

В.С. Маслов, В.Г. Румянцев,  
Н.И. Сенова, Ю.М. Рыцарев

## **РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ ЛОКАЛЬНО АДАПТИВНЫХ СВЕТОФИЛЬТРОВ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ**

*Обоснована актуальность адаптивности наблюдательных каналов человекомашинных систем к яркостной структурированности их визуальной среды. Исследованы ситуация и психофизиологические механизмы интегральной и зональной дезадаптации зрительного анализатора. Разработаны принципы построения, создан демонстрационный макет и проведена его апробация на моделирующем стенде, оценены базовые характеристики локально адаптивных светофильтров различного назначения.*

**E-mail:** shlemm@yandex.ru

**Ключевые слова:** исследование, наблюдение, дезадаптация зрения, светофильтры и модуляторы, построение, алгоритм, локальная адаптация, матричная адресация, макет, стенд, апробация.

**Актуальность адаптивности наблюдательных каналов человекомашинных систем прямого видения.** Расширение условий применения перспективных наблюдательно-информационных человекомашинных систем (ЧМС) различного назначения требует новых подходов к эффективному разрешению в них ряда проблем. Одной из проблем является технико-эргономическое решение задачи автоматической адаптации ЧМС прямого (без промежуточной обработки воспринимаемого внешнего пространства) видения (ПВ) к его яркостно-контрастной структурированности. Это связано с тем, что используемые в настоящее время для такой задачи светофильтры имеют фиксированные дискретно вводимые или плавно регулируемые коэффициенты интегрального пропускания ( $\tau_{\text{сф}}$ ) в поле канала прямой видимости. Это снижает эффективность деятельности операторов ЧМС ПВ, вплоть до ее срывов при значительной вариабельности внешней светотехнической обстановки. Освещенность наблюдаемых объектов при структурированной визуальной среде разная, поэтому задавать величину  $\tau_{\text{сф}}$ , одинаковую для всех наблюдаемых объектов и зон, нецелесообразно.

С учетом изложенного выше актуальность обоснования научно-методических основ построения и исследований адаптивно управляемых светофильтров, обеспечивающих перенос условий восприятия операторами внешней яркостно-неоднородной среды наблюдения в диапазоны функционирования зрительного анализатора (ЗА), комфортные по психофизиологическим показателям. Для обеспечения эффективного восприятия информации от всех объектов визуальной среды необходимо применять адаптивные оптические фильтры с неоднородной оптиче-

ской апертурой, в каждой области которой изменение коэффициента пропускания осуществляется различным способом.

Следовательно, требуется использовать локально адаптивный светофильтр (ЛАСФ) и придавать разным областям апертуры его электрически управляемого модулятора света (ЭУМС) различные значения  $\tau_{\text{сф}}$  (в соответствии с текущим распределением яркостных зон в наблюдаемой обстановке). Это обеспечит локальную режекцию в ЭУМС световых потоков от ярких источников света природного и искусственного характера [1, 2].

**Видение** — сложный психофизиологический процесс, в основе которого взаимодействие всех функций ЗА оператора, поэтому автоматическая адаптация характеристик ЛАСФ к выходным оптическим параметрам должна носить комплексный характер [1, 3]. Адаптация зависит от энергетических, пространственных, временных и информационных параметров оптических сигналов, поступающих от среды через ЛАСФ в ЗА оператора, совокупность которых определяет качество видимости объектов [4]. При их учете и реализации могут быть сняты ограничения на светотехнические условия применения полуавтоматических ЧМС ПВ.

**Типовые ситуации дезадаптации ЗА.** Реальная светотехническая внешняя обстановка в наблюдательных каналах ЧМС ПВ характеризуется значительной неравномерностью оптических параметров подлежащих видению объектов и фонов (яркости, освещенности, спектрального коэффициента отражения и т. п.), т. е. в поле зрения операторов могут находиться области со светотехническими характеристиками, значительно отличающимися от средних характеристик фона [1, 4]. Распределение яркостных зон в наблюдаемом пространстве ЧМС ПВ приводит к зрительному дискомфорту и снижению зрительных функций (в наиболее неблагоприятных условиях и к органическим повреждениям тканей глаза), физиологической основой которых являются механизмы локальной дезадаптации ЗА оператора. В связи с этим целесообразно рассмотреть и классифицировать типовые ситуации, вызывающие такое состояние [1, 4].

Дезадаптирующие световые источники могут иметь как естественную природу, так и техногенный характер [2, 3]. Наиболее мощный естественный дезадаптирующий источник — Солнце. При прямом наблюдении размер его диска в среднем равен примерно  $30'$  ( $0,5^\circ$ ), а яркость —  $(1,5 \dots 2,0) \cdot 10^9$  кд/м<sup>2</sup>, являясь абсолютно дезадаптирующей [4]. Проекция изображения Солнца в центральную часть поля зрения приводит к выраженному зрительному дискомфорту (вплоть до термического ожога сетчатки глаз), непровольному миганию и даже зажмуриванию глаз. В результате оператор практически выключается из каналов наблюдения и управления ЧМС ПВ.

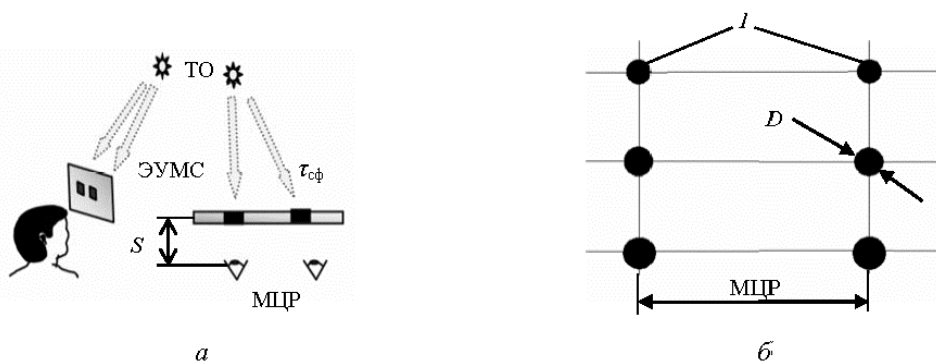
В этом случае применение экранов и очков со светофильтрами постоянной или интегрально регулируемой оптической плотности малоэффективно, так как при малой плотности эти устройства не обеспечи-

вают достаточного снижения яркости, а при высокой — воспринимаемая яркость визуальной обстановки перестает быть дезадаптирующей. При этом светимость окружающих его объектов в поле ЗА становится недостаточной для комфортного видения в пространстве [1, 4].

**Психофизиологические механизмы зональной дезадаптации ЗА.** Использование указанных выше средств интегральной защиты органа зрения при его локальной световой дезадаптации мало эффективно, а также отрицательно влияет на качество и безопасность выполнения операторских задач днем и в сумерках. Поэтому необходимы системный анализ, предложения по учету психофизиологических механизмов зональной дезадаптации ЗА и разработка специальных методов локальной (структурированной по величине  $\tau_{\text{сф}}$  в поле зрения) защиты органа зрения операторов.

Световое воздействие на ограниченную область сетчатки глаза вызывает зрительную индукцию: возбуждение не только участка ЗА, на который проецируется изображение зонального светового излучателя (прямое действие), но также и смежных с ним участков. Признаками возбуждения при неравномерном распределении яркости и наличии в поле зрения локально ярких источников (блеских источников, БИ) оптического излучения являются ослепленность ЗА и пелена внутри склеры глаза, снижение функции зрения, т. е. патогенные факторы зрительной дезадаптации [3, 4].

**Основы построения локально адаптивных модуляторов света.** Решение задачи оптимизации зрительной деятельности в условиях ее локальной дезадаптации может быть получено с помощью интеллектуализированных ЭУМС со световыми потоками, исходящими от яркостно-структурированной среды и позволяющими зонально управлять оптической плотностью ЛАСФ [1, 3]. Следует учесть, что принцип локальной адаптации работает только в варианте бинокулярного ЛАСФ (рис. 1, а), затемняющие области (две «шторки»  $I$  диаметром  $D$  каждая) которого носят горизонтально парный характер (рис. 1, б).



**Рис. 1. Схемы бинокулярного ЛАСФ (а) и имитатора ЭУМС ЛАСФ (б):** ТО — тест-объект; МЦР — межцентровое расстояние глаз ЗА оператора;  $S$  — расстояние между ЗА и ЭУМС;  $D$  — диаметр бинокулярной затемняющей области;  $I$  — варьруемые по диаметру  $D$  и МЦР затемняющие «шторки»

Основные направления создания комфортных условий для зрительной деятельности операторов ЧМС ПВ:

1) изменения в левом и правом каналах ЗА средних значений воспринимаемой яркости внешней среды до комфортных значений;

2) снижение яркости тех локальных участков поля наблюдения, которые оказывают дезадаптирующее действие на ЗА.

Решение первого направления отражено в работах [2, 3] и состоит в обратно пропорциональном изменении коэффициента пропускания ( $\tau_{\text{сф}}$ ) интегрально адаптивного светофильтра в соответствии со средней яркостью ( $L_{\text{ср}}$ ) поля зрения. Реализация второго направления [3] представляет весьма сложную задачу, так как требует непрерывного анализа распределения яркостной структурированности в наблюдаемой области и эффективного зонального управления оптическими параметрами ЭУМС ( $\tau_{\text{сф } i}$ ). Наиболее сложным в теоретическом и практическом плане является вопрос о выделении (определении границ) дезадаптирующих световых источников в яркостно-структурированных наблюдаемых областях.

По данным Международного комитета по освещению, дезадаптирующая яркость, создаваемая БИ, определяется по выражению [1, 4]

$$L_{\text{дез}} = m_{\text{дез}} E / \theta^2, \quad (1)$$

где  $E$  — освещенность от БИ на зрачке наблюдателя, лк;  $\theta$  — угол между направлением на БИ и зрительной осью, град;  $m_{\text{дез}}$  — постоянный коэффициент. Как следует из (1), БИ оказывает основное неблагоприятное влияние в непосредственной близости от линии визирования, при удалении от нее яркость вуалирующей пелены в ЗА быстро снижается. Для  $L_{\text{дез}} \geq 10^6$  кд/м<sup>2</sup> значения  $m_{\text{дез}}$  практически постоянны ( $\sim 9,46$ ), а если значение яркости  $L_{\text{дез}}$  принадлежит диапазону  $5 \cdot 10^3 \dots 10^6$  кд/м<sup>2</sup>, то значение  $m_{\text{дез}}$  вычисляется как

$$m_{\text{дез}} = 3 \lg L_{\text{дез}} - 8,54. \quad (2)$$

В реальных условиях использование выражений (1) и (2) затруднительно, так как заранее неизвестна светотехническая структурированность среды (размер и число БИ).

**Принципы построения и алгоритм рационального функционирования интеллектуализированных ЛАСФ.** Исследован также подход, основанный на нормировании неравномерности распределения яркости в поле зрения оператора [1—3]. Его реализация предполагает наличие многоэлементного фотоприемного устройства (ФПУ) в ответвлении ЭУМС, позволяющего в режиме обратной связи интегрально измерять среднее значение яркости ( $L_{\text{ср}}$ ) области визирования и одновременно оценивать значения этого показателя ( $L_j$ ) для зональных областей структурированной среды. При этом выделяются на выходе ФПУ и подавляются в ЭУМС сигналы из зон повышенной

яркости ( $L_{\text{дез}}$ ), которые вызывают нежелательную локальную зрительную дезадаптацию (при  $L_j > L_{\text{дез}}$ ).

Алгоритм работы ЭУМС с подавлением им сигналов из ФПУ от локальных дезадаптирующих источников в поле зрения может быть следующим. С помощью матричного ФПУ, состоящего из  $n$  светочувствительных ячеек, измеряются яркости локальных участков ( $L_j$ ) наблюдаемой области. В качестве адаптирующей яркости ( $L_a$ ), определяющей уровень световой чувствительности ЗА оператора, принимается среднее по полю зрения значение яркости ( $L_{\text{ср}}$ ):

$$L_{\text{ср}} = (L_j + L_{j+1} + \dots + L_{j+n})/n. \quad (3)$$

Значения яркости локальных участков внешней для ЧМС ПВ поля зрения обстановки ( $L_j$ ) сравниваются с текущим значением средней яркости  $L_{\text{ср}}$ , а в качестве дезадаптирующих принимаются участки с яркостью

$$L_j > kL_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент, определяющий порог возникновения дискомфортных ощущений.

Для исключения дезадаптирующего действия в области проекции этих участков на зрачок глаза оператора ЧМС ПВ реализуются локальные изменения коэффициентов пропускания  $\tau_{\text{сф } i}$  в ЭУМС, которые определяются соотношением величин  $L_j$  и  $L_{\text{ср}}$ . Такой подход позволяет автоматически определить необходимый диапазон локальных изменений оптической плотности ЛАСФ для реальных условий (зональных яркостей среды).

**Постановка задачи реализации локальной адаптации.** Одной из задач при разработке и создании зонально адаптируемых к пространственной светотехнической структуре среде наблюдения через ЛАСФ на основе многоэлементных ЭУМС является управление адресным выбором тех отдельных участков матричного ЛАСФ, где необходима редукция входного излучения.

Такая задача для ЧМС ПВ может решаться с помощью дополнительного видеоинформационного канала [2]: сканированием информационно-вычислительным устройством ЛАСФ матрицы ФПУ и подсчетом числа строк и пикселей по строкам и столбцам местоположения слепящих ЗА зон (вычисления их координат и размеров в поле зрения), в которых значение текущей амплитуды яркости ( $L_j$ ) превышает пороговое (или среднее по полю) значение ( $L_{\text{пор}}/L_{\text{ср}}$ ). По результатам сканирования осуществляется мультиплексирование адресных входов матричного ЛАСФ с изменением коэффициента пропускания элементов его модулятора света ( $\tau_{\text{сф } i}$ ) [2].

К базовым свойствам ЛАСФ и их ЭУМС относятся [1, 3]:

- характер взаимодействия со световым потоком;
- диапазон изменения коэффициента пропускания  $\tau_{\text{сф}}$ ;

- динамические свойства переходной характеристики;
- реологические (механические) свойства слоя рабочего вещества;
- эргономичность реализации (в том числе технологическая) и инженерно-психологическое совершенство.

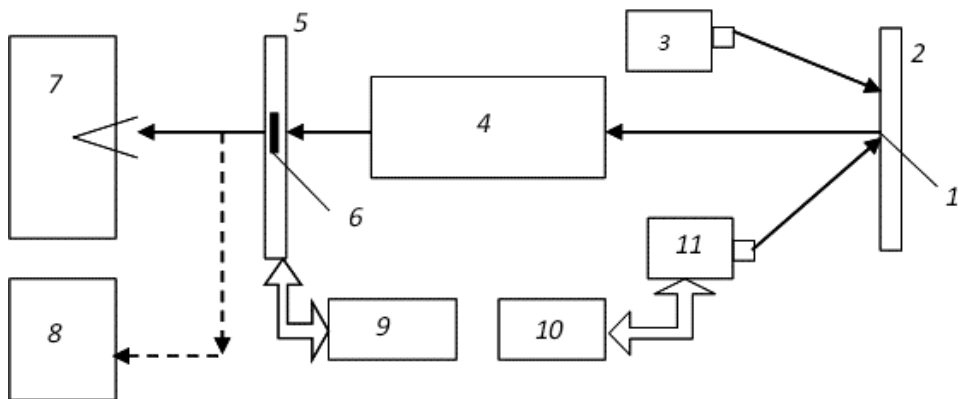
В ЛАСФ ЧМС ПВ возможна работа только на пропускание или на комбинированное пропускание-отражение входного светового потока в видимом спектре 0,38...0,75 мкм [3]. При этом должны реализовываться промежуточные значения (серая шкала) локальных коэффициентов  $\tau_{\text{сф } i}$  для обеспечения плавной регулировки зависимостей  $\tau_{\text{сф}} = f(L_j / L_{\text{ср}})$ . Малое время реакции ЭУМС (рациональные значения от сотни микросекунд до единиц миллисекунд) на увеличение интенсивности светового потока уменьшает опасность перегрузки ЗА оператора, а длительность релаксации рабочего вещества ЭУМС (обычно от единиц до десятков миллисекунд) определяет быстроедействие ЛАСФ:  $\tau_{\text{сф}} = f(t)$ . Перспективны эргономичность (например, вписывание в сферическую конструкцию для наשלемых ЧМС ПВ) и технологичность ЛАСФ (реализация ЭУМС на гибких подложках) улучшают технические и эксплуатационные характеристики светофильтра.

**Аспекты электрической матричной адресации в ЭУМС и способ расширения диапазона модуляции.** Если электрическая адресация управляющих сигналов в ЭУМС выбирается пассивно-матричная, то адресуемая (активируемая) область слоя рабочего вещества образуется на пересечении практически прозрачных проводников адресных строк и столбцов. Это позволяет выбирать  $m$ -ю область рабочего слоя за счет подачи двух управляющих сигналов на  $m$ -ю строку и  $n$ -й столбец,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $n = 1, 2, \dots, N$ , где  $M$  и  $N$  — число строк и столбцов матрицы. При активно-матричной адресации управляющих сигналов в узлах пересечений строк и столбцов располагаются тонкопленочные транзисторы, которые увеличивают коэффициент мультиплексирования, но дают «темную сетку» (ее нет при пассивно-матричной адресации) вследствие малой прозрачности транзисторов в узлах сетки. Это уменьшает коэффициент общей плотности ЭУМС при его работе на пропускание.

Поэтому среди недостатков использованного в данной статье имитатора ЭУМС (ТФТ-матрицы от монитора PD104SLS) с активно-матричной адресацией следует отметить его низкий коэффициент пропускания (~7 %) и большое рассеяние света на электродах, что привело к размыванию наблюдаемых тест-объектов и выводу о целесообразности применения в ЛАСФ ЭУМС с пассивно-матричной адресацией. Для уменьшения недостатков и полного перекрытия диапазона яркостей фона (цель — увеличение глубины защиты зрения) были использованы одиночные и двойные (с проворотом) поляроид-

ные пленки с нанесенными парными «шторками» различных диаметров  $D$  (см. рис. 1, б).

**Разработка и создание стенда, моделирующего демонстрационный макет ЛАСФ и зонально структурированную световую среду.** Разработки моделирующей среды (МС) и демонстрационного макета ЛАСФ проведены на уровне комплекса аппаратно-программных средств экспериментального стенда, моделирующего одновременно ЛАСФ (его идеологию, концепцию построения и технико-эргономические параметры) и светотехническую среду его функционирования. На рис. 2 представлена структурная схема моделирующего испытательного стенда.



**Рис. 2. Структурная схема моделирующего испытательного стенда:**

1 — тест-объект (угловые размеры Солнца  $\gamma_c = 0,5^\circ$  и техногенных объектов  $\gamma_{т.о} \geq 0,5^\circ \dots 3,0^\circ$ ); 2 — экран с матовым диффузным отражателем (конструктив тест-объекта и фона); 3 — компьютерный проектор КП-1 PLC-SV55 для имитации фона; 4 — оптический коллиматор типа «Ленинград-4»; 5 — имитатор ЛАСФ (ЭУМС) на базе жидкокристаллического модулятора (ТФТ-матрицы) от монитора PD104SL5 (со снятой конструкцией системы подсветки); 6 — «шторки» субъективных диаметров (затемняющие области на ЭУМС); 7 — ЗА; 8 — яркомер-люксметр (Я-Л) ЯРМ-3 для измерения яркостей световых потоков от тест-объекта, фона, на выходе ЛАСФ и освещенности ЗА; 9, 10 — персональные компьютеры ПК-1, ПК-2 на базе процессоров Pentium IV со специальным программным обеспечением для управления условиями и параметрами эксперимента; 11 — компьютерный проектор КП-2 ЕР-Х350 для имитации тест-объекта

Моделирующая среда реализована по полунатурной схеме: бинокулярная локальная оптическая адаптация ЗА к яркостной пространственной структурированности фона (тест-объекты 1 бинокулярно задают типовые объекты наблюдения, экран 2 — фон; области 6 (см. рис. 1, б), сдвинутые по горизонтали на межцентровое расстояние глаз (54...72 мм) и субъективно регулируемые по диаметру, имитируют требуемые локальные затемняющие области («шторки») на ЭУМС и т. п.).

**Методика и условия испытаний ЛАСФ средствами МС.** Испытания макета ЛАСФ проводились с участием семи операторов на

светотехническом моделирующем стенде (см. рис. 2). На экране 2 проектором 3 создавался однородный или пространственно неравномерный по яркости фон, другим проектором 11 высвечивались тест-объекты в виде круглых (возможна и другая их конфигурация) ярких белых пятен с изменяемыми угловым размером  $\gamma$  и яркостью  $L$ . Условия и диапазоны изменения экспериментальных параметров даны ниже:

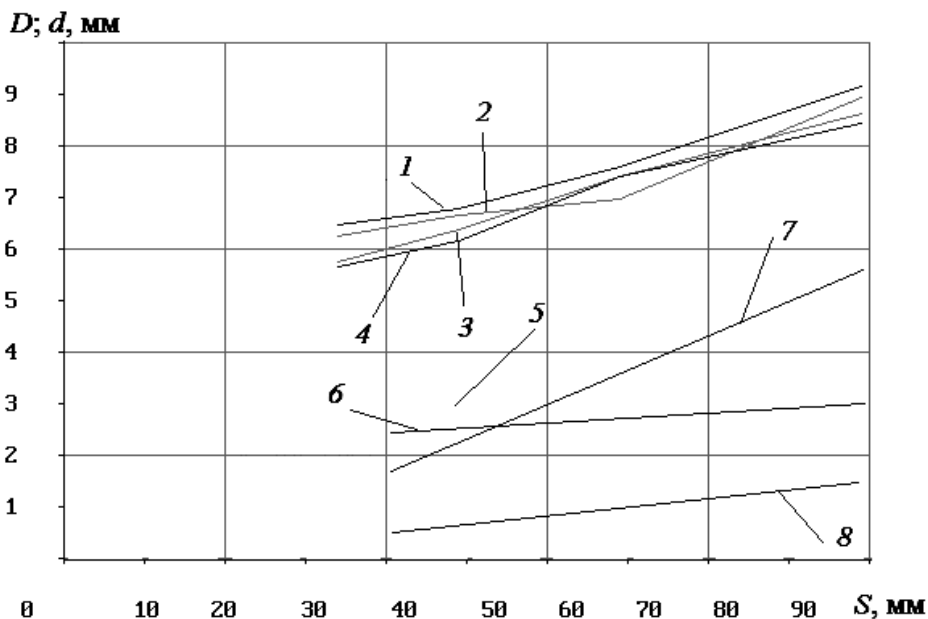
Яркость адаптации (объекта) $L_a$ , кд/м <sup>2</sup> .....	210; 820; 3200; 6500
Угловой размер тест-объекта $\gamma_{т.о}$ ( $\gamma_c, \gamma_{т.о}$ ), град .....	0,5...3,0
Фон, % .....	Около 10
Расстояние между ЗА и ЭУМС $S$ , мм .....	35; 50; 70; 100
Цветность тест-объекта $\lambda$ , нм .....	400...700 (белый),
.....	750 (красный)
Размер «шторок»:	
линейный, мм .....	$D(\gamma)$
угловой, град .....	Var

Регулировка диаметра и яркости пятен тест-объектов осуществлялась с помощью специальной программы на проекторе 11 (КП-2) и позволила изменять угловые размеры  $\gamma$  и яркость  $L$  на экране 2, имитируя типовые объекты: от  $\gamma_c = 0,5^\circ$  (Солнце) до  $\gamma_{т.о} = 3^\circ$  (техногенные объекты). Оператор рассматривал указанные яркие пятна через имитатор ЭУМС ЛАСФ и коллиматор, в фокальной плоскости которого располагался экран 2, чем имитировалось удаление в бесконечность яркого (в том числе БИ) тест-объекта ( $L$ ), наблюдаемого оператором на менее ярком фоне ( $L_\phi$ ). С учетом МЦР глаз настраивались размеры (вариация диаметров  $D$ ), субъективно полностью закрывающих тест-объект парными «шторками» (см. рис. 1, б), приводя к комфортным условиям восприятия структурированную область внешней обстановки.

**Апробация эффективности и оценки базовых характеристик ЛАСФ.** Основной целью проведенных в данной статье научно-технических исследований было получение и изучение зависимостей размеров (угловых  $\gamma$  и линейных (диаметров)  $D$ ) субъективно экранирующих участков на ЛАСФ от расстояний  $S$  (от зрачков ЗА оператора до имитатора ЭУМС) при вариациях яркостей тест-объекта ( $L$ ), его размеров ( $d, \gamma$ ) и цветности ( $\lambda$ ) в диапазоне физиологически нарушенной четкости видения ЗА ( $S < 250$  мм).

На рис. 3 показаны зависимости диаметров ( $D$ ) локальных областей («шторок») субъективного затемнения ЛАСФ от расстояний между ЗА и ЭУМС ( $S$ ) при различных яркостях тест-объекта  $L_a$ . Из зависимости 5 ясно, что при больших угловых размерах тест-объекта (техногенный объект  $\gamma_{т.о} = 3^\circ$ ) диаметр зон локального затемнения слепящих тест-объектов возрастает с увеличением расстояния  $S$  при всех значениях яркости тест-объекта. При малом угловом размере





**Рис. 3.** Зависимости диаметров ( $D$ ) локальных областей («шторок») субъективного затемнения ЛАСФ от расстояний между ЗА и ЭУМС ( $S$ ) при яркостях тест-объекта  $L_a = 210$  (1), 820 (2), 3200 (3) и 6500 (4) кд/м<sup>2</sup> и при  $\gamma_{т.о} = 3^\circ$  (5, 7),  $\gamma_c = 0,5^\circ$  (6, 8):

5, 6 — для диаметра  $D$  (эксперимент); 7, 8 — для диаметра  $d$  (теория)

тест-объекта (например, у Солнца  $\gamma_c = 0,5^\circ$ ) зависимость 6 выражена меньше, что очевидно связано с большей размытостью и меньшим разрешением ЗА наблюдаемого через ЛАСФ тест-объекта при уменьшении его углового размера.

Проведенные исследования с хроматическими тест-объектами (имитировался красный тест-объект типа «солнце»  $\gamma_c = 0,5^\circ$ ) в указанном выше диапазоне яркостей значимого влияния цветности на параметры и эффективность ЛАСФ не выявили.

Экспериментально установлен новый и несколько неожиданный с позиций физиологии зрения эффект: при  $S < 250$  мм субъективные экспериментальные диаметры  $D$  существенно больше (в 2—3 раза при техногенных объектах с  $\gamma_{т.о} = 3^\circ$  и в 5—10 раз в случае Солнца  $\gamma_c = 0,5^\circ$ ) теоретически объективных диаметров  $d$  экранов, вычисленных с точки зрения геометрической оптики (см. кривые 7 и 8, что связано со свойствами ЗА на малых расстояниях  $S$  (уменьшением четкости видения, разрешающей способности и иррадиации восприятия глаз при сокращении расстояния между ЗА и ЭУМС) и должно учитываться при разработке ЛАСФ с небольшими расстояниями их ЭУМС от ЗА (типа ЧМС ПВ со светофильтрами в очках, защитных шлемах, остеклениях скафандров и т. п.).

Разработанные концепция построения и методика исследований, аппаратно-программные средства моделирования ЛАСФ и светотехники внешней среды, результаты апробации и оценки технико-эргономических характеристик позволяют в дальнейшем ставить и решать задачи углубленных исследований, проектирования и создания эксплуатационно совершенных ЛАСФ для ЧМС ПВ различного назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов В.С., Березин Г.Д., Сенова Н.И. Адаптивный светофильтр наблюдательных и информационных систем космонавта // Пилотируемые полеты в космос: Тез. докл. 6-й МНПК. Звездный городок. 2005. — С. 20—21.
2. Разработка, создание и экспериментальное исследование интегрально адаптивных светофильтров / В.С. Маслов и др. // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2012. № 3. — С. 20—38.
3. Маслов В.С., Румянцев В.Г., Сенова Н.И., Рыцарев Ю.М. Разработка и исследование электрооптического локально адаптивного светофильтра космонавта // Пилотируемые полеты в космос: Сб. материалов Космического форума 2011. Звездный городок. 2011. — С. 8—9.
4. Хацевич Т.Н. Физиологическая оптика. Ч. 1. — Новосибирск: РИО СГГА, 1988. — 74 с.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012