

Разработка методики ускоренного проектирования освещения горнолыжных трасс

С.А. АЛЕКСАНДРОВ

ООО «Спектор Лаб», Москва

E-mail: alexandrov@spector-lab.com

Аннотация

Статья посвящена созданию методики ускоренного проектирования освещения горнолыжных трасс для проведения соревнований с телевизионной трансляцией.

Ключевые слова: спортивное освещение, горнолыжная трасса, телевизионная трансляция, методика проектирования, отражённая блёскость.

Введение

В настоящее время как в России, так и за рубежом активно развиваются зимние виды спорта, появляются новые современные трассы, проводятся соревнования международного уровня с телевизионной трансляцией. Таким образом, появляется спрос на качественное спортивное освещение горнолыжных склонов, которое удовлетворяло бы стандартам освещения для телевидения высокой чёткости (*HDTV*).

Если рассматривать горнолыжные склоны с точки зрения проектирования освещения, то, прежде всего, они отличаются от многих других спортивных объектов своей сложной объёмной структурой, в которой расчётная поверхность не только находится под углом к горизонту, но и зачастую представляет собой сложную фигуру с множеством граней.

Существенное значение имеют отражающие свойства освещаемой поверхности – снежного покрова, имеющего высокие коэффициенты отражения (от 60 до 95 % для разных состояний снега) [1, 2]. Учёт отражённой составляющей вертикальной освещённости позволяет значительно сокращать количество ОП. Кроме того, снег обладает выраженным эффектом зеркального отражения, что может оказывать слепящее действие на спортсменов.

Проведённый автором анализ современных светотехнических компью-

терных программ показал, что ни одна из них не имеет полного функционала для расчёта освещения горнолыжных трасс. С оговорками для этого применима только программа «*DIALux*», т.к. она позволяет рассчитывать как прямую, так и отражённую компоненты освещения наклонных расчётных плоскостей. Однако существует несколько серьёзных ограничений использования этой программы. Во-первых, в ней невозможно построить сплошную трассу сложной формы, и расчёт приходится проводить на наборе плоских фрагментов, что значительно снижает точность и усложняет оценку результатов, т.к. для каждого фрагмента они выводятся на отдельный лист. Во-вторых, «*DIALux*» не позволяет рассчитывать для наклонных поверхностей показатель ослеплённости – один из важнейших показателей качества в спортивном освещении. Никак не учитывается и отражённая блёскость. Наконец, расчёт сложных сцен с большим количеством ОП слишком долгов (для крупных трасс это десятки минут), не позволяет проектировщику оперативно отслеживать результат внесённых им изменений. В то же время, специфика расчёта спортивного прожекторного освещения такова, что для достижения хорошей равномерности освещения в нескольких направлениях необходимо производить многократные итерации по изменению углов нацеливания и типов светораспределения каждого из нескольких сотен прожекторов, поэтому процесс проектирования освещения одной трассы может занимать несколько недель.

Помимо указанных недостатков программного обеспечения наблюдается явная нехватка методического материала по проектированию освещения таких сложных объектов. Как в отечественной, так и в зарубежной литературе присутствуют только общие рекомендации по спортивному

освещению, в которых горнолыжным трассам уделяется всего несколько строк, и то, как правило, не учитываются особенности освещения для телевизионных трансляций.

Целью данной работы была разработка методики проектирования ОУ для соревнований с ТВ-трансляцией, создающих высокое качество освещения горнолыжных склонов с минимальными затратами времени на проектирование. Для достижения цели следовало разработать программу, позволяющую учитывать особенности освещаемых объектов, расширяющую возможности проектировщика и служащую основой для создания указанной методики.

Методика проектирования

Приступая к проектированию ОУ, в первую очередь необходимо определиться с требованиями к освещению. В нашей стране применительно к данным объектам действуют ведомственные нормы [3] (нормирование освещения для съёмок проводилось дополнительно перед Олимпиадой 1980 года [4]), а в европейских странах – стандарт [5], известны и соответствующие рекомендации МКО [6]. При этом задание на освещение конкретного объекта обычно формирует заказчик совместно с представителями спортивной федерации и организацией-исполнителем съёмок и трансляции соревнований.

Следующий шаг – определение возможных мест установки световых приборов. Для освещения горнолыжных трасс применяется классическая «верхне-боковая» схема освещения, характерная для многих других спортивных сооружений. Батареи прожекторов устанавливаются на опорах, расположенных по обеим сторонам трассы. Что касается высоты и шага опор, то данный параметр целиком и полностью определяется геометрией трассы, а именно её шириной и углом наклона. Учитывая высокую стоимость как самих опор, так и их монтажа в условиях горной местности, при проектировании закладываются минимально возможные высота и количество опор. Этот минимум ограничивается требованиями по исключению повышенного слепящего действия и необходимостью создания равномерного освещения поверхности снега. Исходя из ширины трассы, максимальный угол

подъёма прожектора, нацеленного на её противоположную сторону, при котором слепящее действие будет в допустимых пределах, определяет высоту опоры. Как правило, этот угол должен составлять не более 70° от вертикали. Сама опора при этом должна отступать от трассы так, чтобы угол между вертикалью и направлением от батареи прожекторов к ближней границе трассы составлял не менее 30° , в противном случае не удаётся создать необходимую вертикальную освещённость в ближней к опоре зоне. Таким образом, мы имеем достаточно узкий

диапазон геометрических параметров, в который должна попадать установленная на опоре батарея прожекторов.

Далее аналогичным способом определяется шаг опор – за основу берётся максимальный угол, под которым прожектор можно нацелить вверх или вниз относительно плоскости трассы, т.е., как правило, те же 70° . Поскольку сама плоскость трассы, линии нацеливания камер и линии зрения наблюдателей наклонены к горизонту, углы нацеливания откладываются не от вертикали, а от перпендикуляра к поверхности трассы в месте установки

светового прибора. Шаг опор должен быть таким, чтобы световое пятно от опоры совмещалось со световыми пятнами от соседних опор, без образования тёмных провалов. Понятно, что при увеличении угла наклона трассы шаг опор в горизонтальной проекции будет уменьшаться, но в проекции на поверхность трассы при любом угле наклона шаг останется неизменным. Исходя из практики, для создания равномерного освещения шаг опор в проекции на плоскость трассы не должен превышать 1,6 длины перпендикуляра, опущенного от батареи прожекторов на плоскость трассы. Это соотношение подлежит уточнению для каждой конкретной трассы при проведении светотехнических расчётов.

После определения геометрических параметров осветительной установки дальнейшее проектирование осуществляется в светотехнической расчётной программе. Основные этапы проектирования следующие:

- Задание расчётных плоскостей и отражающей поверхности.
- Размещение телевизионных камер.
- Выбор и размещение ОП.
- Первичное нацеливание, корректировка количества.
- Оптимизация параметров ОУ.

Оптимизацией называется процесс подбора углов нацеливания и светораспределения прожекторов для достижения требуемых параметров, и этот пункт занимает основную часть времени проектирования.

Автором предлагается соответствующий алгоритм проектирования, представленный на рис. 1.

Дальнейшее рассмотрение данного алгоритма будет производиться на примере его реализации в созданной автором экспериментальной расчётной программе. Она имеет следующие возможности: отображение сцены в графическом окне с навигацией, загрузка в проект КСС ОП в форматах *ies* и *ldt*, табличное представление используемых в сцене ОП и их характеристик, задание координат телекамер в соответствующей таблице, расчёт освещённости как в плоскости трассы, так и на заданной высоте по направлению к камерам, расчёт слепящего действия на наклонных поверхностях, отображение рассчитанных значений освещённости в графическом окне рядом с расчётными точками.

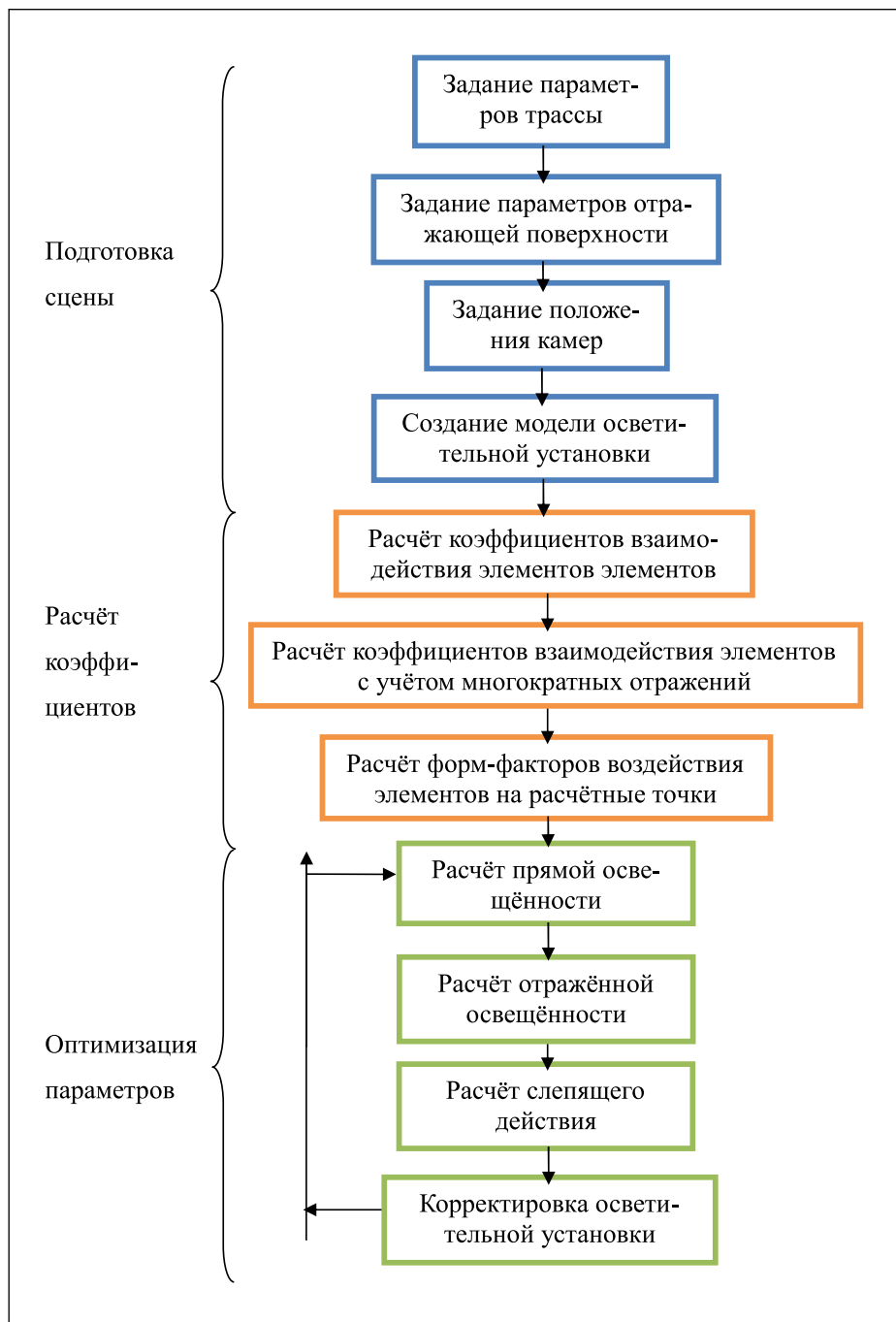


Рис. 1. Алгоритм светотехнического проектирования горнолыжной трассы

Построение трассы и склона

Поскольку горнолыжная трасса в плане чаще всего представляет собой сложную ломаную фигуру, для её построения применяется графический метод с использованием плана сооружения. Данный план, который выдают разработчики спортивной технологии, служит заданием для проектирования инженерных систем. На нём изображена трасса с проходящими по ней изогипсами (линиями равных высот). Используя данный план как подложку, пользователь отмечает на экране опорные точки с известными высотами на границах трассы. После завершения этого процесса программа автоматически распределяет по поверхности трассы расчётные точки для освещённости и показателя ослеплённости с заданным шагом (рис. 2). Аналогичным образом задаётся отражающая поверхность, которая может быть больше трассы, после чего она автоматически разбивается на элементарные треугольные плоскости заданного максимального размера (рис. 3).

Расчёт показателя ослеплённости

Для установок наружного спортивного освещения и освещения открытых площадок слепящее действие определяется согласно публикации МКО 112–1994 [7]. Данный метод разработан на обширной экспериментальной базе и доказал свою применимость в различных осветительных установках.

Исследования показали, что следующие два параметра наилучшим образом соотносятся с оценкой слепимости для наружных установок:

L_{vl} – вуалирующая яркость, создаваемая ОП,

L_{ve} – вуалирующая яркость, создаваемая окружением.

Слепящее действие может быть различным для различных точек расположения наблюдателя и для различных направлений его взгляда. Следующая формула определяет эквивалентную вуалирующую яркость L_v (в кд/м²):

$$L_v = 10 \sum_{i=1}^n (E_{eyei} / \Theta_i^2), \quad (1)$$

где E_{eyei} – освещённость глаза наблюдателя в плоскости, перпендикулярной

Рис. 2. Трасса с расчётными точками и поверхность склона

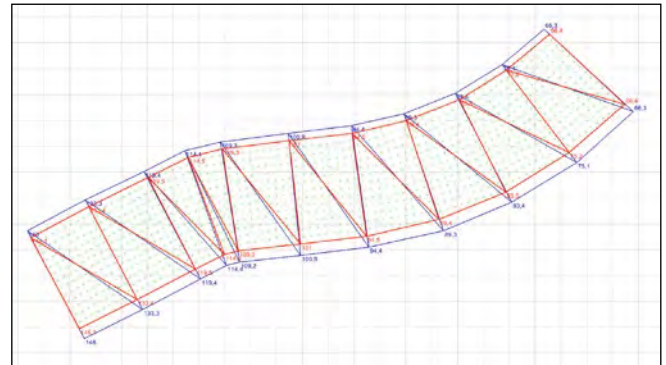
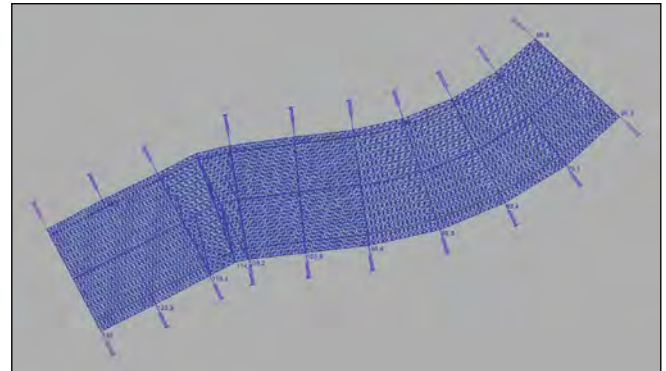


Рис. 3. Разбитый на элементы склон на фоне подложки



линии зрения, создаваемая i -м источником света, лк;

Θ_i – угол между линией зрения наблюдателя и направлением от глаза к i -му источнику света, градусы ($1,5^\circ < \Theta_i < 60^\circ$);

n – общее количество источников света.

Для расчёта L_{ve} , освещённая территория представляется в виде бесконечного количества малых источников света. Условие $\Theta > 1,5^\circ$ для L_{vl} будет автоматически выполняться при направлении взгляда наблюдателя не выше 2° от горизонта. Для L_{ve} это ограничение означает, что часть освещённой территории, попадающая в центр поля зрения в пределах угла $2 \times 1,5^\circ$, не будет браться в расчёт.

Величина GR (*Glare Rating*), характеризующая слепящее действие, рассчитывается по формуле:

$$GR = 27 + 24 \cdot \lg(L_{vl} / L_{ve}^{0,9}).$$

Чем ниже значение GR , тем меньше слепимость и лучше условия наблюдения.

Расчёт слепящего действия производится в точках, равномерно распределённых по всей трассе, шаг этих точек может быть меньше, чем шаг точек для расчёта освещённости. Исходя из формулы (1), важным параметром является направление линии зрения наблюдателя. При этом, как в отече-

ственных, так и в зарубежных нормах нет указаний – какое именно направление нужно выбирать для спортсмена или зрителя на горнолыжном склоне. Понятно, что при взгляде прямо на прожекторную батарею, показатель ослеплённости будет неприемлемо большим даже в правильно спроектированной осветительной установке, поэтому для получения практически полезных данных направление взгляда наблюдателя необходимо ограничивать. При расчётах плоскостных спортивных сооружений линия зрения наблюдателя по высоте ограничивается углом 2° вниз от горизонта, считая положение глаза – на высоте 1,5 м от уровня спортивной площадки. По азимуту рассматриваются все направления с шагом 15° .

Возвращаясь к горнолыжным склонам, можно с уверенностью сказать, что как для спортсмена, так и для зрителя, линия зрения в большинстве случаев будет направлена вдоль трассы, т.к. спортсмен будет смотреть на трассу, а зритель на спортсмена. В 2013 году, во время проведения чемпионата мира по фристайлу среди юниоров в г. Сочи, автор данной работы производил опрос соревнующихся спортсменов на тему слепящего действия во время выполнения прыжка с трамплина в дисциплине «лыжная акробатика». Опрос показал, что при подкате к трамплину спортсмен

Рис. 4. Направления линии зрения наблюдателя на наклонном участке трассы

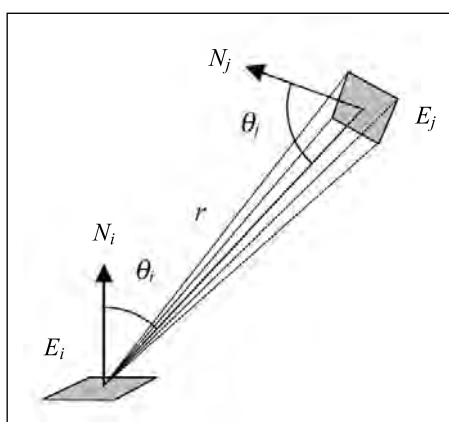
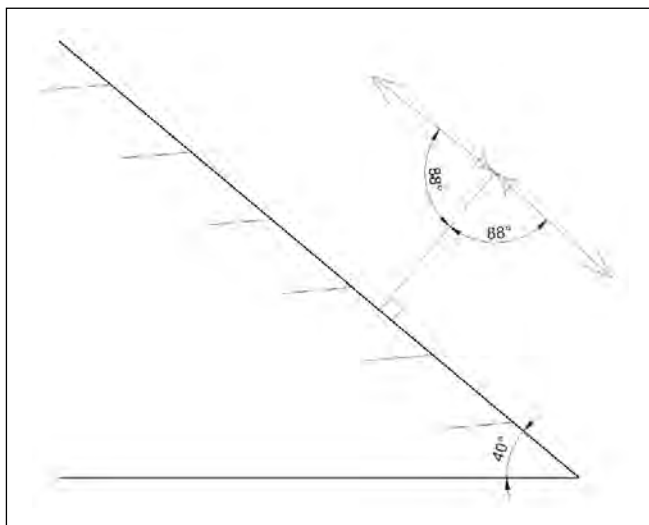


Рис. 5. Геометрия взаимодействия двух элементов

смотрит практически себе под ноги, а во время прыжка прожекторное освещение, выполненное по верхне-боковой схеме, не мешает ему концентрироваться и контролировать свои действия.

Таким образом, для практического применения можно взять угол 2° ниже плоскости трассы, при этом вращение линии зрения по азимуту будет производиться не в горизонтальной плоскости, а в плоскости данного участка трассы, которая может быть наклонена к горизонту (рис. 4).

Алгоритм экспресс-расчёта

Первая отличительная особенность метода экспресс-расчёта – сохранение постоянных, однократно рассчитанных, параметров в памяти и пересчёт влияния на распределение освещённости только текущих изменений в положении и нацеливании конкретного прибора.

Расчёт прямой освещённости трассы (её поверхности и вертикальной по

направлению к камере) и снега производится по закону квадратов расстояний при изменении параметров одного из прожекторов (нацеливание, расположение, тип, количество). В основу метода положен тот факт, что каждый из прожекторов в сцене вносит свой вклад в освещённость каждой расчётной точки. Для каждого прожектора в сцене этот вклад считается и хранится отдельно. При внесении изменений в какой-либо прожектор сначала из освещённости каждой расчётной точки или элемента снега вычитается рассчитанный ранее вклад этого прожектора, затем вычисляется и прибавляется новый.

Вторая идея экономии времени заключается в том, что расчёты коэффициентов (форм-факторов) однократно и многократного взаимодействия элементов, а также коэффициентов, связывающих освещённость расчётных точек с освещённостью элементов снега, вынесены из расчёта отражённого света и производятся только один раз после создания геометрии сцены. В связи с этим процесс экспресс-расчёта можно разделить на две основные стадии: начальную стадию, на которой однократно рассчитываются и сохраняются в памяти все коэффициенты и стадию оптимизации, при которой создаются, удаляются или изменяются отдельные ОП. При этом принимается, что геометрия трассы постоянна, задаётся один раз и её изменение влечёт за собой повторное проведение начальной стадии с пересчётом всех коэффициентов.

Коэффициент взаимодействия элемента i с элементом j (рис. 5) рассчитывается по закону квадратов расстояний:

$$k_{i-j} = \frac{E_j}{E_i} = \frac{\rho \cdot S_i \cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{\pi \cdot r^2},$$

где E_i – освещённость элемента i , полученная им от прожекторов;

E_j – освещённость элемента j , полученная им в результате отражения света от элемента i ;

ρ – коэффициент отражения элемента i ;

S_i – площадь элемента i ;

θ_i – угол излучения света в направлении элемента j относительно нормали к поверхности элемента i ;

θ_j – угол падения света на элемент j относительно нормали к его поверхности;

r – расстояние между центрами элементов.

Аналогичным образом рассчитываются и сохраняются в памяти коэффициенты, связывающие освещённость данного элемента отражающей поверхности и данной расчётной точки трассы. Далее в процессе оптимизации рассчитанные значения освещённости снега будут просто перемножаться на сохранённые коэффициенты. Расчёт коэффициентов производится по приведённой выше формуле, где вместо элемента j выступает расчётная точка на плоскости.

Для расчёта коэффициентов взаимодействия элементов с учётом многократных отражений в цикле моделируется проход луча от одного элемента к другому через все возможные варианты (для двух переотражений проход через один промежуточный элемент, для трёх через два промежуточных элемента и т.д.). В итоге формула для учёта вклада в освещённость n -й итерации выглядит как

$$E_j = E_i \cdot \sum_{p1, p2, \dots, pn} (k_{i-p1} \cdot k_{p1-p2} \cdot \dots \cdot k_{pn-j}),$$

где в качестве промежуточных элементов $p1, p2, \dots, pn$ последовательно перебираются все элементы сцены.

Для получения итоговой отражённой составляющей освещённости элемента j необходимо сложить вклады от всех учтённых в расчёте итераций.

Известно, что при увеличении отношения размера элемента к расстоянию до него закон квадратов расстояний даёт значительную погрешность. Математическое моделирование на базе созданной расчётной программы

показало, что для двух смежных треугольников погрешность расчёта освещённости центра масс одного треугольника отражённым от другого треугольника светом составляет 60 %, независимо от угла между ними. Несмотря на значительную погрешность, необходимо учитывать, что на освещённость элемента снега оказывает влияние не только смежный с ним элемент, но и множество более удалённых элементов, а основную часть освещённости создаёт прямой свет от прожекторов. Кроме того, освещённость снега является лишь промежуточным звеном в цепи расчётов. Чтобы выявить реальное влияние данной погрешности, было принято решение рассмотреть в качестве альтернативы расчёт коэффициентов взаимодействия по аналогии Нусселтса [8], имеющей аналитически точное значение. Аналогия Нусселтса заключается в том, что форм-фактор грани относительно точки есть проекция вектора телесного угла грани на расчётную плоскость, что аналогично проекции части полусферы единичного радиуса на плоскость её основания.

Математическое моделирование с расчётом вертикальной освещённости на участках реальных трасс показало, что погрешность расчёта освещённости при использовании аналогии Нусселтса становится существенно ниже погрешности при использовании закона квадратов расстояний только при больших размерах элементов, когда сама величина погрешности доходит до десяти и более процентов (рис. 6). Вместе с тем расчёт коэффициентов по аналогии Нусселтса занимает примерно в два раза больше времени. Исходя из этого, более целесообразно использовать закон квадратов расстояний.

Также в рамках описанного выше математического моделирования в экспериментальной расчётной программе была проведена серия расчётов с различными параметрами для двух типов трасс – участок прямой трассы с изломом в 37° и участок трассы хаф-пайпа, которая представляет собой половину трубы. Целью было определение максимальных размеров элементов, при которых погрешность не выходит за установленные пределы. Из полученных результатов сделаны следующие выводы: до размера элемента 1,5 м на прямой трассе и до 1,25 м на трассе хаф-пайпа погрешность не

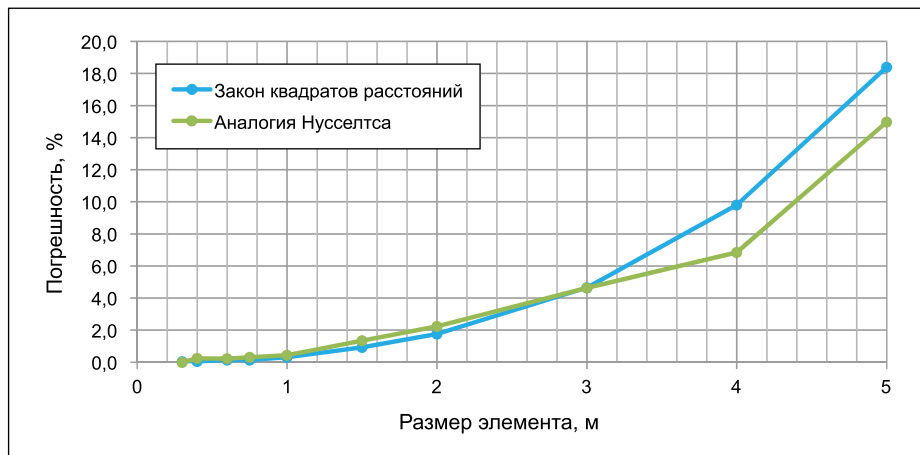
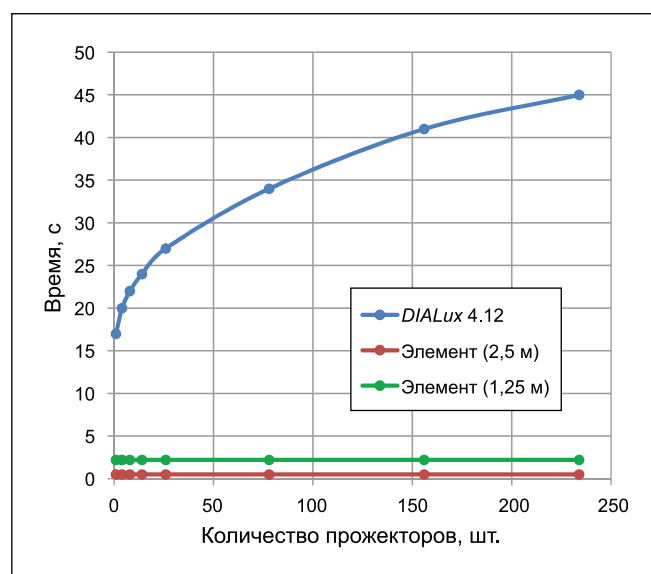


Рис. 6. Зависимость погрешности от размера элемента

Рис. 7. Сравнение по времени расчёта



превышает 1 %, при размере элемента до 3 м на прямой трассе и до 2,5 м на трассе хаф-пайпа погрешность не превышает 5 %.

Поскольку скорость расчёта коэффициентов в предложенном методе критически зависит от количества учитываемых итераций многократных отражений, следующей задачей было выяснить минимальное число итераций, которое будет достаточным для данного типа объектов. При помощи математического моделирования удалось выяснить, что для участка трассы хаф-пайпа вклад 3-й и далее итераций в вертикальную освещённость не превышает десятой доли процента и, соответственно, их можно не учитывать в расчёте. Для участка прямого склона с изломом в 37° вклад 2-й и дальнейших итераций не превышает десятых долей процента. Также, вклад 2-й итерации в хаф-пайпе не превышает 1 %, а вклад 1-й итерации на прямых трассах – 3 %. Учёт столь небольших зна-

чений можно оставить на усмотрение проектировщика.

Проверка точности и скорости расчёта

После разработки и реализации в экспериментальной расчётной программе описанного выше алгоритма экспресс-расчёта он был проверен на точность расчёта двумя разными способами. Первый – это решение задачи Соболева [9], которая представляет собой расчёт освещённости от точечного источника, расположенного между двух бесконечных параллельных плоскостей, и имеет точное аналитическое решение. Вторым – сравнение с программой «DIALux» на тестовом участке трассы. Сравнение данных, полученных в программе экспресс-расчёта, с аналитическим решением задачи Соболева и выходными данными из программы «DIALux» показало хорошую сходимость результатов.

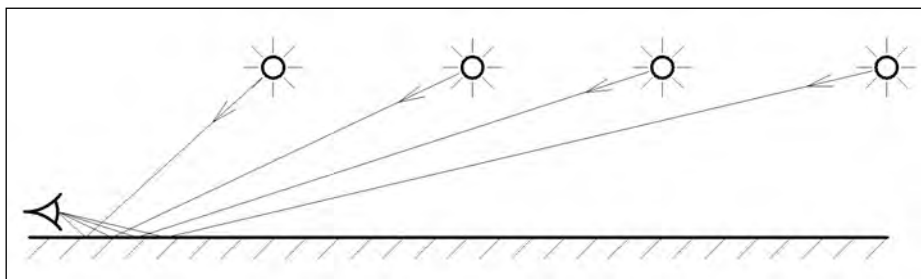


Рис. 8. Схема нацеливания и перемещения прожектора

Рис. 9. Сравнение по вуалирующей яркости (в кд/м²) при узкой КСС прожектора

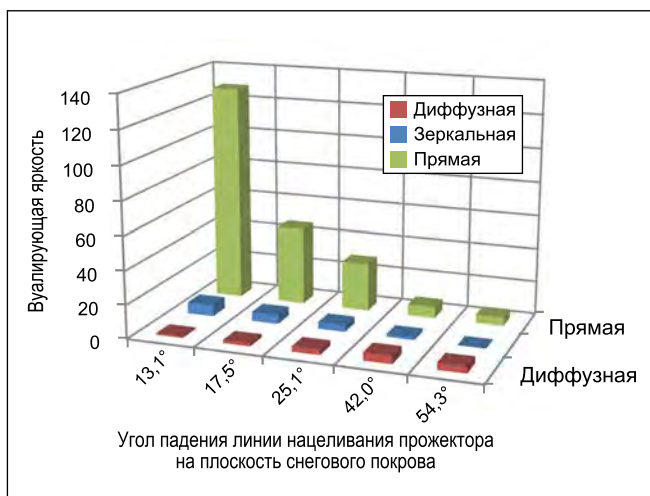
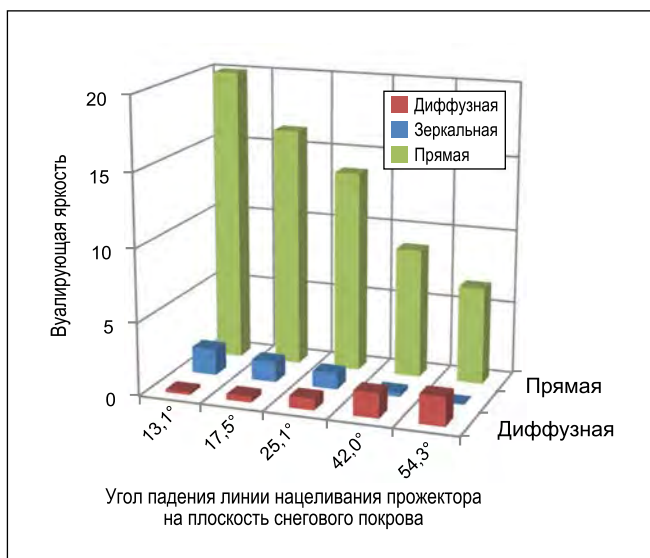


Рис. 10. Сравнение по вуалирующей яркости (в кд/м²) при широкой КСС прожектора



Кроме того, было проведено сравнение по времени расчёта с программой «DIALux». Как уже было сказано выше, для расчёта спортивного освещения важно, чтобы пересчёт сцены после внесения в неё изменений производился «в режиме реального времени», т.е. не более чем за несколько секунд. Сравнение проводилось на тестовой трассе для двух вариантов размера элементов – 1,25 и 2,5 м. Была учтена 1 итерация, расчёт коэффициентов взаимодействия занял соответственно 123 и 25 с. Результаты

сравнения в зависимости от количества прожекторов в сцене, приведены на рис. 7.

Из приведённого графика видно, что при проведении оптимизации решения, когда последовательно изменяются настройки только одного из всех участвующих в сцене ОП, программа экспресс-расчёта позволяет обчитывать эти изменения в разы быстрее, чем программа «DIALux». В данной сцене для одного прожектора разница составляет от 8 до 34 раз, в зависимости от выбранного разме-

ра элемента. При увеличении количества прожекторов, эта разница возрастает многократно и составляет от 20 до 90 раз.

Отражённая блёскость

Для оценки слепящего действия от зеркальной составляющей отражения снега было проведено математическое моделирование на основе имеющихся литературных данных по зеркальному отражению снега с ледяной коркой (настом) [10]. В программе была создана сцена с прямым участком трассы. Наблюдатель располагался в середине торцевой стороны данного участка, а прожектор, расположенный на продольной оси трассы, перемещался вдоль этой оси (рис. 8).

Световая ось прожектора наклонялась в вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось трассы, таким образом, чтобы отражённый луч попадал в глаз наблюдателя, т.е. был выбран наихудший с точки зрения ослеплённости случай. Линия зрения наблюдателя оставалась неизменной и, согласно существующей методике расчёта GR, составляла – 2° от горизонта. К сожалению, данная методика не позволяет учитывать яркие распределённые пятна. Поэтому для оценки влияния отражённой блёскости было принято решение сравнить между собой вуалирующие яркости для прямой от прожектора, диффузной от снега и зеркальной от снега составляющих освещённости. Полученные результаты для двух типов КСС представлены на рис. 9 и 10.

Они наглядно демонстрируют, что прямая составляющая создаёт значительно большую вуалирующую яркость, нежели зеркально отражённая, следовательно вклад последней в слепящее действие не будет определяющим.

Заключение

Разработанный метод позволяет производить качественные расчёты освещения горнолыжных склонов с учётом отражённого света, при этом форма трассы максимально приближена к её реальной форме, а скорость расчёта позволяет выводить результаты в течение нескольких секунд. Выявленные оптимальные исходные данные для расчёта, а именно число многократных отражений и размеры

элементов разбиения, позволяют проектировщику оптимизировать временные затраты на проектирование.

Проведённое математическое моделирование показало, что отражённая блёскость от снега сравнительно мала. Сам по себе вопрос о влиянии ярких распределённых пятен на слепящее действие остаётся открытым, но в практическом отношении при расчёте горнолыжных трасс, эффектом зеркального отражения снега можно пренебречь.

Созданный экспериментальный расчётный модуль обладает всем необходимым функционалом для расчёта горнолыжных трасс и, после небольшой доработки, может быть использован в качестве полноценной расчётной программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюнин А.К. В царстве снега. – Новосибирск: Наука, СО, 1983.
2. Таблицы для расчёта природной освещённости и видимости. – Изд-во АН СССР, 1945.
3. ВСН-1–73/Спорткомитет СССР «Нормы электрического освещения спортивных сооружений».
4. Мутин А.И., Царьков В.М., Шахнаруняц Г.Р., Ключев С.А. Критерии освещения стадионов при передачах цветного телевидения и методы их обеспечения при проектировании путём расчёта на ЭВМ // Светотехника. – 1979. – № 9. – С. 2–5.
5. EN12193: 1999 «Sports Lighting».
6. CIE169: 2005 «Practical Design Guidelines for the Lighting of Sport Events for Colour Television and Filming».
7. CIE112: 1994 «Glare evaluation system for use within outdoor sports and area lighting».
8. Ashdown I. Radiosity: A Programmer's perspective. – NY: John Wiley & Sons, 1994.
9. Соболев В.В. Точечный источник света между параллельными плоскостями // ДАН СССР. – 1944. – Т. 42, № 4. – С. 176–177.
10. Dirmhirn I., Eaton F.D. Some Characteristics of the Albedo of Snow. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<0375:SCOTAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<0375:SCOTAO>2.0.CO;2) (дата обращения: 02.2018).



Александр Сергей Александрович, магистр.
Окончил в 2003 г. МЭИ. Технический директор ООО «Спектор Лаб»

В этом узкополосном приёмнике УФ излучения используются нанокристаллы In_2O_3 , внедрённые в тонкую плёнку Al_2O_3 . Полупроводниковые квантовые точки (нанокристаллы размером всего в несколько нм) привлекли внимание исследователей благодаря тому, что размер точек влияет на их электрические и оптические характеристики. Изменяя размер таких объектов, можно регулировать длину волны поглощаемого им излучения, тем самым реализуя селективный фотоприёмник, в том числе и для приёма УФ излучения.

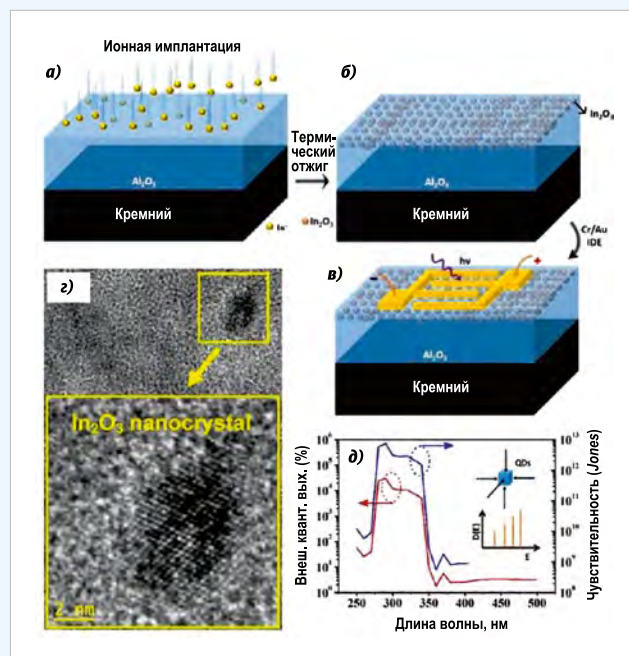
Узкополосные приёмники УФ излучения могут использоваться во многих областях применения, в частности в биологии и медицине, где они используются в флуоресцентной детекции и УФ фототерапии. Обычно для изготовления таких фотоприёмников используются оксиды и нитриды с широкими запрещёнными зонами, обеспечивающие большой диапазон рабочих температур и высокую прозрачность для видимого и солнечного излучения при малых размерах приборов.

Теперь же российские и индийские учёные разработали узкополосный приёмник УФ излучения на основе нанокристаллов In_2O_3 , внедрённых в тонкую плёнку Al_2O_3 . «В ходе нашей работы, нам удалось добиться существенного уменьшения темнового тока (более чем вдвое по сравнению с аналогичным фотоприёмником на основе нанопроволоки из In_2O_3). Благодаря внедрению In_2O_3 в широкополосную матрицу и низкому значению темнового тока новый фотоприёмник демонстрирует рекордные значения чувствительности и внешнего квантового выхода», – сказал Алексей Михайлов, руководитель лаборатории Научно-исследовательского физико-технического института Нижегородского государственного университета им. Лобачевского.

In_2O_3 представляет собой прозрачный полупроводниковый оксид, имеющий запрещённую зону шириной примерно 3,6 эВ с прямыми переходами и запрещённую зону шириной примерно 2,5 эВ с непрямыми переходами. Хорошо известно, что высокочувствительные приёмники УФ излучения могут быть созданы на основе In_2O_3 . По словам Михайлова, российским учёным и их индийским коллегам удалось посредством имплантации ионов индия синтезировать нанокристаллы In_2O_3 в плёнке Al_2O_3 на силиконовой подложке.

Ионная имплантация является основным методом современной электронной технологии, позволяющим контролировать размеры примесей и, тем самым, управлять оптическими характеристиками фотоприёмников. Используемая для внедрения нанокристаллов In_2O_3 матрица из Al_2O_3 имеет некоторые преимущества перед другими диэлектриками, т.к. этот материал с широкой запрещённой зоной (8,9 эВ) прозрачен в широком диапазоне длин волн.

На приведённой выше схеме показаны процесс изготовления фотоприёмника на основе плёнки Al_2O_3 с синтезированными потоком ионов нанокристаллами In_2O_3 (а–в), полученное при помощи электронного микроскопа изображение нанокристалла In_2O_3 (г) и спектральные зависимости характеристик этого фотоприёмника.



Полоса чувствительности в УФ области имеет ширину всего 60 нм, причём коэффициент подавления видимого излучения относительно УФ излучения достигает 8400. Этот фотоприёмник очень подходит для практического применения, например в узкополосных спектрально селективных фотоприёмниках. Приборы на основе синтезированных нанокристаллов могут дать новый подход к созданию нечувствительных к видимому излучению фотоприёмников.

Подробности – в статье *Rajamani S. et al. Deep UV narrow-band photodetector based on ion beam synthesized indium oxide quantum dots in Al2O3 matrix // Nanotechnology. – 2018. – Vol. 29, No. 30.*

compondsemiconductor.net
06.07.2018