

УДК 51-74, 004.046

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ

Статья поступила в редакцию 22.04.2019, в окончательном варианте – 09.06.2019.

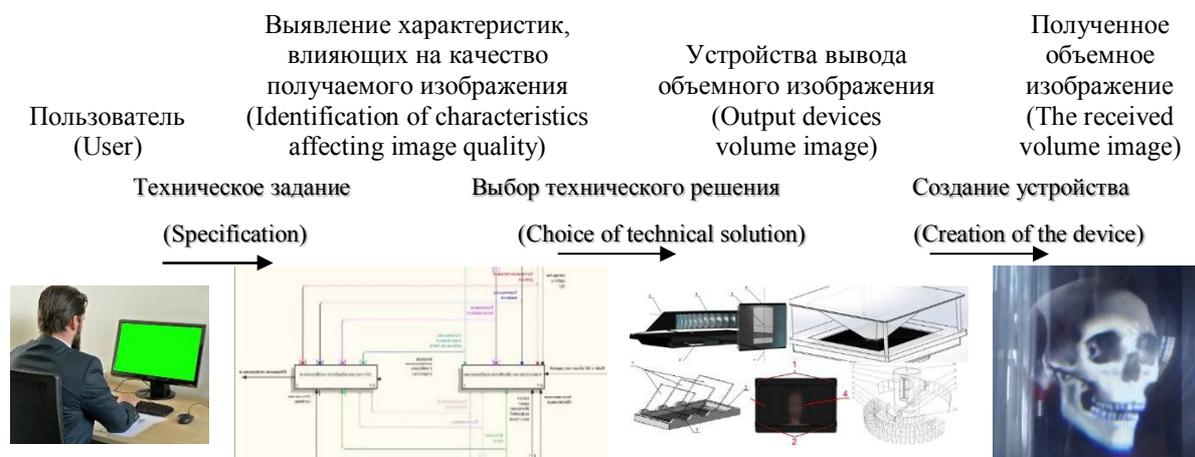
Ключиков Аркадий Викторович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, e-mail: krok9407@mail.ru

Большаков Александр Афанасьевич, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, доктор технических наук, профессор, e-mail: aabolshakov57@gmail.ru

Описаны существующие способы воспроизведения объемного изображения. Проанализированы свойства различных технических решений. Выявлены основные проблемы и задачи, требующие решения для улучшения качества воспроизведения объемных дисплеев. Предложен, описан и реализован модельный ряд устройств формирования объемного изображения. Определены показатели качества выходного объемного изображения, влияющие на восприятие эффекта объема наблюдателем. Проведена формализация процесса формирования 3D-объектов в результате действия дисплея как системы, описаны взаимосвязи между блоками управления, а также каждый из процессов его поэтапного формирования. Предложена функциональная модель формирования 3D-изображения на основе нотаций IDEF0. Описана поэтапная декомпозиция процесса формирования объемного изображения в дисплеях. Рассмотрены факторы, влияющие на процесс формирования изображения. Представлены инструментальные средства создания выходного объемного изображения требуемого качества. Определены признаки входного изображения, влияющие на восприятие его глубины наблюдателем.

Ключевые слова: объемный дисплей, оптическая система, 3D-изображение, воксели, источник света, функциональное моделирование, стереопара, проекционная плоскость, линза Френеля, лентичулярный растр

Графическая аннотация (Graphical annotation)



FUNCTIONAL MODELING OF THE PROCESS OF CREATION OF VOLUMETRIC IMAGES BASED ON AUTOSTEREOSCOPIC DISPLAYS

The article was received by editorial board on 22.04.2019, in the final version – 09.06.2019.

Klyuchikov Arkadiy V., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: krok9407@mail.ru

Bolshakov Alexander A., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: aabolshakov57@gmail.ru

Existing methods for reproducing a three-dimensional image are described. The properties of various technical solutions are analyzed. The main problems and tasks that need to be solved to improve the quality of reproduction of volumetric displays are identified. Proposed, described and implemented a range of devices for forming a three-dimensional image. The quality indicators of the output volumetric image that affect the perception of the volume effect by the observer

are determined. The formalization of the process of the formation of 3D objects as a result of the display as a system has been carried out, the interrelations between the control units, as well as each of the processes of formation have been described in stages. A functional model for the formation of a 3D image based on IDEF0 notations is proposed. Phased decomposition of the process of forming a volumetric image in displays is described. The factors influencing the process of image formation are considered. Describes the tools to create the output three-dimensional image of the required quality. Identified features of the input image that affect the perception of its depth by the observer.

Keywords: volume display, optical system, 3D image, a voxel, optical source, functional modeling, stereo pair, projective plane, Fresnel lens, Lenticular lens

Введение. Для человека объемное изображение является наиболее привлекательным и информативным. Поэтому направление развития технологий, способных воспроизводить объемное изображение, является весьма перспективным. Одним из устройств, предназначенных для воспроизведения трехмерной информации, является объемный дисплей [1, 18, 20, 26]. В нем изображение формируется объемными пикселями (далее именуемые «вокселями»). Другой способ базируется на представлении трехмерного изображения векторами, заполняющими рабочее пространство дисплея, которое в свою очередь определяется конструкционными особенностями устройства.

Широкое применение таких дисплеев ограничено рядом факторов:

- высокая стоимость устройств;
- низкое качество изображения;
- ограничения по количеству лиц, способных одновременно просматривать изображение (в силу ограниченности зоны пространства, в которой такие лица должны располагаться по отношению к дисплею);
- сложность масштабирования комплектующих в изделии;
- необходимость использования специальных средств для наблюдения изображений (различные очки и т.п.).

В связи с появлением в настоящее время дополнительных возможностей физической реализации технологий получения объемных изображений активизировался спрос на них потребителей и интерес разработчиков. Существует ряд задач, связанных с противоречием технологий и средств воспроизведения объемного изображения для успешного и широкого использования устройств многоцветной полноразмерной объемной динамической визуализации информации [3, 13, 19, 24].

Первое, и основополагающее, – это противоречие между потоком обрабатываемых данных, необходимым для обеспечения изображения и требуемым качеством изображения.

Второе. Технология создания изображения, которое поступает на входы устройства. Обычно объемные дисплеи требуют проводить сложную первичную обработку плоского изображения или входной трехмерной модели.

Третье. Технические особенности состава и конструкции дисплея. Если рассматривать дисплеи, главный фактор построения которых связан с электронной составляющей, то для них увеличение области просмотра и качества картинки приводит к повышению стоимости и сложности управления. Если дисплеи используют оптические элементы, то это приводит к увеличению габаритов дисплея, а также к новым вычислениям, так как оптические свойства элементов системы не изменяют параметров при масштабировании.

Целью работы является обеспечение получения объемного изображения требуемого качества на основе выявления основных характеристик объекта исследования как системы, влияющих на выходное качество объемного изображения; подбора параметров и вариантов технической реализации устройства; разработки метода, способного обеспечивать передачу и воспроизведение изображения в режиме реального времени через широкополосную линию передачи информации интернета.

Проведем анализ имеющихся технических решений на текущий момент. Для этого определим критерии, по которым можно разделить способы формирования изображения.

Первым критерием выберем механическое перемещение в пространстве для проецирования объемных образов.

По характеру подвижности проекционных плоскостей будем различать динамические и статические.

Динамические проекционные плоскости. Для создания иллюзии 3D-образов используют механически перемещающиеся части, независимо от типа перемещения и перемещаемых элементов. Этот способ включает дисплеи с проекционными или имитирующими поверхностями, которые вращаются (двигаются), а изображение на них создается скоростными проекторами или светодиодами, включаемыми в определенный момент.

Поворотные объемные дисплеи создают трехмерные изображения, проецируя ряд двумерных изображений на вращающуюся поверхность, линейные – на перемещающуюся. Когда поверхность вращается или перемещается достаточно быстро, то из-за инертности зрения этот ряд двумерных изображений воспринимается зрителем как одновременно существующие. Если серия двумерных изображений

включает вид объекта, снятого с разных точек зрения, и эти ракурсы согласовываются с движением вращающейся или перемещающейся поверхности, то это создает эффект трехмерного объекта, который могут с разных точек зрения просмотреть один или несколько зрителей. Движущаяся поверхность в таких устройствах может диффундировать, отражать или преломлять свет проецируемого изображения. Поверхность может быть выполнена в форме диска, прямоугольника, спирали, клина, пирамиды и т.д. Чтобы защитить зрителя от контакта с быстро движущейся поверхностью, вращающаяся или перемещающаяся поверхность, как правило, закрыты внешним прозрачным кожухом. Это может создавать дополнительные проблемы при сохранении изображения в фокусе.

Существует также метод, который включает элементы, расположенные на перемещающейся поверхности. В этом случае подвод информации к элементам достаточно сложен, а светоизлучающие элементы при высоких скоростях перемещения подвержены влиянию значительных сил инерции.

Ограничениями такой технологии является:

- изображение «призрачное», без непрозрачности или окклюзии объектов;
- трудно создавать большие дисплеи из-за массы и инерции быстро вращающихся объектов;
- имеются проблемы механического износа и шума вращающихся подшипников и других движущихся частей привода таких дисплеев;

- для дисплеев, в которых угол между экраном и проекционным лучом временами становится слишком малым для создания качественного изображения;

- для дисплеев, проекционный экран которых размещен в защитном кожухе, физически изолированном от рук зрителя, имеются ограничения для сенсорного взаимодействия.

Статичные проекционные плоскости. Это способ формирования изображения с отсутствием макроскопического механического движения в устройстве.

Группу статичных дисплеев в свою очередь можно разделить на следующие классы:

- 1) линзовые, с переменным фокусом, и/или зеркальные, с переменным углом наклона массивы [10];
- 2) использующие неподвижные параллакс-барьеры [9];
- 3) с элементами отображения типа «суб-пиксель», имеющие несколько фиксированных угловых направлений демонстрации;

- 4) с объективами типа «глаз мухи» или так называемые «Pin-Hole» – массивы, дисплеи на основе перезаписываемых голографических носителей [17];

- 5) с неподвижной многослойной, переключаемой структурой экранов, воспроизводящих изображения.

Их можно также классифицировать по критерию характера представления исходной трехмерной сцены в визуальном образе, предъявляемом наблюдателю, т.е. исходно подготовленное изображение на входе устройства.

Целесообразно разделить их на два способа:

- 1) на входе которого формируется сцена, образ или объект, т.е. исходное световое распределение, свойственное разрешимым точкам реальных объектов;

- 2) с дифракционным представлением объекта, образа или сцены.

Например, спектрально-угловое представление, или Френелевская дифракция, когда предъявляется дифракционное световое распределение, существующее в некоторой плоскости пространства, расположенной на некотором расстоянии от объектов сцены [25].

Известные частные методики «падают» под описанные выше общие группы классов. Произвольный известный метод формирования объемного изображения, например, в дисплеях, может сочетать комбинацию несколько методов, и каждое из предложенных решений можно отнести к одному единственному из базовых подклассов [3].

Резюмируя характеристики описанных дисплеев, можно сделать вывод, что в связи с необходимостью обработки и передачи большого объема информации требуется уменьшать цветность и разрешающую способность выходного изображения, либо угол обзора; или использовать узкоспециализированное дорогостоящее оборудование, сложное и невыгодное для воспроизведения в условиях серийного производства.

Предлагаемые собственные технические решения. Объектом исследования в статье является трехмерное изображение, формируемое объемными дисплеями из определенного модельного ряда. Исходя из потребностей пользователей, определенных статистическими методами, далее рассматриваются следующие авторские технические решения.

Первый тип дисплея представляет насадку на корпус карманного смартфона или планшета (рис. 1). На экране устройства воспроизведения формируется исходное изображение, разделенное на n -количество сцен, повторяющее расслоение перспективы кадра на n -количество слоев. Каждая из сцен, преломляясь на проекционных гранях, изготовленных из прозрачного материала, расположенного под 45 градусов относительно источника изображения, переносится в вертикальную плоскость для удобного

просмотра пользователю на уровне глаз, при условии, что источник изображения находится в горизонтальной плоскости. Полученное изображение на каждом слое является мнимым и создает «мнимый эффект объема» из-за «висящего» в воздухе изображения.

Главным преимуществом дисплея первого типа является его мобильность и универсальность в использовании, а также метод, применяемый для воссоздания изображения, обеспечивает больший эффект объема, который достигается окклюзией изображений, находящихся разнесенными в пространстве друг от друга. Таким образом, реальная перспектива сцен обеспечивается многослойностью экрана.



Рисунок 1 – Дисплей первого типа

Несмотря на то, что при использовании такого способа создания объемного изображения возможно наблюдать сцену в перспективе, не имеется возможность просматривать ее с разных ракурсов, что является главным недостатком устройства.

Второй тип дисплея является насадкой для экрана монитора (рис. 2). Покрытие устройства представляет массив плосковыпуклых линз (лентикулярный растр) с шагом от 10 до 40 линз на дюйм. Верхние и боковые крепления фиксируют покрытие на экране персонального компьютера или телевизора. Во избежание наблюдения дисперсии, возникающей в результате разложения света при прохождении через линзы, на заднюю поверхность лентикулярного растра наложена пленка обратной проекции. Транслирующийся видеоролик является набором кадров с чересстрочной разверткой. Каждый кадр представляет набор от 2 до 11 ракурсов объемной сцены или объекта, в зависимости от разрешения пикселяции экрана, а также количества линз на дюйм у выбранного лентикулярного растра [22].



Рисунок 2 – Дисплей второго типа

Достоинством технического решения, реализуемого в дисплее второго типа, подразумевает использование динамического изображения (видеоряда) для рекламных целей, а также средства телекоммуникации, что позволяет многократно использовать рекламные стенды без их замены.

Существенным недостатком технического решения является недостаточная плотность пикселей на дюйм у современных дисплеев. Качество выходного объемного изображения изменяется в зависимости от количества линз на дюйм, ракурсов (шаг), пикселей на одно изображение. Настоящий дисплей имеет плотность пикселей на дюйм до 240, в отличие от «среднестатистического» принтера с плотностью 1200 пикселей на дюйм.



Рисунок 3 – Дисплей третьего типа

Следующий вариант технического решения (рис. 3) включает: плоский дисплей, на котором формируется исходное изображение. Базовый кадр, который разбит на 4 ракурса: передний, задний вид, вид справа и слева. Изображение на экране подготовлены компьютерной обработкой: исходный трехмерный объект, разбитый на 4 вида, каждый из которых в свою очередь «разбивается» на 10 кадров с шагом в 9 градусов. Подготовленные кадры совмещаются в одно изображение методом чересстрочной развертки. На поверхности источника света находится параллаксный барьер, представляющий линтикулярную поверхность с шагом в 20 линз на дюйм, также разделенные на 4 равные трапеции, покрывающие 4 вида подготовленного изображения. При изменении наклона зрения пользователя в фокус линзы попадают определенные полосы одного из изображений, увеличивая его, закрывая остальные. В результате пользователь видит сменяющие друг друга кадры. Линтикулярная поверхность, находящаяся на источнике света, добавляет эффект дисперсии, существенно ухудшая качество изображения. Для фильтрации части видимого излучения между этими поверхностями располагается полупрозрачный экран, представленный слоем пленки обратной проекции. Полученные изображения переносятся в горизонтальную плоскость и сводятся в одну точку, отражаясь от зеркальной поверхности [9–10], представляющей усеченную к вершине пирамиду из оргстекла, расположенную под углом в 45 градусов к источнику света. В результате формируется мнимое изображение, расположенное перпендикулярно к плоскости экрана, которое регулируется передвижением базового образа на экране монитора для получения отображения 3D на уровне человеческого взгляда. Часть экрана, которая не задействована в формировании трёхмерного образа, находится в середине и образует квадрат 50 x 50 мм из-за усечения отражающей пирамиды. Это пространство проецирует изображение рабочего ролика, позиционируя сцену в изометрии. «Поверх» этого пространства располагается линза Френеля с 4,57 кратностью увеличения. Так как верхняя крышка дисплея является прозрачным листом оргстекла, то она может использоваться в качестве экрана для управления. На внутренней части верхней крышки располагается пленка рир-проекции, служащая экраном для формирования образа в изометрии, параметров проецируемого образа, а также команд для управления роликом.

Существенный недостаток конструкции – переход от одного вида к другому, смежные грани ухудшают качество восприятия объемного изображения. «Дробление» пирамиды на большее количество граней значительно уменьшает область проецирования видимого объекта.

Четвертый тип дисплея (рис. 4) включает следующие элементы: вокруг оси устройства со скоростью 1200–1500 об./мин. вращается непрозрачный барабан со сквозными отверстиями, закрытыми прозрачным материалом. Внутри барабана установлен просветная линтикулярная плоскость, на которой выводится изображение. На лицевой стороне устройства расположена прозрачная мультиэкранная панель, представляющая часть прямой многогранной призмы, которая покрыта пленкой рир-проекции, на которую выводится первичное изображение. Изображение формируется на всех гранях мультиэкранной панели с использованием массива проекторов, световые пучки, которые сфокусированы на слое пленки рир-проекции. С использованием двух модулей оптической системы образованный пучок света пересекает ось устройства и достигает зеркальной поверхности, состоящей из плоских поверхностей зеркал. Отразившись от зеркального многогранника, световой пучок достигает экрана, на котором в результате формируется итоговое изображение.

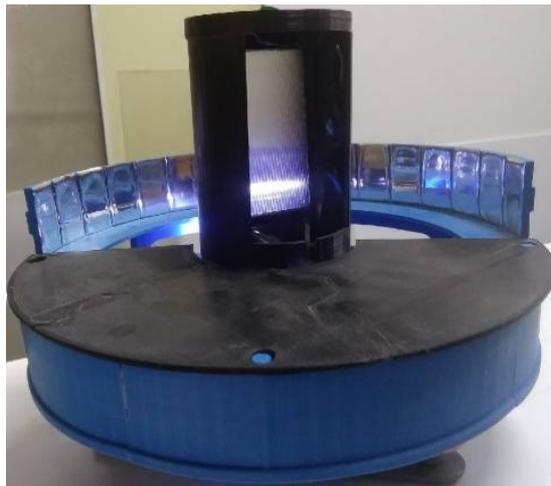


Рисунок 4 – Дисплей четвертого типа

Пятый тип дисплея (рис. 5) состоит из следующего: источник света экран монитора, проецирующий исходный кадр; двенадцать трапецеидальных зеркал, образующих зеркальный многогранник для переноса изображения в вертикальную плоскость; ожерелье линз, увеличивающих и фокусирующих изображение в центре азимутальной сходимости; выходная диафрагма, отсекающая оставшиеся боковые кадры и излишний засвет от источника изображения и отражающих элементов системы; увеличивающая линза Френеля выходного каскада, создающая мнимое изображение и являющаяся выходной проекционной плоскостью системы.



Рисунок 5 – Дисплей пятого типа

Шестой тип включает дисплеи, находящиеся в разработке:

а – дисплей 5-го типа с заменой ожерелья из линз на оптическую систему из матрицы линз;

б – дисплей типа ба с заменой формы выходного экрана на сферическую, но меньшим углом обзора;

в – комбинированное решение, совмещающее третий тип дисплея без лентулярного растра, а также три дисплея пятого типа.

В отличие от рассмотренных при анализе аналогов, предлагаемые средства формирования и передачи изображения соответствуют пропускной способности стандартных сетей общего пользования. Таким образом, создание метода и устройства, способного уменьшить поток данных, требуемых для формирования объемного изображения с заданным качеством, является актуальной задачей построения объемных дисплеев.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи для достижения цели, связанной с получением на выходе устройства, способного отображать объемное изображение без специальных средств для просмотра (автостереоскопический дисплей) дисплея, изображения заданного качества.

1. Системный анализ формирования объемных изображений с использованием стереоскопических и автостереоскопических дисплеев [2, 14, 21].

2. Формализация процесса визуализации объемных образов для описания работы системы.
3. Определение основных характеристик объекта для получения объемного изображения требуемого качества.
4. Выявление факторов, влияющих на выходное качество объемного изображения, на основе исследования процесса формирования изображения.
5. Определение оптимальных значений параметров и вариантов технической реализации устройства.
6. Разработка метода, обеспечивающего передачу и воспроизведение изображения в режиме реального времени через широкополосную линию передачи информации интернета.

Решение задач. В настоящей статье рассматривается решение первых четырех задач.

Опишем функционирование автостереоскопического дисплея на основе структуры технической системы, воспроизводящей объемное изображение на основе входных параметров. Определим критерии входных переменных, влияющих на восприятие объема человеком, а также на формирование итогового объемного изображения. Проведем анализ объекта исследования формализацией на основе функционального моделирования стандарта IDEF0 в виде схемы, представленной на рисунке 6.



Рисунок 6 – Формализация объемного изображения с помощью диаграммы в нотации IDEF0

Обозначим входную переменную, определяющую восприятие глубины ИЗОБРАЖЕНИЯ пользователем символом I , т.е. это фактор, влияющий на восприятие трехмерного изображения человеком. В свою очередь восприятие определяется несколькими признаками, совокупность которых позволяет в некоторой степени формировать виртуальное объемное изображение.

Эти признаки можно разделить на монокулярные, когда объекты, попадающие в поле зрения, воспринимаются только одним из глаз:

x_1 – относительные размеры объектов (рис. 7а) – параметр изменяется в зависимости от расположения наблюдателя относительно объекта наблюдения. Чем ближе наблюдатель находится к объекту, тем больше ему представляется размер объекта [5];

x_2 – градиент текстуры – также зависит от расстояния между объектом и наблюдателем. Детализация изображения, четкость его текстуры ухудшается с увеличением расстояния от изображения до наблюдателя [7];

x_3 – взаимное расположение (рис. 7б) – так называемый эффект окклюзии изображения, когда объект, расположенный ближе, частично перекрывает или затеняет на изображении объект, расположенный дальше;

x_4 – линейная перспектива (рис. 7в) – одна из разновидностей перспективы, для наблюдения которой необходимо сохранять неподвижную точку зрения, что позволяет наблюдать единую точку схода на линии горизонта, т.е. предметы уменьшаются пропорционально по мере удаления их от переднего плана на изображении, даже параллельные линии изображены сходящимися к концам ближе к горизонту [11];

x_5 – атмосферная перспектива или воздушная (рис. 7а), определяется потерей четкости изображения, его очертаний, т.е. увеличением значения дефокусировки при отображении объектов заднего плана. Также значение атмосферной перспективы характеризуется изменением насыщенности, его уменьшением так, что удаленные объекты кажутся более светлыми, чем передний план [4];

x_6 – параллакс движения (рис. 7г) – общее название признаков восприятия относительного движения, которое характеризует зависимость смещения зрительного анализатора наблюдателя (перемещение всего тела вместе с головой или отдельный поворот головы) относительно систематических движений в зрительной области. При этом проекция на сетчатку глаз тех объектов, которые расположены ближе к наблюдателю, смещается быстрее, чем проекция объектов, находящихся дальше [15].

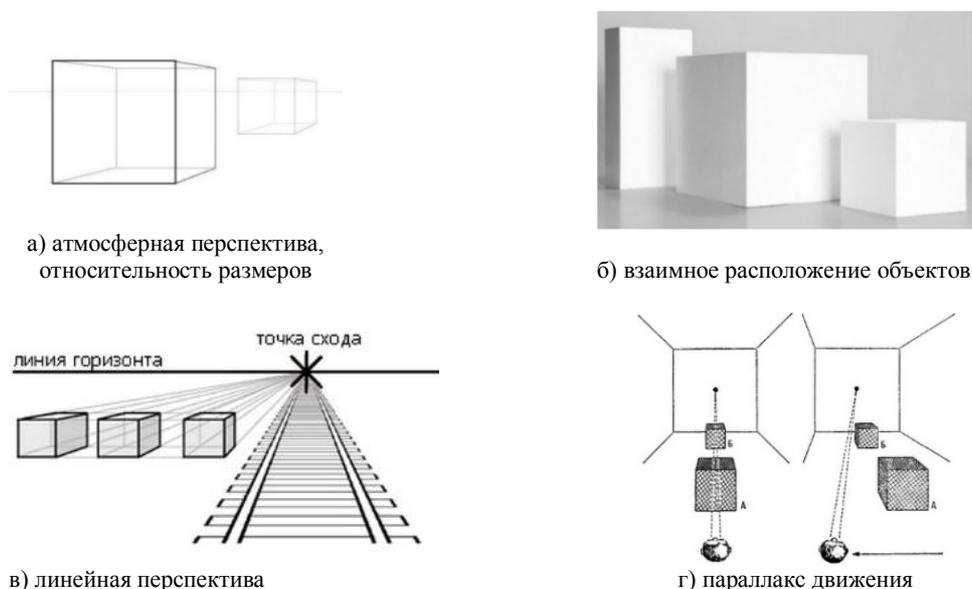


Рисунок 7 – Некоторые из монокулярных признаков восприятия объема

Бинокулярные признаки:

x_7 – бинокулярная конвергенция описывает напряжение мышц глаза, ответственных за кривизну хрусталика, а также форму глазного яблока и угол схождения зрительных осей глаза. Этот параметр характеризует восприятие приближающихся предметов. Сдвигаясь к центру – носу, мышцы глаз испытывают повышенное напряжение, а при восприятии отдаленных предметов, раздвигаясь от центра (носа), глаза расслабляются [16];

x_8 – нормальная бинокулярная диспаратность определяет величину отклонения двух точечных источников света, проецируемых только на одну из сетчаток глаз, от положения корреспондирующих точек. Значение отклонения положительно, так как расстояние между источниками света несколько больше, нежели между корреспондирующими точками. Изменение диспаратности прослеживается при восприятии разного расстояния до предметов. Например, для близких объектов значение диспаратности является значительным, между тем что видит левый и правый глаз, а для отдаленных предметов диспаратность будет незначительна. Также возможна отрицательная бинокулярная диспаратность, которая проявляется при замене нормальных проекционных точек наблюдаемого объекта на их зеркальную копию (например, при помощи псевдоскопа). Таким образом, вместо реального объекта воспринимается иллюзия его обратной перспективы, которая «заставляет» наблюдателя видеть нарушение относительного взаимного расположения объектов или может являться причиной восприятия обратного рельефа объектов (вогнутое воспринимает выпуклым и наоборот) [12].

Качество получаемого на выходе объемного изображения Y существенно зависит от способа и степени технической реализуемости этих признаков. Основными критериями, влияющими на качество при выводе графической информации, являются следующие: разрешение, цветопередача, скорость передачи информации, частота и угол обзора. В нашей системе эти критерии обозначаются как Z и являются входными сигналами (рис. 6).

На сегодняшний день технические средства не позволяют воссоздать полностью идентичный реальному виртуальный объект в виде его изображения. Этот фактор накладывает определенные ограничения u_1 на входные переменные системы – Z , которые вследствие этого влияют на качество выходного изображения y . Также на формирование объемного изображения влияют физиологические особенности и психологические факторы отдельного человека u_2 . Поэтому дополнительным аспектом, который необходимо учитывать при разработке метода формирования трехмерного изображения, является необходимость его апробации на статистических группах пользователей.

Для этого необходимо описать систему с технической точки зрения. Рассмотрим структуру реализации устройств воспроизведения модельного ряда, который условно назовем «Интердисп». С точки зрения реализации процесса цель исследования можно формализовать в виде функционального моделирования стандарта IDEF0 (рис. 8).



Рисунок 8 – Функциональное моделирование процесса создания объемного изображения (0 уровень)

Внешнее воздействие определяется следующими характеристиками.

1. Технические ограничения источника света – это характеристика, существенно влияющая на выходное изображение. От нее непосредственно зависит выходное разрешение и размер изображения, возможный угол обзора, яркость, цветность и скорость передачи информации.

2. Алгоритм работы программного обеспечения (ПО). Определяет работу устройства воспроизведения и зависит от целей, которые преследует пользователь. Так как программное обеспечение включает способ приема и передачи информации, а также процесс создания мультимедийных роликов для дисплея, то алгоритм является уникальным для каждой модели из ряда устройств.

3. Техническое задание. Это воздействие является основополагающим и включает аспекты, связанные с установлением значений показателей, границ, возможных диапазонов изменений, т.е. требуемых значений характеристик качества дисплея.

4. Пожелания (требования) пользователя. Этот тип «воздействия» включает аспекты, связанные с внешним видом устройства, а также его функционалом, т.е. возможные дополнения или модернизация дисплея определенного типа. Таким образом, это «воздействие» является характеристикой, аналогичной рассматриваемой в пункте 3. Однако оно не влияет на выбор технического решения, а оказывает влияние на процесс его реализации.

5. Экспериментальные данные. Для адаптации процесса реализации технического задания необходимо разработать ряд математических моделей для вычисления значений параметров системы (расстояния, коэффициентов преломления, толщины оптических элементов и т.д.). Процесс реализации устройства воспроизведения объемного изображения непосредственно зависит от результатов предварительного моделирования и натурных экспериментов.

Инструментальные средства, которые требуются для реализации процесса воспроизведения изображения, следующие.

1. Персональный компьютер. Устройство может представлять смартфон, ноутбук, стационарный персональный компьютер.

Основными характеристиками и параметрами при выборе инструмента являются: быстродействие системы, возможность подключения к высокоскоростной сети, интерфейс портов (возможность подключения VGA, HDMI, TSR, USB).

2. Источник света. Выбор источника света зависит от реализуемого технического решения. Например, это могут быть: экран смартфона, жидкокристаллического телевизора или проектор. Выбор делается на основе параметров: мобильности, разрешения, диагонального размера экрана, цветности, яркости и т.д.

3. Оптическая система. При выборе технического решения и на основе экспериментальных данных формируется состав оптической системы. Например, наклонные проекционные плоскости, линтикулярный растр или более сложная составная конфигурацию. Этот инструмент позволяет изменять характеристики изображения, которое поступает с источника света и преобразовывает его в объемное изображение [20].

4. Программное обеспечение. Позволяет осуществлять управление выходным изображением объемных объектов, его характеристиками, а также обеспечивать телекоммуникативную связь.



Рисунок 9 – Этапы процесса объемной визуализации

5. Пользователь. Подразумевается управляющее воздействие системой, обусловленное индивидуальными особенностями восприятия объема человеком. В зависимости от «способности наблюдать объем» человек может программным или аппаратным способом изменять характеристики устройства воспроизведения, изменяя качество выходного изображения.

Произведем деление задачи формирования объемных изображений. Процесс можно разделить на несколько этапов (рис. 9). Вначале необходимо сформировать первичные изображения, поступающие на вход устройства, из которых затем формируется выходное – объемное изображение. В зависимости от метода формирования объемного изображения и, как следствие, выбранного устройства, будут изменяться качественные и количественные характеристики первичных изображений. Это непосредственно влияет и на конечный результат восприятия наблюдателем объема объекта.

С технической точки зрения этот процесс можно разбить на следующие составляющие: компьютерная обработка изображения [6, 8]; оптическая обработка изображения (рис. 10). Как описано ранее, на вход системы по созданию объемного изображения подается файл, содержащий объемный образ или сцену. Первичной обработкой исходных данных является компьютерная, аппаратная. Рассмотрим рисунок 10, который является декомпозицией рисунка 8.

В этом блоке формируется плоское изображение с набором стереопар или послойное изображение сцены. Выходной результат достигается на основе работы специализированного программного обеспечения по формированию опорных кадров для одного или нескольких устройств. Причем ПО строго соответствует техническому заданию, которое установлено заказчиком и вводит ряд ограничений при изготовлении. Также в число ограничений, требующих учета, входят конкретные технические характеристики источника света и экспериментальные данные, полученные на стендовом образце, обеспечивающем сходимость световых лучей, испускаемых из условных точек на источнике света в аналогичные точки объемного изображения. Пользователь управляет ПО и устанавливает характеристики, регулируя параметры изображения или источника света, на основе собственных предпочтений. Для описания способа передачи исходных данных на текущем этапе декомпозиции необходимо ввести инструмент – канал связи (интернет, проводной кабель, твердотельный носитель, беспроводной канал связи), поэтому на схеме туннель изображен около свободного конца. Выходные данные, полученные при работе ПО и блока «компьютерная обработка», могут представляться в виде двумерных изображений, синхронизированных по времени для вывода на один или несколько источников света. По составу они могут включать как набор ракурсов трехмерного объекта, так и послойный набор сцен трехмерной сцены, полученные из исходных данных. Качество определяется выбранным техническим решением, которое в свою очередь зависит от ТЗ и пожеланий пользователя.

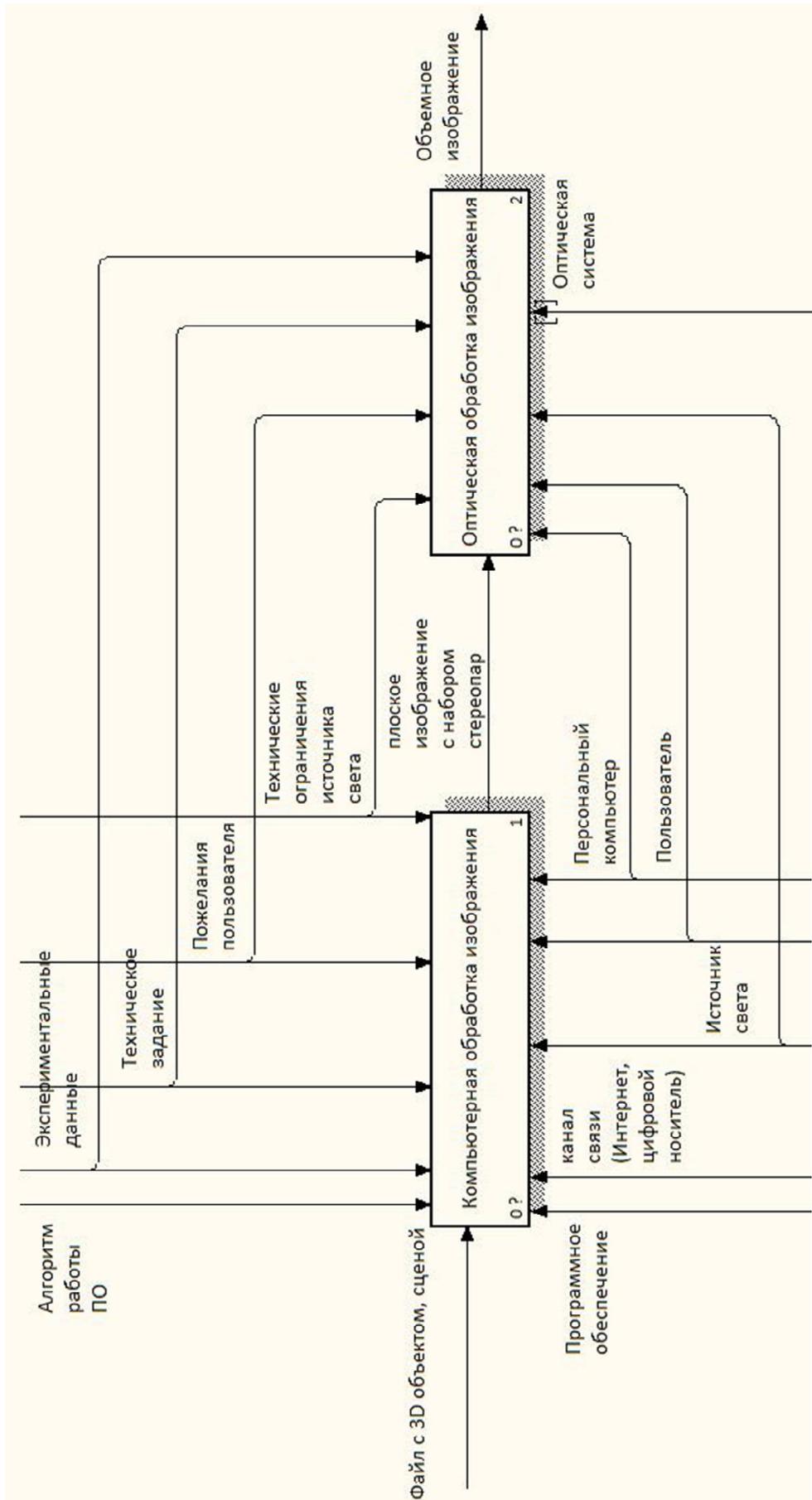


Рисунок 10 – Функциональное моделирование процесса преобразования изображения (1-й уровень)

Эта информация поступает на вход блока «Оптическая обработка изображения», результатом которого является формирование объемного изображения, наблюдаемого пользователем. На этот блок действуют ограничения, которые описаны для предшествующего блока системы. К инструментам добавляется оптическая система, представляющая набор оптических компонентов, варьируемых в зависимости от выбранного технического решения. Так как оптическая система состоит из ряда компонентов, а также в ряде технических решений имеет различные комплектации, поэтому стрелка на схеме имеет туннель у входа в блок. Более подробное описание рассмотрим при детальном анализе блока.

Аналогичное представление следует осуществить и с последующими этапами процесса формирования объемного изображения. В результате анализа выделены следующие основные стадии преобразования изображений из «исходных» в конечное, объемное. Такое преобразование происходит в волюметрических дисплеях (рис. 11), где изображение представляется в виде вокселей, реально разнесенных в пространстве.

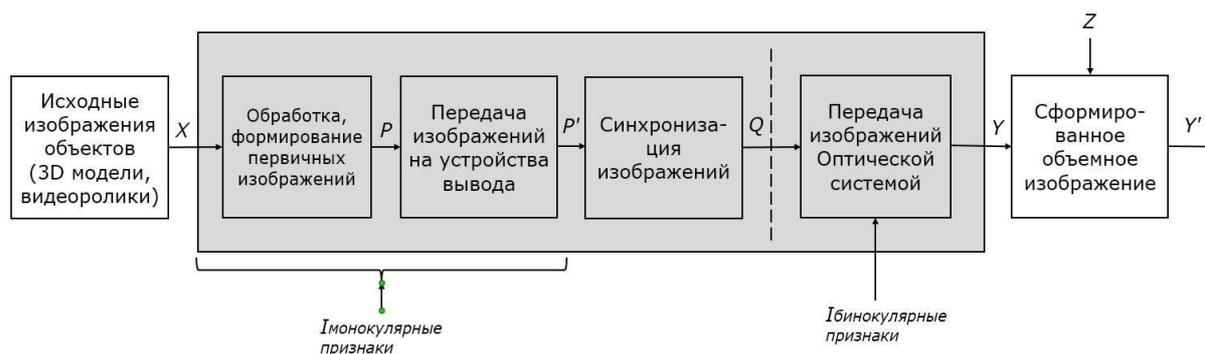


Рисунок 11 – Обобщенная последовательность преобразований в волюметрических дисплеях

Рассмотрим более подробно этапы формирования изображения. Исходные изображения обозначены как «X». К исходным относятся трехмерные модели объектов или сцен, а также их видеоряд, причем они достаточны для воспроизведения на их основе объемных изображений. Эти данные подаются на блок обработки и формирования первичных изображений P . На этой стадии производится создание кластера двумерных изображений объекта, т.е. первичных изображений, из которых далее формируется объемный образ. К кластеру P относятся двумерные изображения объекта, которые используются для создания анимированной визуализации при помощи следующего: соответствующей съемки трехмерного объекта или сцены с различных ракурсов; специально подготовленного набора стереопар; разложения объектов сцены на нескольких различных слоях; представления вышеописанной информации в формате видеоматериалов.

С использованием устройства вывода (персональный компьютер) из переданных первичных изображений P получается составное изображение P' , либо объединенное изображение, подаваемое на единственный экран, либо набор изображений, подаваемых на множество устройств воспроизведения. Также для корректного объединения составных частей изображений необходимо синхронизировать их демонстрацию во времени. В результате получается синхронизованное в пространстве и времени изображение Q , которое передается на вход оптической системы для создания окончательного объемного изображения Y . Последнее воспринимается пользователем с учетом его психофизиологических особенностей организма Z в виде изображения Y' .

Представим эти процессы в формализованном виде (рис. 12).

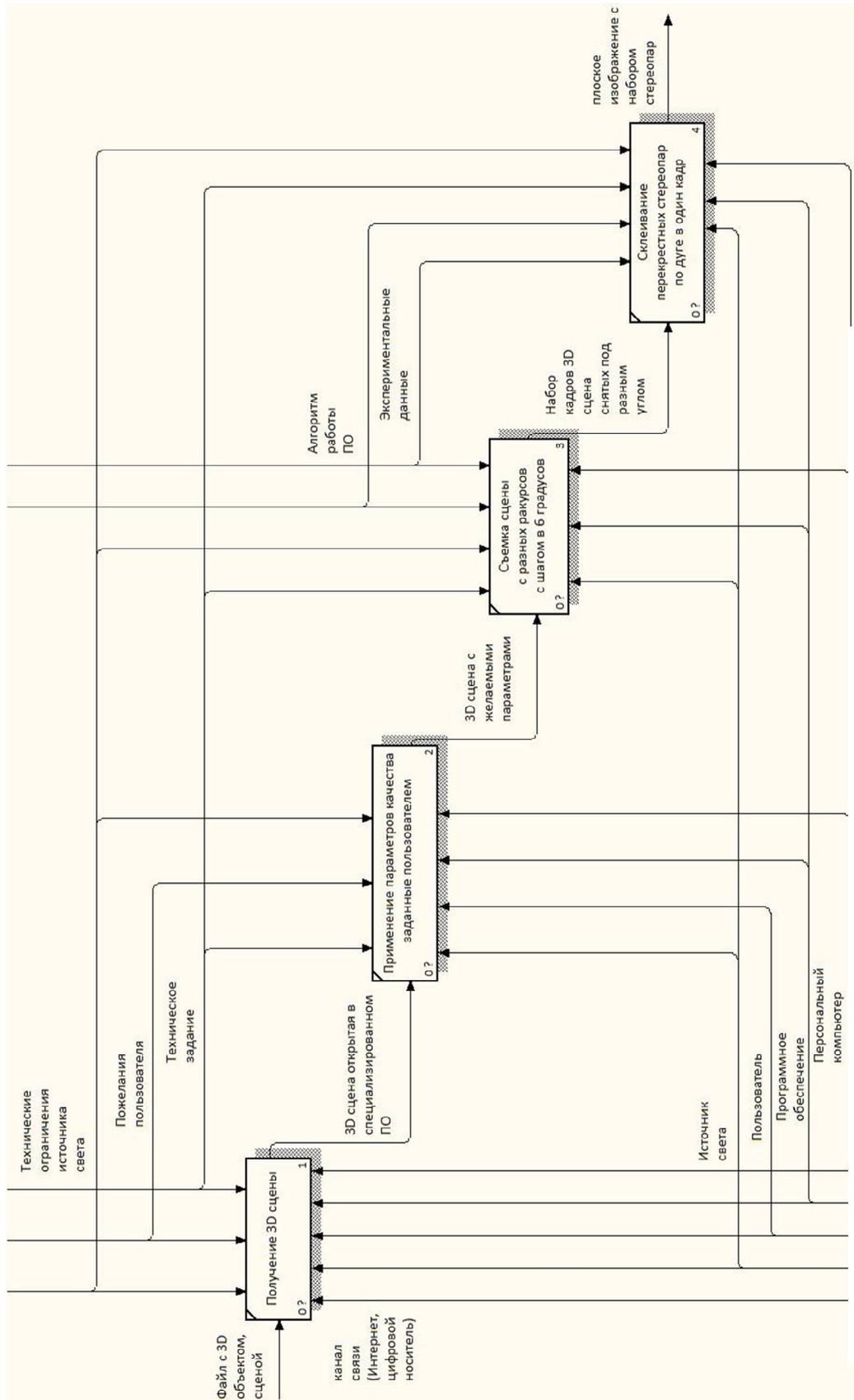


Рисунок 12 – Функциональное моделирование процесса компьютерной обработки изображения (2 уровень)

Рассмотрим блоки функционального моделирования компьютерной обработки изображения на рисунке 12 последовательно.

1. Пользователь получает исходные данные через выбранный канал связи. Большинство дисплеев из предлагаемого модельного ряда работают с интернетом. Также возможно проводное подключение твердотельных носителей информации. Получаемая информация трехмерного объекта или сцены поступает на персональный компьютер пользователя и выводится на экран (источник света), как промежуточный этап – если это требуется (в иных случаях программное обеспечение опускает этот процесс). Результатом выполнения будет подготовленный файл, открытый в специализированном ПО для дальнейшей обработки.

2. Пользователю необходимо определить параметры желаемого качества объемного изображения. Большинство специализированных параметров (линейная перспектива, атмосферная перспектива, параллакс движения, бинокулярная конвергенция, нормальная бинокулярная диспаратность) устанавливаются ПО или в исходных данных сцены. Пользователю предоставляется возможность изменить относительные размеры объекта или сцены, градиент текстуры, а также яркость, контрастность, цветность и разрешение изображения. Результатом выполнения функции является 3D-сцена с реализованными пользовательскими параметрами.

3. После сбора необходимой информации алгоритм программного обеспечения приводится в действие и начинается преобразование объемного объекта или сцены в двумерные изображения. В случае дисплеев 4, 5 и 6 типа используется съемка объекта с множества ракурсов, обычно этот угол равен 5° – 6° , что соответствует стереоскопическому углу зрения человека. Для дисплеев 3-го типа используется значительно больший угол, а для четкости изображения на дисплеях 2-го типа этот угол, наоборот, уменьшается. Алгоритм ПО для дисплеев 1-го типа выделяет объекты, удаленные друг от друга в сцене, и располагает их на разных слоях (изображениях). В результате работы блока на выходе получается набор подготовленных ракурсов или слоев в двумерном формате представления изображения.

4. «Склеивание» изображений в единый файл для передачи в блок оптической обработки с помощью источника света. Для дисплея 6в такая задача усложняется необходимостью синхронизации трех источников света с разным набором двумерных изображений.

Создание объемного изображения предусматривает оптическую обработку изображения. Рассмотрим этот процесс на примере функционального моделирования оптической обработки устройства, оснащенного максимальной комплектацией на базе дисплея 5-го типа (рис. 13). На этом примере поясним общий принцип построения объемного изображения с частными отклонениями для всех типов дисплеев. Набор плоских изображений требуется совместить в видимой области и создать эффект объема с использованием оптических компонентов.

Для обеспечения этого процесса в качестве инструментов используются элементы, аналогичные предыдущему процессу, причем основным является использование дополнительно оптической системы. При построении оптической системы используются экспериментальные данные на основе пожеланий пользователя и технического задания (ТЗ), которые являются управляющим воздействием при построении оптической системы.

Также для наглядности приведем схему рабочей компоновки оптической системы дисплея 5-го типа в изометрии, на примере которого рассмотрим полный процесс оптической обработки, части которого являются общими для остальных дисплеев модельного ряда с частными отклонениями (рис. 14).

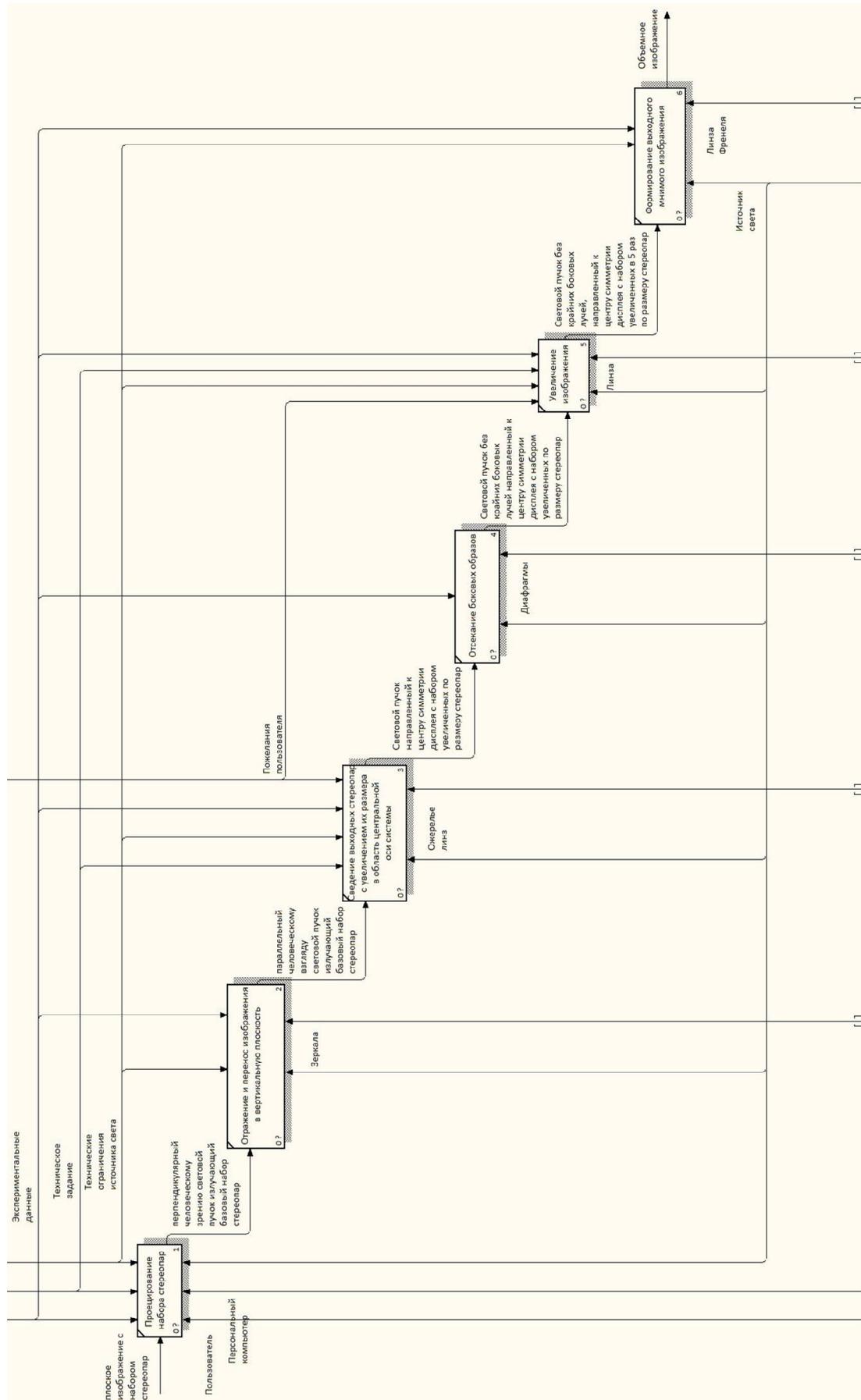


Рисунок 13 – Функциональное моделирование процесса оптической обработки изображения (2 уровень)

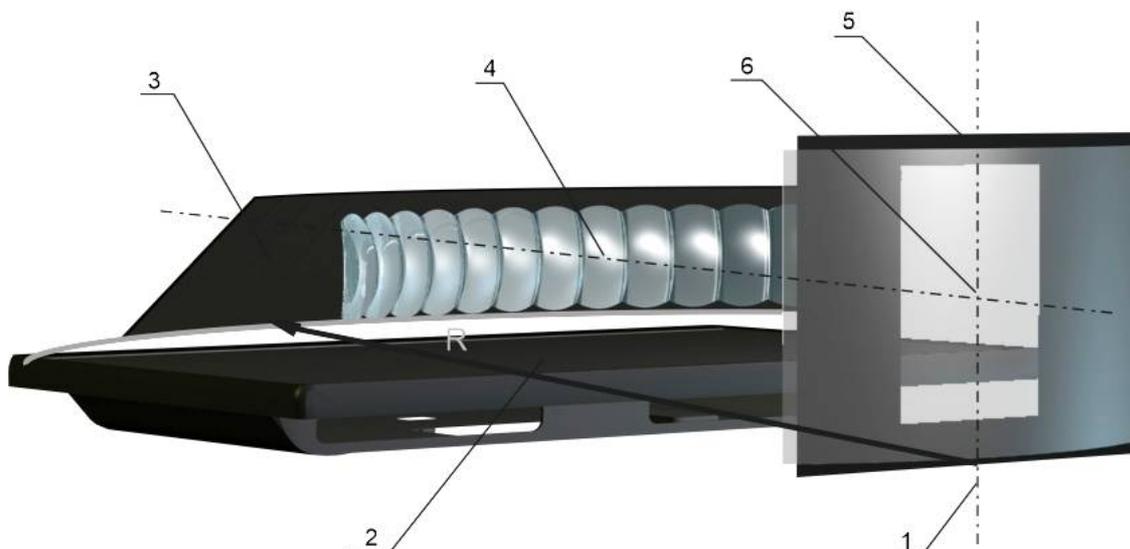


Рисунок 14 – Схема рабочей компоновки оптической системы дисплея 5-го типа (изометрия)

Рассмотрим блоки функционального моделирования оптической обработки изображения последовательно.

1. Воспроизведение подготовленных плоских изображений через источник света (поз. 2, рис. 14), управление и включение которого обеспечивает пользователь с использованием персонального компьютера. Изображение проецируется перпендикулярно выходному экрану, на котором формируется итоговое объемное изображение в большинстве дисплеев модельного ряда. Для дисплеев 2-го и 6б типов необходим такой источник света, чтобы создаваемый пучок света направлялся к выходному экрану (поз. 6, рис. 14).

2. Отражение и перенос изображения. Из-за конструктивных особенностей устройств предусмотрен промежуточный блок в процессе построения изображения, а именно перенос изображений в плоскость, параллельную выходному экрану для дисплеев 1,3 и 6б типов посредством проецирующей грани из органического стекла. Для дисплеев 4, 5, 6а типов – с использованием поверхностей с отражающими свойствами (зеркал) (3, рис. 14) [1, 22].

3. Совмещение набора стереопар и их увеличение. Для обеспечения процесса сведения отдельно проецируемых плоских изображений к оси симметрии (рис. 14, поз. 6), в которой наблюдается совмещенное и целостное изображение, а также увеличение линейных размеров для дисплеев старшего поколения (5-го типа и выше). Для этого необходимо использовать экспериментальные данные, полученные на основе компьютерного моделирования. При построении устройства учитываются расстояния между оптическими объектами, их углы наклона, а также оптические параметры системы, которые влияют на качество выходного изображения для достижения заданных значений характеристик. Например, для дисплеев 1-го типа необходимо расположить строго друг за другом слои проецирующих плоскостей так, чтобы конец одной плоскости являлся началом второй. Дисплеи 2-го типа используют преломляющую поверхность по принципу дифракционной решетки (линзовый растр), которую необходимо подбирать в соответствии с разрешением изображения на экране (выраженных в единицах «пиксель на дюйм» – PPI), а также линзу на дюйм (LPI). Дисплеи 3-го типа используют принцип дисплеев 1-го типа. Однако взаимное расположение граней для них в совокупности представляют геометрическую фигуру в пространстве, в основе которой используется многогранник. Дисплеи 4-го типа используют аналогичный принцип с дисплеем 3-го типа, однако в качестве оптического элемента используются отражающие поверхности (зеркала), установленные на большем расстоянии друг от друга. Дисплеи 5-го типа в качестве инструмента используют совокупность отражающих поверхностей (зеркал) подобно дисплею 4-го типа, а также преломляющие свет элементы (линзы) с аналогичной схемой построения, но меньшим радиусом вписанной окружности (рис. 5, поз. 4). Дисплеи 6-го типа являются модернизацией дисплеев 5-го типа, причем 6а использует дополнительно 3 ряда преломляющих элементов, 6б исключает использование отражающих элементов, а 6в является аналогом 5, но с добавлением проекционных граней дисплея 3-го типа.

4. Для дисплеев последнего поколения (5-го и выше типов) имеется промежуточный блок, обеспечивающий исправление в конечном объемном изображении, которое позволяет обрезать выходное изображение по краям для предотвращения дублирования смежных кадров или их наслаивания на исход-

ное. В качестве инструмента в этом блоке используется диафрагма (рис. 14, поз. 5) для дисплеев всех типов старшего поколения, однако с разными параметрами отверстий, которые получены в экспериментах.

5. В ряде случаев, если техническое задание или пожелание пользователя предусматривает варьирование увеличения линейных размеров выходного объемного изображения свыше 3-кратного, то в системы вводится промежуточный блок. Он использует в качестве инструмента для увеличения преломляющий элемент (сферическую линзу) большого диаметра в соответствии с параметрами, полученными из экспериментальных данных.

6. Формирование объемного изображения. Для устройств младше 4-го поколения этот процесс обеспечен предыдущими блоками. Дисплей 4-го поколения использует колебания полупрозрачной проекционной плоскости, дисплеи 5 и 6а поколений используют линзу Френеля (рис. 14, поз. 6) в качестве устройства проекции, 6б – сферическое стекло, 6в – проекционные грани пирамиды.

Заключение. Таким образом, в статье рассмотрен объект исследования: трехмерное изображение, формируемое объемными дисплеями из определенного модельного ряда. Предложен модельный ряд, который включает разработанные конструкции объемного дисплея, условно разделяемые на 5 типов, также еще 3 варианта, находящиеся на стадии разработки.

Выполнен системный анализ формирования объемных изображений с использованием стереоскопических и автостереоскопических дисплеев на основе материалов статей [2, 14, 21]; формализация процесса визуализации объемной графической информации для описания работы системы; определение основных характеристик объекта для получения объемного изображения требуемого качества; выявление факторов, влияющих на выходное качество объемного изображения, на основе исследования процесса формирования изображения.

Для этого предложена схема формирования объемного изображения с использованием автостереоскопических дисплеев на основе функционального моделирования с использованием нотаций IDEF0. Показаны основные факторы, влияющие на качество получаемого 3D-изображения. Полученную функциональную модель целесообразно использовать с учетом возможностей статусных функций [5, 26] для решения задачи оптимизации обеспечения выходных объемных изображений заданного качества. Целесообразно выявить множество характеристик двумерных изображений, которые определяют качество выходного объемного изображения для оптимального выбора технического решения из ряда предложенных. При этом необходимо учитывать ряд ограничений, накладываемых определенным техническим решением. От этих ограничений зависит конечное объемное изображение и качество восприятия объема представляемых объектов человеком.

Библиографический список

1. Большаков А. А. Разработка объемного дисплея для решения задач визуализации и диспетчеризации / А. А. Большаков, А. А. Сгибнев, М. А. Железов, А. В. Мельников // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 7. – С. 31–34.
2. Большаков А. А. Системный анализ человеко-машинного взаимодействия на основе статусных функций при формировании объемного изображения в волнометрических дисплеях / А. А. Большаков, И. В. Вешнева, Ю. Н. Грепечук, А. А. Сгибнев, А. В. Ключиков // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2017. – № 40. – С. 102–110.
3. Ежов В. А. Трехмерный дисплей: выбор реализуемых и перспективных технических решений / В. А. Ежов // Киномеханик. – 2006. – № 9–11.
4. Изучение воздушной перспективы в художественной школе / Э. Х. Самигулова, учитель ИЗО // Разделы: МХК и ИЗО. – 11.04.2016.
5. Красильников Н. Н. Коэффициент эффективности зрительной системы человека при произвольных ракурсах наблюдения трехмерных объектов / Н. Н. Красильников, Е. П. Мироненко, О. И. Красильникова // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 10. – С. 63–68.
6. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений / Н. Н. Красильников. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.
7. Медицинские оптические приборы. Физиологическая оптика : учеб. пос. – 3-е изд., испр. и доп. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 135 с.
8. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. – Москва : Физматлит, 2001. – 784 с.
9. Патент US № 4729017 от 25.02.1986 г. МПК H04N 13/00.
10. Патент Евразии № 200601499 08.02.2005. Трёхмерный дисплей, использующий переменную фокусирующую линзу / Сео Чеонг Соо, Гим Донг Вуо, Чо Гиоунг П [и др.].
11. Раушенбах Б. Системы перспективы в изобразительном искусстве / Б. Раушенбах. – Москва : Наука, 1986.
12. Ребер А. Оксфордский толковый словарь по психологии / А. Ребер. – 2002.
13. Сгибнев А. А. Анализ технических решений при разработке объемного дисплея для информационно-коммуникационного взаимодействия в сети интернет / А. А. Сгибнев // Логистика и экономика ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности : Междунар. науч.-практ. конф. (МНПК «ЛЭРЭП-10-2017»), г. Тула, ТГУ – 15–16 ноября 2017 г. – Режим доступа: <http://lerei2017.sstu.ru>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

14. Учаев Д. Ю. Анализ и управление рисками, связанными с информационным обеспечением человеко-машинных АСУ технологическими процессами в реальном времени / Д. Ю. Учаев, Ю. М. Брумштейн, И. М. Ажмухамедов, О. М. Князева, И. А. Дюдиков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2 (34). – С. 82–97.
15. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение / Д. Хьюбел. – Москва : Мир, 1990. – 239 с.
16. Хьюбел Д. Х. Бинокулярная конвергенция – Глаз, мозг, зрение / Д. Х. Хьюбел ; пер. Г. Шараева. – Москва : Мир, 1990.
17. An Automultiscopic Projector Array for Interactive Digital Humans / A. Jones, J. Unger, K. Nagano et al. // SIGGRAPH 2015. – ACM Press, 2015.
18. Barry G. Blundell. Volumetric three-dimensional display systems / G. Blundell Barry, J. Schwarz Adam. – John Wiley & Sons Inc. (NY), 2013. – 330 p.
19. Bolshakov A. System analysis of formation and perception processes of three-dimensional images in volumetric displays / A. Bolshakov, A. Sgibnev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 973. – P. 1–10. DOI:10.1088/1742-6596/973/1/012060 (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012060>).
20. Bolshakov A. A. A Model of the Optical System of the Interdisp Display / A. A. Bolshakov, Yu. N. Grepechuk, A. V. Klyuchikov, A. A. Sgibnev // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE. – 2018. – Art. no. 8542354. – P. 63–70. ISBN: 978-153864332-7. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542354/
21. Bolshakov A. A. Assessment of the effectiveness of decision support in the application of the information system for monitoring the process of forming competences based on status functions / A. A. Bolshakov, I. V. Veshneva // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE. – 2018. – Art. no. 8542462. – P. 75–82. ISBN: 978-153864332-7. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542462/
22. Bolshakov A. A. Development method of forming three-dimensional images for autostereoscopic volumetric displays / A. A. Bolshakov, M. A. Zhelezov, V. V. Lobanov, A. V. Nikonov, A. A. Sgibnev // 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE : Conference Proceedings. – 2014. – Vol. 2, art. no. 6958294. – P. 461–468. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958294. ISBN: 978-590652276-4.
23. Cutting J. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth / J. Cutting, P. M. Vishton // Epstein W. & Rogers S. (eds.) Handbook of perception and cognition. – San Diego, CA : Academic Press, 1995. – Vol. 5. Perception of space and motion. – P. 69–117.
24. Endo (Yendo) T. Cylindrical 3-D Video Display Observable from All Directions / T. Endo (Yendo), Y. Kajiki, T. Honda, M. Sato // Proc. Pacific Graphics. – 2000.
25. Jones A. Rendering for an interactive 360° light field display / A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, P. Debevec // ACM Trans. Graph. – 2007. – № 26 (3). – P. 40.
26. Nagano K. An Autostereoscopic Projector Array Optimized for 3D Facial Display / K. Nagano, A. Jones et al. // SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies. – 2013.

References

1. Bolshakov A. A., Sgibnev A. A., Zhelezov M. A., Melnikov A. V. Razrabotka obemnogo displeya dlya resheniya zadach vizualizatsii i dispatcherizatsii [Development of a volumetric display for solving tasks of visualization and scheduling]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2016, no. 7, pp. 31–34.
2. Bolshakov A. A., Veshneva I. V., Grepechuk Yu. N., Sgibnev A. A., Klyuchikov A. V. Sistemnyy analiz cheloveko-mashinnogo vzaimodeystviya na osnove statusnykh funktsiy pri formirovani obemnogo izobrazheniya v volyumentricheskikh displeyakh [System analysis of human-machine interaction based on status functions in the formation of a volumetric image in volumetric displays]. *Izvestiya SPbGTI(TU)* [Proceedings of the St. Petersburg State Institute of Technology and Technology], 2017, no. 40, pp. 102–110.
3. Yezhov V. A. Trekhmernyy display: vybor realizuemykh i perspektivnykh tekhnicheskikh resheniy [Three-dimensional display: a choice of realizable and promising technical solutions]. *Kinomekhanik* [Kinomechanic], 2006, no. 9–11.
4. Samigulova E. Kh. Izuchenie vozduzhnoy perspektivy v khudozhestvennoy shkole [Studying an aerial perspective in art school]. *Razdely: MKhK i IZO* [Sections: Moscow art academy and fine arts], 11/04/2016.
5. Krasilnikov N. N., Mironenko E. P., Krasilnikova O. I. Koeffitsient effektivnosti zritelnoy sistemy cheloveka pri proizvolnykh rakursakh nablyudeniya trekhmernykh obektov [Efficiency coefficient of the human visual system with arbitrary viewing angles of three-dimensional objects]. *Opticheskyy zhurnal* [Optical journal], 2006, vol. 73, no. 10, pp. 63–68.
6. Krasilnikov N. N. *Tsifrovaya obrabotka 2D- i 3D-izobrazheniy* [Digital processing of 2D and 3D images]. St. Petersburg, BKhV-Petersburg Publ., 2011. 608 p.
7. *Meditsinskie opticheskie pribory. Fiziologicheskaya optika* [Medical optical devices. Physiological optics: studies]. 3rd ed., rev. and add. Novosibirsk, SSGA Publ., 2010. 135 p.
8. Soifer V. A. (ed.) *Metody kompyuternoy obrabotki izobrazheniy* [Methods of computer image processing]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 784 p.
9. *US Patent No. 4,729,017* of February 25, 1986. IPC H04N 13/00.
10. *Eurasia Patent No. 200601499* 08.02.2005 Three-dimensional display using a variable focusing lens / Seo Cheong Soo, Gim Dong Woo, Cho Gioung II [et al.].
11. Rauschenbakh B. *Sistemy perspektivy v izobrazitelnom iskusstve* [Systems of perspectives in the visual arts]. Moscow, Nauka Publ., 1986.
12. Reber A. *Oksfordskiy tolkovyy slovar po psikhologii* [Oxford Dictionary of Psychology], 2002.
13. Sgibnev A. A. Analiz tekhnicheskikh resheniy pri razrabotke obemnogo displeya dlya informatsionno-kommunikatsionno vzaimodeystviya v seti internet [Analysis of technical solutions in the development of a volumetric

display for information and communication interaction on the Internet]. *Logistika i ekonomika resursosberezheniya i energosberezheniya v promyshlennosti : Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (MNPК «LEREP-10-2017»)* [Logistics and Economics of Resource Saving and Energy Saving in Industry (RER "LEREP-10-2017") : International Scientific and Practical Conference], Tula, TSU –November 15–16, 2017. Available at: <http://lerei2017.sstu.ru>.

14. Uchaev D. Yu., Brumshtein Yu. M., Azhmukhamedov I. M., Knyazeva O.M., Dyudikov I. A. Analiz i upravlenie riskami, svyazannymi s informatsionnym obespecheniem cheloveko-mashinnykh ASU tekhnologicheskimi protsesami v realnom vremeni [Analysis and management of risks associated with the information support of man-machine automated process control systems of technological processes in real time]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and high technologies], 2016, no. 2 (34), pp. 82–97.

15. Khyubel D. *Glaz, mozg, zrenie* [Eye, Brain, Vision], Moscow, Mir Publ., 1990. 239 p.

16. Khyubel D. Kh. *Binokulyarnaya konvergentsiya – Glaz, mozg, zrenie* [Binocular Convergence – Eye, Brain, Vision], Moscow, Mir Publ., 1990.

17. Jones A., Unger J., Nagano K. et al. An Automultiscopic Projector Array for Interactive Digital Humans. *SIGGRAPH 2015*. ACM Press, 2015.

18. Barry G. Blundell, Adam J. Schwarz. *Volumetric three-dimensional display systems*. John Wiley & Sons Inc. (NY), 2013. 330 p.

19. Bolshakov A., Sgibnev A. System analysis of formation and perception processes of three-dimensional images in volumetric displays. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, vol. 973, pp. 1–10. DOI:10.1088/1742-6596/973/1/012060 (<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012060>).

20. Bolshakov A. A., Grepechuk Yu. N., Klyuchikov A.V., Sgibnev A. A. A Model of the Optical System of the Interdisp Display. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE*, 2018, art. no. 8542354, pp. 63–70. ISBN: 978-153864332-7. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542354/

21. Bolshakov A. A., Veshneva I. V. Assessment of the effectiveness of decision support in the application of the information system for monitoring the process of forming competences based on status functions. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE*, 2018, art. no. 8542462, pp. 75–82. ISBN: 978-153864332-7. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542462/

22. Bolshakov A. A., Zhelezov M. A., Lobanov V. V., Nikonov A. V., Sgibnev A. A. Development method of forming three-dimensional images for autostereoscopic volumetric displays. *2014 International Conference on Actual Problems of Electron. Devices Engineering, APEDE : Conference Proceedings*, 2014, vol. 2, art. no. 6958294, pp. 461–468. DOI: 10.1109/APEDE.2014.6958294. ISBN: 978-590652276-4.

23. Cutting J., Vishton P. M. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relativepotency, and contextual use of different information about depth. Epstein W. & Rogers S. (Eds.) *Handbook of perception and cognition*. San Diego, CA, Academic Press, 1995, vol. 5. Perception of space and motion, pp. 69–117.

24. Endo (Yendo) T., Kajiki Y., Honda T., Sato M. Cylindrical 3-D Video Display Observable from All Directions. *Proc. Pacific Graphics*, 2000.

25. Jones A., McDowall I., Yamada H., Bolas M., Debevec P. Rendering for an interactive 360° light field display. *ACM Trans. Graph.*, 2007, no. 26 (3), p. 40.

26. Nagano K., Jones A. et al. An Autostereoscopic Projector Array Optimized for 3D Facial Display. *SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies*, 2013.