

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ МУЛЬТИЛИНЗ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Н.Л. Казанский<sup>1,2</sup>, И.С. Степаненко<sup>2</sup>, А.И. Хаймович<sup>2</sup>, С.В. Кравченко<sup>1,2</sup>, Е.В. Бызов<sup>1,2</sup>, М.А. Моисеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

### Аннотация

Предложен метод оптимизации параметров инжекционного литья с использованием численного имитационного моделирования процесса. На примере изготовления оптического элемента для дорожного освещения определены критерии качества отливок мультилинз, наиболее полно характеризующие возможное отклонение поверхностей от расчётной модели. С использованием оптимально подобранных параметров инжекционного литья и геометрических размеров пресс-формы изготовлены мультилинзы из поликарбоната с наибольшей погрешностью расположения оптических поверхностей, по результатам моделирования в пределах значений допусков для 7-го качества точности.

**Ключевые слова:** инжекционное литье, оптический элемент, распределение интенсивности, поверхность свободной формы, метод Тагути.

**Цитирование:** Казанский, Н.Л. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н.Л. Казанский, И.С. Степаненко, А.И. Хаймович, С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев, // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 203-214. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.

### Введение

Инжекционное литье (ИЛ) является одним из наиболее распространённых способов изготовления изделий из полимерных материалов. Оно позволяет получить изделия с высоким размерным постоянством, что важно, например, для производства оптических элементов для светодиодов. Одним из типичных дефектов, возникающих при инжекционном литье, является деформация поверхностей деталей (коробление). Коробление может быть минимизировано правильным подбором режима литья. Для отработки режимов литья в последнее время применяется численный эксперимент на основе метода конечных элементов. Данная методика позволяет предсказать поведение расплава в пресс-форме в процессе литья, деформацию детали и тем самым отказаться от использования ресурсозатратного метода проб и ошибок. Для проверки результатов имитационного моделирования на контрольных режимах требуется провести натурные эксперименты. В современных САЕ-системах (англ. САЕ – Computer-aided engineering – программные комплексы, предназначенные для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов) существуют встроенные методы анализа и минимизации литьевых дефектов. Одним из наиболее эффективных методов многокритериального анализа влияния технологических параметров на качество изделия является метод Тагути [1].

Применение метода Тагути для оптимизации инжекционного литья разного соотношения поликарбоната (РС) и полиметилметилакрилата (РММА) и улучшения механических характеристик вторичной оптики для светодиодов было рассмотрено в работе [2]. В ней были определены наиболее значимые и оптимальные параметры (режимы литья, соотношение компонентов смеси и т.д.), обеспечивающие наилуч-

шую освещённость в выходной плоскости. В работе [3] была показана возможность применения имитационного моделирования процесса литья для улучшения технологичности и эксплуатационных качеств деталей оптики. В работе [4] с помощью САЕ-системы и планирования экспериментов методом Тагути было рассмотрено обеспечение высокой точности изготовления изделия при минимальных затратах на производство (минимальном времени производства). Применение дисперсионного анализа в работе [4] показало, что погрешность между имитационными и натурными экспериментами составила менее 3 %.

Целью настоящей статьи является определение критериев качества отливок мультилинз (МЛ), которые наиболее полно характеризуют возможное отклонение оптических свойств МЛ от расчётной модели, а также совершенствование методов оптимизации режимов инжекционного литья МЛ с использованием имитационного САЕ-моделирования.

### 1. Метод расчёта теоретической геометрии мультилинз

Прежде чем приступить к определению критериев качества отливки мультилинзы, рассмотрим расчёт её оптических поверхностей из условия формирования требуемого светового распределения.

Под мультилинзой обычно понимают единую литую деталь, которая устанавливается на алюминиевую плату с массивом светодиодов. Каждому светодиоду на плате соответствует свой единичный оптический элемент в мультилинзе, предназначенный для трансформации светового потока одного источника в необходимое распределение [5–10]. В таком случае задача проектирования мультилинзы, формирующей заданную диаграмму направленности (распределение освещённости), сводится к расчёту единичных оптических элементов, которые далее объединяются в единую деталь.

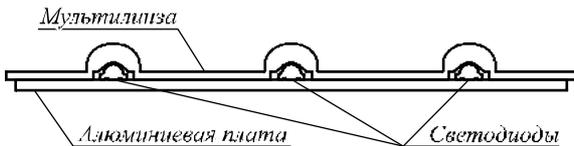


Рис. 1. Схематическое расположение платы, светодиодов и мультилинзы

Наиболее распространённым вариантом является мультилинза, состоящая из одинаковых оптических элементов. В настоящей работе в качестве такого оптического элемента предлагается использовать линзу, формирующую диаграмму направленности для дорожного освещения. Данный выбор обусловлен быстро растущей популярностью дорожных светильников нового поколения на основе светодиодов, применение которых невозможно без вторичной оптики. В оптических элементах для задач дорожного освещения используются так называемые поверхности свободной формы (англ. free-form surface) [11–14], не обладающие осевой симметрией, что, в свою очередь, позволит определить критерии качества отливки детали наиболее объективно.

В качестве единичного дорожного оптического элемента предлагается использовать линзу с двумя поверхностями свободной формы, рассчитанную методом [15]. Ниже, в пунктах 1.1 и 1.2, представлено сжатое описание данного метода.

1.1. Расчёт внутренней поверхности оптического элемента

Предположим, что в начале координат находится светодиод, распределение интенсивности которого описывается функцией  $I_{src}(\mathbf{x})$ . Оптический элемент с показателем преломления  $n$  располагается над светодиодом (рис. 2). Необходимо рассчитать его внутреннюю и внешнюю поверхности из условия формирования требуемой диаграммы направленности  $I_{req}(\mathbf{x})$ .

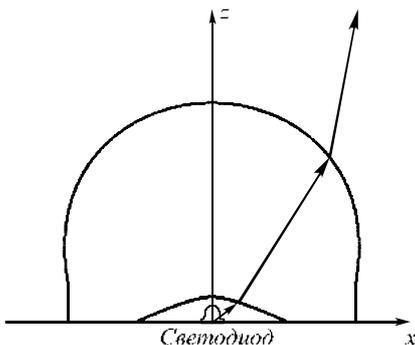


Рис. 2. Взаимное расположение светодиода и оптического элемента

Расчёт поверхностей оптического элемента выполняется последовательно, для каждой поверхности получается сначала кусочно-гладкое решение из условия формирования дискретного светового распределения, аппроксимирующего непрерывную диаграмму направленности  $I_{req}(\mathbf{x})$ , а затем полученное решение сглаживается NURBS-сплайном. Для расчёта кусочно-гладкого решения используется так называемый метод согласованных квадрик [16–19].

Аппроксимируем требуемую непрерывную диаграмму направленности  $I_{req}(\mathbf{x})$  дискретным световым распределением  $(\Phi_i, \mathbf{x}_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , представляющим собой набор сколлимированных световых пучков со световыми потоками  $\Phi_i$ , которые распространяются в соответствующих направлениях  $\mathbf{x}_i$ . Для этого разобьём область определения функции  $I_{req}(\mathbf{x})$  на малые телесные углы  $\delta\Omega_i$ , и для каждого элемента разбиения  $\delta\Omega_i$  рассчитаем значения интегрированного светового потока  $\Phi_i$  и взвешенное среднее направление  $\mathbf{x}_i$ :

$$\Phi_i = \int_{\delta\Omega_i} I(\mathbf{x}) d\Omega, \tag{1}$$

$$\mathbf{x}_i = \left( \int_{\delta\Omega_i} \mathbf{x} I(\mathbf{x}) d\Omega \right) / \Phi_i. \tag{2}$$

Для расчёта внутренней поверхности не требуется знать точный вид диаграммы направленности внутри элемента. Мы будем искать решение в виде кусочно-гладкой поверхности, состоящей из  $N$  сегментов, каждый из которых сужает угловой размер падающего на него пучка, преломляя его в соответствующем направлении  $\mathbf{x}_i$ . Здесь и далее под сужением будем понимать выполнение следующей функции лучевого соответствия:

$$\gamma = k\psi, \tag{3}$$

где  $\psi$  и  $\gamma$  – углы между лучом и направлением  $\mathbf{x}_i$  до и после его преломления сегментом внутренней поверхности соответственно (рис. 3). Коэффициент  $k \in [0; 1]$  определяет соотношение, в котором разделяется работа по повороту лучей между внутренней и внешней поверхностями.

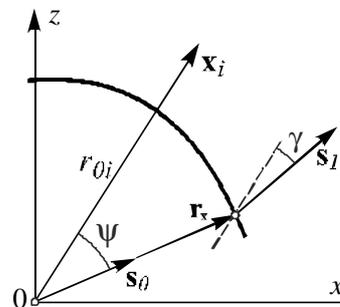


Рис. 3. Принцип работы сегмента внутренней поверхности

Таким образом, в зависимости от величины коэффициента  $k$  внутренняя поверхность будет выполнять ту или иную часть работы по повороту луча. Например, в случае  $k = 0,5$  произвольный луч будет преломлён внутренней и внешней поверхностью на одинаковый угол, то есть работа по повороту луча между поверхностями будет разделена поровну. В случае  $k = 1$  внутренняя поверхность имеет форму полусферы и работы по преломлению лучей не выполняет, распределение формируется внешней поверхностью. При  $k = 0$  требуемое распределение создаётся только внутренней поверхностью, а форма внешней определяется формой волнового фронта после прохождения внутренней поверхности.

Выразим угол  $\psi$  через единичный вектор луча  $\mathbf{s}_0$  и направление коллимирования  $\mathbf{x}_i$  и запишем общее уравнение для расчёта сегмента внутренней поверхности  $r(\mathbf{s}_0)$ , реализующего функцию лучевого соответствия вида (3), в следующем виде [15]:

$$\begin{cases} \mathbf{r}(\mathbf{s}_0) = r(\mathbf{s}_0)\mathbf{s}_0, \\ r(\mathbf{s}_0) = r_0 \left( \frac{\cos((1-k)\arccos(\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_i)) - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $r_0 = r(0)$  – параметр, определяющий размер сегмента внутренней поверхности. В таком случае кусочно-гладкая внутренняя поверхность, состоящая из  $N$  сегментов вида (4), может быть рассчитана следующим образом [15]:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_x(\mathbf{s}_0) = r_i(\mathbf{s}_0)\mathbf{s}_0, \\ i = \arg \min r_j(\mathbf{s}_0), \\ r_j(\mathbf{s}_0) = r_{0j} \left( \frac{\cos((1-k)\arccos(\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_j)) - \frac{1}{n}}{1 - \frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \end{cases} \quad (5)$$

Форма кусочно-гладкой поверхности (5) полностью определяется набором параметров сегментов  $r_{0i}$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Каждый параметр  $r_{0i}$  характеризует размер  $i$ -го сегмента и величину падающего на него светового потока  $\Phi_i$ , отклоняемого поверхностью в направлении  $\mathbf{x}_i$ . Для расчёта параметров  $r_{0i}$  используется метод согласованных квадрик [18].

Выражения (5) позволяют получить кусочно-гладкую поверхность из условия формирования дискретного светового распределения вида (1), (2). Для получения непрерывной внутренней поверхности необходимо выполнить аппроксимацию полученного кусочно-гладкого решения NURBS-сплайном.

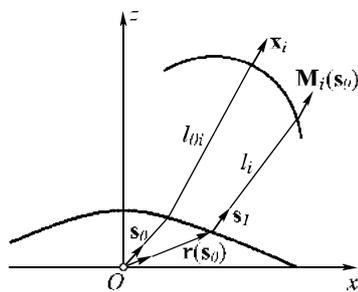


Рис. 4. Принцип работы сегмента внешней поверхности

**1.2. Расчёт внешней поверхности оптического элемента**

Расчёт внешней поверхности выполняется аналогично расчёту внутренней: сначала определяется кусоч-

но-гладкое решение, формирующее дискретную диаграмму направленности, а затем оно аппроксимируется NURBS-сплайном. Как и в случае с внутренней поверхностью, кусочно-гладкая внешняя поверхность состоит из  $N$  сегментов, каждый из которых коллимирует падающий световой поток в некотором направлении  $\mathbf{x}_i$ .

Форма  $i$ -го сегмента внешней поверхности  $\mathbf{M}_i(\mathbf{s}_0)$  определяется согласно принципу Ферма следующим образом [20]:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_i(\mathbf{s}_0) = \mathbf{r}(\mathbf{s}_0) + l_i(\mathbf{s}_0)\mathbf{s}_1, \\ l_i(\mathbf{s}_0) = \frac{l_{0i}(1-n) + r(\mathbf{s}_0)(1 - (\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_i))}{(\mathbf{s}_1(\mathbf{s}_0), \mathbf{x}_i) - n}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mathbf{r}(\mathbf{s}_0)$  – ранее рассчитанная гладкая внутренняя поверхность,  $l_i(\mathbf{s}_0)$  – скалярная функция, определяющая расстояние от точки  $\mathbf{r}(\mathbf{s}_0)$  внутренней поверхности до точки  $\mathbf{M}_i(\mathbf{s}_0)$  сегмента внешней поверхности вдоль преломлённого луча  $\mathbf{s}_1(\mathbf{s}_0)$  внутри оптического элемента,  $l_{0i}$  – параметр  $i$ -го сегмента. Полная кусочно-гладкая внешняя поверхность определяется аналогично внутренней следующим образом [15]:

$$\begin{cases} \mathbf{R}(\mathbf{s}_0) = \mathbf{r}(\mathbf{s}_0) + l_i(\mathbf{s}_0)\mathbf{s}_1, \\ i = \arg \min l_j(\mathbf{s}_0), \\ l_j(\mathbf{s}_0) = \frac{l_{0j}(1-n) + r(\mathbf{s}_0)(1 - (\mathbf{s}_0, \mathbf{x}_j))}{(\mathbf{s}_1(\mathbf{s}_0), \mathbf{x}_j) - n}. \end{cases} \quad (7)$$

Как и в случае внутренней поверхности, вид кусочно-гладкого решения для внешней поверхности полностью определяется набором  $N$  параметров  $l_{0i}$ . Для их расчёта также может быть использован метод согласованных квадрик [18].

**2. Пример расчёта единичного оптического элемента**

Предложенный выше метод расчёта был реализован в среде программирования Matlab®. Для проверки его работоспособности был рассчитан оптический элемент, формирующий диаграмму направленности для освещения дорог класса А (магистральные дороги и улиц общегородского значения). Сечения подобранного распределения интенсивности представлены на рис. 5.

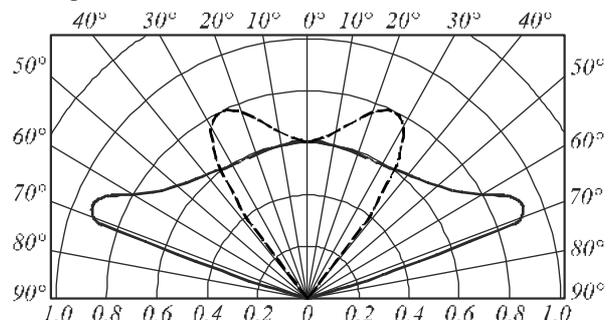


Рис. 5. Профили требуемой диаграммы направленности для освещения дорог класса А

Предложенное распределение было аппроксимировано 900 точками вида (1), (2), после чего был рассчитан оптический элемент, модель которого приведена на рис. 6а. На основе этого элемента была спроектирована мультилинза с 306 точками (рис. 6б).

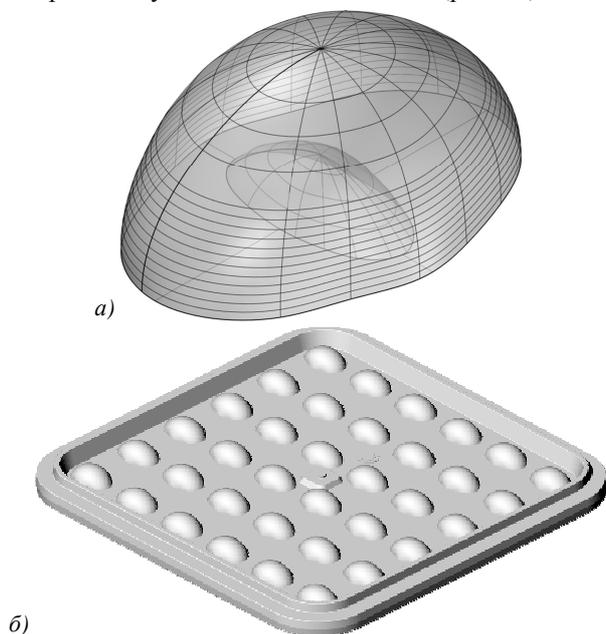


Рис. 6. Модель единичного оптического элемента для освещения дорог класса А (а); модель спроектированной мультилинзы (б)

Характеристики спроектированной мультилинзы были промоделированы в коммерческом программном обеспечении TracePro для светодиода Osram Oslon Square. Кривые силы света полученного распределения интенсивности представлены на рис. 7.

Световая эффективность мультилинзы по результатам моделирования составила 89%. Такое значение световой эффективности является близким к теоретическому максимуму в 92%, так как минимум по 4% светового потока теряется на каждой границе раздела сред вследствие френелевских потерь (даже в случае нормального падения лучей). При этом среднеквадратичное отклонение требуемого распределения от формируемого элементом, представленным на рис. 6, составило не более 7,5%. Таким образом, объединение оптических элементов в единую мультилинзу не оказало существенного влияния ни на эффективность решения, ни на вид формируемого светового распределения.

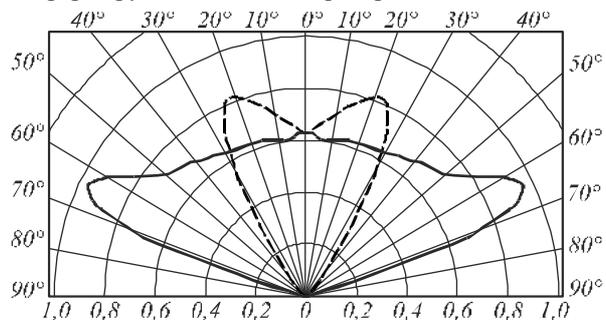


Рис. 7. Профили диаграммы направленности, формируемой рассчитанным оптическим элементом

### 3. Исследование влияния параметров ИЛ на точность изготовления

При изготовлении формирующей оптики светодиодов основным требованием является наиболее точное воспроизведение рассчитанной теоретической поверхности. Форма оптической поверхности литой детали может изменяться вследствие объёмной усадки материала, которая требует компенсации. Величина компенсации усадки зависит от многих факторов: формы литой детали, параметров технологического режима ИЛ, подбора полимерной композиции материала, использования специальных технологий литья.

Для уменьшения количества таких факторов были проведены предварительные исследования, которые позволили:

- определить допустимый диапазон температуры формообразующих поверхностей для исключения усадки преломляющих поверхностей линз;
- увеличить жёсткость конструкции пресс-формы для устранения дефектов по разнотолщинности МЛ вследствие деформации пресс-формы при литье.

С использованием пресс-формы увеличенной жёсткости при температуре формообразующих поверхностей в пределах 50–70 °С была изготовлена мультилинза из поликарбоната марки Sam Yang Trirex 3022L1-I2. На рис. 8а представлена численная модель объёмной усадки оптического элемента литой МЛ при температурах пресс-формы в диапазоне 45...80 °С, на рис. 8б – разрез литой МЛ по оптическим поверхностям, на рис. 8в – результаты измерения оптических поверхностей на координатно-измерительной машине (КИМ) DEA Global Performance 07.10.07.

Численное моделирование (рис. 8а) показало, что оптимальным для пресс-формы является температурный диапазон 45...80 °С. Данный температурный диапазон обеспечивает достаточную скорость кристаллизации поликарбоната и минимальную усадку материала по оптическим поверхностям, что было позднее подтверждено экспериментально (рис. 8б, в).

Анализ геометрии преломляющих поверхностей, выполненных в предварительно изготовленной экспериментальной оснастке, показал, что максимальное отклонение формы одиночной линзы составляет не более 0,01 мм (измерения проводились на КИМ DEA GlobalPerformance 07.10.07). Данное значение хорошо согласуется с результатами численного эксперимента (FE-анализ, англ. finite-element analysis – моделирование методом конечных элементов), выполненного в коммерческом программном обеспечении ANSYS Workbench.

На рис. 9а представлена конструкция пресс-формы для литья МЛ. На рис. 9б, в – результаты FE-анализа в ANSYS Workbench по деформациям (прогибу) формообразующих поверхностей в плоскости разъема в процессе литья МЛ с давлением заполнения 2000 бар для стандартной конструкции пресс-формы (рис. 9б) и конструкции повышенной жесткости с дополнительными подкладными брусками (рис. 9в).

Численное моделирование (рис. 8а) показало, что оптимальным для пресс-формы является температурный диапазон 45...80°C.

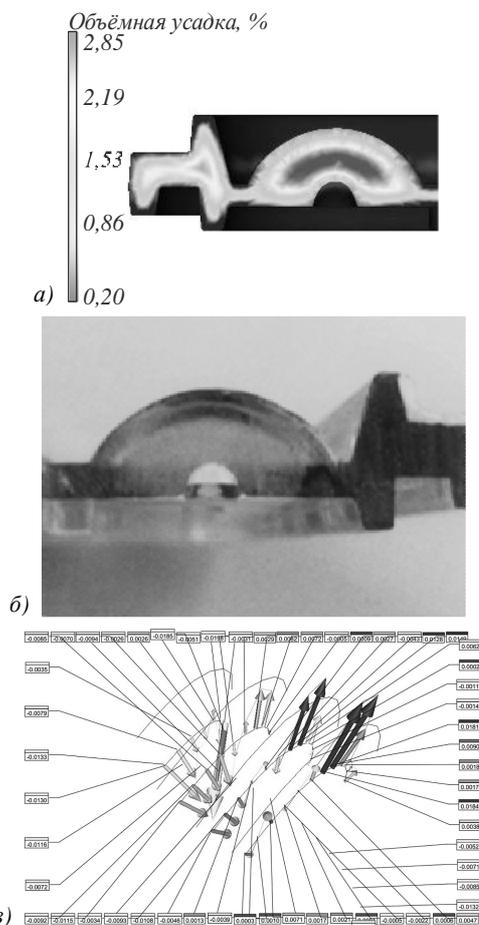


Рис. 8. Влияние температуры пресс-формы в диапазоне 45...80 °С на усадку преломляющих поверхностей: результаты численного моделирования объёмной усадки оптического элемента литой МЛ (а); разрез литой МЛ по оптическим поверхностям (б); результаты измерения оптических поверхностей на КИМ (в)

В результате повышения жёсткости конструкции пресс-формы удалось уменьшить абсолютную величину прогиба формообразующих поверхностей более чем в 2 раза.

Анализ результатов предварительных исследований показал, что при достаточной конструкционной жёсткости пресс-формы в диапазоне температур подачи расплава поликарбоната 230...295 °С и температуре пресс-формы 60...80 °С наиболее вероятной причиной отклонения геометрии преломляющих оптических поверхностей МЛ является смещение каждой преломляющей поверхности от её номинального положения вследствие коробления и неравномерности объёмной усадки МЛ. Таким образом, наиболее существенным фактором, влияющим на картину распределения светового потока, является точность расположения преломляющих поверхностей МЛ относительно номинального расположения светодиодов на печатной плате.

Необходимо отметить, что компенсация технологической усадки предусмотрена на этапе проектиро-

вания пресс-формы в виде масштабного коэффициента формообразующих поверхностей (коэффициента усадки). Далее рассмотрим алгоритм компенсации усадки и расчёт масштабного коэффициента, обеспечивающего ее минимизацию.

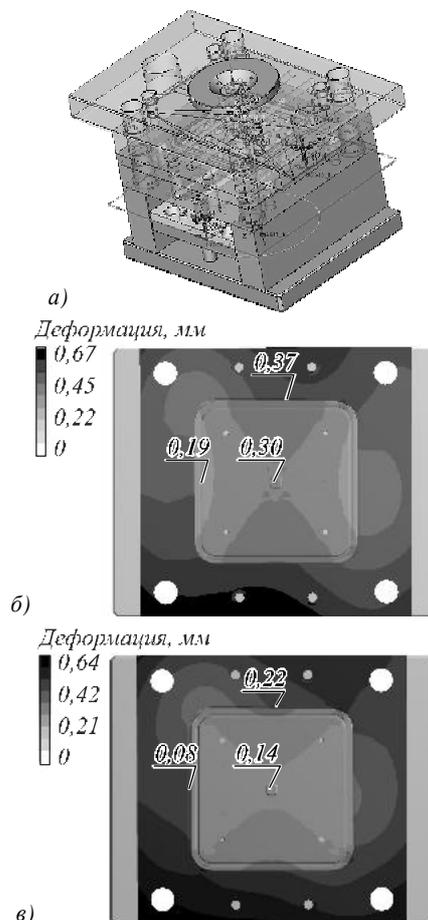


Рис. 9. Модель пресс-формы для ИЛ (а); деформации в стандартной конструкции (б); деформации в усиленной конструкции (в)

#### 4. Алгоритм компенсации усадки

В общем случае коэффициент масштабирования, соответствующий усадке в каждой точке, будет переменным, в зависимости от формообразующей геометрии пресс-формы и режимов литья. В идеальном случае коэффициент для всех точек будет одинаковым. В нашем случае, когда все единичные оптические элементы одинаковы, а толщина пластины постоянна, оптимальным коэффициентом будет такой, при котором погрешность компенсации неравномерности усадки в каждой точке при масштабировании на постоянный коэффициент будет минимальной. Исходя из вышесказанного, был предложен алгоритм компенсации усадки, блок-схема которого приведена на рис. 10.

На основе априорных данных о материале вычисляется коэффициент усадки в разных точках МЛ и определяется рекомендуемый режим литья. Исходя из этого коэффициента, выбирается масштабный фактор и корректируется 3D-модель формообразующей полости пресс-формы. По результатам имитационно-

го моделирования процесса инжекционного литья на основе скорректированной модели производится расчёт коробления и усадки. Далее оценивается точность литого изделия. Если точность не удовлетворяет требованиям технического задания, то на основании расчёта на данном режиме вновь вычисляется действительный коэффициент усадки, масштабируется формообразующая поверхность и назначается новый технологический режим переработки. Ключевыми пунктами в представленном алгоритме являются расчёт единого масштабного фактора, выбор контрольных точек для оценки качества литой МЛ по критерию величины коробления и оптимизация режимов ИЛ на основе проведения многофакторной оценки качества литой МЛ по нескольким критериям методами имитационного моделирования литья. Рассмотрим каждый из этих пунктов более подробно.



Рис. 10. Блок-схема алгоритма компенсации усадки

### 5. Расчёт масштабного коэффициента

Для контроля параметра качества по дефекту «коробление» были выбраны точки, находящиеся на внешней преломляющей поверхности каждого оптического элемента напротив светодиода (рис. 11). Так как линзы расположены симметрично в вертикальном (ось Y) и горизонтальном (ось X) направлениях, а подводящий литник с координатами (0,0) расположен в центре детали, то, вследствие наличия симметрии, предлагается рассмотреть ¼ часть МЛ.

Для определения степени неравномерности коробления были выбраны контрольные точки, расположенные на вершинах линз.

Обозначим  $x_{ij}, y_{ij}$  координаты вершин линз относительно центра МЛ (рис.11). Формообразующие полости

пресс-формы моделируются с учётом будущей усадки, т.е. масштабируются на некоторый коэффициент  $M$ :

$$\begin{aligned} {}^m x_{ij} &= {}^{(0)}M_x x_{ij}, \\ {}^m y_{ij} &= {}^{(0)}M_y y_{ij}, \end{aligned} \tag{8}$$

где  ${}^m x_{ij}, {}^m y_{ij}$  – координаты вершин формообразующих полостей для единичных линз в пресс-форме,  ${}^{(0)}M_x, {}^{(0)}M_y$  – выбранные коэффициенты масштабирования по осям.

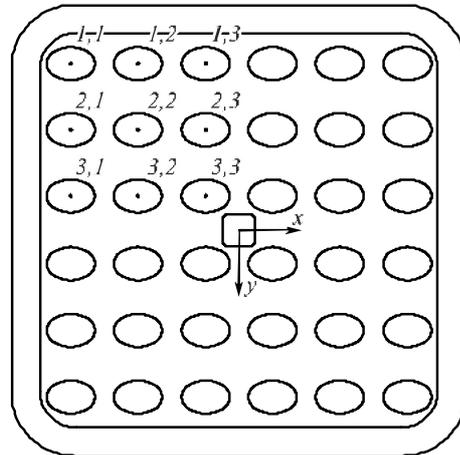


Рис. 11. Расположение контрольных точек для оценки качества литой мультилинзы

Выберем в качестве начального приближения следующие значения:

$${}^{(0)}M_x = {}^{(0)}M_y = \left( 1 + \frac{{}^{(0)}s}{100\%} \right), \tag{9}$$

где  ${}^{(0)}s$  – процент усадки по паспорту материала.

Пусть в результате проведенного эксперимента (численного моделирования процесса усадки и коробления) были получены следующие действительные значения координат вершин линз –  ${}^d x_{ij}, {}^d y_{ij}$ . В этом случае смещения координат вследствие погрешности назначения  ${}^{(0)}s$  будут определяться зависимостями:

$$\delta x_{ij} = {}^d x_{ij} - \frac{{}^m x_{ij}}{{}^{(0)}M_x}, \tag{10}$$

$$\delta y_{ij} = {}^d y_{ij} - \frac{{}^m y_{ij}}{{}^{(0)}M_y}. \tag{11}$$

Случай, когда погрешности близки к нулю, означает, что усадка и коробление полностью компенсируются масштабированием формообразующих полостей.

Требуемый для минимизации погрешностей масштабный коэффициент может быть вычислен на основе результатов численного моделирования, исходя из условия минимизации среднеквадратичных отклонений:

$$\sum_i \sum_j (\delta x_{ij})^2 \rightarrow \min, \tag{12}$$

$$\sum_i \sum_j (\delta y_{ij})^2 \rightarrow \min. \tag{13}$$

В результате решения (12) и (13) получаем уточнённые относительно исходных значения коэффициентов масштабирования:

$${}^{(1)}M_x = \frac{{}^{(0)}M_x \sum_i \sum_j x_{ij}^2}{\sum_i \sum_j x_{ij}^d x_{ij}}, \quad (14)$$

$${}^{(1)}M_y = \frac{{}^{(0)}M_y \sum_i \sum_j y_{ij}^2}{\sum_i \sum_j y_{ij}^d y_{ij}}, \quad (15)$$

и скорректированное значение усадки:

$${}^{(1)}s = \left( \sqrt{{}^{(1)}M_x^2 + {}^{(1)}M_y^2} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (16)$$

Кроме повышения точности компенсации усадки в среднем с помощью выражений (12) и (13), необходимо минимизировать абсолютное значение коробления, то есть учесть по крайней мере, два фактора, существенно влияющих на качество литых МЛ. В качестве таких факторов были выбраны максимальные абсолютные значения ошибок (10), (11) для девяти контрольных точек (рис.11):

$$|\delta_x|_{\max} = \max \{ |\delta x_{ij}| \}, \quad (17)$$

$$|\delta_y|_{\max} = \max \{ |\delta y_{ij}| \}, \quad (18)$$

и разница между максимальной и минимальной погрешностями для контрольных точек:

$$\Delta_x = |{}^x\delta_{\max} - {}^x\delta_{\min}|, \quad (19)$$

$$\Delta_y = |{}^y\delta_{\max} - {}^y\delta_{\min}|, \quad (20)$$

где

$${}^x\delta_{\max} = \max \{ \delta x_{ij} \}, \quad {}^x\delta_{\min} = \min \{ \delta x_{ij} \},$$

$${}^y\delta_{\max} = \max \{ \delta y_{ij} \}, \quad {}^y\delta_{\min} = \min \{ \delta y_{ij} \}.$$

Следует отметить, что для реализации алгоритма компенсации усадки необходим оптимальный план эксперимента, минимизирующий количество расчётов. Наиболее распространённым способом многокритериальной оценки и оптимизации качества является метод Тагути.

**6. Многофакторная оценка качества литой МЛ по нескольким критериям методом Тагути**

Планирование виртуальных экспериментов инжекционного литья МЛ производилось по методу Тагути. Ортогональная матрица плана эксперимента была выбрана в соответствии с управляющими факторами и их уровнями для определения оптимального качества литья МЛ при минимальном числе экспериментов, исходя из условия поддержки достаточной робастности процесса.

План эксперимента был назначен в соответствии с ортогональной матрицей L9 (9 экспериментов, 4 регулируемых параметра) со стандартной последовательностью (табл. 1). В качестве управляющих факторов использовались следующие параметры технологического процесса литья: температура расплава, температура пресс-формы, скорость впрыска, время выдержки под давлением. Четыре контролируемых

параметра – показателей качества – максимальные значения погрешности по оси X и по оси Y, разница между максимальной и минимальной погрешностью по X и по Y.

Табл. 1. План экспериментов

Эксперименты	Уровни варьирования факторов				
	№	F1	F2	F3	F4
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	2	1	2	3	3
5	2	2	3	1	1
6	2	3	1	2	2
7	3	1	3	2	2
8	3	2	1	3	3
9	3	3	2	1	1

Показатели качества  $Z_k$  литой МЛ определялись по категории «меньше – лучше», исходя из принципа минимизации величин наблюдаемых погрешностей в  $n$  экспериментах:

$$Z_k \in \{ (|\delta_x|_{\max})_k, (\Delta_x)_k, (|\delta_y|_{\max})_k, (\Delta_y)_k \}, k = 1..n.$$

В этом случае интегрированный показатель качества определяется как функция отношения сигнала к шуму и вычисляется по формуле [1]:

$$Eta = -10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum (Z_k^2) \right). \quad (21)$$

Здесь  $Eta$  является результирующим отношением сигнал/шум (С/Ш), где сигнал – это номинальная геометрия МЛ по модели, а шум – это коробление отлитой детали. Заметим, что отношение С/Ш является выражением предполагаемой квадратичной функции потерь. Множитель -10 указывает на то, что это отношение характеризует величину, противоположную плохому качеству. Максимизация этого отношения приводит к возрастанию качества.

При проведении эксперимента параметры процесса устанавливаются согласно ортогональной матрице (табл. 1). Далее вычисляются значения отношения сигнала к шуму и устанавливаются виды таблицы и графика отклика. Вначале вычисляется среднее значение отклика для каждого фактора  $F_i$  затем – значение главного влияющего эффекта  $\Delta F$ : чем выше значение основного влияющего фактора, тем сильнее влияние этого фактора на систему в целом. Затем из этих данных и анализа влияния факторов могут быть получены таблицы и графики отклика. Значение функции отклика вычисляется следующим образом:

$$\bar{F}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{ij}, \quad (22)$$

$$\Delta F = \max (\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n) - \min (\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n), \quad (23)$$

где  $\bar{F}_i$  – среднее отношение С/Ш на  $i$ -м уровне фактора  $F$ ,  $m$  – номер  $i$ -го уровня каждого фактора,  $y_{ij}$  –  $j$ -ое отношение С/Ш на  $i$ -ом уровне;  $\Delta F$  – значение главного эффекта для фактора  $F$ ; и  $n$  – число уровней каждого фактора. Уровни варьирования факторов в

соответствии с выбранным диапазоном параметров ИЛ представлены в табл. 2.

Табл. 2. Уровни варьирования факторов

Факторы	Уровни варьирования факторов		
	L1	L2	L3
F1 – Температура расплава, °С	200	248	295
F2– Температура пресс-формы, °С	50	65	80
F3– Скорость впрыска V, см³/с	25	50	75
F4– Время выдержки под давлением t, с	10	15	20

В табл. 3 представлена расширенная матрица плана экспериментов и результатов имитационного моделирования литья МЛ.

Табл. 3. Расширенная матрица экспериментов

№	Температура расплава, °С	Температура пресс-формы, °С	Скорость впрыска V, см³/с	Время выдержки под давлением t, с	$ \delta_x _{max}$ , мм	$\Delta x$ , мм	$ \delta_y _{max}$ , мм	$\Delta y$ , мм
1	200	50	25	10	0,150	0,180	0,142	0,169
2	200	65	50	15	0,190	0,233	0,185	0,225
3	200	80	75	20	0,228	0,277	0,224	0,270
4	248	50	50	20	0,387	0,480	0,383	0,477
5	248	65	75	10	0,398	0,496	0,395	0,492
6	248	80	25	15	0,421	0,519	0,420	0,522
7	295	50	75	15	0,432	0,538	0,424	0,529
8	295	65	25	20	0,467	0,578	0,461	0,574
9	295	80	50	10	0,462	0,576	0,457	0,570

В САЕ-системе имитации инжекционного литья была промоделирована серия из 9 экспериментов, согласно плану экспериментов Тагути (табл. 3). Исходная модель МЛ разбивалась на тетраэдральные конечные элементы. Выбиралась последовательность анализа (заполнение, уплотнение, коробление), материал, расположение точки впрыска и параметры процесса, являющиеся управляющими факторами. В результате были получены картины распределения и величины коробления МЛ (рис. 12). Значения величин коробления в контрольных точках записывались посредством макроса для вычисления  $|\delta|_{max}$  и заносились в табл. 3.

Обработка результатов экспериментов (табл. 3) по методу Тагути производилась в программном комплексе StatsoftStatistica. Результаты обработки, графики отношения С/Ш по условию «меньше – лучше» для каждого фактора, представлены на рис. 13.

Исследование представленных на рис. 13 результатов анализа качества литой МЛ по критериям минимизации коробления по методу Тагути показывает, что температура расплава поликарбоната является наиболее влияющим на качество управляющим фактором. В этой связи минимальное значение температуры расплава 240 °С (нижняя технологическая граница) обеспечивает оптимальное качество литой МЛ. Понижение температуры пресс-формы до 50 °С также способствует уменьшению коробления и более равномерной усадке, но в значительно меньшей степени. Скорость впрыска в диапазоне значений 25...75 см³/сек и время

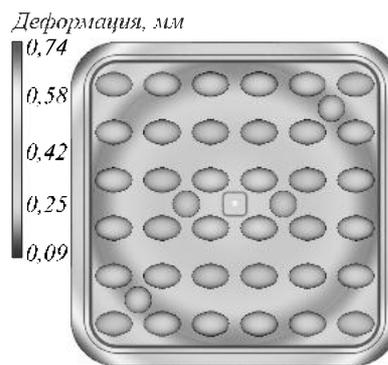


Рис. 12. Результаты имитационного моделирования ИЛ: расчётная величина коробления при оптимальных режимах. Анализ полученных результатов

выдержки отливки под давлением 1500 бар в диапазоне 10...20 с практически не оказывают влияния на качество изделия.

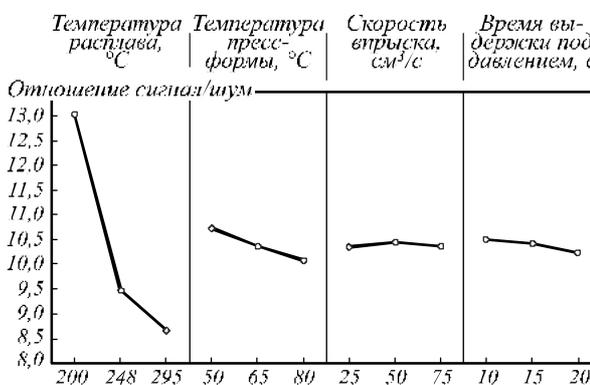


Рис. 13. Зависимости отношения сигнала к шуму от различных регулируемых параметров

На рис. 14 представлена МЛ, отлитая по оптимизированным технологическим режимам.

### 7. Результаты измерения диаграммы направленности отлитой мультилинзы

Для измерения диаграммы направленности, формируемой отлитой мультилинзой, использовался специальный гониофотометрический стенд (рис. 15).

Стенд включает в себя две прецизионные поворотные платформы, задающие ориентацию оптического элемента с точностью 1 угловая минута по зенитному и азимутальному углам. Для оценки световых характе-

ристик использовался люксметр Testo 545, измеряющий освещенность с разрешением 1 люкс.



Рис. 14. Изготовленная мультилинза

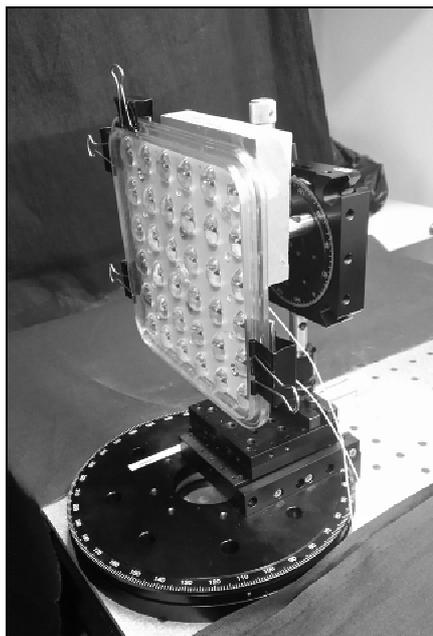


Рис. 15. Мультилинза на поворотных платформах

Измерения проводились с шагом 0,5°. Кривые силы света распределения интенсивности, формируемого отлитой мультилинзой, представлены на рис. 16.

СКО формируемого отлитым элементом распределения интенсивности от промоделированного в коммерческом программном обеспечении составило всего 7,8%. Такая величина ошибки косвенно подтверждает высокую точность изготовления поверхностей мультилинзы при использовании оптимизированных технологий литья, полученных в рамках данной работы.

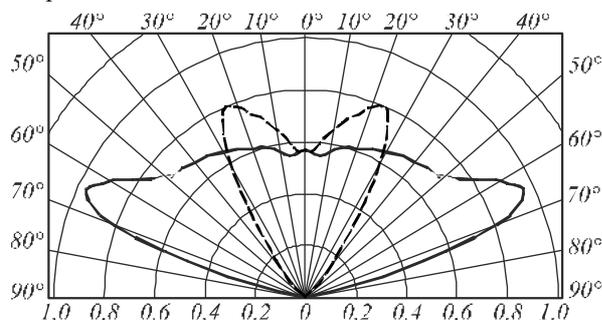


Рис. 16. Профили диаграммы направленности, формируемой изготовленным оптическим элементом

### Заключение

Предложен метод оптимизации параметров инъекционного литья средствами численного имитационного моделирования процесса с анализом результатов по методу Тагути. С помощью представленного метода на примере изготовления оптического элемента для дорожного освещения, определены критерии качества отливок МЛ, наиболее полно характеризующие возможное отклонение их оптических свойств от расчётной модели. К этим критериям относятся температура расплава и температура пресс-формы. Высокая точность воспроизведения поверхности МЛ обеспечивается при значениях этих величин 240 °С и 50 °С соответственно. Показано, что скорость впрыска и время выдержки отливки под давлением практически не оказывают влияния на качество отливаемых поверхностей.

С использованием оптимальных параметров инъекционного литья и расчётных показателей усадки был изготовлен оптический элемент из поликарбоната. Наибольшая погрешность расположения оптических поверхностей по результатам моделирования не превышала значений допусков для 7-го качества точности. Среднеквадратичное отклонение распределения, формируемого реальной МЛ, от диаграммы направленности, промоделированной в коммерческом программном обеспечении TracePro, составило 7,8%, что подтверждает высокую и достаточную для оптических элементов такого класса точность изготовления.

Необходимо отметить, что мультилинза (рис. 14), расчёт и литьё которой рассмотрено в данной работе, в 2015 году получила сертификат соответствия и была изготовлена тиражом 2 000 штук и использована в своих светодиодных светильниках компанией ООО «Светодиодные Технологии» для освещения улиц в городе Санкт-Петербурге.

### Благодарности

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00969).

### Литература

1. Taguchi, G. Robust quality / G. Taguchi, D. Clausing // Harvard Business Review. – 1990. – Vol. 68(1). – P. 65-75.
2. Thanh, H.V. Injection Molding of PC/PMMA Blend for Fabricate of the Secondary Optical Elements of LED Illumination / H.V. Thanh, C.C.A. Chen, C.H. Kuo // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 579. – P. 134-141.
3. Jaworski, M. Applying simulation to optimize plastic molded optical parts / M. Jaworski, A. Bakharev, F. Costa, C. Fried / Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8489. – 848906.
4. Chen, C.-P. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis / C.-P. Chen, M.-T. Chuang, Y.-H. Hsiao, Y.-K. Yang, C.-H. Tsai // Expert Systems with Applications. – 2009. – Vol. 36(7). – P. 10752-10759.
5. Кравченко, С.В. Расчёт преломляющих оптических элементов с двумя рабочими поверхностями для формирования заданных распределений освещённости / С.В Кравченко, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович / Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 435-442.

6. Winston, R. Nonimaging Optics / R. Winston, J.C. Miñano, P. Benítez. – Elsevier Academic Press, 2005. – 512 p.
7. Moiseev M.A. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source / M.A. Moiseev, L.L. Doskolovich, K.V. Borisova, E.V. Byzov // Journal of Modern Optics. – 2013. – Vol. 60, Issue 14. – P. 1100-1106.
8. Chen H.-C. Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light / H.-C. Chen, J.-Y. Lin, H.-Y. Chiu // Optics Express. – 2013. – Vol. 21, Issue 3. – P. 3201-3212.
9. Кравченко, С.В. Расчёт осесимметричных оптических элементов с двумя асферическими поверхностями для формирования заданных распределений освещённости / С.В. Кравченко, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 467-472.
10. Elmer, W.B. Optical design of reflectors. / W.B. Elmer // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17(7). – P. 977-979.
11. Lin, K.Ch. Weighted least-square design of freeform lens for multiple point sources / K.Ch. Lin // Optical Engineering. – 2012. – Vol. 51, Issue 4. – 043002.
12. Benitez, P. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions / P. Benitez, J.C. Minano, J. Blen, R. Mohedano, J. Chaves, O. Dross, M. Hernandez, W. Falicoff // Optical Engineering. – 2004. – Vol. 43(7). – P. 1489-1502.
13. Bruneton, A. High resolution irradiance tailoring using multiple freeform surfaces / A. Bruneton, A. Bäuerle, R. Wester, J. Stollenwerk, P. Loosen // Optics Express. – 2013. – Vol. 21(9). – P. 10563-10571.
14. Ma, Y. Hybrid method of free-form lens design for arbitrary illumination target / Y. Ma, H. Zhang, Z. Su, Y. He, L. Xu, H. Li // Applied Optics. – 2015. – Vol. 54(14). – P. 4503-4508.
15. Кравченко, С.В. Расчёт оптических элементов с двумя преломляющими поверхностями из условия формирования заданной диаграммы направленности / С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 4. – С. 508-514. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-508-514.
16. Doskolovich, L.L. On the use of the supporting quadric method in the problem of the light field eikonal calculation / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev, E.A. Bezus, V. Olikier // Optics Express. – 2015. – Vol. 23(15). – P. 19605-19617.
17. Michaelis, D. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems/ D. Michaelis, P. Schreiber, A. Bräuer // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36(6). – P. 918-920.
18. Olikier, V. Supporting quadric method in optical design of freeform lenses for illumination control of a collimated light / V. Olikier, J. Rubinstein, G. Wolansky // Advances in Applied Mathematics. – 2015. – Vol. 62. – P. 160-183.
19. Досколович, Л.Л. О применении метода согласованных квадратов к расчёту дифракционных оптических элементов / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 339-346.
20. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

#### *Сведения об авторах*

*Сведения об авторе Казанский Николай Львович см. стр.201 этого номера.*

**Степаненко Илья Сергеевич**, 1992 года рождения, в 2015 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва по специальности 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки», аспирант кафедры технологий производства двигателей. Область научных интересов: имитационное моделирование, высокоточные технологии производства. E-mail: [iliva.stepanenko@gmail.com](mailto:iliva.stepanenko@gmail.com).

**Хаймович Александр Исаакович**, д.т.н., 1966 года рождения, в 1992 году окончил Куйбышевский авиационный институт имени академика С.П. Королёва по специальности 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки», работает доцентом на кафедре технологий производства двигателей. Область научных интересов: механика сплошной среды, высокоточные технологии производства. E-mail: [berill\\_samara@bk.ru](mailto:berill_samara@bk.ru).

**Кравченко Сергей Васильевич**, 1991 года рождения. В 2014 году с отличием окончил обучение в магистратуре Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных трудов С.В. Кравченко 18 публикаций. E-mail: [sergey.kravchenko91@gmail.com](mailto:sergey.kravchenko91@gmail.com).

**Бызов Егор Владимирович**, 1988 года рождения. В 2014 году с отличием окончил обучение в магистратуре Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по направлению «Прикладные математика и физика». В списке научных работ Е.В. Бызова 17 публикаций и 1 авторское свидетельство. E-mail: [xameak@bigmir.net](mailto:xameak@bigmir.net).

**Моисеев Михаил Александрович**, 1986 года рождения, в 2008 году с отличием окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности 010600 «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2011 год), работает научным сотрудником в лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Является членом международного научного общества SPIE. М.А. Моисеев – специалист в области решения обратных задач геометрической оптики. В списке научных работ М.А. Моисеева 35 статей и 7 авторских свидетельств. E-mail: [mikhail@smr.ru](mailto:mikhail@smr.ru).

*Поступила в редакцию 14 марта 2016 г. Окончательный вариант – 19 апреля 2016 г.*

**INJECTIONAL MULTILENS MOLDING PARAMETERS OPTIMIZATION**

*N.L. Kazanskiy<sup>1,2</sup>, I.S. Stepanenko<sup>2</sup>, A.I. Khaimovich<sup>2</sup>, S.V. Kravchenko<sup>1,2</sup>, E.V. Byzov<sup>1,2</sup>, M.A. Moiseev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,*

<sup>2</sup> *Samara State Aerospace University, Samara, Russia*

**Abstract**

A technique for controlling and optimizing injection molding parameters by numerical simulation is proposed. Using this method for an optical element designed for roadway lighting, multilens molding quality criteria have been defined. Optimal parameters for lens manufacturing have been determined. Based on these parameters, a polycarbonate multilens has been made with an absolute tolerance equal to 0.01 mm.

**Keywords:** injection molding, optical element, intensity distribution, free-form surface, Taguchi's method.

**Citation:** Kazanskiy NL, Stepanenko IS, Khaimovich AI, Kravchenko SV, Byzov EV, Moiseev MA. Injectional multilens molding parameters optimization. *Computer Optics* 2016; 40(2): 203-214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.

**Acknowledgements:** The work was funded by the Russian Science Foundation under project # 14-19-00969.

**References**

- [1] Taguchi G, Clausing D. Robust quality. *Harvard Business Review* 1990; 68(1): 65-75.
- [2] Thanh HV, Chen CCA, Kuo CH. Injection Molding of PC/PMMA Blend for Fabricate of the Secondary Optical Elements of LED Illumination. *Advanced Materials Research* 2012; 579: 134-141.
- [3] Jaworski M, Bakharev A, Costa F, Fried C. Applying simulation to optimize plastic molded optical parts. *Proc SPIE* 2012; 8489: 848906.
- [4] Chen C-P, Chuang M-T, Hsiao Y-H, Yang Y-K, Tsai C-H. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. *Expert Systems with Applications* 2009; 36(7): 10752-10759.
- [5] Kravchenko SV, Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of refractive optical elements with two free-form surfaces for generation of prescribed illuminance distribution. *Computer Optics* 2014; 38(3): 435-442.
- [6] Winston R, Miñano JC, Benítez P. *Nonimaging Optics*. Elsevier Academic Press; 2005.
- [7] Moiseev MA, Doskolovich LL, Borisova KV, Byzov EV. Fast and robust technique for design of axisymmetric TIR optics in case of an extended light source. *J Mod Opt* 2013; 60(14): 1100-1106.
- [8] Chen H-C, Lin J-Y, Chiu H-Y. Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light. *Opt Express* 2013; 21(3): 3201-3212.
- [9] Kravchenko SV, Moiseev MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Design of axis-symmetrical optical element with two aspherical surfaces for generation of prescribed irradiance distribution. *Computer Optics* 2011; 35(4): 467-472.
- [10] Elmer WB. Optical design of reflectors. *App Opt* 1978; 17(7): 977-979.
- [11] Lin KCh. Weighted least-square design of freeform lens for multiple point sources. *Opt Eng* 2012; 51(4): 043002.
- [12] Benitez P, Minano JC, Blen J, Mohedano R, Chaves J, Dross O, Hernandez M, Falicoff W. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions. *Opt Eng* 2004; 43(7): 1489-1502.
- [13] Bruneton A, Bäuerle A, Wester R, Stollenwerk J, Loosen P. High resolution irradiance tailoring using multiple freeform surfaces. *Opt Express* 2013; 21(9): 10563-10571.
- [14] Ma Y, Zhang H, Su Z, He Y, Xu L, Li H. Hybrid method of free-form lens design for arbitrary illumination target. *App Opt* 2015; 54(14): 4503-4508.
- [15] Kravchenko SV, Byzov EV, Moiseev MA, Doskolovich LL. Design of optical elements with two refractive surfaces to generate a prescribed intensity distribution. *Computer Optics* 2015; 39(4): 508-514. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-508-514.
- [16] Doskolovich LL, Moiseev MA, Bezus EA, Oliker V. On the use of the supporting quadric method in the problem of the light field eikonal calculation. *Opt Express* 2015; 23(15): 19605-19617.
- [17] Michaelis D, Schreiber P, Bräuer A. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems. *Opt Lett* 2011; 36(6): 918-920.
- [18] Oliker V, Rubinstein J, Wolansky G. Supporting quadric method in optical design of freeform lenses for illumination control of a collimated light. *Adv Appl Math* 2015; 62: 160-183.
- [19] Doskolovich LL, Moiseev MA, Kazanskiy NL. On using a supporting quadric method to design diffractive optical elements. *Computer Optics* 2015; 39(3): 339-346.
- [20] Born M, Wolf E. *Principles of optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

**Authors' information**

The information about author **Nikolay Lvovich Kazanskiy** you can find on page 202 of this issue.

**Ilya Sergeevich Stepanenko** (b. 1992) graduated from S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU) in 2015, majoring in Aircraft Engines and Power Plants, currently postgraduate student of Engine Manufacturing Technologies chair. His research interests are currently focused on computer simulation, high-precise manufacturing methods. E-mail: [iliya.stepanenko@gmail.com](mailto:iliya.stepanenko@gmail.com).

**Alexander Isaakovich Khaimovich** (b. 1996), graduated (1992) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute, majoring in 160301 « Aircraft Engines and Power Plants». He works as associate professor at Engine Manufacturing Technologies department. His leading research interests include continuum mechanics, high precise manufacturing technologies. E-mail: [berill\\_samara@bk.ru](mailto:berill_samara@bk.ru).

**Sergey Vasilyevich Kravchenko** (b. 1991) graduated with honors (2014) from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is co-author of 18 scientific papers. E-mail: [sergey.kravchenko91@gmail.com](mailto:sergey.kravchenko91@gmail.com).

**Egor Vladimirovich Byzov** (b. 1988) graduated with honors (2014) from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He is co-author of 15 scientific papers and 1 patent. E-mail: [xameak@bigmir.net](mailto:xameak@bigmir.net).

**Mikhail Alexandrovich Moiseev** (b. 1986) graduated with honors (2008) from the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU), majoring in Applied Mathematics and Physics. He received his Philosophy Degree in Physics and Mathematics (2011) from Samara State Aerospace University. He is a researcher in diffraction optics laboratory of Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). He is a *SPIE* member. He is co-author of 35 scientific papers and 7 inventions and patents. His current research interests include nonimaging optics.

---

*Received March 14, 2015. The final version – April 19, 2016.*

---