20	293	5	5×10^{-4}	$4,1 \times 10^{-4}$	0,2	302,6	29,6
ОКР4	20	293	5	7×10^{-4}	$9,6 \times 10^{-3}$	0,14	293,8	20,8

Таблица 4. Конструктивные параметры исходной оптической системы

№ поверхности	Радиус кривизны, мм		Осевое расстояние, мм		Материал	Коэффициенты асферики	
1	∞	V	0,5		ПММА	0	V
2	2,191	V	57,735	V	воздух	0	V
3	∞	V	3		ОКР4	0	V
4	-40,604	V	39,265	V	воздух	0	V

$\Gamma = 15^\times$
 $2\omega' = 18''$

Oper #	Type	Surf	Det#	Pix#	Data	# Ignored	
1: BLNK	BLNK	clear detectors					
2: NSDD	NSDD	1	0	0	0	0	
3: BLNK	BLNK	trace rays					
4: NSTR	NSTR	1	0	0	0	0	
5: BLNK	BLNK	output energy distribution					
6: NSDD	NSDD	1	4	-4	1	0	
7: BLNK	BLNK	90% energy inside rect-detector					
8: NSDD	NSDD	1	4	0	2	0	
9: OPGT	OPGT	8					
10: BLNK	BLNK	second component distance monitoring					
11: NPZG	NPZG	1	2	0			
12: NPZL	NPZL	1	1	0			

Рис. 2. Оптимизационная модель в ZEMAX.

параметров использованы радиусы кривизны оптических компонентов, осевые расстояния и коэффициенты асферики.

Первоначально используется операнд NSDD для очистки детекторов от предыдущих данных. Необходимо установить номер детектора (Det#) на ноль: это даст команду очистить данные всех используемых детекторов, а не конкретного. Операнд NSDD возвращает нулевое значение и не влияет на функцию оценки при очистке. Поверхность (Surf) — это номер поверхности некогерентной группы; в данной работе всегда используется 1, так как режим программы непоследовательный.

Затем применяется операнд NSTR для трассировки лучей. В целях выполнения операции для конкретного источника необходимо установить его номер (Src#). Нулевое значение данной графы подразумевает трассировку лучей от всех источников. Отметим, что количество лучей, заданное в параметрах источника, определяет количество времени, затраченного на трассировку. Кроме всего прочего, NSTR

всегда возвращает ноль и не влияет на функцию оценки. Этот операнд также поддерживает варианты использования разделения, рассеяния и поляризации.

Для считывания данных с детектора используется новая группа операндов NSDD, которая имеет четыре аргумента — поверхность (Surf), детектор (Det#), пиксел (Pix#) и данные (Data). Детектор — это номер объекта детектора. Если пиксел (Pix#) представляет собой целое число больше нуля, то в этот пиксел возвращаются поток, поток/область или поток/телесный угол. Каждый из них определяется аргументом данных, который должен быть 0, 1 или 2 для потока, яркости или интенсивности соответственно. Если пиксел равен 0, возвращается сумма всех потоков или яркости/области в детекторе. Единицы возвращаемых данных определяются единицами системы. Если объект является фасеточным детектором или количество пикселов равно -1 или 0, поддерживаются только параметры данных 0 и 1. В шестой строке задано считывание

Таблица 5. Конструктивные параметры оптимизированной оптической системы преобразователя пучка лазерного излучения

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Осевое расстояние, мм	Материал	Коэффициенты асферики
1	-2,976	0,5	ПММА	-137,852
2	1,649	60,629	воздух	-8,958
3	-63,004	3	ОРК4	-0,002
4	-36,559	33,371	воздух	4,640

$\Gamma = 15^\times$
 $2\omega' = 32''$

вание стандартного отклонения интенсивности ($\text{Pix\#} = -4$) всех ненулевых пикселей с детектора на выходе из ОС. Восьмая строка обеспечивает считывание концентрации энергии в угловом пространстве, выполняя требование к параллельности выходного пучка на детекторе.

В девятой строке используется операнд OPGT для того, чтобы значение выходной энергии на детекторе превышало 4,9, что соответствует 98% от числа номинальной энергии 5 Вт. Это значит, что в системе допускаются потери энергии, но не более чем 2%. Кроме этого, в оптимизационную модель добавлены операнды NPZG («положение объекта по оси z больше чем») и NPZL («положение объекта по оси z меньше чем») для ограничения расстояния между окуляром и объективом перевернутого телескопа. Для приведенных операндов требуется указать номер поверхности (следует указывать 1 в непоследовательном режиме). Номер объекта (Object), к которому применяется операнд, и ссылку (Ref): если данный параметр равен 0, то учитываются координаты относительно привязки объекта, 1 обозначает координаты относительно начала отсчета в глобальной системе координат, 2 — считаются координаты относительно опорной поверхности глобальной системы координат. Целью аргумента (target) является численное значение, ограничивающее положение выбранного объекта [17].

Полученные в результате оптимизации значения конструктивных параметров ОС ППЛИ представлены в табл. 5. Схема оптимизированной ОС и формируемое ею распределение интенсивности излучения приведены на рис. 3.

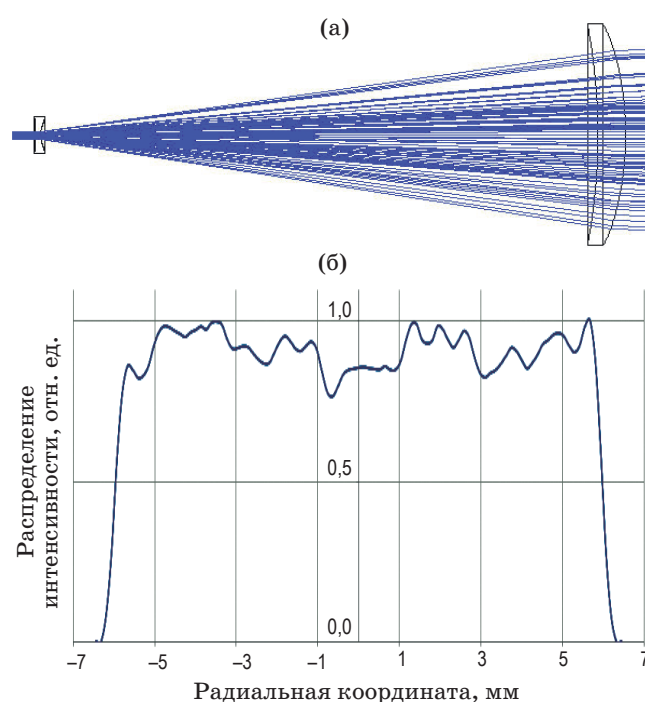


Рис. 3. Оптическая схема оптимизированной ОС ППЛИ (а) и поперечное сечение интенсивности излучения (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Оценку неравномерности распределения лазерного излучения полученной системы можно провести по значению относительной неравномерности интенсивности [18]

$$\Delta I = \left(\frac{\Delta I_{\text{RMS}}}{I_m} \right) 100\%, \quad (4)$$

где ΔI_{RMS} — среднее квадратическое отклонение интенсивности излучения, I_m — среднее значение интенсивности излучения.

В настоящей работе полученная неравномерность распределения интенсивности не превышает 7%, что удовлетворяет требования к современным системам гомогенизации лазерного излучения. В качестве сравнения — подобная система формирователя лазерного излучения *πShaper 6_6 Series* производства немецкой компании *Adl Optica* [19], выполненная из оптических кристаллов, обеспечивает относительную неравномерность интенсивности светового пятна порядка 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика расчета оптической системы преобразователя пучка лазерного излучения, выполненного из полимерных асфери-

ческих линз, осуществляющего гомогенизацию пучка. Компьютерная модель учитывает температурные изменения компонентов преобразователя при лазерном воздействии. Относительная неравномерность интенсивности излучения в формируемом световом пятне составляет не более 7%, что сопоставимо с аналогами, представленными на рынке. При этом полученный преобразователь с полимерными оптическими элементами обладает удовлетворительной стойкостью к влиянию лазерного излучения и рядом преимуществ перед аналогами, выполненными из стеклянной или кристаллической оптики: низкая масса, малая себестоимость компонентов, возможность быстрой штамповки и точной репликации сложных оптических поверхностей в условиях массового производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dickey F.M.* Laser beam shaping: Theory and techniques. 2nd ed. N.Y.: CRC Press, 2017. P. 402.
2. *Kreuzer J.L.* Coherent light optical system yielding an output beam of desired intensity distribution at a desired equiphase surface // Патент США № 3476463A. 1969.
3. *Orekhova M.K., Voznesenskaya A.O., Romanova G.E.* Design of single and two-lens laser flat-top reshaping systems // Proc. SPIE. 2018. V. 10693. № 106930Y. P. 1–8.
4. *Освальд Т., Турнг Л.-Ш., Грэмман П.Дж.* Литье пластмасс под давлением / Под ред. Калинчева Э.Л. СПб.: изд. ЦОП Профессия, 2005. С. 128–176.
5. *Серова В.Н., Наумов А.К., Мукменева Н.А., Черезова Е.Н.* Лазерная стойкость полимеров // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 10. С. 33–37.
6. *Трифонов А.В., Хребтов А.А., Федоренко Е.В.* Проблемы лазерной прочности прозрачных полимеров и методы их решения // Молодой ученый. 2017. № 2.1 (136.1). С. 37–39.
7. Osaka Gas Chemicals [Электронный ресурс]: <<http://www.ogc.co.jp/e/products/fluorene/okp.html>>
8. *Schaub M.P.* The design of plastic optical systems // SPIE Tutorial Text. 2009. V. TT80. P. 15–29.
9. *Луццейкин Г.А.* Моделирование ударной вязкости полимерных материалов // Пластические массы. 2016. № 9–10. С. 24–27.
10. *Иванов С.Е., Романова Г.Э.* Использование двухкомпонентного афокального компенсатора в зеркально-линзовых системах для коррекции термоабберации положения // Научно-техн. вест. информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 372–379.
11. *Носов П.А., Ширанков А.Ф., Третьяков Р.С., Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я.* Нагрев оптических элементов из высокочистых кварцевых стекол излучением мощных волоконных лазеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 12. С. 1028–1033.
12. *Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н.* Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985. С. 132–156.
13. *Вейко В.П., Либенсон М.Н.* Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973. С. 29.
14. *Beich W.S.* Plastic optics: Specifying injection-molded polymer optics [Электронный ресурс]: <https://www.photonics.com/Articles/Plastic_Optics_Specifying_Injection-Molded/a25487>
15. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1987. С. 234–300.
16. Thorlabs.Inc. [Электронный ресурс]: <<https://www.thorlabs.com>>
17. ZEMAX 13. Optical Design Program. User's Guide. June 24, 2015.
18. *Свешников А.А.* Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. М.: Наука, 1965. С. 143.
19. Adl optica [Электронный ресурс]: <<http://pishaper.com/shaper.html>>