

## Расчет показателя дискомфорта с помощью технологий компьютерной графики

Д. Н. Макаров, Д. К. Слюсарев, В. П. Будак

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена усовершенствованию расчета объединенного показателя дискомфорта (UGR) для оценки качества освещения. Авторы критикуют ограничения современных систем проектирования (DIALux, Relux), не учитывающих вторичные зеркальные блики, и предлагают метод на базе технологий компьютерной графики (3ds Max) и математического моделирования (Matlab). Ключевое нововведение – алгоритм кластеризации источников бликов, заменяющий трудоемкий попиксельный расчет. Это повышает точность UGR на 10 %, лучше отражая физиологию зрительного восприятия. Результаты показывают, что учет коэффициентов отражения (особенно при  $\rho > 0.8$ ) существенно снижает дискомфорт. Метод актуален для проектировщиков и архитекторов, позволяя прогнозировать UGR на этапе моделирования.

**Ключевые слова:** объединенный показатель дискомфорта (UGR), зрительный дискомфорт, зеркальные отражения, компьютерная графика, 3D-визуализация, кластеризация источников бликов, коэффициент отражения, трассировка лучей, программное обеспечение светотехнического проектирования, физиология зрительного восприятия

## Calculation of the discomfort index using computer graphics technologies

D. N. Makarov, D. K. Slyusarev, V. P. Budak

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

**Abstract.** The article addresses the improvement of the Unified Glare Rating (UGR) calculation for lighting quality assessment. The authors critique limitations of current design tools (DIALux, Relux), which ignore secondary specular glares, and propose a method leveraging computer graphics (3ds Max) and mathematical modeling (Matlab). The core innovation is a clustering algorithm for glare sources, replacing pixel-level calculations. This enhances UGR accuracy by 10%, better aligning with human visual perception. Results demonstrate that accounting for surface reflection coefficients (notably at  $\rho > 0.8$ ) significantly reduces discomfort. Practical recommendations for material selection are provided. The approach enables UGR prediction at the design stage, offering architects and lighting designers a tool to optimize visual comfort while accounting for complex reflections.

**Keywords:** Unified Glare Rating (UGR), visual discomfort, specular reflections, computer graphics, 3D visualization, glare source clustering, reflection coefficient, ray tracing, lighting design software, visual perception physiology

### Введение

Качественные показатели освещения – ключевые светотехнические характеристики осветительных установок. Они, в отличие от количественных показателей, позволяют оценить её визуальное восприятие и понять, насколько комфортно будет людям и возможно ли выполнение зрительных задач [1].

Глаз человека реагирует именно на яркость, а не на освещенность поверхности. Поэтому критерии качества освещения определяются яркостью освещаемых объектов и окружения сцены. В современной светотехнике становится актуальной разработка методов моделирования и оценки пространственно-углового распределения яркости (ПУРЯ). Одним из инструментов служит создание фотореалистичных изображений на основе метода адаптивной трассировки лучей.

Среди большого количества качественных показателей освещения особое место занимает объединенный показатель дискомфорта (UGR). Он характеризует качество освещения и закреплён в нормативных документах. Этот показатель позволяет определить, насколько комфортно человеку будет находиться в помещении с проектируемой осветительной установкой.

Важно подчеркнуть, что широко используемые в светотехническом проектировании программы моделирования DIALux (Германия) и Relux (Швейцария) построены на основе метода конечных элементов и решают не уравнение глобального освещения относительно яркости, а уравнение излучательности в диффузном приближении. При этом вторичные блики не учитываются.

Важным шагом вперед в светотехническом проектировании стало появление DIALux evo (Германия), расчетное ядро которой основано на методе фотонных карт. Но метод расчета UGR в нем не изменился. В результате при проектировании освещения дается лишь приблизительная оценка комфортности для человека.

Сегодня в существующих системах автоматизированного проектирования, таких как DIALux и Relux, в UGR входят только сами светильники, для которых не нужно рассчитывать яркость. В связи с этим расчета UGR оказывается недостаточно для полноценной оценки дискомфортных ощущений, вызываемой сценой освещения.

Поэтому в настоящее время активно разрабатываются новые методы оценки качества освещения. Однако развитие сложных методик, основанных на построении новых шкал психовизуальных ощущений, требует больших исследований и будет внедрено в светотехническое программное обеспечение (ПО) еще нескоро, в то время как развитие архитектурных приемов, решений и отделочных материалов рабочих и жилых пространств требует особого внимания к оценке влияния зеркальных бликов на комфортность пребывания в них людей уже сейчас.

В настоящей статье предлагается использовать не реализованный в современных системах проектирования потенциал расчета UGR с помощью определения блеских источников по распределению яркости в программах для 3D-визуализации на примере 3Ds Max.

### Постановка задачи

Основной целью работы является создание программы для более точного расчета показателя дискомфорта UGR по изображению распределения яркости и сравнение результатов работы с расчетом в программе DIALux evo.

В работе предполагается выполнение следующих задач:

- 1) сравнение светотехнических расчетов в DIALux evo и 3Ds Max;
- 2) разработка программы для попиксельного расчета UGR в Matlab;
- 3) проверка метода расчета UGR на реальной ОУ по фотометрическим характеристикам;
- 4) разработка методики уточненного расчета показателя дискомфорта UGR.

### Теория

Что такое зрительный комфорт? Одна из точек зрения состоит в том, что зрительный комфорт – это просто отсутствие зрительного дискомфорта [2]. Зрительный дискомфорт определяется в [3] как неприятные ощущения, характеризующиеся чувством неудобства и напряженности, возникающие в основном в результате наличия в освещаемом пространстве резких различий яркости или неудачного выбора спектра излучения источника света. Также принято разделять зрительный дискомфорт, относящийся к психологическому восприятию, и нарушение зрительных функций или ослепление.

Основные механизмы, которые приводят к восприятию дискомфортной ослепленности, до сих пор мало изучены. Важность оценки ослепленности подчеркивается Международной комиссией по освещению (CIE) в документе под названием «Исследовательская дорожная карта для здорового внутреннего освещения», опубликованном в 2016 году.

Наличие яркости, значительно превышающей среднюю для поля зрения, вызывает дискомфорт и называется бликами. Блескость может проявляться в двух формах: ослепляющая блескость (disability glare) и дискомфортная блескость (discomfort glare) [2].

Ослепляющая блескость – это форма, оказывающая негативное влияние на зрительную работоспособность. Блескость, вызывающая ощущение дискомфорта, называется дискомфортной. Общий негативный эффект влияния ослепляющей засветки на зрительную работоспособность можно рассчитать, поскольку Холладей (1927) на основе тестов видимости вывел формулу, предсказывающую эквивалентную вуалирующую яркость. Её значение зависит от освещённости на глазу ( $E_{eye}$ ) и угла ( $\theta$ ) между направлением взгляда и направлением падения света от источника засветки [2].

С распространением светодиодных технологий особую актуальность приобрела проблема блескости и связанного с ней зрительного дискомфорта. Одним из способов её решения стало внедрение объединенного показателя дискомфорта (UGR) среди множества качественных характеристик освещения.

В настоящее время данный показатель, регламентированный стандартом [6], служит основным критерием оценки качества неспециальных осветительных установок и реализован в большинстве современных системах автоматизированного проектирования осветительных установок.

Несмотря на достаточную эффективность методики расчета обобщенного показателя дискомфорта, в профессиональном сообществе продолжают дискуссии относительно того, насколько он подходит для оценки систем на основе полупроводниковых источников света [7].

Согласно [9], UGR – это критерий оценки дискомфортной блёскости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения.

Разработанный Международной комиссией по освещению (МКО) метод UGR (Unified Glare Rating), представленный в публикациях МКО 1995 и МКО 2010, получил мировое признание и включен во многие международные и национальные нормативные документы [7].

Методика предназначена для количественной оценки дискомфортной блескости, создаваемой светильниками внутреннего освещения, и базируется на расчетной формуле, представленной уравнением (1). CIE объединила лучшие элементы различных методов оценки бликов, использовавшихся на тот момент, в единую формулу. Благодаря этому «методу консенсуса» результат получил название «CIE Unified Glare Rating (UGR)» [7].

$$UGR = 8lg \left[ \frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{p_i^2} \right], \quad (1)$$

где  $L_i$  – яркость блеского источника в направлении наблюдателя, кд/м<sup>2</sup>;

$\omega_i$  – угловой размер блеского источника, стер;

$p_i$  – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения по Гуту;

$L_a$  – средняя яркость поля адаптации наблюдателя, кд/м<sup>2</sup>. Рассчитывается через вертикальную непрямую освещенность на уровне глаз наблюдателя по формуле  $L_b = E_{\text{непрям}}/\pi$ .

Суммирование происходит по всем источникам освещения в поле зрения.

Современный подход к оценке дискомфорта от освещения основан на расчете объединенного показателя дискомфорта UGR, который позволяет прогнозировать ослепляющий эффект осветительных установок на психофизической шкале дискомфорта.

Шкала UGR основана на устаревшей Британской системе индекса ослепления, успешно применявшейся почти 30 лет [2].

Описание зрительных ощущений по шкале UGR приведено в таблице.

**Шкала ощущений UGR**

UGR	Ощущение	Где применяется
$\leq 10$	Блеск отсутствует или незаметен	Высочайшие требования к визуальному комфорту и концентрации внимания: операционные в больницах, прецизионные лаборатории (электроника, часовое дело)
13	Блеск едва заметен	Высококочувствительные задачи (хирургические операции, читальные залы библиотек)
16	Заметный, но не раздражающий блеск	Стандартные офисные помещения, учебные классы. Требуется для большинства рабочих мест с постоянным пребыванием людей
19	Заметный блеск, начинает вызывать дискомфорт	Помещения, где зрительная работа не является основной или постоянной: промышленные цеха (рабочие зоны без постоянной работы с мелкими деталями), столовые, спортивные залы, некоторые зоны розничной торговли
22	Ощутимый дискомфорт	Технические помещения, гаражи, некоторые виды производств, подсобные помещения
25	Сильный дискомфорт	Производственные цеха, склады (где блеск не критичен)
28	Невыносимо	Не рекомендуется для любых рабочих зон

Чем ниже значение UGR, тем меньше дискомфортного блеска и комфортнее освещение. Чем выше UGR, тем сильнее ощущение дискомфорта, напряжения и усталости глаз.

- UGR <10: блики практически незаметны.

- UGR = 28: блики вызывают невыносимый дискомфорт.

Минимально заметная разница в уровне дискомфортного ослепления составляет 1 единицу UGR, а разница в 3 пункта – явно ощутимому.

Меньшая величина показателя UGR соответствует более комфортному освещению. Производители светотехнического оборудования приводят значения UGR для стандартных конфигураций светильников в типовых помещениях, что позволяет проводить сравнительный анализ различных моделей.

Несмотря на широкое применение, метод UGR имеет ряд общепризнанных ограничений:

1. Применимость уровня (1) – корректна только для малоугловых источников с равномерной яркостью и не учитывает протяженные неоднородные блики.
2. Угловые размеры источников – метод действителен в диапазоне 0,0003–0,1 стерadian; за его пределами требуются альтернативные подходы.
3. Условия наблюдения – расчет предполагает расположение наблюдателя у стены прямоугольного помещения с фиксированным направлением взгляда, что не всегда соответствует реальным условиям (например, работа за столом в центре комнаты).

Для очень малых источников света (телесный угол  $< 0.0003$  ср) дискомфорт от бликов зависит от силы света, а не от яркости. В таких случаях система UGR не применяется (CIE 1995). Для них CIE (2002) предлагает формулу на основе силы света.

Для крупных источников (телесный угол  $> 0.1$  ср, например,  $1 \text{ м}^2$  с расстояния 3 м) система не проверена и её использование не рекомендуется [9].

Тем не менее, несмотря на эти ограничения, метод UGR остается практичным решением, доказавшим свою эффективность в большинстве случаев. Для источников света, выходящих за рамки его применимости, в публикации МКО (2002) предложены альтернативные методики оценки [7]. Однако остаются нерешенные вопросы, связанные с методикой UGR.

### Результаты экспериментов

Так как основной целью нашего исследования является разработка методики расчета UGR, которая будет учитывать зеркальные отражения, а также используемое программное обеспечение должно быть доступно и просто в использовании для любого проектировщика, то этим целям удовлетворяет программа 3ds Max от компании Autodesk, которая считается признанным лидером в своей области.

На рисунках 1 и 2 представлены визуализации расчетов освещения разными методами, на которых можно наблюдать значительные отличия в деталях визуализации. При расчете трассировкой лучей на стенах и на полу наблюдаются многократные переотражения. Причем нужно отметить, что весомый вклад в блёскость и визуальный дискомфорт вносят не только первые переотражения, но и вторые. В небольшом стандартном интерьере при наличии зеркальной компоненты отражения поверхностей больше 0,7 яркость первичных отражений может достигать 20 % от яркости источника света, а яркость вторичных переотражений – до 10 % от яркости источника. В то время как в DIALux evo (см. рис. 2) все эти вторичные источники в расчет UGR просто не войдут.

Также на примере шара на рисунке 3 наблюдаем, что при внесении в сцену одного небольшого предмета с поверхностью с зеркальным характером отражения можно получить дополнительные источники блескости как на самом объекте, так и в отражении на полу, что гарантированно повлечет за собой увеличение UGR. Это подчеркивает важность учета зеркальным отражений в сложных сценах освещения.

Для того чтобы посчитать вклад зеркальных бликов в показатель дискомфорта, проведем расчет в 3ds Max и сравним с расчетом для диффузных отражений в DIALux evo. Построим модель помещения с теми же размерами и ies профилями светильников, но вместо диффузного коэффициента отражения устанавливаем коэффициент направленного зеркального отражения на те же уровни, что и DIALux evo.

Программа 3ds Max очень точно рассчитывает распределение яркости и проводит визуализацию, но не предоставляет численные данные о распределении яркости напрямую пользователю. Для того чтобы получить точные численные значения распределения яркости, полученные при рендере освещения сцены, при экспорте данных из 3Ds Max будем использовать технологию High Dynamic Range Imaging (HDRI) – технология, предназначенная для захвата, обработки, хранения и визуализации изображений и видео с динамическим диапазоном, значительно превышающим возможности стандартных форматов (LDR/SDR).

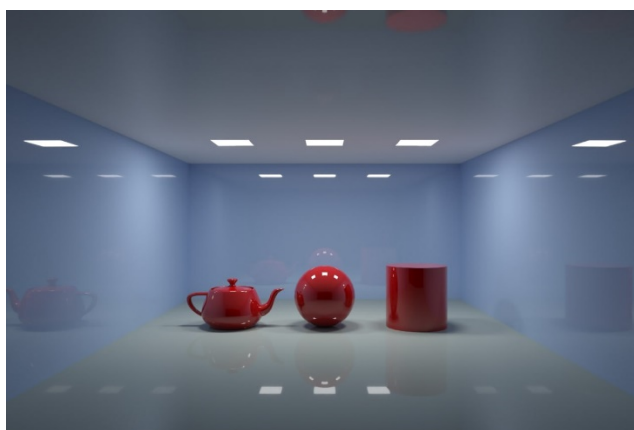


Рисунок 1. Визуализация методом трассировки лучей в 3ds Max



Рисунок 2. Визуализация методом фотонных карт в DIALux evo

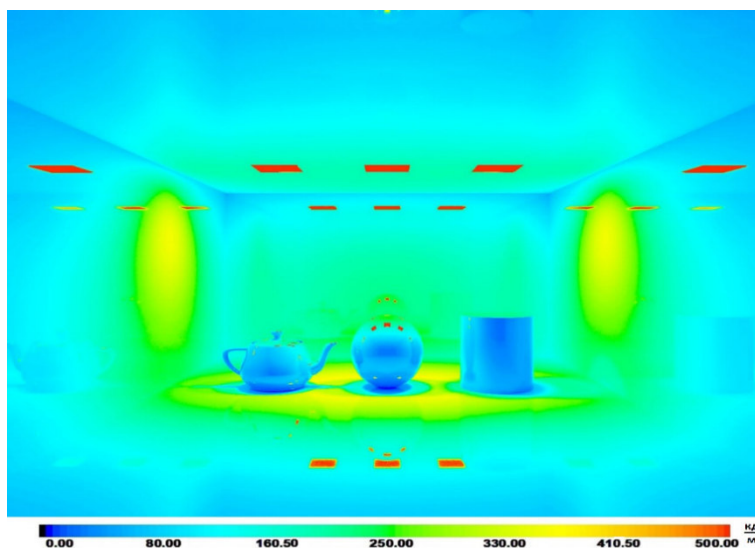


Рисунок 3. Распределение яркости в 3ds Max в псевдоцветах

Для проведения попиксельного расчета по распределениям яркости в качестве среды программирования была выбрана программа Matlab, так как она обладает высокой эффективностью и скоростью расчетов с матричным представлением данных. Именно такими данными и являются HDRI матрицы распределения яркости с большим количеством элементов – пикселей изображения. Также в Matlab есть специальный Image Processing Toolbox – большой набор инструментов для работы с изображениями.

Для чтения EXR файлов в Matlab существует функция `exrread`, однако она доступна в Image Processing Toolbox только начиная с MATLAB R2020b. Так как в исследовании разрабатывается методика, доступная для всех проектировщиков, то она должна работать не только на последней версии ПО. Если версия Matlab устарела, то можно использовать функцию `hdrread` и считывать каждый `hdr` файл, предварительно сохранив их в 3Ds Max по отдельности.

Для расчета UGR необходимо определить индекс позиции Гута для каждого пикселя. Согласно [10], индекс позиции  $p$  рассчитывается по специальной таблице, однако количество значений в таблице недостаточно для работы с изображением, поэтому нужно прибегнуть к интерполяции. Однако данный подход дает очень грубые результаты для большого количества пикселей в изображении. Поэтому было решено обратиться к опыту корейских исследователей. В статье [11] предлагают вычислять индекс позиции по следующей формуле:

$$p = e^{(35.2 - 0.31889 \cdot \alpha - 1.22 \cdot e^{\frac{-2\alpha}{9}}) \cdot 0.001 \cdot \beta + (21 + 0.267 \cdot \alpha - 0.0029663 \cdot \alpha^2) \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между линией зрения и линией, соединяющей наблюдателя с точкой под источником, в градусах;

$\beta$  – угол между линией зрения и линией от наблюдателя к источнику.

Определение углов  $\alpha$  и  $\beta$  в пространстве сцены представлено на рисунке 4. Условно обозначены источник  $S$ , перпендикуляр к горизонту  $H$  и наблюдатель значком глаза.

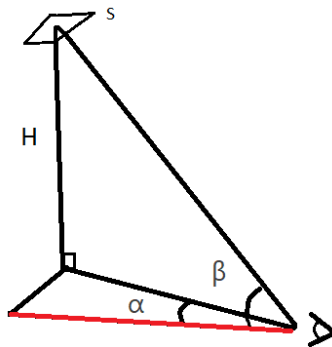


Рисунок 4. Определение углов  $\alpha$  и  $\beta$  для расчета индекса позиции  $p$

Полученная карта значений  $p$  может быть масштабирована для различных угловых размеров изображения. Отметим, что для поля зрения, соответствующего полному человеческому зрению ( $200^\circ \times 120^\circ$ ), распределение значений  $p$  приближается к табличным значениям, что подтверждает справедливость данной формулы.

В результате была получена карта значений  $p$ , представленная на рисунке 5.

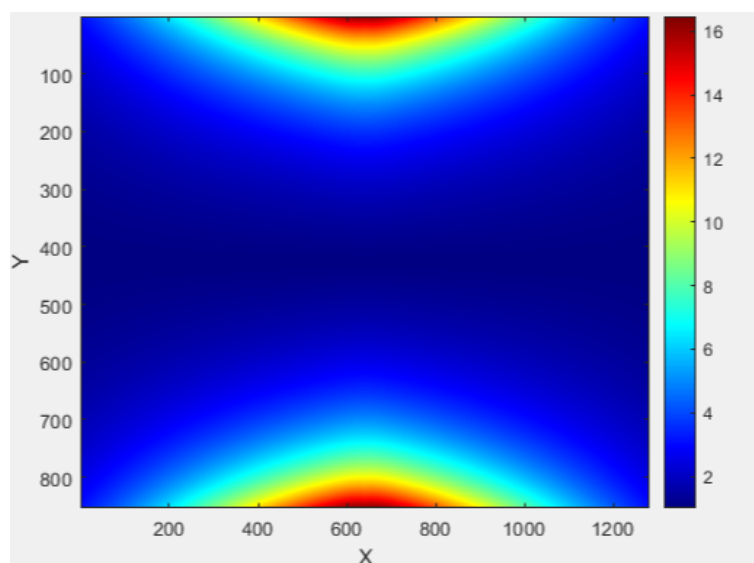


Рисунок 5. Карта значений  $p$  для поля зрения  $200^\circ \times 120^\circ$

По данному распределению наглядно понятен физический смысл индекса позиции. Чем ближе источник к линии зрения, тем меньше значение  $p$  в формуле UGR и тем больше его вклад в дискомфорт.

После вычисления всех необходимых параметров для расчета UGR были рассчитаны вклады всех пикселей в дискомфорт и произведено суммирование по стандартной формуле UGR (1).

Для того чтобы проверить работу методики попиксельного расчета, необходимо сначала определиться, какие пиксели будут являться источниками дискомфорта. Согласно МКО UGR рассчитывается по стандартной формуле только для источников направленного света, то есть формула применима лишь для первичных источников направленного света и вторичных источников, вызванных зеркальными отражениями.

Как же тогда выделить пиксели, которые войдут в расчет UGR? В работе [4] В.С. Желтов предлагает выделить пиксели с яркостью выше некоторого порога. Или выделить пиксели с резким перепадом яркости вокруг. Но этого может быть недостаточно, потому что по полученной визуализации и фотографии уже невозможно определить характер отражения светового пятна на поверхности. Вместо зеркального блестящего источника в расчет могут попасть пиксели с диффузно отраженным светом большой яркости. Помочь в определении природы источника может определение градиента яркости на границах пятна. Но это трудно реализуемая задача, не гарантирующая высокой точности результатов определения. Поэтому мы предлагаем обратиться к продвинутым технологиям 3D-визуализации в КГ [5].

Пакет Corona render дает возможность разделения излучения на каналы в зависимости от пути, по которому свет добрался до камеры.

В 3ds Max (Corona Renderer) каналы рендера Sources, Direct, Reflect и Indirect распределяют свет следующим образом:

1. Sources (свет от источников) – это свет, который напрямую попадает в камеру от заданных первичных фотометрических источников света в сцене, взаимодействуя с поверхностями.
2. Direct (прямой свет) – это свет, который напрямую попадает на объекты из источников освещения (лампы, солнце и т.д.) и отражается диффузно.
3. Reflect (отраженный свет) – это свет, отраженный зеркально (гладкие поверхности, блики). Для полностью диффузных материалов (без зеркальности) этот канал должен быть пустым.
4. Indirect (непрямой, рассеянный свет) – это свет, который отражается рассеянно от других поверхностей при вторичных и многократных отражениях. Для полностью диффузной сцены это основной канал.

В 3D-рендеринге термины Direct, Reflect и Indirect связаны не с тем, что видит камера, а с путем света от источника до камеры.

Для согласования методики расчета с стандартом UGR и для приближения модели к реальной физиологии зрения был предложен новый подход: используя алгоритм кластеризации, выделить области с наиболее резкими перепадами яркости на границе, поскольку глаз реагирует именно на контраст и перепады яркости.

Теперь будем рассматривать каждую яркую область как единый источник с усредненной яркостью и общим телесным углом. Благодаря такому подходу сохраним главное преимущество попиксельного расчета – высокую детализацию при учете блестящих источников.

В качестве алгоритма кластеризации используем функцию в Matlab. Для ее работы нам необходимо определить пороговый контраст источника с фоном, при котором будут детектироваться яркие области.

В случае непрерывного ПУРЯ в сцене освещения контраст является отношением градиента распределения яркости по полю зрения к средней яркости по полю. Обобщенный контраст в точке сцены можно определить с помощью следующего уравнения (3):

$$K(x, y) = \frac{|grad(L(x, y)p(x, y))|}{\bar{L}}, \quad (3)$$

где  $x, y$  – координаты точки на проекции сцены;

$L$  – яркость данной точки в направлении наблюдения;

$\bar{L}$  – средняя яркость по полю зрения;

$p(x, y)$  – функция, учитывающая различный вклад в реакцию в зависимости от расположения в поле зрения.

В уравнении (3)  $\rho$  имеет тот же физический смысл, что и индекс положения в формуле UGR. По данной формуле можно сделать вывод, что теперь изменение яркости по фону будет влиять на градиент яркости. Для того чтобы ограничить порог изменений яркостей, которые не будут играть существенную роль в восприятии качества освещения, в статье [4] исследователи предлагают использование определенного порога, ниже которого контрасты не следует учитывать.

Предполагается, что пороговый контраст будет определяться поставленной визуальной задачей.

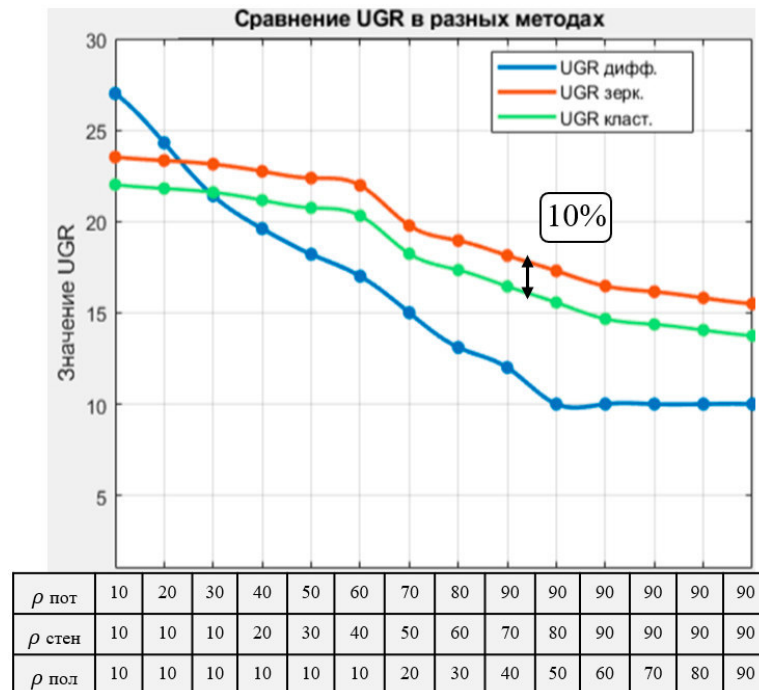


Рисунок 6. Результаты расчетов UGR методами кластеризации и попиксельного расчета

Значения, полученные методом кластеризации, оказались меньше, чем при попиксельном расчете в среднем на 1 единицу по шкале UGR. Средняя разница в процентном соотношении составила примерно 10 % (рис. 6). Это связано с отличиями в расчетных формулах, описанных выше, а также с тем, что мы намеренно не учитывали области с малыми контрастами на границе, которые не вызовут дискомфорт. Также мы избавились от таких нежелательных особенностей работы рендера, как возможность появления шумов и паразитных засветок при низких коэффициентах отражения поверхностей в сцене.

Ожидается, что дальнейшее увеличение яркостей в сцене еще больше увеличит разницу между кластерным и попиксельным расчетом, потому что вклад ложных блеских пикселей при попиксельном расчете будет расти, тогда как точность кластерного расчета не изменится.

Метод кластеризации позволил уточнить значения UGR. Несмотря на то, что процентная разница в результатах между методами не критична для стандартного проектировании освещения, главным преимуществом данной методики является большее приближение данной модели к реальным механизмам зрительного восприятия. Также нужно отметить, что этот алгоритм затрачивает меньше вычислительных ресурсов, поскольку расчет UGR проводится для небольшого количества источников в отличие от принудительного расчета для огромного количества пикселей в попиксельном методе.

С одной стороны, по зависимости для диффузного отражения видна тенденция на уменьшение UGR с ростом коэффициента отражения. Но при появлении зеркальной составляющей отражения в сцене появляются вторичные источники, вносящие вклад в повышение UGR. Эффект двух противоположных тенденции складываются, поэтому в результате получается зависимость, близкая к прямой. Однако снижение UGR за счет малых контрастов при высоких коэффициентах отражения превышает возможную компенсацию от появления вторичных источников, что приводит к итоговой тенденции спада. Соответственно при внесении дополнительных первичных источников света в сцену кривая пройдет еще выше и будет еще больше выпрямляться.



Благодаря данному методу расчета значения показателя UGR были уточнены. В результате исследования можно дать следующие рекомендации архитекторам. Даже при полном отсутствии зеркального отражения при  $\rho < 0,2$  UGR превышает 25, что является недопустимым для большинства типов помещений.

В этом случае, чтобы преодолеть значимый для многих нормативов барьер в  $UGR=20$ , следует использовать материалы с немного большей составляющей диффузного отражения, например покрытых темной матовой краской, с напылением специальных темных порошков и покрытий.

Для приемлемой зоны  $0,3 < \rho < 0,8$  зеркальные блики могут повысить показатель дискомфорта не более чем на один порог ощущений 3-4 единицы. Выбор отделки имеет широкий диапазон допустимых материалов и зависит от типа конкретного помещения и архитектурной концепции.

При высоких коэффициентах отражения  $\rho > 0,8$  зеркальная компонента отражения уже не вносит ощутимого влияния на ощущения. Дискомфортная блескость становится минимальной при высоких коэффициентах отражения. Однако необходимо помнить про возникающую блескость насыщения и ограничивать предельную яркость в поле зрения до  $1000-2000$  кд/м<sup>2</sup> в зависимости от типа помещения.

Для подтверждения расчетов UGR по предлагаемой нами методике был проведен натурный эксперимент в реальном помещении учебной аудитории на кафедре светотехники НИУ «МЭИ».

В помещении были установлены два встраиваемых потолочных светильника  $600 \times 600$  мм с матовым рассеивателем и световым потоком 3800 лм каждый. Использовались диммируемые светильники, чтобы провести измерения при разных световых потоках. Светильники абсолютно новые, не эксплуатируемые ранее. Соответственно они имеют неискаженные заводские параметры.

Таким образом, эксперимент в реальном помещении подтвердил теоретические ожидания о росте UGR при наличии в сцене поверхностей с низким коэффициентом отражения. Метод кластеризации позволил исключить шумы, однако значения все еще остаются выше, чем для 3D-модели. Поэтому можно сделать вывод, что при упрощенном моделировании или при моделировании сложных 3М-сцен нужно учитывать возможное занижение оценки UGR по сравнению с реальной осветительной установкой до 10 %.

В результате исследования была сформирована комплексная методика для расчета UGR с помощью современных технологий КГ, ее можно представить в виде блок-схемы на рисунке 7.



Рисунок 7. Методика расчета, представленная в виде алгоритма

Первый этап – стандартное моделирование. Создается 3D-модель помещения, осуществляется подбор светильников.

Второй этап – использование САПР для получения визуализации с точным яркостным распределением.

Третий этап – программа в Matlab. Расчет UGR методом кластеризации.

Благодаря проектно-ориентированному подходу удалось обеспечить удобное практическое применение методики и ее доступность для проектировщиков ОУ.

## Заключение

В работе были рассмотрены исследования в области оценки дискомфорта освещения, выявлены проблемы и недостатки существующих методов расчета показателя дискомфорта, которые требуют дополнительных исследований. Последние исследования, проводимые в этой области, реализуемы только в случае реальных объектов с уже установленным световым оборудованием. Поэтому одной из задач настоящих исследований было создания метода с возможностью оценки показателя дискомфорта еще на стадии проектирования ОУ.

Анализ расчетов светотехнических параметров в программах DIALux 4.13 и DIALux evo подтвердил, что программы используют стандартный метод расчета UGR, в котором невозможен учет зеркальных бликов от поверхностей.

Также проведен более подробный анализ зависимостей UGR от коэффициентов отражения и даны соответствующие рекомендации проектировщикам и архитекторам для уменьшения показателя зрительного дискомфорта.

Увеличение коэффициентов отражения поверхностей однозначно уменьшает ощущение дискомфорта в помещении, однако необходимо ограничивать значения яркости в пределах определенного допустимого уровня, рассчитываемого для различных областей поля зрения в зависимости от соотношения яркости источников и яркости фоновой адаптации.

Разработана новая методика попиксельного расчета UGR с использованием программ КГ. Технология HDRi, доступная в различных программах для качественной 3D-визуализации, позволила получить точное распределение яркости в сцене освещения с учетом зеркальных отражений. А дополнительный функционал рендера Corona в 3Ds Max сделал возможным разделение распределения яркости в сцене на слои в зависимости от характера прямого и отраженного света. Это позволило выделить только источники направленного света и учесть их в дальнейшем расчете UGR.

Разработана программа в Matlab для попиксельного расчета UGR, суммирующая вклад блеских пикселей в общий UGR для всей сцены. В программе введены дополнительные уточнения, связанные с особенностями физиологии зрения. Широкое поле видения, соответствующее человеческому, корректировка формулы UGR для малых источников для изображений с большим разрешением.

Также предложен улучшенный алгоритм расчета с кластеризацией, который лучше согласовывался с механизмом восприятия блескости. Так как глаз реагирует на яркое пятно целиком, поэтому теперь программа выделяет точные области пикселей, соответствующие блеским источникам, а не единичные пиксели. Результаты расчетов UGR в простой сцене освещения показали уменьшение значений UGR на 10 % по сравнению с попиксельным расчетом. В более сложных сценах освещения с наличием зеркальных бликов и более высокими уровнями яркости ожидается еще большее расхождение значений. Таким образом, удалось избежать вклада ложных пикселей в дискомфорт и повысить точность результатов расчета.

В результате работы была сформирована методика уточненного расчета UGR с помощью программ компьютерной графики, позволяющая работать как с распределениями яркости реальных объектов, так и с моделью ОУ еще на стадии проектирования.

Однако проблема учета неравномерного распределения яркости у блеских источников при расчете UGR требует дальнейших исследований. Уточнение критериев кластеризации также нуждается в дополнительном изучении. Перспективой дальнейшего развития в данной области является подключение к методике нейросетей для прогнозирования значения UGR.

## Список литературы

1. Справочная книга по светотехнике: учебное пособие для обучающихся по образовательным программам высшего образования уровня бакалавриат и магистратура по направлению «Электроника и микроэлектроника» / Редакция журн. «Светотехника»; общ. ред. Ю.Б. Айзенберг, Г.В. Боос; науч. ред. С.Г. Ашурков, Л.П. Варфоломеев. 4-е изд., полностью перераб. и доп. Москва: [б.и.], 2019. 892 с.
2. Boyce P.R. Human Factors in Lighting 3rd Edition / CRC Press. 2014.
3. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч.2: учебное пособие для вузов по специальности «Светотехника и источники света». 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат 1989. 431 с.
4. Расчет UGR на основе пространственно-углового распределения яркости / В.С. Желтов, В.Д. Чембаев // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2019. № 4(06)

- 
5. Будаков В.П., Макаров Д.Н. Компьютерная графика с приложением в светодизайн: учебник для высших учебных заведений. Москва: Редакция журн. «Светотехника», 2022. 264 с.
  6. ГОСТ 33392-2015. Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений.
  7. Дискомфорт, обусловленный блескостью светильников с источниками света неравномерной яркости / Питер Торнс // Современная светотехника. 2020. № 5.
  8. Wout van Bommel. Interior Lighting. Fundamentals, Technology and Application // Nuenen, The Netherlands. Springer Nature Switzerland. 2019.
  9. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение.
  10. ГОСТ 55710-2013. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы контроля.
  11. Kim W., Kim. J. T. A Formula of the Position Index of a Glare Source in the Visual Field// Indoor and Built Environment. 2010. T. 20, вып. 1. P. 47-53.