

УДК 681.7.014.2

ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ДИСПЛЕЕВ

Чжэел Рю¹, Н. В. Муравьев², А. Н. Путилин³

В настоящее время существует много типов виртуальных дисплеев и с каждым годом появляются новые. Однако подавляющее большинство из них оказываются технически неприменимыми из-за того, что не соответствуют ряду ключевых факторов, связанных с физиологией глаза. В данной работе представлены общие требования к оптическим системам виртуальных дисплеев с учетом физиологии глаза человека.

Ключевые слова: физиология глаза, Eye Box, FoV, Eye relief, VR, AR, HMD.

Введение. По принципу формирования виртуального изображения или оптическим схемам виртуальные дисплеи (ВД) называют: Near-Eye-Display [1], Retinal Scanning Display [2], Pinlight Display [3], See-through display [4, 5] и т.п. В исследованиях, связанных с ВД, глаз наблюдателя не является пассивным элементом и должен быть включен в исследуемую оптическую схему. Но в большинстве работ предлагают и исследуют оптические схемы ВД без физиологических особенностей глаза человека. Результаты данных работ оказываются неприменимыми для создания технически успешных продуктов, хотя в них получен хороший результат по некоторым параметрам: большое поле зрения (FoV), большая зона видения виртуального изображения (ЗВВИ, английская версия: Eye Box), большое расстояние от ВД до глаза (Eye relief), малые габариты и так далее. Однако перечисленные параметры тесно связаны друг с другом и физиологией глаза человека, что требует комплексного подхода при изучении данной проблемы.

В данной работе определены требования к оптической системе ВД с учетом физиологии глаза человека: поле зрения, движение глаза и разрешение глаза.

¹ Московский физико-технический институт (МФТИ), 141700 Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: Jaeyeol.ryu@phystech.edu.

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005 Россия, Москва, 2-я Бауманская, дом 5, стр. 1.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: putilinan@sci.lebedev.ru.

Зависимость требований от области применения. Требуемые поле зрения и разрешение могут быть определены областью применения ВД. На рис. 1 представлен ряд возможных применений ВД и соответствующие им поле зрения и разрешение.

Поле зрения и разрешение разделены по 3 группам, по полю зрения: малое ($< 30^\circ$), среднее ($30\text{--}60^\circ$), большое ($> 60^\circ$); по разрешению: низкое ($< 20 \text{ pixel}/^\circ$), среднее ($20\text{--}40 \text{ pixel}/^\circ$) и высокое ($> 40 \text{ pixel}/^\circ$).

Максимальные разрешение и поле зрения необходимо обеспечить для дисплеев игровых консолей. Они составляют $40 \text{ pixel}/^\circ$ и 80° , а для остальных применений разрешение и поле зрения могут быть ниже.

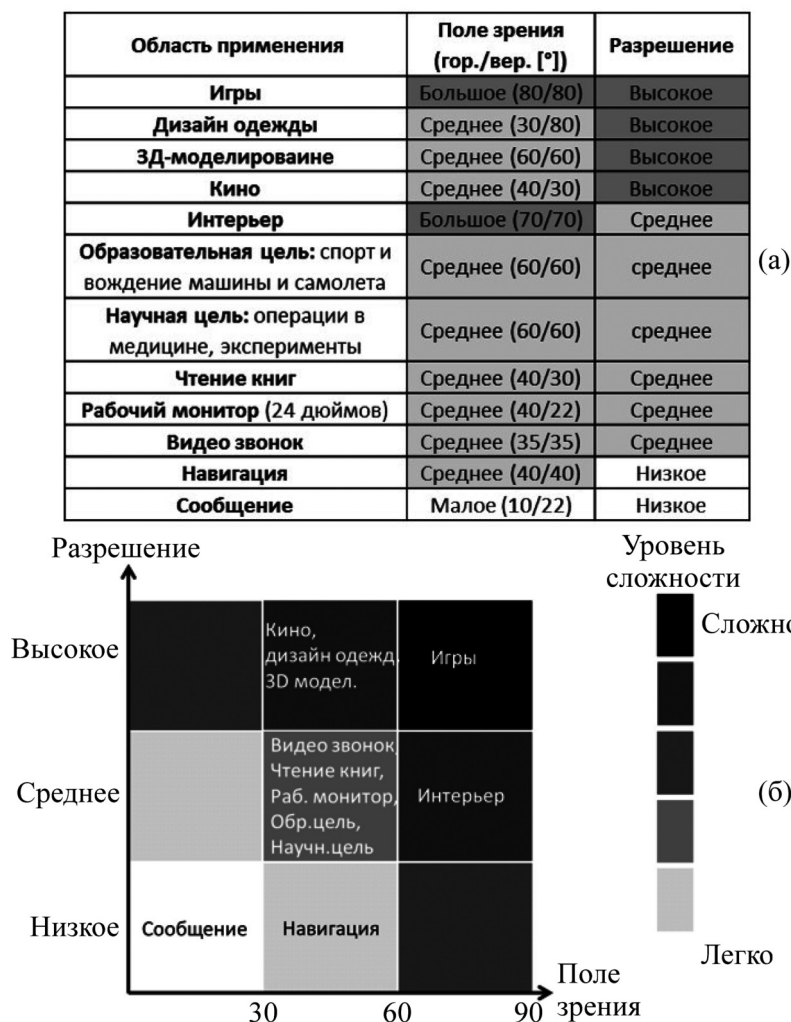


Рис. 1: Область применения, требуемые поле зрения и разрешение для соответствующего применения.

Влияние разрешения глаза на требования ВД. Разрешение глаза человека достигает 60 пикселей на градус только в области центрального зрения (области центральной ямки – Fovea), которая совпадает с оптической осью глаза, а вне этой области разрешение резко падает [6], так как плотность фоторецепторов (колбочек и палочек) снижается [7]. По этим причинам, когда человек хочет рассмотреть объект в подробностях, сперва глаз рефлекторно поворачивается с помощью глазодвигательных мышц так, чтобы объект попал в область Fovea, а потом голова поворачивается к тому же объекту для снижения напряженности глазодвигательных мышц [8]. Однако глаз обычно совершает перемещения в широком диапазоне, поэтому оптическая система ВД должна обеспечить большую ЗВВИ. Если ЗВВИ мала, то при повороте глаза зритель перестанет видеть часть виртуального изображения. Важно отметить, что чем больше поле зрения у системы ВД, тем больше ЗВВИ требуется (будет рассмотрено в следующем параграфе).

Зависимость поля зрения от ЗВВИ. Обычно оптическая система ВД проектируется так, чтобы ЗВВИ находилась в зрачке глаза наблюдателя. Когда человек хочет увидеть объект, находящийся на угловом расстоянии α от центрального зрения, глаз поворачивается на угол α , соответственно зрачок глаза перемещается относительно номинального положения ЗВВИ. Это перемещение зависит от угла поворота глаза α и радиуса стекловидного тела R (см. рис. 2).

Параметр ЗВВИ характеризует степень виньетирования поля зрения оптической системы с требуемым качеством, а не равномерность яркости виртуального изображения по полю. В связи с этим предложены три типа ЗВВИ ($Z_{\text{ВВИ}}^{\text{ном}}$, $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мин}}$ и $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мак}}$), каждый из которых характеризует равномерность яркости по полю: $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мак}}$ – равномерная освещенность виртуального изображения по полю; $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{ном}}$ – крайнее поле видно с половиной яркости относительно центрального поля; $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мин}}$ – крайнее поле видно с яркостью, близкой нулю.

Номинальный $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{ном}}$ определяется смещением оптической оси глаза при повороте глаза на угол, равный половине углового поля зрения, $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мин}}$ – смещением “внутренних” краев зрачка глаза и $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мак}}$ – смещением “наружных” краев зрачка (см. рис. 2(а)). Для поля зрения 80° необходимо обеспечить $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{ном}} = 14.5$ мм, $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мин}} = 12.2$ мм, $Z_{\text{ВВИ}}^{\text{мак}} = 16.8$ мм при диаметре зрачка глаза 3 мм.

Влияние положения глаза (Eye relief) на поле зрения. Исследовано оптимальное положение глаза относительно плоскости ЗВВИ $L_{\text{опт.глаз}} = L_{\text{ЗВВИ}} + \Delta L_{\text{глаз}}$, которая находится на расстоянии $L_{\text{ЗВВИ}}$ от ВД. На рис. 2(б) представлены три случая положения глаза относительно ВД, когда $\Delta L_{\text{глаз}} > 0$, $\Delta L_{\text{глаз}} = 0$, $\Delta L_{\text{глаз}} < 0$.

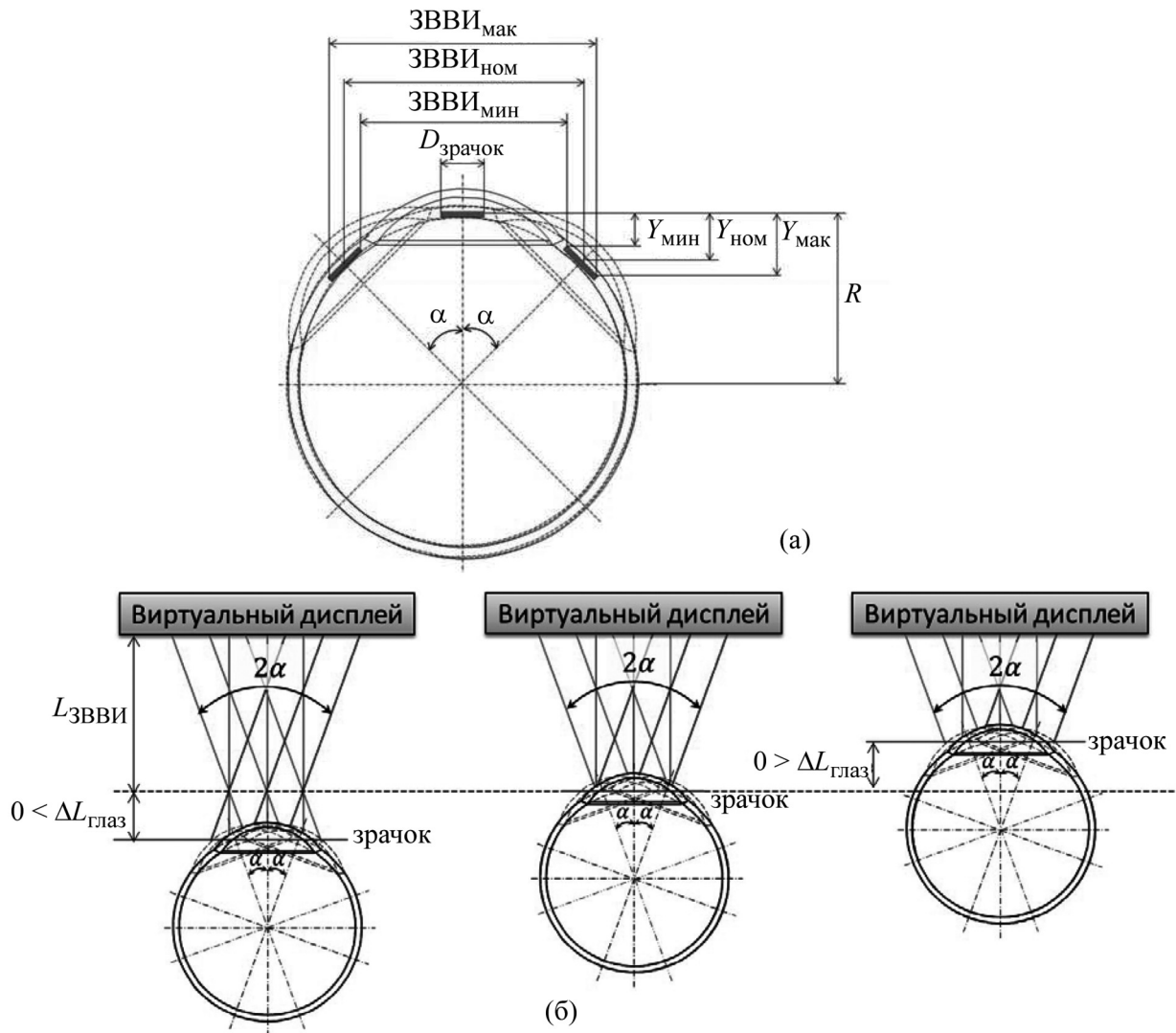


Рис. 2: (а) перемещение глаза за счет его поворота. $ZВВИ_i$ – требуемое значение $ZВВИ$, Y_i – смещение глаза в вертикальной координате системы, $D_{зрачок}$ – диаметр зрачка; (б) три случая расположения глаза относительно от плоскости $ZВВИ$.

При определенном поле зрения и размере зрачка глаза возникает следующий эффект: человек поворачивает глаз, например, направо, чтобы видеть правую часть виртуального изображения, но в случае $\Delta L_{глаз} > 0$ пучки правой части виртуального изображения не приходят в глаз, а полностью виньетируются зрачком, в то же время пучки левой части виртуального изображения приходят в глаз, что вызывает дискомфорт восприятия.

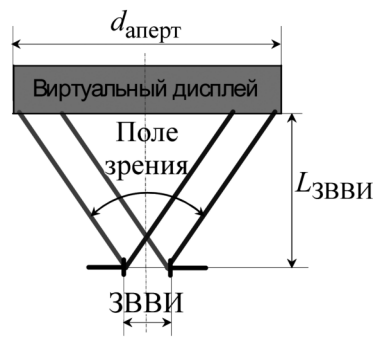


Рис. 3: Схема ключевых параметров ВД.

Параметры									
Поле зрения [°]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ЗВВИ _{ном} [мм]	4.2	6.2	8.2	10.1	12	13.8	15.4	17.0	18.4
$L_{\text{звви}}$ [мм]	10								
$d_{\text{аперт}}$ [мм]	7.7	11.6	15.5	19.5	23.6	27.8	32.2	37.0	42.2
$L_{\text{звви}}$ [мм]	15								
$d_{\text{аперт}}$ [мм]	9.5	14.3	19.1	24.1	29.3	34.8	40.6	47.0	54.1
$L_{\text{звви}}$ [мм]	20								
$d_{\text{аперт}}$ [мм]	11.2	16.9	22.8	28.8	35.1	41.8	49.0	57.0	66.1

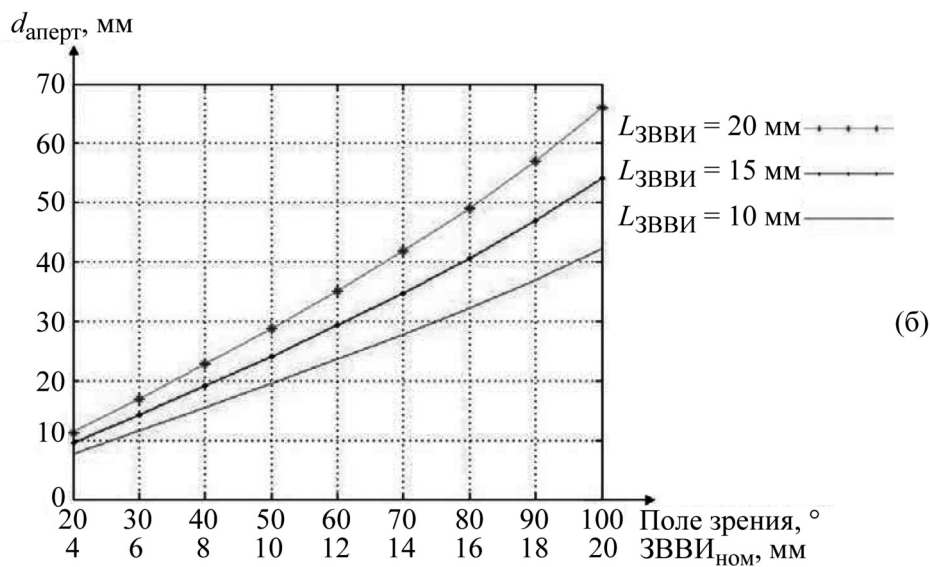


Рис. 4: Требуемый $d_{\text{аперт}}$ для различных значений поля зрения, $\text{ЗВВИ}_{\text{ном}}$ и $L_{\text{звви}}$.

Обозначим смещение зрачка вдоль оптической оси ВД $Y_{\text{мин}}$, $Y_{\text{нор}}$, $Y_{\text{мак}}$, соответственно, для ЗВВИ_{мин}, ЗВВИ_{нор} и ЗВВИ_{мак} на рис. 2(а). В случае ЗВВИ_{мин} смещение $Y_{\text{мин}}$ увеличивается с возрастанием угла поворота зрачка α и уменьшением диаметра зрачка глаза $D_{\text{зрачок}}$. В случае ЗВВИ_{нор} смещение $Y_{\text{нор}}$ зависит только от угла поворота α , а в случае ЗВВИ_{мак} смещение $Y_{\text{мак}}$ увеличивается с возрастанием угла поворота α и размера зрачка глаза $D_{\text{зрачок}}$. Результат исследования показал, что оптимальным положением глаза является $\Delta L_{\text{глаз}} < 0$. Таким образом в зависимости от того, какой тип ЗВВИ требуется обеспечить, необходимо разное оптимальное положение глаза $\Delta L_{\text{глаз}}$. Чем больше равномерность яркости изображения по полю требуется, тем ближе к ВД должен располагаться глаз.

Требование к оптической системе. Теперь с учетом выше проведенного анализа установим требования к оптической системе.

На рис. 3 представлена схема ВД и указаны основные параметры: поле зрения и расстояние от глаза до ВД $L_{\text{ЗВВИ}}$ и размер апертуры оптической системы ВД $d_{\text{аперт}}$, которая дает возможность оценить габариты и сложность разрабатываемой оптической системы, и может дать представление о возможности разработки коммерчески успешного продукта с точки зрения габаритов устройства.

Апертура оптической системы ВД может быть ограничена размером линзы, зеркала, волновода или голографического оптического элемента, записанного линзой или зеркалом, или растра таких оптических элементов, или пространственно-временного модулятора света и т.п. Размеры апертуры оптической системы $d_{\text{аперт}}$ в зависимости от поля зрения и ЗВВИ_{нор} представлены в виде таблицы и графика на рис. 4.

Можно сделать вывод, что для обеспечения поля зрения 80° необходимо $d_{\text{аперт}} 49$ мм.

Заключение. В работе определены требования к оптическим системам ВД в зависимости от области применения, с учётом влияния физиологии глаза на требования к разрешению и полю зрения ВД, зависимость поля зрения от ЗВВИ и влияние положения глаза на поле зрения. Предложена методика определения оптимального положения глаза в зависимости от ЗВВИ ВД. Проводимые исследования были согласованы с современным представлением о физиологии глаза человека. Особенностью физиологии глаза по сравнению с электронными матричными приемниками является его движение, которое приводит к ужесточению требований к оптическим системам ВД.

На основе этих исследований определены общие требования к апертурным характеристикам оптических систем ВД, в частности: минимальный размер апертуры оптиче-

ской системы ВД, согласование зоны видения виртуального изображения с требуемым полем зрения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Lanman, D. Luebke, Proc. ACM SIGGRAPH Asia **32**(6), 220 (2013).
- [2] M. M. Bayer, Proc. SPIE **4711**, 202 (2002).
- [3] A. Maimone, D. Lanman, K. Rathinavel, et al., Proc. ACM SIGGRAPH **33**(4), 89 (2014).
- [4] K. Hong, J. Yeom, C. Jang, et al., Opt. Lett. **39**(1), 127 (2014).
- [5] D. Cheng, Y. Wang, H. Hua, and M. M. Talha, Appl. Opt. **48**(14), 2655 (2009).
- [6] H. W. Hunziker, *Im Auge des Lesers: foveale und periphere Wahrnehmung-vom Buchstabieren zur Lesefreude (The Eye of the Reader: Foveal and Peripheral Perception-from Letter Recognition to the Joy of Reading)* (Zurich, Transmedia, 2006).
- [7] Brian A. Wandell, “Foundations of Vision” in: Stanford University resource, <https://foundationsofvision.stanford.edu/>
- [8] D. V. Davies and H. Gray, *Gray’s anatomy: descriptive and applied* (London, Longmans, 1967).
- [9] A. Keirl, C. Christie, *Clinical Optics and Refraction. A Guide for Optometrists, Contact Lens Opticians and Dispensing Opticians* (Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007).

Поступила в редакцию 19 декабря 2017 г.