

УДК 53

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-642-648

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ОЧКОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А.А. Иванюк

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: ivanyukaa@student.bmstu.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 06.08.20, принята к печати 05.09.20  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Иванюк А.А. Проектирование оптического модуля очков дополненной реальности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 642–648. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-642-648

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрен метод проектирования оптического модуля очков дополненной реальности, который содержит полупрозрачный светоделительный элемент, позволяющий наблюдать реальные предметы с наложенным дополнительным виртуальным изображением (OST HMD — optical see-through head-mounted display). Центральным элементом оптического модуля является призма, позволяющая видеть одновременно два канала: картину реального мира и наложенное на нее виртуальное изображение. В результате создается изображение дополненной реальности. Рассмотрена функциональная схема оптического модуля с введенной системой слежения за взглядом. **Метод.** Выполнена оптимизация поверхностей призмы, а также их наклонов и взаимного расположения при помощи Zemax OpticStudio. В основе оптимизации лежит идея использования поверхностей свободной формы, позволяющая уменьшить габариты, увеличить поле зрения и повысить качество изображения. **Основные результаты.** Приведены начальные параметры оптического элемента, а также алгоритм оптимизации поверхностей свободной формы, позволяющие получить сравнительно широкое поле зрения (54° по диагонали), компактность и высокие параметры качества изображения. **Практическая значимость.** Результаты работы могут найти применение при проектировании и разработке очков дополненной реальности в различных областях, например: медицине, дистанционном образовании, оборонной промышленности, спорте, маркетинге.

### Ключевые слова

очки дополненной реальности, виртуальная реальность, поверхности свободной формы

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-642-648

## OPTICAL MODULE DESIGN FOR AUGMENTED REALITY GLASSES

A.A. Ivaniuk

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation  
 Corresponding author: ivanyukaa@student.bmstu.ru

### Article info

Received 06.08.20, accepted 05.09.20  
 Article in Russian

**For citation:** Ivaniuk A.A. Optical module design for augmented reality glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 642–648 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-642-648

### Abstract

**Subject of Research.** The paper considers an optical module design method for augmented reality glasses. The module contains a translucent beam-splitting element that provides observation of real objects with superimposed additional virtual image (OST HMD — optical see-through head-mounted display). The central element of the optical module is a prism that views two channels simultaneously: a real world picture and a virtual image. As a result, the user is able to see an augmented reality image. The functional scheme of the optical module with the introduced eye tracking system is considered. **Method.** Optimization of the prism surfaces, as well as tilts and relative positions, was performed using Zemax OpticStudio. It is based on the idea of applying free-form surfaces, which enables the sizes to be reduced, the field of view to be increased and the image quality to be improved. **Main Results.** The initial parameters of the optical element and an algorithm for optimization of free-form surfaces are developed, that gives the possibility to obtain a relatively wide field of vision (54° diagonally), compactness and high image quality parameters. **Practical Relevance.**

The results of this work can be used in the design and development of augmented reality glasses in various fields, such as: medicine, online education, defense industry, sports, and marketing.

**Keywords**

augmented reality glasses, virtual reality, augmented reality, free form surfaces

**Введение**

В последнее время особую популярность получают очки дополненной (augmented reality, AR) и виртуальной реальности, которые нашли применение в различных областях, таких как медицина (отображение вспомогательной информации, например, во время операции, когда использование рук невозможно); социальные сети (возможность видеть новости пользователей в режиме реального времени глазами авторов новостей); бизнес (обучение сотрудников и повышение их эффективности, а также контроль выполнения должностных обязательств); образование (виртуальные уроки для повышения эффективности дистанционного обучения); спорт (например, отображение скорости и пульса велосипедиста при использовании очков, или тренировки с сопровождением виртуального тренера) [1].

В соответствии с исследованием Tractica [2] популярность очков дополненной и виртуальной реальности вначале росла медленно, из-за того, что мировой рынок и качество самих устройств не были адаптированы к массовому использованию. Tractica прогнозирует, что мировой рынок умных AR-очков вырастет со 101 000 единиц в 2018 г. до 19,7 млн единиц ежегодно к 2025 г., что представляет собой совокупный годовой темп роста в размере 112,4 %. Эти объемы приведут к росту выручки устройств от 143 млн долларов США в 2018 г. до 20,9 млрд долларов США к 2025 г. в среднем на 103,8 %. Более того, мировые технологические гиганты (Google, Microsoft, Apple, Epson, Сбербанк и др.) уже занимаются разработкой очков дополненной и виртуальной реальности. А многие эксперты прогнозируют, что очки в будущем могут полностью заменить использование компьютеров и смартфонов.

**Устройство оптического модуля**

HMD (head-mounted display) — дословно переводится как дисплей, закрепленный на голове. Это устройство, используемое в системах дополненной и виртуальной реальности (иногда переводится как «шлем виртуальной реальности»), одеваемое непосредственно на голову в виде шлема или части его, которое имеет дисплей и оптику перед одним (монокулярная система) или двумя глазами (бинокулярная система).

OST HMD (optical see-through head-mounted display) — устройство HMD, с возможностью видеть не только виртуальную картину, но и одновременно наблюдать картину реального мира сквозь оптическую систему (рис. 1). Преимуществами AR-очков по технологии OST HMD с возможностью видения сквозь оптическую систему и использованием свободной формы, являются: компактность; невысокие значения фокусного расстояния; широкое поле зрения; улучшенные яркость и контраст передаваемого изображения; снижение аберраций.

Центральным элементом модуля является призма, одна из поверхностей которой — светоделительная, позволяющая наблюдать реальные предметы с наложенным дополнительным виртуальным изображением (рис. 2). Таким образом, будут оптимизированы два оптических канала: путь проекционного изображения микродисплея и путь прозрачного изображения.

Оптический модуль (рис. 2) состоит из призмы свободной формы, корректора свободной формы, микродисплея, системы отслеживания взгляда Eye tracking (состоит из инфракрасной (ИК) камеры и ИК светодиодов), микроконтроллера.

**Выбор начальных параметров**

Успешная оптимизация во многом зависит от правильно выбранных ограничений систем.

$$\begin{cases} Y_{Pa'} - Y_{Pa} < 0, \\ Y_{Pa''} - Y_{Pa} > 0, \\ 0,5 < Z_{Pa'} - Z_{Pa} < 2, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{Pb'} - Y_{Pb} > 0, \\ -1,5 < Z_{Pb'} - Z_{Pb} < -0,2, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} -2 < Y_{Pc} - Y_{Pc'} < -0,2, \\ 0 < Z_{Pc} - Z_{Pc'} < 1, \end{cases} \quad (3)$$

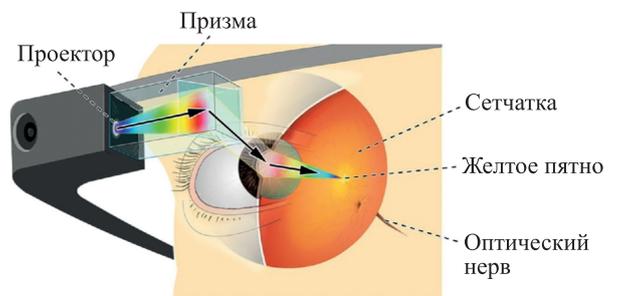


Рис. 1. Принцип работы оптического модуля очков дополненной реальности

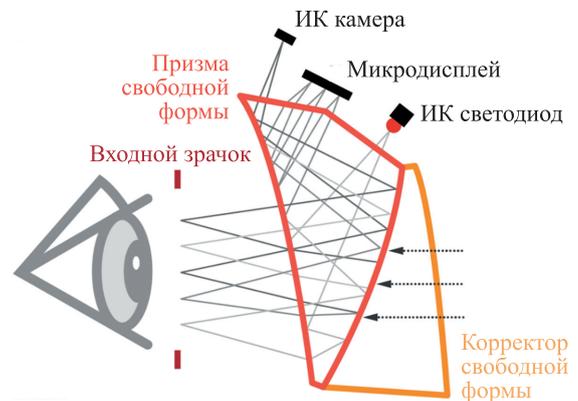


Рис. 2. Функциональная схема оптического модуля

$$\begin{cases} Z_{Pa} > \text{расстояние видения глаза (17 мм)}, \\ Z_{Pc} > \text{расстояние видения глаза (17 мм)}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $Pa, Pa', Pa''$  — координаты прохождения или отражения луча  $R_{2b}$  от поверхностей  $S1, S2, S3, S1'$  соответственно (рис. 3, б);  $Y_{Pa'}, Y_{Pa}, Y_{Pa}, Z_{Pa'}, Z_{Pa}$  — соответствующие координаты по осям  $Y$  и  $Z$ ;  $Pb$  — координата отражения луча  $R_{1u}$  от поверхности  $S2$ ;  $Pb'$  — координата прохождения луча  $R_{2b}$  через поверхность  $S3$ ;  $Z_{Pa'}, Z_{Pb}, Y_{Pa'}, Y_{Pb}$  — соответствующие координаты по осям  $Z$  и  $Y$ ;  $Pc, Pc'$  — координаты прохождения или отражения луча через поверхности  $S1', S3$  соответственно;  $Z_{Pc'}, Z_{Pc}, Y_{Pc'}, Y_{Pc}$  — соответствующие координаты по осям  $Z$  и  $Y$ .

Без выбора систем (1)–(4) велика вероятность, что будут получены три поверхности в пространстве, никак не связанные между собой, поэтому особое внимание необходимо уделить ограничениям и условиям оптимизации для контроля полученной системы. В соответствии с [3, 4] все координаты соотносятся с глобальной координатной системой с центром в зрачке глаза. Для наглядности приведено изображение хода лучей от локальных зон поверхности (рис. 3, б).

Ограничения по  $Y$ -направлению с помощью  $Pa'', Pa', Pa$  утверждают, что поверхности 1 и 2 не пересекутся, и нижний краевой луч пройдет без помех. И также, последнее выражение в формуле (1) накладывает ограничения на толщину границ призмы (от 0,5 до 2 мм). С помощью параметров по  $Y$ - и  $Z$ -направлениям ( $Pb', Pb$ ) (2) гарантированно, что:

1. верхний краевой луч пройдет после преломления на поверхности  $S1'$ ;
2. выражение (2) позволяет контролировать толщину призмы;
3. с помощью выражения (3) поверхности 1 и 3 расположены правильно относительно друг друга, и лучи будут проходить без помех и в соответствии с требованиями в (3);

4. при помощи выражений (1) и (3) три поверхности призмы располагаются верно друг относительно друга.

Эти ограничения [5] также в дальнейшем регламентируют поворот и децентрировку поверхностей 1 и 2, что помогает снизить aberrации на этих поверхностях. С использованием выражения (4) устанавливается минимальное значение наилучшего видения, а также факт, что наклон поверхности 1 призмы будет в противоположную сторону.

$$z = c \frac{x^2 + y^2}{\left(1 + \sqrt{(1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2))}\right)} + \sum C_j x^m y^n, \quad (5)$$

$$j = \frac{[(m + n)2 + m + 3n]}{2} + 1,$$

где  $z$  — прогиб поверхности вдоль оси  $Z$ ;  $x$  и  $y$  — координаты в локальной системе координат;  $m$  и  $n$  — степени для  $x$ ,  $y$  координат;  $c$  — кривизна поверхности в области вершины;  $k$  — коническая константа;  $C_j$  — коэффициент для  $x^m y^n$  с порядковым номером  $j$ .

В ходе оптимизации [3] в программе Zemax стандартные поверхности сначала оптимизируются до асферических поверхностей с типом Even asphere и добавлением коэффициентов до 10-го порядка [6, 7]. Далее тип этих поверхностей меняется на Extended Polynomial (расширенный полином) (5).

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_r}{n_i}\right), \quad (6)$$

где  $n_r$  — показатель преломления материала, в котором будет происходить преломление;  $n_i$  — показатель преломления падающей среды. В этом случае условие полного внутреннего отражения выполняется, когда лучи, проходящие в пределах призмы, ударяются о поверхность  $S1'$  под углом, большим  $\theta_c = 42,09^\circ$ . Материал призмы PMMA (полиметилметакрилат),  $n = 1,492$ .

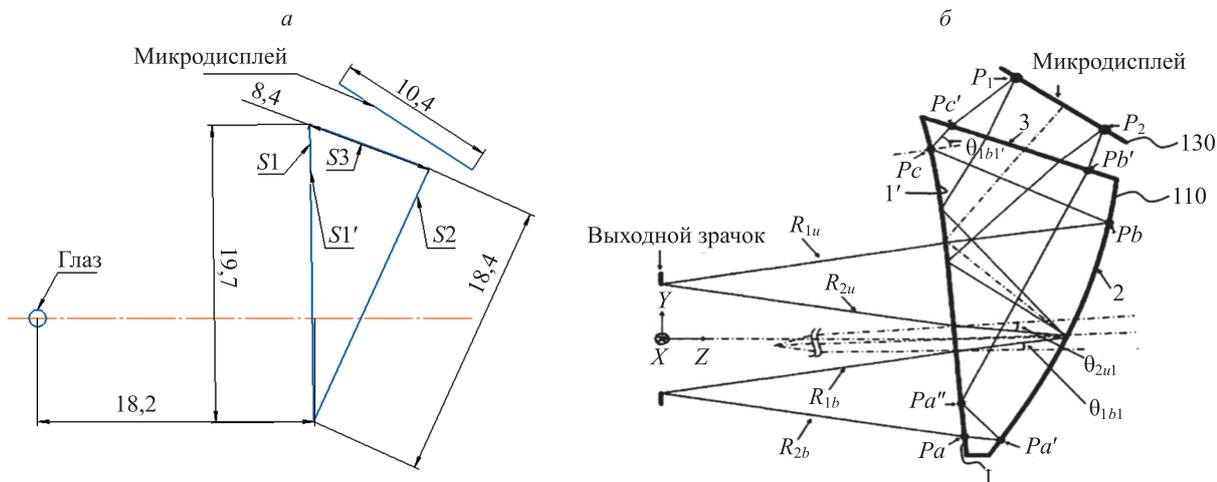


Рис. 3. Начальная схема призмы оптического модуля (а); оптический ход лучей от разных зон поверхности и положений зрачка, в зависимости от их поля и положения зрачка и контролируемого условия для создания полного внутреннего отражения (б).

$R_{2u}, R_{2b}$  — случайные лучи для разных поля зрения и положения входного зрачка;  $\theta_{1b1}, \theta_{2u1}$  и  $\theta_{1b1}'$  — случайные углы падения лучей  $R_{2u}, R_{2b}$  на поверхностях  $S1, S1', P1, P2$  — точки фокусировки лучей  $R_{2u}, R_{2b}$

Таблица 1. Начальные параметры призмы

Поверхность	X, мм	Y, мм	Z, мм	Децентрировка по оси Y, мм	Поворот по оси X, град
S1	—	0,305	18,25	4,55	-1,8
S2	—	15,534	26,25	1,50	23
S1'	Параметры совпадают с S1, так как это одна просветленная поверхность, которую для последовательного проектирования в Zemax необходимо вводить, как разные				
S3	—	17,101	33,55	21,50	-70
Микродисплей	—	—	39,55	22,00	-60

Чтобы учесть факт полного внутреннего отражения [8], рассчитывается критический угол прохождения луча. Угол прохождения луча через поверхности — результат наклона, децентрировки и положения плоскостей друг относительно друга. Лучи, испускаемые микродисплеем, отражаются от S1' посредством полного внутреннего отражения. Это явление происходит, когда свет, перемещающийся внутри материала с более высоким индексом, ударяется о поверхностную границу среды с более низким индексом под углом, большим его критического угла (6).

Учитывая ограничения (1)–(6) и требования к компактности, выведены начальные (базовые) параметры призмы, которые приведены в табл. 1, схема призмы на начальном этапе приведена на рис. 3, а.

Целью настоящей работы является определение компактности, легкого веса, и широкого поля зрения AR-очков. Основываясь на таких параметрах, как размер, разрешение, доступность и цена, — выбран дисплей E-magin OLED с разрешением 2040 × 2040 (2K) пикселей и размером пикселя 9,3 мкм. В результате необходимо получить поле зрения 54° по диагонали, с фокусным расстоянием не более 17 мм. Минимальное фокусное расстояние 10 мм.

### Оптимизация в Zemax OpticStudio

На начальном этапе оптимизации вводятся рассчитанные параметры из табл. 1 и основные характеристики. Размер входного зрачка определяется как 5 мм (выбирается среднее значение, так как зрачок человеческого глаза составляет 2–8 мм).

Система моделируется «в обратном ходе» для установки, работающей в реальности. В реальности (в фи-

зической системе) предметом является микродисплей, а плоскостью изображения — сетчатка человеческого глаза (выходные/входные зрачки системы и человеческого глаза будут совмещены). Для эффективной оптимизации система определяется таким образом, что выходной зрачок физической системы — это входной зрачок, смоделированный в OpticStudio, а микродисплей рассмотрен как «плоскость изображения» системы. Далее описан процесс моделирования лучей в OpticStudio.

Оптическая система в значительной степени зависит [4, 9] от наклонов и децентрировки (табл. 1) нескольких поверхностей, для регулировки наклона и децентрировки поверхностей которых используются координатные разрывы и тип поверхности Coordinate Break. Все поверхности приведены на рис. 4, а, при этом поверхность 1 — диафрагма (STOP). Например, координатными разрывами для поверхности 3 (S1) являются поверхности 2 и 4, а для поверхности 6 (S2) — поверхности 5 и 7.

На рис. 4, а координатные разрывы выделены красным цветом. Свойства поверхности S1 копируются в свойства поверхности S1' с помощью функции Pickup.

Для настройки работы системы в двух режимах одновременно используется редактор мультиконфигураций (рис. 4, б). Конфигурация 1 создана поверхностями 0–13, а также плоскостью изображения (поверхности 17 и 18). Конфигурация 2 состоит из поверхностей S1 и S2, но больше не использует поверхности S1' или S3. Эти поверхности (и соответствующие им разрывы координат) в редакторе не учтены. Конфигурация 2 настроена так, чтобы учитывать только поверхности 0–7, 14–16 и 18; координатный разрыв для поверхности изображения отсутствует, поскольку необходимо, чтобы

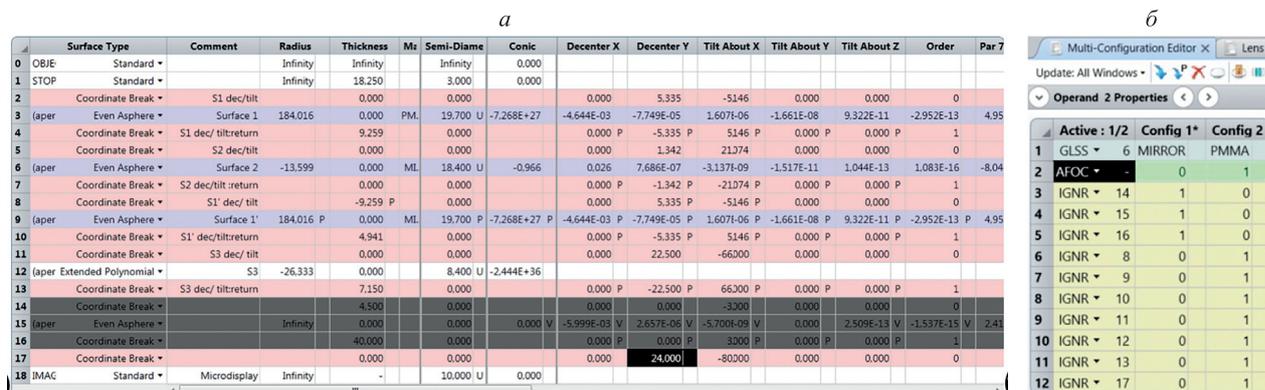


Рис. 4. Конструктивные параметры оптической системы (а) и редактор мультиконфигураций (б)

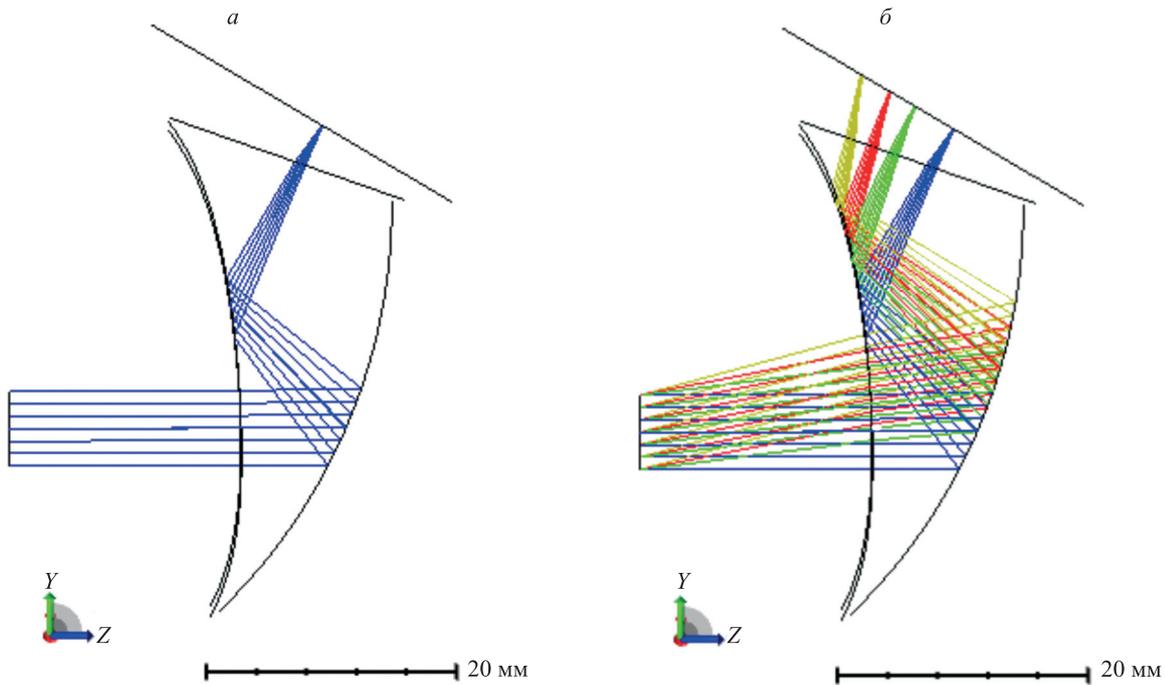


Рис. 5. Оптимизация на начальном этапе (а); оптическая система после введения полей  $11^\circ$  (зеленый цвет),  $15^\circ$  (красный),  $20^\circ$  (желтый цвет) и оптимизации (б)

плоскость изображения была перпендикулярна оси  $Z$ , как бы моделируя свет из окружающей среды.

До оптимизации введены конструктивные параметры [9, 10] и соответствующие координатные разрывы. После чего поверхности  $S1$  и  $S2$  подверглись оптимизации до типа Even asphere (рис. 5, а). На втором этапе оптимизации, когда aberrации и качество системы стали удовлетворительными, было увеличено поле зрения (рис. 5, б), и снова проведена оптимизация. На каждом этапе добавляются соответствующие операнды оценочной функции, которые представлены в табл. 2. На третьем этапе оптимизации поле зрения увеличено до  $54^\circ$  по диагонали, проведена оптимизация, и настроены режимы мультиконфигурации.

### Полученные результаты

В результате рассчитанных ограничений систем (1)–(6) и начальных параметров призмы рис. 3, а, а также оптимизации в OpticStudio, результат которой приведен на рис. 6, были получены параметры главного оптического элемента модуля AR-очков. Конструктивные параметры оптической системы, полученные в результате оптимизации, приведены на рис. 4, а. Вид оптической системы с обозначениями после оптимизации и отображенными двумя каналами оптического хода, приведен на рис. 6.

На рис. 7, а представлена 3D-модель оптического модуля. Рис. 7, б иллюстрирует виртуальное изобра-

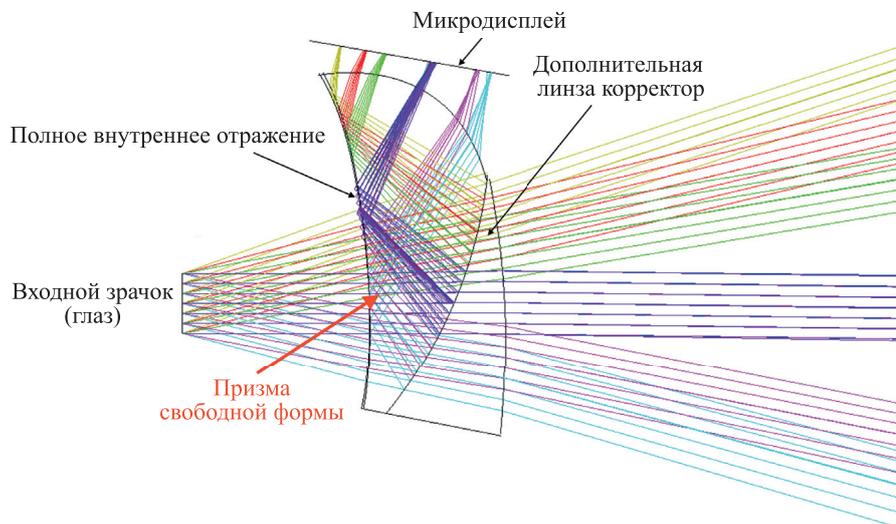


Рис. 6. Вид оптической системы в режиме мультиконфигурации после оптимизации и с полем зрения  $54^\circ$  по диагонали

Таблица 2. Операнды OpticStudio и их применение при решении заданной задачи

Название операнда	Функция операнда
GLCZ/GLCY/GLC	Глобальные координатные ограничения: следует выровнять поверхность $S1'$ к $S1$ (поверхностей 9 и 3), так как физически это одна поверхность;
DIFF (RAGY, RAGZ)	$Y, Z$ — координаты главного луча, попадающего на линзу, и луча, попадающего на фазовую поверхность;
MNCA, MXCA, MNEA	требования к воздушным промежуткам;
MNCG, MXCG, MNEG	требования к толщинам стекла;
CONF	выбор конфигурации для введения ограничений;
GLCZ	положение по оси $Z$ , взаимное расположение по оси $Z$ поверхностей $S1, S1'$ ;
GLCY	отслеживание положения по оси $Y$ последней поверхности и микродисплея с применением операнда DIFF, который измеряет разницу;
EFFL	контроль фокусного расстояния с применением дополнительных операндов OPGT и OPLT для задания минимального и максимального значений;
WFNO	значение рабочего фокусного числа, зависящее от параметров краевого луча;
DIMX	контроль дисторсии задается для каждой точки поля по оси $Y$ ;
DISG	контроль дисторсии задается для всех точек поля;
POWP	power at a point in the pupil вычисляет значения эффективного фокусного расстояния (EFL) после преломления от заданной поверхности в любой точке на зрачке для заданной длины волны;
PMGT, PMLT	операнды для задания диапазона значений. В данном случае будет задаваться диапазон изменения децентрировки и наклона;
OPTH	ограничения длины оптического пути при указанной длине волны;
CVVA	контроль кривизны поверхностей при помощи дополнительных операндов: RECI (возвращает обратно значение), OPGT и OPLT (создают диапазон для ограничения возможных значений), MNCG и MXCG (для контроля толщины стекла заданных поверхностей создают диапазон возможных значений);
RAID	контроль углов, задаются граничные значения.

жение, получаемое при прохождении света через разработанный модуль.

Полученная оптическая система имеет широкое поле зрения,  $54^\circ$  по диагонали [11, 12], в то время, как ряд приборов даже сейчас производится со значениями поля зрения  $35^\circ, 42^\circ$  по диагонали. Из aberrаций в системе присутствует в основном дисторсия. При этом для коррекции дисторсии, близорукости и дальнозоркости пользователя, а также других дефектов глаза, может

быть предусмотрена дополнительная система. Система соответствует требованиям к компактности, размер по каждой оси не превышает 20–25 мм.

В соответствии с рис. 1 и рис. 2, к микродисплею подключается микроконтроллер. При необходимости к оптическому модулю может быть подключена система отслеживания взгляда Eye tracking. В этом случае будет необходимо включение в оптический модуль ИК камеры и ИК светодиодов.

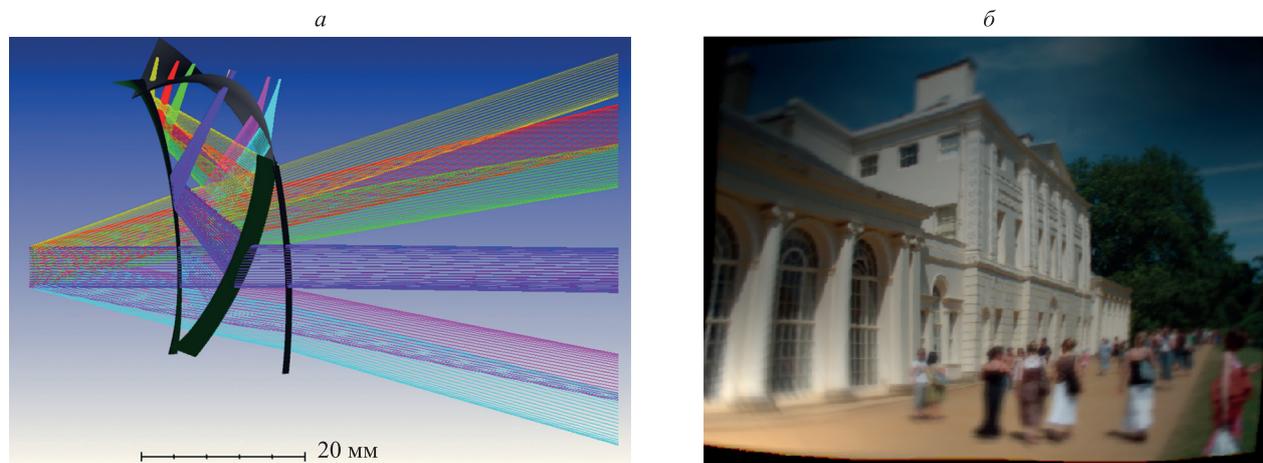


Рис. 7. 3D-модель полученной оптической системы в Zemax OpticStudio (а); виртуальное изображение, получаемое при прохождении света через разработанный модуль (б)

Оптический модуль может быть произведен методом литья под давлением [1, 13]. При этом необходима трехосевая система для центрировки и успешного цементирования основной призмы и корректора свободной формы. Контроль формы поверхностей свободной формы может быть осуществлен разными способами, например, иммерсионным или рефлектометрическим.

### Заключение

В работе на конкретном примере рассмотрена задача создания и оптимизации оптического модуля очков дополненной реальности по технологии OST HMD с использованием поверхностей свободной формы. Полученные данные могут быть использованы при проектировании оптического модуля очков дополненной реальности или улучшении показателей уже разработанного оптического элемента.

### Литература

1. Иванюк А.А. Производство оптического модуля очков дополненной реальности методом литья под давлением // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. № 14. С. 579–589.
2. Tractica research. Smart augmented reality glasses. 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://tractica.omdia.com/research/smart-augmented-reality-glasses/> (дата обращения: 30.06.20)
3. Fournier F.R., Cassarly W.J., Rolland J.P. Fast freeform reflector generation using source-target maps // *Optics Express*. 2010. V. 18. N 5. P. 5295–5304. doi: 10.1364/OE.18.005295
4. Cheng D., Hua H., Wang Y. Optical see-through free-form head-mounted display. Patent US20140009845A1. 2014.
5. Droessler J.G., Fritz T.A. High brightness see-through head-mounted display. Patent US6147807A. 2000.
6. Handbook of Plastic Optics / ed. by S. Bäumer. Wiley-VCH, 2005. P. 98–202. doi: 10.1002/3527605126
7. Bajura M., Fuchs H., Ohbuchi R. Merging virtual objects with the real world: seeing ultrasound imagery within the patient // *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1992. V. 26. N 2. P. 203–210. doi: 10.1145/142920.134061
8. Rolland J.P., Biocca F., Hamza-Lup F., Ha Y., Martins R. Development of head-mounted projection displays for distributed, collaborative, augmented reality applications // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2005. V. 14. N 5. P. 528–549. doi: 10.1162/105474605774918741
9. Hua H., Brown L.D., Zhang R. Head-mounted projection display technology and applications // *Handbook of Augmented Reality*. Springer, 2011. P. 123–155. doi: 10.1007/978-1-4614-0064-6\_5
10. Sisodia A., Bayer M., Townley-Smith P., Nash B., Little J., Cassarly W., Gupta A. Advanced helmet mounted display (AHMD) // *Proceedings of SPIE*. 2007. V. 6557. P. 65570N. doi: 10.1117/12.723765
11. Русинов М.М. *Техническая оптика*. Л.: Машиностроение, 1979. С. 20–22, 401–419.
12. Русинов М.М. *Композиция оптических систем*. Л.: Машиностроение, 1989. С. 88–98.
13. Hazlett R.D. Fractal applications: Wettability and contact angle // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1990. V. 137. N 2. P. 527–533. doi: 10.1016/0021-9797(90)90425-N

### Авторы

**Иванюк Анастасия Александровна** — студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9070-1078, [aanastasiia00@gmail.com](mailto:aanastasiia00@gmail.com)

### References

1. Ivanjuk A.A. Production of optical module for alternate reality glasses by injection molding. *Innovation. Science. Education*, 2020, no. 14, pp. 579–589. (in Russian)
2. Tractica research. Smart augmented reality glasses, 2018. Available at: <https://tractica.omdia.com/research/smart-augmented-reality-glasses/> (accessed: 30.06.20)
3. Fournier F.R., Cassarly W.J., Rolland J.P. Fast freeform reflector generation using source-target maps. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 5, pp. 5295–5304. doi: 10.1364/OE.18.005295
4. Cheng D., Hua H., Wang Y. Optical see-through free-form head-mounted display. *Patent US20140009845A1*, 2014.
5. Droessler J.G., Fritz T.A. High brightness see-through head-mounted display. *Patent US6147807A*, 2000.
6. *Handbook of Plastic Optics*. Ed. by S. Bäumer. Wiley-VCH, 2005, pp. 98–202. doi: 10.1002/3527605126
7. Bajura M., Fuchs H., Ohbuchi R. Merging virtual objects with the real world: seeing ultrasound imagery within the patient. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1992, vol. 26, no. 2, pp. 203–210. doi: 10.1145/142920.134061
8. Rolland J.P., Biocca F., Hamza-Lup F., Ha Y., Martins R. Development of head-mounted projection displays for distributed, collaborative, augmented reality applications. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2005, vol. 14, no. 5, pp. 528–549. doi: 10.1162/105474605774918741
9. Hua H., Brown L.D., Zhang R. Head-mounted projection display technology and applications. *Handbook of Augmented Reality*. Springer, 2011, pp. 123–155. doi: 10.1007/978-1-4614-0064-6\_5
10. Sisodia A., Bayer M., Townley-Smith P., Nash B., Little J., Cassarly W., Gupta A. Advanced helmet mounted display (AHMD). *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6557, pp. 65570N. doi: 10.1117/12.723765
11. Rusinov M.M. *Optical Engineering*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, pp. 20–22, 401–419. (in Russian)
12. Rusinov M.M. *Composition of Optical Systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, pp. 88–98. (in Russian)
13. Hazlett R.D. Fractal applications: Wettability and contact angle. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1990, vol. 137, no. 2, pp. 527–533. doi: 10.1016/0021-9797(90)90425-N

### Authors

**Anastasiia A. Ivaniuk** — Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9070-1078, [aanastasiia00@gmail.com](mailto:aanastasiia00@gmail.com)