
**МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи

МАКАРОВ Денис Николаевич

научный руководитель - д.т.н., проф. **БУДАК В.П.**

**МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬ-
НЫХ УСТАНОВОК**

Специальность

05.09.07 – Светотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2007 г.

Содержание

Введение	4
1. Применение теории глобального освещения в светотехническом проектировании	9
1.1. Уравнение глобального освещения и методы его решения.....	9
1.2. Реализация метода глобального освещения в современных светотехнических программах	22
1.3. Основные методики проектирования осветительных установок	35
Выводы по первому разделу:	47
2. Современные программы проектирования осветительных установок	49
2.1. Требования и новые методы светотехнического проектирования	49
2.2. Возможности использования 3М моделирования для светотехнического проектирования.....	56
2.3. Классификация и точность расчета светотехнических программ	64
2.4. Моделирование и расчет естественного освещения в программах.....	70
2.5. Качественные показатели освещения при компьютерном проектировании ОУ.....	81
Выводы по второму разделу:	84
3. Практическое применение методик проектирования осветительных установок	86
3.1. Методы компьютерного светотехнического проектирования искусственного освещения в интерьере.....	86
3.2. Проектирование архитектурного освещения. Совмещение 2D и 3D визуализации.....	93

3.3.	Моделирование естественного освещения и инсоляции ...	101
3.4.	Некоторые методы анализа светового поля в 3М сценах..	108
	Выводы по третьему разделу:	115
4.	Заключение	116
	Список литературы	118
	Приложение.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена проблемам повышения качества освещения при светотехническом проектировании и методам компьютерного моделирования осветительных установок.

Современная светотехника не мыслима без использования в качестве основного инструмента – компьютера, или вернее светотехнических программ по расчету показателей освещения (освещенность, яркость, блескость, неравномерность и т.п.) В настоящее время на рынке существует огромное количество светотехнических программ, как российского, так и западного производства. Из-за этого появляется ряд проблем:

1. Разработка методики моделирования осветительных установок на основе светотехнических программах;
2. Определение степени точности расчета показателей освещения в программах;
3. Определение области применения той или иной программы и их классификация;
4. Вопросы сопряжения программ между собой, для осуществления комплексного подхода к светотехническому проектированию;

В настоящей работе рассматривается наиболее часто встречаемое в проектной светотехнической практике программное обеспечение, на основе которого формулируются основные методы и подходы светотехнического проектирования. Решаются проблемы использования светотехнических программ в проектировании ОУ такие как:

- Сравнение точности расчета показателей освещения в программах;
- Составление классификации светотехнических программ по 15-ти критериям;
- Формулируются методы выбора светотехнических программ в зависимости от конкретной светотехнической задачи;
- Расчет естественного освещения и инсоляции методом радиосити;

- Описываются методы получения качественных показателей освещения и анализа светового поля;

Так же отдельная часть работы посвящена теоретической обоснованности использования светотехнических программ в проектировании ОУ, основанных на методе *глобального освещения* т.е. методах радиосити (Radiosity) и трассировки лучей (Ray tracing).

Актуальность проделанной работы подтверждается многочисленными публикациями по этой тематике появившиеся в настоящее время, как в светотехнической литературе, так и в интернете [30,34,41,47,48].

Главной целью настоящей диссертационной работы является разработка методов компьютерного моделирования ОУ на основе современных светотехнических программ. Данные методы позволяют поднять качественный уровень проектирования ОУ, а их использование на практике даст возможность в разы экономить время разработки проекта освещения.

В данной работе формулируются основные математические методы – радиосити и трассировка лучей, входящие во все современные светотехнические программы.

Для достижения цели диссертации в работе были решены следующие задачи:

1. Приводится теоретическая обоснованность использования светотехнических программ, на основе метода глобального освещения в проектировании ОУ;
2. Определена точность расчета показателей освещения в светотехнических программах;
3. Разработаны методы моделирования ОУ всех типов с использованием светотехнических программ;
4. Вводятся новые критерии оценки освещения в ОУ;
5. Доказана правомерность использования светотехнических программ при проектировании осветительных установок с наличием естественного света;

6. Разработаны методы и схемы сопряжения светотехнических программ между собой и другими инженерными и дизайнерскими приложениями;

Методы исследований: Решение задачи распределения освещенности в 3М сцене, на основе методов глобального освещения. При сравнении точности расчета программ использовались: классический метод расчета, основанный на законе квадрата расстояния [1] и метод расчета распределения освещенности от изотропного источника, находящегося между двумя бесконечными диффузными поверхностями, предложенный Соболевым В.В. [43]. Расчет естественного освещения проводился на основе действующих нормативных документах МГСН 2.06-99 и СНиП 23-05-95.

Достоверность результатов приведенных в диссертационной работе определяется:

- Строгим выводом основных соотношений метода глобального освещения;
- Аналитическим решением уравнения ГО для задачи Соболева;
- Совпадением результатов моделирования ОУ в пределах точности с инженерными методами расчета;
- Выполненными и реализованными проектами ОУ с использованием разработанной методики;

Результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработаны методы проектирования осветительных установок при помощи светотехнических программ;
2. Определена погрешность расчета светотехнических показателей освещения в исследуемых программах;
3. Обоснована правомерность использования светотехнических программ при расчете естественного света и инсоляции;
4. Определена роль многократных переотражений в условиях естественного освещения жилой застройки;
5. Вводятся новые критерии оценки светового поля в 3М сценах;

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

В первой главе работы проводится аналитический обзор литературный данных по методам проектирования осветительных установок. В первом параграфе даются необходимые сведения и определения по методу глобального освещения. Приводятся все необходимые аналитические выкладки и делаются выводы о его достоинствах и недостатках. Во втором параграфе представлены светотехнические программы, использующие при расчете показателей освещения метод глобального освещения. Так же дается их краткая характеристика и классификация. Делается акцент на разные подходы к проектированию ОУ классическим (ручным) методом и при помощи светотехнических программ. Формулируются проблемы и научные задачи, появляющиеся при переходе от ручных методов расчета ОУ к компьютерным. В третьем параграфе дается описание существующей классической методики проектирования осветительных установок ее плюсы и минусы. В разрез с этим описываются те возможности компьютерного моделирования ОУ, которые нельзя реализовать или получить классическими методами.

Вторая глава работы посвящена решению возникших научных задач компьютерного проектирования ОУ. В первом параграфе формулируются методы моделирования и расчета ОУ наиболее распространенных типов. Приводятся требования к светотехническим программам и метод их выбора под конкретную задачу. Во втором параграфе формулируются возможности 3М моделирования в светотехнических программах. Решается проблема оптимизации расчетных 3М моделей. Третий параграф работы направлен на определение степени точности расчета светотехнических показателей освещения в программах. Так же дается сводная таблица классификации светотехнических программ. В четвертом параграфе решается задача использования светотехнических программ при расчете естественного освещения и инсоляции. Полученные в программах результаты сверяются с данными действующих нормативных документов. Пятый параграф содержит сведения о ка-

качественных показателях освещения, получаемых ручными методами и с помощью светотехнических программ.

Третья глава работы описывает возможности светотехнических программ по проектированию ОУ: интерьерное и архитектурное освещение, моделирование и расчет естественного освещения и инсоляции. Так же демонстрируются возможности светотехнических программ по получению новых оценок светового поля. Первый параграф работы ориентирован на применение ранее разработанной методики компьютерного моделирования ОУ на примере интерьерного освещения. Во втором параграфе представлены возможности светотехнических программ по проектированию архитектурного освещения. Отдельно демонстрируется возможность слияния 2М и 3М визуализации. Третий параграф описывает примеры расчета естественного освещения и инсоляции в помещении. Затрагиваются вопросы проектирования совмещенного освещения. В четвертом параграфе изложены и продемонстрированы возможности светотехнических программ по расчету качественных показателей освещения, на примере крытого универсального спортивного комплекса. Затронуты вопросы нормирования показателей освещения в спортивном освещении.

В конце каждой главы делаются выводы.

Заключение представляет собой основные выводы по работе. Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в [28-30, 35,47,48] и апробированы на всероссийских научно-технических конференциях.

Работа написана на 121 странице, имеет 39 рисунков и 6 таблиц. Список используемой литературы включает в себя 48 наименований.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ГЛОБАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

1.1. Уравнение глобального освещения и методы его решения

Развитие вычислительной техники в последние годы привели к столь широкому применению компьютеров в светотехнике от проектирования приборов и систем до управления процессами их производства и эксплуатации. Это не позволяет в пределах отведенного места, осветить все возможные аспекты применения ЭВМ в светотехнике, поэтому мы сосредоточим свое внимание на одном из направлений – расчете осветительных установок (ОУ).

Теория расчета и нормирования ОУ была практически завершена и изложена в учебниках к 70-м годам [1]. В основе алгоритмов расчета ОУ лежат несложные математические выражения, не требующие значительных ресурсов ЭВМ, поэтому широкое внедрение компьютеров в светотехническую практику сдерживалось изначально их высокой стоимостью и неудобством применения больших ЭВМ (типа системы IBM 360/370 за рубежом или единой серии ЕС в нашей стране) в инженерной практике. Положение существенно изменилось с появлением малых (PDP и CM) и, особенно персональных ЭВМ. Фирма IBM совершила настоящую революцию в 1980 году, произведя на свет свой персональный компьютер PC, который представлял собой наилучший из возможных компьютеров по цене менее средней зарплаты в США (\$2000). Это привело к тому, что с середины 80-х на западе, а у нас с начала 90-х годов компьютер вытесняет со стола проектировщика калькулятор, как тот в свое время вытеснил легендарную логарифмическую линейку.

Однако процесс внедрения компьютеров сильно отличался от внедрения калькуляторов в инженерную практику. Дело в том, что компьютеры появились практически одновременно во всех видах инженерной деятельности. На первом этапе это породило создание в каждой из областей больших программ-монстров: системы автоматического проектирования (САПР), в которых разработчик вводил все необходимые исходные данные и получал требуемую документацию. Это практически сразу выявило проблему общих

частей в САПР различных направлений: расчет ОУ внутреннего освещения зданий лучше производить на базе чертежей этого здания, выполненного архитекторами, и на них же произвести разводку линий электропитания. Следствием этого стала изменение в стратегии создания САПР: программа выполняет только специальную часть, общаясь с другими программами через файлы стандартных форматов.

Другой важнейшей стороной сегодняшнего программного обеспечения является его дружественный интерфейс, который определяется не требованиями ЭВМ, а характером решаемой задачи и некоторыми общими правилами инженерской или конторской деятельности: концепция экрана программы как рабочего стола, за которым пользователь может, выбирая подходящие из меню инструменты, писать, чертить или рисовать. Столь изоциренные программы становятся уже не под силу разрабатывать группе программистов даже сравнительно большой светотехнической организации, поэтому необходимо их объединение. Естественно возникает вопрос о финансировании подобного рода проектов, учитывая, что сотни заинтересованных мелких фирм по продаже светотехнического оборудования не смогут оплатить подобные затраты. На западе пошли путем финансирования таких проектов либо крупной фирмой, либо их объединением так, что при этом распространение программ производится бесплатно, однако сами программы используют нестандартный формат баз данных светильников, и могут быть используемы, по сути, только дистрибьюторами этих фирм.

В последние годы программы автоматизированного проектирования ОУ переживают поистине революционные изменения, связанные с проникновением алгоритмов и методов компьютерной графики, позволяя воссоздавать на экране дисплея ЭВМ изображение освещаемых объектов с фотографической точностью. Это позволяет оценивать освещение не только в соответствии с нормами, но и эстетически, что для непромышленных помещений является важнейшим требованием. На сегодня нет проблем, используя чертежи здания, подготовленные архитектором, расположить светильники с

заданными кривыми распределения силы света, задать фотометрические характеристики всех оптически активных поверхностей, и в результате работы программы получить не только распределение освещенности по рабочим поверхностям, но и настоящий фильм об освещении интерьера здания. Но и это не все. Такой подход позволяет увидеть и оценить влияние отдельных элементов интерьера на качество освещения помещения.

Развитие компьютерной графике происходило независимо от светотехники, в основном для нужд кинематографа, дизайнеров и архитекторов. Главной задачей компьютерной графики являлась визуализация объектов, задаваемых некоторой математической моделью. Однако развитие компьютерной графики выявило, что для фотореалистичного воспроизведения виртуальных объектов необходимо произвести максимально точный расчет распределения яркости по всем их поверхностям.

Под воспроизведением изображения виртуальных объектов на экране монитора ЭВМ естественно следовало понимать такое изображение, которое соответствовало восприятию аналогичного реального объекта. К сожалению, механизм восприятия реального мира глазом человека сложен и на сегодняшний день изучен весьма приблизительно [2-6]. Однако в нашей повседневной жизни мы достаточно уверенно можем судить о незнакомых нам объектах по фотографии. Поэтому компьютерная графика исходит из позиции фотореалистического изображения: соответствие виртуального изображения фотографии аналогичного реального объекта [7]. Отсюда становится понятно, что как бы мы не старались в рамках компьютерной графики создать изображение альтернативное по восприятию с реальностью, нам это не удастся. С другой стороны, использование фотореалистических изображений при проектировании ОУ, не предполагает 100% соответствие их с действительностью – это просто не нужно. Данные изображения используются светотехниками–проектировщиками двумя способами: во-первых, для качественной и эстетической оценки ОУ, во-вторых, для наглядного представления их заказ-

чику, тем самым, подтверждая ими правильность проведенных расчетов и выбор светового оборудования.

Постепенно центральное место исследований по компьютерной графике сместилось из области геометрических построений на экране монитора ЭВМ в сторону точного расчета светового поля яркости в наблюдаемом пространстве. Поскольку в распоряжении исследователей были наиболее мощные компьютеры, а человеческий глаз оказался на редкость точным инструментом, подмечающими малейшие неточности в распределении яркости, то развитие компьютерной графике привело к формулировке строгих уравнений и эффективных алгоритмов их решения. Это привело к революционному изменению теории светового поля, что в свою очередь сегодня принципиально изменяет содержание расчета ОУ. В литературе по компьютерной графике теория точного моделирования яркости поверхностей виртуальных объектов наблюдения с учетом всех возможных оптических процессов получила название глобального освещения (global illumination) [8].

Если пренебречь явлениями дифракции и интерференции, которые проявляются в достаточно тонких и специальных экспериментальных ситуациях, то для излучения применимо лучевое приближение: свет состоит из достаточно тонких лучей, по каждому из которых как по трубке протекает лучистая энергия, с плотностью мощности L – яркость луча. В рамках лучевого приближения механизм формирования фотографического изображения хорошо изучен и существует его строгая математическая теория, восходящая еще к работам Альгазена (латинизированное имя арабского ученого Абу Али Хайсама) в XI веке [9]. Изображение в идеальной оптической системе (без искажений, называемых в оптике аберрациями) является центральной или перспективной проекцией, а облученность каждой точки в изображении определяется выражением [10]

$$E(\mathbf{r}_i) = \frac{\pi O^2}{4} L(\mathbf{r}_o), \quad (1.1)$$

где $\mathbf{r}_i=(x_i, y_i)$ – радиус-вектор точки в плоскости изображения с координатами x_i и y_i , $L(\mathbf{r}_o)$ – яркость сопряженной (соответствующей по центральной проекции) точки \mathbf{r}_o в пространстве объектов, $O=D/f$ – относительное отверстие объектива, D – диаметр выходного зрачка, f – его фокусное расстояние.

При центральной проекции точки \mathbf{r}_i и \mathbf{r}_o лежат на одной прямой, проходящей через центр оптической системы S . Следовательно, для создания фотореалистического изображения объекта надо определить угловое распределение яркости в центре объектива или, что аналогично, пространственное распределение яркости по поверхностям объекта. Поэтому в основе алгоритмов компьютерной графики лежит расчет яркости светового поля, или иначе, речь идет о визуализации распределения яркости в пространстве. Отметим, что во всех моделях компьютерной графики всегда присутствуют два пространства: двумерное пространство (2М) изображения на экране и трехмерное пространство (3М) объектов визуализации [8].

Соответственно математическая модель визуализации объектов представляет собой не что иное, как фотометрический расчет светового поля при заданном расположении объектов, источников света, светотехнических характеристиках их поверхностей.

Рассмотрим полную яркость поверхности с учетом ее отражения, пропускания и излучения [11]:

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi} \int_{\Sigma} L(\mathbf{r}', \hat{\mathbf{l}}') \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2 r' \quad (1.2)$$

где $F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{|\langle \hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}), (\mathbf{r} - \mathbf{r}') \rangle \langle \hat{\mathbf{N}}(\mathbf{r}'), (\mathbf{r} - \mathbf{r}') \rangle|}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^4}$, $\hat{\mathbf{l}}' = \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$.

Интегральное уравнение (1.2) учитывает все фотометрические явления на границе объектов 3М сцены: диффузно-зеркальное отражение, пропускание и собственное излучение. Оно включает все возможные акты переотражений и пропускания света в сцене, а потому получаемое решение физически адекватно распределению яркости реальной сцене наблюдения. В противоположность глобальному освещению, на начальном этапе развития компью-

терной графики изображения 3М сцен пытались создавать на основе, либо полного пренебрежения эффектами многократного переотражения (пропускания) поверхностями сцены, либо учета первой кратности - локальное освещение (local illumination) [8, 10-12].

Первые программы визуализации, использовавшие локальные модели освещения, в рамках которых предполагается, что затенение одной поверхности не зависит от затенений другой поверхности, трактовали задачи видимости поверхности и затенения независимо. Локальные модели освещения обычно пренебрегают переотраженным светом и принимают, что свет приходит только из конечного числа точечных источников освещения. Расчеты прямого освещения просты, но при этом объект, не освещенный непосредственно, выводится черным, а тени, если моделируются вообще, обычно интенсивно обрамляются, отчего поверхности предметов выглядят гладкими и пластмассовыми, а вся сцена подобна сценам наружного освещения.

Глобальные модели освещения основываются на том, что видимость и затенения связаны между собой: яркость точки поверхности определяется распределением яркости по всем остальным поверхностям, видимым из этой точки, что определяется интегральным характером уравнения (1.2). Такими методами синтеза изображения можно моделировать полутени, шероховатость и свойства отражения реальных материалов, освещение многократно отраженным светом и связанные с ним цветовые эффекты [11]. Видимые результаты глобального освещения есть те банальности, которые мы едва осознаем в реальной жизни, но их отсутствие очень заметно в изображениях, синтезируемых компьютером. Неточное моделирование глобального освещения на реальной, материальной сцене подобно точному моделированию на нереальной, нематериальной сцене.

Впервые уравнение (1.2) в компьютерной графике было получено Кэджиуа J.T. в 1986 г. [13] и названо им уравнением визуализации. Однако в близком варианте произвольного закона отражения это уравнение было ранее получено советским теплотехником Поляком [14], а для более простого вариан-

та диффузных поверхностей Moon P. [15] или еще ранее в этом случае, но для конечных элементов японским светотехником Yamauti Z. [16]. В случае диффузного отражения и пропускания уравнение (1.2) можно переписать в виде:

$$M(\mathbf{r}) = M_0(\mathbf{r}) + \frac{\sigma(\mathbf{r})}{\pi} \int_{\Sigma} M(\mathbf{r}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2 r'. \quad (1.3)$$

Достоинством уравнения (1.3) является то, что неизвестная функция $M(\mathbf{r})$ зависит только от координат поверхности. Именно в таком виде оно и было получено Р. Моон в [15]. Нетрудно видеть, что решение (1.3) не является в строгом смысле светимостью, поскольку определяется не только собственным свечением поверхности, но и отражением падающего на нее с других поверхностей света, а потому характеризует не только саму поверхность, но и ее положение и свойства других поверхностей. Понимание этого факта привело Р. Моон к необходимости введения новых терминов для описания освещения и свечения поверхности в условиях многократных переотражений света. В частности, для светимости в этом случае им было изобретено новое английское слово “radiosity”, которое, если пользоваться правилами образования слов в английском языке: radio – излучение, -sity – суффикс образования существительного от существительного, можно перевести, как излучательность.

Возможности уравнений (1.2) и (1.3) выходят далеко за рамки решения задач визуализации 3D сцен. Они являются средством описания светового поля в 3D сцене в среде без рассеяния и поглощения света. Поэтому представляется, что лучше эти уравнения называть уравнениями глобального освещения, а расчет светового поля в 3D сцене на основе этих уравнений – методами глобального освещения.

Метод решения уравнения глобального освещения (1.3), связан с определением по Р.Моон излучательности (*Radiosity*) M , что и дало ему название метод излучательности, хотя в русскоязычной литературе иногда использует-

ся и термин *радиосити*. Также важнейшим свойством метода излучательности является его независимость от положения наблюдателя.

Уравнение глобального освещения имеет решение только для идеализированных ситуаций, не имеющих ничего общего с практическими задачами. Решение же практических задач возможно только численными методами. В общем случае произвольной 3М сцены для построения численных алгоритмов решения уравнения глобального освещения используются два основных подхода:

1. замена интеграла в уравнениях (1.3) или (1.2) конечной суммой с использованием подходящей квадратурной формулы, что приводит интегральное уравнение к системе линейных алгебраических уравнений;
2. разложение решения в так называемый ряд Неймана.

Наиболее общим приемом при первом подходе является так называемый метод конечных элементов Галёркина. В этом случае приближенное решение $\tilde{M}(\mathbf{r})$ уравнения (1.3) представляется в виде конечной суммы по набору из N ортонормированных функций $\psi_j(\mathbf{r})$:

$$\tilde{M}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N M_j \psi_j(\mathbf{r}), \quad (1.4)$$

где коэффициенты разложения

$$M_j = \int_{\Sigma} M(\mathbf{r}) \psi_j(\mathbf{r}) d^2r \equiv (M, \psi_j). \quad (1.5)$$

Условие ортонормированности набора функций имеет в этом случае вид

$$(\psi_i, \psi_j) = \int_{\Sigma} \psi_i(\mathbf{r}) \psi_j(\mathbf{r}) d^2r = \delta_{ij} \equiv \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ 1, & i = j. \end{cases} \quad (1.6)$$

Не останавливаясь на дальнейших математических выкладках [10], используя условные обозначения, при которых:

$$\varepsilon_i = (M_0, \psi_i), \quad A_{ij} = \delta_{ij} - \int_{\Sigma} \psi_i(\mathbf{r}) \int_{\Sigma} k(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \psi_j(\mathbf{r}') d^2r',$$

То уравнение (1.4) приводится к системе линейных алгебраических уравнений, которая в матричной форме имеет вид

$$\vec{A} \vec{M} = \vec{\varepsilon}, \quad (1.7)$$

где стрелка над символом обозначает вектор-столбец соответствующих элементов, двойная стрелка – матрицу.

Наибольшее значение в компьютерной графике приобрел специальный случай метода конечных элементов (1.7), основанный на приближенной замене всей поверхности 3М сцены наблюдения сеткой плоских многоугольников \square_i , называемых заплата (patch) или грань (face). При этом в качестве базисных функций выбираются

$$\psi_i(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1/S_i, & \text{при } \mathbf{r} \in \Sigma_i, \\ 0, & \text{при } \mathbf{r} \notin \Sigma_i, \end{cases}$$

где S_i – площадь грани \square_i .

При этом выражения (1.4 – 1.5) переходят в

$$\forall i \in \overline{1, N}: M_i = M_{0i} + \sum_{j=1}^N M_j \sigma_j F_{ij}, \quad (1.8)$$

или

$$\forall i \in \overline{1, N}: \sum_{j=1}^N A_{ij} M_j = M_{0i}, \quad A_{ij} = \delta_{ij} - \sigma_j F_{ij}, \quad (1.9)$$

где величину $F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int \int_{\Sigma_i \Sigma_j} \frac{\cos \vartheta \cos \vartheta'}{\pi r'^2} \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2 r'$ в литературе по компьютерной графике [8, 10-12] принято называть форм-фактор (form-factor).

В задачах визуализации 3М сцен количество граней может превышать несколько десятков тысяч, что делает обращение матрицы при решении системы уравнений (1.8) математически некорректной задачей. Однако поскольку $A_{ii} = 1 - \sigma_i F_{ii} > 0$, то систему уравнений решать простейшим методом итераций Якоби (Jacobi)

$$M_i^{(m)} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{A_{ij}}{A_{ii}} M_j^{(m-1)} + \frac{M_{0i}}{A_{ii}}. \quad (1.10)$$

Каждая m -ая итерация, представляет собой светимость (излучательность) поверхности, связанная с m -ой кратностью переотражений от поверхностей сцены. Итерационную процедуру можно существенно улучшить, если на каждом шаге итераций подставлять не предыдущее значение элементов искомой излучательности, а текущие – метод итераций Гаусса-Зейделя (Gauss-Seidel), имеющий существенно более быструю сходимость

$$M_i^{(m)} = -\sum_{j=1}^{i-1} \frac{A_{ij}}{A_{ii}} M_j^{(m)} - \sum_{j=i+1}^N \frac{A_{ij}}{A_{ii}} M_j^{(m-1)} + \frac{M_{0i}}{A_{ii}}. \quad (1.11)$$

Еще ускорить сходимость метода можно, если выбирать последовательность элементов для очередного шага итерации не произвольно, а тех, вычисления которых, в наибольшей степени уточняет решение. Введем обозначения:

$\mu_i = S_i M_i$ – полный поток лучистой энергии, уходящий с площадки i ;

$\varepsilon_i = S_i M_{0i}$ – поток лучистой энергии, излученный с площадки i .

Тогда уравнение излучательности принимает вид

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1.12)$$

где $K_{ij} = \frac{S_i}{S_j} A_{ij} = \delta_{ij} - \rho_i F_{ji}$.

Решение системы (1.12) методом итераций можно записать в виде

$$\mu_i^{(k+1)} = \frac{1}{K_{ii}} \left(\varepsilon_i - \sum_{j \neq i}^N K_{ij} \mu_j^{(k)} \right). \quad (1.13)$$

Ошибку на каждом шаге итерации будем оценивать вектором

$$\mathbf{r}^{(k)} = \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{K}\boldsymbol{\mu} \quad \text{или} \quad r_i^{(k)} = \varepsilon_i - \sum_{j=1}^N K_{ij} \mu_j^{(k)}. \quad (1.14)$$

Поскольку на каждом шаге итераций изменяется только одно значение вектора $\mu^{(k)}$, то только один элемент вектора $(\mu^{(k+1)} - \mu^{(k)})$ отличен от нуля (допустим i), и с учетом выражения (1.13) выражение для вектора ошибки можно представить в виде

$$r_j^{(k+1)} = r_j^{(k)} - \frac{K_{ji}}{K_{ij}} r_i^{(k)}. \quad (1.15)$$

Из (1.15) видно, что наибольшей скоростью сходимости будет обладать алгоритм, в котором на каждом следующем шаге итерации уточняется в отличие от Гаусса-Зейделя не последовательно все элементы, а тот элемент, у которого ошибка $r^{(k)}$ наибольшая - итерационный метод Саусвелла (Southwell). Для этого на текущем шаге итерации $\mu^{(k)}$ и $r^{(k)}$ выбирается элемент с наибольшим $r_i^{(k)}$ и для него вычисляется $\mu_i^{(k+1)}$. В качестве первоначального приближения выбираются $\mu_i^{(0)}=0$, а им соответствуют $r^{(0)}=\varepsilon$.

С физической точки зрения вектор ошибок представляет собой неизлученную часть света с каждой грани. При каждой итерации Саусвелла определяется грань с наибольшим потоком излучения и этот поток перераспределяется. Если аналогично проанализировать итерации Гаусса-Зейделя, то там на каждом шаге итерации определяется энергия падающая на данную грань.

Существенной проблемой визуализации 3М сцен методом излучательности является выбор размеров сетки разбиения сцены на грани. Время и точность решения уравнения визуализации накладывают противоречивые требования к количеству элементов сетки разбиения поверхностей: чем меньше элементы, тем точнее решение, но тем больше их количество и время решения. Очень мелкое разбиение неразумно, так как для равномерно освещенных поверхностей при точном вычислении форм-фактора это абсолютно не добавит точности. В то время как сильно неравномерно освещенные грани (тьнь) нуждаются в достаточно мелком разбиении.

Другим подходом к решению уравнения глобального освещения (1.2) является, представление решения на основе ряда Неймана:

$$L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = \sum_{n=0}^{\infty} L_n(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}), \quad (1.4)$$

где каждый член ряда выражается через предыдущий

$$L_n(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) = L_0(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{l}}) + \frac{1}{\pi_{\Sigma}} \int L_{n-1}(\mathbf{r}', \hat{\mathbf{l}}') \sigma(\mathbf{r}; \hat{\mathbf{l}}, \hat{\mathbf{l}}') F(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \Theta(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d^2 r'. \quad (1.5)$$

Последнее выражение сводит решение интегрального уравнения к вычислению суммы многократных интегралов. Для расчета каждый интеграл заменяется суммой по некоторой квадратурной формуле, что эквивалентно построению в пространстве лучей из источника к приемнику (прямой ход луча) или наоборот – обратный ход. Сам же метод получил название трассировки лучей (ray tracing) [17-18]. При диффузном отражении каждый луч при взаимодействии с поверхностью расщепляется на пучок лучей – рекурсия лучей, что существенно усложняет вычисление при многократных отражениях. Поэтому часто при расчете многократных переотражений используется квадратурная формула со случайными узлами – метод Монте-Карло, что существенно проще при реализации алгоритма [18].

Трассировка лучей позволяет учесть произвольный закон отражения, в отличие от метода излучательности, который допускает расчет только диффузного отражения. Однако при расчете диффузного отражения метод трассировки лучей теряет эффективность из рекурсии. В отличие от излучательности трассировка лучей позволяет получать изображение только под одним определенным ракурсом. Поэтому расчет сцены с учетом многократных диффузных переотражений в большинстве современных программ компьютерной графике производится методом излучательности, но для окончательной визуализации конкретного вида (проектирования 3М сцены на 2М экран дисплея) используется обратный ход луча, что позволяет учесть и зеркальные отражения. Обычно при этом расчет дополняется и методом прямого хода луча, существенно улучшающий вид теней в изображении сцены [19-20].

Серьезной проблемой расчета светового поля внутри 3М сцены и его визуализации является наличие очень мелких деталей, например, ворсинки

ковра, структура деревянного или другого покрытия и т.д. С точки зрения перераспределения излучения в сцене эти детали не играют практически никакой роли и для описания грани их можно заменить средним коэффициентом отражения, но для визуального восприятия очень существенны. Для решения данной проблемы используются *текстуры*: расчет распределения потока по сцене проводится с учетом среднего коэффициента отражения, а определение яркости по освещенности проводится с учетом растрового изображения структуры грани, которое представляется отклонениями от среднего коэффициента отражения [17]. Аналогично используются текстуры для пропускания и свечения объектов. Несколько иначе используется текстура неровностей (*bumping*): здесь значения пикселей растра определяет отклонение нормали в данной точке от средней [10].

1.2. Реализация метода глобального освещения в современных светотехнических программах

На сегодняшний день светотехническое проектирование или лучше сказать моделирование освещения, уже не мыслимо без применения компьютера. Компьютерные программы проникли во все стадии проектирования, начиная от технического задания, которое редко представляется на бумажных носителях, заканчивая составлением выходной технической документации по проекту. Светотехнический расчет, который занимает весьма значительную часть технических документов по проектированию, тоже выполняется в той или иной компьютерной светотехнической программе.

На сегодняшний день перед светотехниками, появляется новые задачи, которые необходимо решать, для успешного выполнения светотехнического проектирования ОУ. Одной из задач является проблема выбора светотехнической программы для расчета параметров ОУ. Выбор программ зависит от многих факторов:

- тип осветительной установки и ее сложность;
- присутствие влияния естественного освещения;
- тип или классификация объекта освещения (интерьер, ландшафт, архитектура и пр.);
- требуемые выходные расчетные данные (т.е. растровое изображение, таблица освещенностей, 3М модель освещения, пространственное или плоскостное распределение освещенности или яркости и пр.);
- имеющиеся исходные данные по объекту;
- количество предполагаемого рабочего/затраченного времени на выполнение проекта;
- степень владения той или иной светотехнической программой и пр.;

Представленный список факторов далеко не полный, но при этом отражает степень проблемы правильного выбора светотехнической программы удовлетворяющей поставленной перед проектировщиком задачи.

Рынок светотехнических программ с каждым годом неуклонно растет, но в основном не из-за появления новых программ, а из-за расширения многоязыковой (Multilanguage) поддержки в уже существующих программах. Это объясняется все возрастающим ростом требований к проектированию ОУ, чему способствует: создание и разработка новых осветительных приборов, инсталляция сложнейших типов световых решений, цветосветовая динамика, использование естественного света для освещения и многое другое. Все это подталкивает разработчиков ПО к усложнению светотехнического программного обеспечения, либо интегрируя в уже готовый продукт всевозможных дополнений (Plug-In) и расширению рынка распространения. Тем самым встает вопрос о готовности проектировщика – светотехника к работе с большим спектром расчетных светотехнических программ. Кажется, совершенно не мыслимо изучить проектировщику – светотехнику огромное количество так не похожих друг на друга программ, но этот факт понимают и разработчики, в свою очередь, выпуская новое программное обеспечение, пытаются создать программную среду (GUI) как можно более понятной. Но даже это не всегда спасает проектировщика от серьезных трудностей в освоении для него нового ПО.

Мы считаем, что в настоящее время сформирован определенный костяк светотехнических программ, в который входят европейские программы, такие как: DiaLux (DIAL GmbH, Германия)[21], Relux (Informatik AG, Швейцария)[22], LiteStar (OxyTech, Италия)[23], американские: Lightscape 3.2. / 3D studio Viz 2006[24,25], отечественного производства: Light-in-Night, WinElse [26,27]. Каждая из программ, не смотря на свою универсальность, имеет определенную ориентацию для решения конкретных светотехнических задач. В настоящей работе все из перечисленных программ будут рассмотрены и проанализированы в соответствии с их возможностями для проектирования ОУ.

DiaLux 4.1.

Программа DiaLux как и многие остальные программы по светотехническому расчету использует при расчете метод излучательности (Radiosity).

Программа является универсальной и ее можно рекомендовать как хороший инструмент для расчета интерьерного и уличного освещения с возможностью создания расчетных фотореалистических изображений среднего качества. К достоинствам программы можно отнести несколько факторов:

- Бесплатное распространение и постоянное обновление¹;
- Простота использования;
- Поддержка базы светового оборудования ведущих западных производителей;
- Возможность расчета естественного и аварийного освещения;

К недостаткам программы можно отнести следующее:

- Недостаточно удобно реализована работа с 3М объектами и их создание;
- Недоработана операция переноса 3М сцен из редакторов 3М графики²;

Возможности программы по созданию фотореалистичных изображений в значительной степени расширяются с использованием встроенного Plug-In-а POV-Ray, основанного на алгоритме адаптивной трассировки лучей. Такой подход позволяет за счет предварительной выбраковки областей изображения, в которые следует в большей или меньшей степени посылать большее или меньшее количество лучей, значительно ускорить работу трассировщика.³

RELUX Professional 2005

Коммерческий продукт компании Informatiс AG, в основном поставляется с каталогами светового оборудования таких брендов как: RZB, Zumtobel – Staff и др.

Программа в целом, схожа с рассматриваемым выше DiaLux 4.1, содержит большую базу данных светового оборудования ведущих европейских светотехнических компаний с исчерпывающей информацией по каждому светильнику, начиная от геометрических размеров, заканчивая цветом корпу-

¹ Полную версию программы можно взять здесь www.DiaLux.com

² Поддерживается только формат *.SAT. Формат *.DXF – возможно использовать только в виде 2М плана.

³ Более подробную информацию по работе POV – RAY, можно получить здесь: www.povray.org

са. Имеется возможность создания трех видов проектов: интерьер, улица, наружное освещение.

Достоинства и недостатки программ в целом схожи, но при этом имеются некоторые отличия:

- Программа Relux 2005 в отличие от DiaLux является платной.
- Необходимо отметить, что Relux является комплексной программой и в ее состав (как дополнительная опция) входят еще два Plug-In-a: Relux Vision и Relux CAD, первый из которых отвечает за работу с материалами, текстурами и трассировку, а второй предназначен для сопряжения программы с программой AutoCad. В отличие от DiaLux программа ReLux + Relux Cad – позволяет без труда проводить расчет на 3М моделях, выполненных или преобразованных в формат DXF.

LITESTAR v.6.00

Программа для светотехнического расчета итальянских разработчиков, включает в себя средства по проведению и разработке светотехнического проекта, электронный каталог светового оборудования и встроенный менеджер по работе с фотометрией светового оборудования. Расчетное ядро программы основано на методе Radiosity. Поддерживается разработка трех видов проектов: интерьер, открытое пространство и дорожное освещение. К достоинствам программы можно отнести следующее:

- Возможность работы с большим количеством светотехнических форматов: Eulumdat, IESNA86, 91 и 95, Cibse TM-14, LTLI;
- Интерфейс программы построен таким образом, что позволяет наиболее успешно проводить расчет с участием большого кол-ва светового оборудования (более 100 ед.);
- Не требовательна к ресурсам компьютера, объем инсталляции не превышает 10-15 Мб⁴;

⁴ В зависимости от базы светового оборудования

- Содержит средства по составлению выходной светотехнической документации;

Данную КСП используют ведущие производители светотехники: GE Lighting (Europic), FaelLuce (FaelLite), Artemide (Luxart) и др. причем программы имеют разные названия, при этом оставаясь в функциональном плане одной и той же LITESTAR. Отличие заключается только в подключаемой базе данных светового оборудования в формате *.fdb.

Программы имеют в своем распоряжении встроенный трассировщик, позволяющий проводить расчетную визуализацию.

К особенностям программы следует отнести то, что она как нельзя лучше подходит для проведения и анализа светотехнического расчета спортивных сооружений. Позволяет получать следующие светотехнические результаты: освещенность (горизонтальную, вертикальную, цилиндрическую, полуцилиндрическую и в плоскости телевизионной камеры), яркость, значения блескости и светового загрязнения.

Lightscape 3.2.

Эта программа является одной из первых программ, в которой удалось реализовать большинство имеющихся на сегодняшний день алгоритмов по расчету распределения излучательности в 3М сценах и построения фотореалистичных изображений.

В основе программы лежат два основных метода: Radiosity и ray tracing. В отличие от других светотехнических программ Lightscape позволяет гибко изменять параметры расчета распределения излучательности трассировки лучей, что в свою очередь ставит этот продукт в один ряд с мощнейшими программами по работе с 3М графикой и визуализацией. Так же имеется богатый набор инструментов по работе с материалами и текстурами, построена возможность моделирования и расчета естественного освещения: Clear sky, Cloudy sky.

К недостаткам программы следует отнести следующие факторы:

- Lightscape 3.2. является последним релизом программы(1999г), поэтому дополнения и поддержка отсутствует⁵.
- Слабо реализован редактор по работе и созданию 3М объектов

Не смотря, на поверхностную работу программы с созданием и модификацией 3М-объектов и сцен, Lightscape понимает два промышленных формата DXF и 3DS.

Структура программы такова, что подразумевается работа с двумя видами файлов: *.lp (Lightscape preparation) – файл, содержащий полное описание 3М сцены с материалами и параметрами и *.ls (Lightscape solution) – файл, содержащий информацию о рассчитанной сцене полностью либо частично. Такой подход к системе расчета мы считаем наиболее правильный и целесообразным, тем более что 3D MAX (начиная с 5^{ой} версии) поддерживается функция конвертации 3М сцены в формат Lightscape preparation (LP).

3D Studio Viz 2006

Программа 3D Studio Viz компании Autodesk, является на сегодняшний день одной из лучших в своем классе программ по расчету и визуализации светотехнических проектов. Программа на наш взгляд является логическим продолжением Lightscape 3.2.. Имея все основные процедуры Lightscape, 3D Studio Viz 2006 предлагает пользователю не только использовать ее как расчетный инструмент, но и создавать 3М сцены любой сложности, т.к. по функциональности программа очень схожа с 3D studio Max. Поэтому любой пользователь который в некоторой степени освоил 3D Max и Lightscape без особых проблем сможет работать и в 3D Studio Viz. Поэтому мы не будем в данной работе описывать принципы работы с программой, тем более что программы тесно связаны между собой и предлагают пользователю создать один раз некоторую сцену, после чего ее можно переводить в понятный формат той или иной программы: Autocad \leftrightarrow 3D Max \leftrightarrow Lightscape \leftrightarrow 3D Viz,

⁵ Причина остановки поддержки – покупка данного проекта компанией Discreet (дочернее предприятие Autodesk-а по визуализации и работе с 3М)

что в свою очередь позволяет решить любую светотехническую расчетную задачу.

WinElso Свет 5

Теперь мы переходим к рассмотрению двух программ, которые пока не ориентированы на создание дизайн – проектов, а служат для инженерного светотехнического расчета.

WinElso Свет 5 – одна из не многих программ созданная отечественными разработчиками. Особенностью является адаптация к процессу проектирования электроустановок (выбор оборудования, проведение расчётов, разработка рабочей документации) в соответствии с российской нормативной базой. Является полнофункциональным Plug-In-ом к всемирно известному редактору векторной и 3М графике AutoCAD 2000-2005. Отсутствие в версии 5 рендринга, также накладывает некоторые ограничения в ее использовании, но если учитывать, что создавалась она как средство автоматизации для проектировщиков электросетей, то этот недостаток не смотрится таким уж глобальным. Одно из достоинств программы, кроме простоты работы, и использование российской нормативной базы, это возможность проводить светотехнический *расчет осветительной установки и автоматическую расстановку светильников для нескольких помещений и открытых площадок непосредственно на 2D или 3M строительной подоснове*, выполненной в AutoCAD-е. Соответственно программу можно рекомендовать как светотехническим фирмам, так и организациям, работающим в сфере проектирования электроснабжения жилых, общественных и производственных объектов, по роду деятельности встречающих необходимость выполнения светотехнических расчетов для выбора осветительного оборудования.

Light - In – Night (Road) версии 1.02 и 2

Еще одна программа российских разработчиков созданная компанией ЗАО «Научно-производственное светотехническое предприятие «Светосервис». Программа Light-in-Night Road предназначена для расчета дорожного, уличного и паркового освещения, позволяющая на основе действующей оте-

чественной методологии расчета светотехнических параметров, нормативной базе и яркостных характеристиках дорожных покрытий выполнять светотехнические расчеты осветительных установок, включая:

- расчет распределения яркости и освещенности дорожного покрытия для заданной схемы размещения светильников и геометрии полотна дороги и парковых зон;
- расчет показателей равномерности распределения яркости и освещенности;
- расчет показателей, регламентирующих слепящее действие светильников;
- расчет полуцилиндрической освещенности для пешеходных зон.

Это позволяет решать следующие проектные задачи:

- осуществлять подбор типа, мощности и светораспределения светового прибора (СП);
- проводить оценку эффективности выбранной схемы расположения СП (боковое одностороннее или двухстороннее, центральное на опорах или на подвесе, индивидуальное для паркового освещения);
- находить параметры наиболее рационального расположения и ориентации СП (высоту установки, шаг между опорами, наклон кронштейна и др.);
- оценивать расчетные значения параметров ОУ при сравнении их с существующими нормативами;

При этом программа дает возможность представить результаты расчета в виде протокола в наглядной табличной и графической форме, удобной для представления в проектной документации. Интерфейс программы и протокол результатов расчета выполнены на русском языке.

Используемая в программе база данных световых приборов основывается на номенклатуре Лихославльского завода светотехнических изделий «Светотехника» (ЛЗСИ) и Московского опытного светотехнического завода (МОСЗ).

Программа Light-in-Night Road представлена в двух версиях. Новая версия программы 2.0 является наиболее эффективной при расчете освещения участков автомобильных дорог и улиц со стандартной конфигурацией, а именно: прямолинейных, без уклонов и длиной не менее четырех пролетов между опорами. Она в наиболее полном виде учитывает специфику дорожного освещения, имеет удобный ввод исходных данных, позволяет оперативно просмотреть результаты расчета и распечатать протокол. Предыдущая версия 1.02 может быть полезной для расчета освещения объектов с нестандартной геометрией: площади, перекрестки, развилки, криволинейные участки, пешеходные зоны и т.п.

Компьютерное светотехническое проектирование имеет серьезные отличия от стандартной методики проектирования, основанной на инженерных методах расчета светотехнических параметров. Оно подразумевает использование в качестве основного инструмента светотехническую программу (расчетную среду, использующую метод *радиосити*), а не набор упрощенных методов расчета. Расчет светотехнических показателей освещения по методу *радиосити* производится на основе метода конечных элементов, что и формирует главное отличие расчетных методик.

На сегодняшний день не существует полноценных методик по проектированию ОУ в условиях применения светотехнических программ, если раньше инженеру-светотехнику для выполнения светотехнического проекта достаточно было иметь знания светотехники, то теперь к этому добавляется, как неотъемлемая часть, знания компьютерной графики и основ метода конечных элементов. В руках светотехника появляются мощнейшие инструменты по светотехническому проектированию в виде 3М расчетных программ.

Но как показывает практика, их использование без надлежащей методики, не всегда приводит к положительному результату. Что же несут собой такого рода изменения? Полностью меняется сам подход к светотехническому проектированию. Если раньше основное время у проектировщика при

проектировании ОУ уходило на расчет (значения освещенностей и яркостей в контрольных точках), то сейчас на расчет требуются считанные секунды. Хочется сделать вывод, что теперь светотехнические проекты будут выполняться с колоссальной скоростью, а выполненное их количество должно стремиться к астрономическим цифрам. Но это не происходит и не произойдет никогда. Дело в том, что данные рассуждения наивны, как утверждалось в середине прошлого века, с внедрением в производство компьютеров и роботов рабочие как класс, исчезнут и в результате будет огромная безработица. Но этого не произошло. В результате рабочие обучились не руками производить товар, а с помощью тех же самых роботов и компьютеров, с той только разницей, что количество и качество товаров увеличилось в разы. Что-то подобное происходит сейчас и в светотехнике. Появляются все более совершенные расчетные светотехнические программы, повышаются требования к качественным показателям освещения, постоянно усложняются и совершенствуются световые приборы, дорожает электроэнергия – все это необходимо современному светотехнику знать и главное уметь грамотно реализовать в светотехническом проекте. Встает вопрос о том, почему число выполненных светотехнических проектов, как правило, не растет пропорционально скорости расчета. Это не происходит потому, что сэкономленное время на расчете тратится на более скрупулезный выбор светового оборудования и достижения в результате оптимального светового решения по экономическим и качественным показателям. Но чтобы это осуществить, необходимо использовать новую методику светотехнического проектирования с использованием светотехнических программ.

Что же дают нам светотехнические программы кроме быстроты расчета? Чтобы ответить на поставленный вопрос, стоит вспомнить о разнице используемых в расчетах методах. Главным преимуществом метода Radiosity, над инженерными методами расчета в том, что благодаря ему, открывается возможность получить физически точное распределение излучения на модели проектируемой ОУ с учетом многократных отражений, что не возможно

получить инженерными методами. Только этот факт ставит крест на использовании инженерных методов в проектировании ОУ крытого типа (интерьеры, спортивные сооружения, и т.д.).

Использование в светотехнических программах электронных баз светового оборудования, как правило, от дюжины, а то и более производителей светотехники, значительно сокращает время на поиск оптимального СП для использования в ОУ. Необходимо также отметить, что базы светового оборудования (за исключением специальных случаев) содержатся в свободно распространяющихся электронных форматах (ies, ldt, TM14 и т.д.), что дает возможность быстрого и простого сопряжения между программами. Электронные базы содержат не только описание КСС, но также фотографии СП, фотометрические и технические характеристики, и прочую дополнительную информацию.

Светотехнические программы позволяют проводить расчет ОУ, на основе реальных геометрических размеров освещаемого объекта, имеют средства по детальному моделированию интерьерного и окружающего пространства. Содержат также средства по моделированию фотометрических свойств материалов используемых в 3М сцене, что в совокупности дает возможность программе использовать метод трассировки лучей, для создания фотореалистических изображений будущей ОУ.

Огромная избыточная информация, получаемая в результате расчета методом Radiosity, позволяет программам предоставлять пользователю большое количество расчетной информации о светотехнических показателях ОУ, в виде таблиц, графиков и цветовых распределений. При этом программы предоставляют пользователю проводить и более глубокий анализ светотехнических параметров ОУ, путем создания новых оценок светового поля. Существующие на сегодняшний день нормативные документы ориентируются на получение качественных показателей освещения инженерными методами, в свою очередь использование в проектировании светотехнических программ, позволит разработать на их основе новые критерии оценки освеще-

щения. [28] Более подробно об этом излагается в 3-й главе настоящей работы.

В отличие от инженерных методов расчета ОУ использование светотехнических программ подразумевает собой другой подход к светотехническому проектированию. А именно, существует трехэтапная структура. Первым этапом является геометрическое моделирование освещаемого объекта/сцены. Подразумевает собой набор методик твердотельного 3М моделирования на основе имеющихся чертежей, фотографий и прочей информации. Вторым этапом служит светотехнический расчет с выбором светового оборудования. На этом этапе, в зависимости от используемой программы подбираются оптимальные расчетные параметры: шаг расчетной сетки, метод расчета, точность и т.д. Третий этап – это этап генерации фотореалистических изображений и вывод расчетной документации по проекту. Естественно при проведении проектных работ возникает необходимость переходить с этапа на этап и в обратном порядке, для достижения оптимальных количественных, качественных и эстетических критериев ОУ.

Участвующие в настоящей работе светотехнические программы весьма разнообразны, как по средствам проектирования, так и по области их применения. Но при этом имеют схожие черты. Во всех программах, за исключением программ российского производства, в качестве расчетного ядра используется метод Radiosity. Поэтому в настоящей работе мы формулируем методы проектирования ОУ, основываясь на общих подходах и принципах к выбору программы и проведению расчета. Ключевым критерием выбора светотехнической программы на наш взгляд, является ее способность качественно проводить расчет светотехнических параметров, значения которых по точности расчета должны удовлетворять светотехническим критериям и не вносить дополнительной ошибки. Необходимо так же отметить, что в настоящей работе мы рассматриваем и соответственно сравниваем, наиболее распространенные светотехнические программы на отечественном рынке, тем самым еще раз подчеркивая актуальность проблемы.

Но не стоит забывать, что с переходом от инженерных методов расчета к компьютерным, появляется ряд проблем, требующих скорейшего и четкого решения. Если не останавливаться на финансовых трудностях, связанных с модернизацией компьютерного парка на предприятиях, и не вдаваться в сложности обучения персонала светотехническим программам, то остаются проблемы и задачи научного характера, такие как:

- количество светотехнических программ на российском и зарубежном рынке достаточно велико, что в свою очередь приводит к проблеме четкого выбора той или иной программы под конкретную светотехническую задачу;

- определение погрешности расчета светотехнических параметров в программах, относительно точных аналитических решений [29-30];

- разбиение программ на группы и их классификация по их функциональной принадлежности;

- разработка методологии проектирования освещения - программными средствами;

- формулирование принципов сопряжения светотехнических программ с САПР, дизайнерскими и архитектурными приложениями;

- разработка методов компьютерного анализа и расчета естественного освещения на основе метода Radiosity;

- расчет и оценка светового поля в пространстве ОУ; [28]

В рамках настоящей работы нами будут сформулированы решения поставленных задач и даны практические рекомендации по их применению в проектной светотехнической работе.

1.3. Основные методики проектирования осветительных установок

Основными нормативными и справочными материалами по проектированию ОУ в нашей стране являются:

- Отечественные нормативные документы [31- 33]
- Зарубежные нормативные документы EN, DIN, рекомендации МКО (CIE)
- Отраслевые нормы искусственного освещения;
- «Справочная книга по светотехнике» под ред. Ю.Б. Айзенберга
- «Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения» Кноринг Г.М.
- Инструкции по проектированию, ПУЭ;
- Другая справочная и нормативная литература

Любое светотехническое проектирование начинается с выбора нормировочных показателей освещения. В настоящее время действуют нормы освещенности СНиП 23-05-95 “Естественное и искусственное освещение”.

Выбор требуемых по нормам искусственного освещения параметров (минимальной или средней освещенности, средней яркости дорожных покрытий) и параметров качества освещения (показателей ослепленности и дискомфорта, цилиндрической освещенности, коэффициента пульсации проводится, как правило, на основании отраслевых норм искусственного освещения, разработанных для многих отраслей промышленности, видов производств, общественных зданий различного назначения. При отсутствии отраслевых норм нормирование осуществляется по имеющимся отраслевым нормам с аналогичными зрительными работами, а иногда – прямое нормирование по СНиП 23-05-95.

Нормы промышленного освещения построены на основе классификации работ по определенным количественным признакам. Ведущим признаком, определяющим разряд работ, является наименьший размер различаемых

деталей, что при расчетном расстоянии до глаз 0,5 м определяет их угловой размер.

В таблице норм освещенности для работ, выполняемых вне зданий, характеристикой разрядов являются только угловые размеры различаемых деталей.

Уже в самих нормах СНиП содержатся таблицы, устанавливающие освещенность для непромышленных помещений.

При выполнении рабочего проекта (РП) и рабочей документации (РД) уровень освещенности от общего освещения выбирается для каждого освещаемого помещения и указывается на чертеже плана (или в пояснениях к чертежу). Для каждого помещения выявляются также максимально допустимые значения показателя ослепленности (или дискомфорта), цилиндрической освещенности и коэффициента пульсации, однако в проекте они не фиксируются, а производится лишь проверка принятых светотехнических решений на соответствие нормативным документам. В РП установок НО промышленных предприятий, городов и населенных пунктов принятые в проекте уровни освещенности (средней яркости) указываются в пояснениях на чертежах или в пояснительной записке.[32]

В соответствующих нормативных документах не регламентируется методы расчета показателей освещения. Они могут выполняться, как инженерными методами, так и с помощью светотехнических программ. С той только разницей, чтобы результаты расчета укладывались в регламентируемые допуски по точности, относительно реальных условий освещения.

Отдельной областью практической светотехники является расчет естественного освещения, под которой мы будем понимать освещение помещений светом неба (прямым или отраженным), проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях⁶ [31].

⁶ Подробное описание метода расчета естественного освещения по МГСН 2.06-99 не входит в настоящую работу

Естественное освещение подразделяется на боковое, верхнее и комбинированное (верхнее и боковое) [32]

В небольших помещениях при одностороннем боковом естественном освещении нормируется минимальное значение КЕО в точке, расположенной на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности на расстоянии 1 м от стены, наиболее удаленной от световых проемов, а при двустороннем боковом освещении — в точке посередине помещения [31].

Коэффициент естественной освещенности (КЕО), % - отношение естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения светом неба (непосредственным или после отражений), к одновременному значению наружной горизонтальной освещенности, создаваемой светом полностью открытого небосвода [31].

В крупногабаритных производственных помещениях при боковом освещении минимальное значение КЕО нормируется в точке, удаленной от световых проемов.

При верхнем или комбинированном⁷ естественном освещении нормируется среднее значение КЕО в точках, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности (или пола). Первая и последняя точки принимаются на расстоянии 1 м от поверхности стен (перегородок) или осей колонн.

Допускается деление помещения на зоны с боковым освещением (зоны, примыкающие к наружным стенам с окнами) и зоны с верхним освещением, нормирование и расчет естественного освещения в каждой зоне производится независимо друг от друга.

В производственных помещениях со зрительной работой I—III разрядов следует устраивать совмещенное освещение. Допускается применение верхнего естественного освещения в крупнопролетных сборочных цехах, в

⁷ сочетание верхнего и бокового естественного освещения

которых работы выполняются в значительной части объема помещения на разных уровнях от пола и на различно ориентированных в пространстве рабочих поверхностях. При этом нормированные значения КЕО принимаются для разрядов I—III соответственно 10, 7, 5 % [32].

Нормированные значения КЕО, e_N , для зданий, располагаемых в различных районах следует определять по формуле

$$e_N = e_H m_N, \quad (1.6)$$

где N — номер группы обеспеченности естественным светом по соответствующей табл. 4 СНиП; e_H — значение КЕО по табл. 1 и 2 СНиП; m_N — коэффициент светового климата по соответствующей табл. 4 СНиП.

Полученные по формуле (26) значения следует округлять до десятых долей [32].

Расчет коэффициента естественной освещенности (КЕО) следует производить:

а) при боковом освещении по формуле:

$$e_p^{\bar{o}} = \left(\sum_{i=1}^L \varepsilon_{\bar{o}_i} q_i + \sum_{j=1}^M \varepsilon_{3Д_j} b_{\Phi_j} k_{3Д_j} \right) r_0 \tau_0 / k_3, \quad (1.7)$$

б) при верхнем освещении по формуле:

$$e_p^{\bar{e}} = \left(\sum_{i=1}^T \varepsilon_{\bar{o}_i} q_i + \varepsilon_{cp} (r_2 k_{\Phi} - 1) \right) \tau_0 / k_3, \quad (1.8)$$

в) при комбинированном (верхнем и боковом) освещении по формуле:

$$e_p^k = e_p^{\bar{e}} + e_p^{\bar{o}}, \quad (1.9)$$

где L - количество участков небосвода, видимых через световой проем из расчетной точки; $\varepsilon_{\bar{o}_i}$ - геометрический КЕО в расчетной точке при боковом освещении, учитывающий прямой свет от i -того участка неба, определяемый по графикам I и II (рис. 1 и 2) СНиП; q_i - коэффициент, учитывающий неравномерную яркость i -того участка облачного неба МКО, определяемый по соответствующей табл. 1 МГСН; M - количество участков фасадов зданий

противостоящей застройки, видимых через световой проем из расчетной точки; $\varepsilon_{здj}$ - геометрический КЕО в расчетной точке при боковом освещении, учитывающий свет, отраженный от j -того участка фасадов зданий противостоящей застройки, определяемый по соответствующим графикам I и II МГСН; $b_{фj}$ - средняя относительная яркость j -того участка фасадов зданий противостоящей застройки, определяемая по соответствующей табл. 2 МГСН.

Как видно из формул (7-9) расчет естественного освещения является одной из неоднозначных и сложнейших задач светотехники, тому свидетельствуют многочисленные отечественные и зарубежные публикации [34-38]. Естественно, проведение поверочного расчета естественного освещения возможно проводить инженерным методом. Но не стоит забывать и о тех случаях, когда ручной расчет будет весьма не эффективен, по сравнению с компьютерным. В самой представленной выше методике расчета есть ряд показателей, значения которых весьма туманны. К таким показателям можно отнести: средневзвешенный коэффициент отражения фасада - $\rho_{ф}$, общий коэффициент светопропускания - τ_0 , значение средней относительной яркости фасадов противостоящих зданий $b_{ф}$ и др. В свою очередь методика расчета естественного освещения на основе светотехнических программ, методом 3М моделирования с последующим расчетом Radiosity, исключает такого рода не определенности. Конечно, встает вопрос о правомерности расчета естественного освещения с помощью светотехнических программ, но проведенные нами исследования полностью это обосновывают [35]. Включая, проделанные независимо исследования, зарубежными специалистами [34]. Более подробно о проведенных исследованиях будет написано во второй главе настоящей работы.

Останавливаясь на инженерных методах расчета, стоит упомянуть, что под таким расчетом, в широком смысле слова, можно понимать совокупность математических операций, связывающих параметры осветительной установ-

ки (число, мощность и расположение светильников и т.п.), и количественную меру результативных светотехнических показателей (освещенность, яркость и т.д.).

Число этих параметров и показателей достаточно велико, соответственно чему разнообразными могут быть и задачи светотехнических расчетов. С некоторой условностью расчеты могут быть разделены на прямые – когда определяются необходимые параметры по заданным показателям, и поверочные – когда, при известных параметрах, определяется ожидаемое значение показателей.

Обычной задачей расчета освещенности является определение числа и мощности светильников, необходимых для обеспечения заданного значения освещенности. Значительно реже выполняются поверочные расчеты, т.е. определение ожидаемой освещенности при заданных параметрах установки.

При освещении “точечными” ИС, т.е. ЛН, а также лампами типов ДРЛ, ДРИ и ДНаТ, обычно число и размещение светильников намечаются до расчета, в процессе же расчета определяется необходимая мощность лампы. При выборе лампы по стандартам допускается отклонение номинального потока лампы от требуемого расчетом в пределах от –10 до +20 %. При невозможности выбрать лампу, поток которой лежит в указанных пределах, изменяется число светильников. [39]

Все применяемые приемы расчета основаны на формулах, связывающих освещенность с характеристиками светильников и ламп:

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (1.10)$$

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (1.11)$$

Метод, основанный на (1.10) носит название метода коэффициента использования. В своих обычных формах он позволяет обеспечить среднюю освещенность горизонтальной поверхности с учетом всех падающих на нее потоков, как прямых, так и отраженных. Метод, основанный на (1.11), – точечный метод, позволяет обеспечить заданное распределение освещенности

на как угодно расположенных поверхностях, но лишь приближенно учесть свет, отражаемый поверхностями помещения.

Соответственно этим особенностям метод коэффициента использования применяется для расчета общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей, а также для расчета наружного освещения в случаях, когда нормируется средняя освещенность. Точечный метод применяется для расчета общего равномерного и локализованного освещения помещений и открытых пространств, а также для расчета местного освещения при любом расположении освещаемых поверхностей. [1]

Расчет светотехнических параметров осветительных установок в своем первоначальном виде весьма трудоемен. Светотехнические расчеты являются одними из наиболее массовых инженерных расчетов, их приходится постоянно выполнять специалистам в многих областях. Естественно, что усилия специалистов светотехников были направлены на упрощение методики расчета, в результате чего появилось много практических (инженерных) методов расчета, которые, однако, являются разновидностью двух основных методов. [1,40]

Стоит отметить, что светотехнические расчеты, как и большинство инженерных расчетов, имеют ряд факторов, влияющих на точность и качество расчетов. К ним можно отнести:

1. *Независимые факторы от способа расчета:*

- Отклонения светотехнических характеристик ИС от номинальных ($\pm 20\%$) [39];
- Отклонение значений КПД световых приборов и их КСС (не менее 10%) [39];
- Минимальная информация о фотометрических данных расчетных поверхностей;
- Колебания электрических параметров сети;
- Неточность данных о характеристиках поглощающей среды, через которую распространяется свет;

- Степень точности принимаемого для расчетов значения коэффициента запаса K_3 ;

2. Факторы, зависящие от способа расчета

- Степень точности используемых методов интерполяции;
- Степень точности представления КСС светового прибора;
- Необходимая математическая точность в расчетах;
- Степень точности определения угловых параметров;
- Учет доли отраженного света;

В результате проделанного анализа совершенно очевидным становится, что имеющаяся инженерная база по расчету осветительных установок весьма устарела. Как показывают отечественные и зарубежные источники [30,34,41], расчет осветительных установок необходимо и целесообразно проводить в светотехнических программах. В результате перехода от проектирования по старой инженерной методике к новой, основанной на применении компьютерных программ, мы получаем существенные улучшения качества светотехнического расчета, такие как:

- Скорость расчета ОУ занимает минуты, а не часы;
- Выбор светового оборудования значительно упрощается при использовании электронных баз в форматах: ies, ltd, и т.п.;
- Возрастает в значительной степени точность светотехнического расчета, особенно в случаях расчета систем отраженного или комбинированного освещения;
- Расчет естественного освещения переходит с уровня сложнейшего вычисления на вполне повсеместно доступный уровень, в связи с многочисленными реализациями в КСП;
- Составление выходной проектной документации проводится (в большинстве случаев) в автоматическом режиме, что значительно экономит время;
- Возможность получения, расчетных фотореалистических изображений ОУ, для проведения ее анализа, так и для предоставления их непосредственно заказчику;

- Появляется возможность в кратчайшие сроки выполнить светотехнический проект в нескольких вариантах с заведомо правильными (светотехнически) результатами, для предоставления выбора заказчику;
- Огромное количество числовой и графической информации, получаемой в результате расчета, позволяет проводить подробный анализ будущей ОУ, что в результате помогает реализовать её с наименьшим риском допущения ошибки;

Данный перечень положений, далеко не полный, но и его хватает, для понимания того, что современное проектирование ОУ должно осуществляться в рамках программных светотехнических приложений.

Предлагаемые в настоящее время методики проектирования [31,32] основанные на применении инженерных методов расчета не подходят к применению их в компьютерном светотехническом проектировании. Это можно объяснить несколькими факторами:

1. Архитектурное освещение:

- В результате светотехнического расчета и выбора светового оборудования требуется представление фотореалистических изображений будущей ОУ, т.е. в большинстве случаев архитектурное освещение предполагает разработку проекта на реальной фотографии объекта или на его 3М модели, что в свою очередь вынуждает проектировщика – светотехника обращаться к программам 2М или 3М графики.
- Использование цвето-динамического освещения в архитектуре и интерьере не возможно без предварительного компьютерного анализа, и представления визуализаций.
- Строительство новых по архитектуре зданий, в которых преимущественно используется стекло, бетон и металлоконструкции, накладывает особые ограничения на проектирование ОУ. Использование естественного света в дневное время суток и экономия электроэнергии в вечернее и ночное вре-

мя в последнее время становятся доминантой⁸. Проектирование ОУ в таких рамках не мысленно без применения светотехнических программ.

2. Интерьерное освещение:

- Светотехнический расчет интерьерного освещения уже давно вышел за рамки выбора светового оборудования по уровням освещенности на рабочих плоскостях. В настоящее время (а в дальнейшем станет нормой) от светотехника требуется выбор светового оборудования, которое не только создает комфортные условия для находящихся в помещениях людей, но гармонично вписывающихся в общую обстановку помещения [42]. В данном случае светотехник должен сочетать в себе инженера и дизайнера в одном лице. Естественно, что достижение этой цели не возможно без качественного 3М моделирования цветосветовой среды интерьера и визуализации.
- Разработка систем отраженного и совмещенного освещения не возможна без применения 3М светотехнических программ на основе метода Radiosity. В противном случае, проектируемая ОУ, может не выполнять своих функций.

Подводя итог к изложению факторов, можно заключить следующее – светотехническое проектирование на основе светотехнических программ не допускает условных допущений в отличие от инженерных методов расчета, а проводит точный (в известных ограничениях) энергетический расчет излучения в проектируемой ОУ. В целом, имеющаяся инженерная расчетная база должна не исключаться, а лишь значительно дополниться, а в некоторых случаях пересмотреться в результате использования КСП на основе решения метода Radiosity. Предлагаемая нами новая методика расчета, основанная на применении светотехнических программ, содержит следующие основные положения:

⁸ С 1-го января 2006г. В силу вступают нормы EN 12464, которые жестко регламентируют экономию электроэнергии в ОУ жилых и общественных зданиях.

Правильный выбор расчетных программ по имеющимся исходным данным об объекте (вид светотехнического проекта).

Условно все светотехнические проекты можно разделить на несколько основных видов это:

- Архитектурное освещение
- Интерьерное освещение
- Спортивное освещение
- Дорожное, парковое освещение

К каждому виду светотехнического проекта требуется свой подход и программное обеспечение.

Создание и/или адаптация под светотехнический расчет уже имеющихся 3М освещаемых объектов.

При 3М моделировании/адаптации расчетной сцены необходимо выполнять ряд требований:

1. Моделирование проводить только тех элементов объекта, которые вносят существенный вклад в распределение излучения в сцене, к таким объектам относятся:
 - для интерьерного освещения элементы отвечающие критерию 1:10 от площади помещения;
 - для архитектурного и дорожного освещения элементы, препятствующие прямому ходу света от светового прибора;
2. При адаптации имеющейся 3М сцены, удалить/скрыть соответствующие элементы, описанные в п.1.
3. Использовать приближенные к реальным фотометрические характеристики материалов. По возможности исключить значения коэффициентов отражения поверхностей имеющие значения более 0.80

4. При моделировании СП использовать только оригинальные КСС в соответствующих форматах или в случае необходимости аналогичные им.
5. При расчете естественного света особое внимание уделять моделированию окружающих здание объектов (коэффициенты отражения, габаритные размеры, пространственные координаты).

Сопряжение расчетных светотехнических программ между собой, CAD приложениями и дизайнерскими программами по визуализации.

Существующие на сегодняшний день светотехнические программы построены таким образом, что подразумевают (по умолчанию) при проведении светотехнического расчета наличие исходных данных в формате *.dxf или *.dwg. Данные два формата не только самыми распространенными и понимаемыми всеми программами⁹, но и являющиеся промышленными стандартами. Поэтому использование export-а такого вида исходных данных в программы в начале проектирования, является стандартной операцией.

Наиболее сложным случаем, является работа export/import с форматами 3М графики. Но для начала попробуем выяснить, с какими форматами работают исследуемые нами программы:

DiaLux 4.1. - осуществляет import таких форматов как: dxf и sat, export проводится так же в формат *.dxf.

Relux 2005 - осуществляет import таких форматов как: dxf и asc (ASCII), export проводится так же в формат *.dxf.

Litestar - осуществляет import и export формата *.dxf.

Lightscae – осуществляет import таких форматов как: dxf, dwg, 3ds, lws (lightwave Scene), export проводится только в формат *.vrmf

⁹ За исключением программы Light-in-Night(Road) из-за узкой специализации.

3D studio Viz 2006 - осуществляет import более чем 20 форматов: dxf, dwg, 3ds, lp,ls,wrl и др., exort проводится так же в более чем 15форматов: dxf, dwg, 3ds, lp,ls,wrl и др.

Проанализировав данный перечень возможностей работы программ с форматами данных, можно заключить следующее, что для полноты возможностей работы программ с 3М сценами нам не хватает редактора понимающего два формата: *.asc (ASCII) и *.sat. Таким редактором может выступить или AutoCAD или программа SolidWorks.

Таким образом, мы заключаем, что данные программы без особого труда сопрягаются между собой, позволяя осуществлять проектирование ОУ используя «параллельный расчет» в одной и в другой группе программ с последующим обменом расчетной информацией.

Выводы по первому разделу:

1. Совокупность предлагаемых методов компьютерного проектирования позволяет вывести светотехническую программу за рамки «калькулятора», делая возможным в короткое время количественно и качественно спроектировать осветительную установку в нескольких вариантах, помогая правильно выбрать используемые СП, при этом оставаясь только инструментом в руках инженера – светотехника;
2. Использование светотехнических программ представляет возможности: создания многовариантного проекта освещения, разработки анимационных роликов, визуализация систем динамического освещения и многое другое, что не возможно добиться традиционными методами;
3. При компьютерном светотехническом проектировании, необходимо использовать методы основные на адаптации и/или создании 3М освещаемых объектов, позволяют значительно сократить время разработки светотехнического проекта, путем вычитания из расчета областей и объектов в наименьшей степени влияющих на распределение излучения в сцене;

4. Методы по сопряжению светотехнических программ между собой и с конструкторскими САД приложениями (AutoCAD, SolidWorks, 3D studio Max), создают благоприятные условия по проведению качественного светотехнического проектирования с нуля. А именно, имея в распоряжении только чертежную документацию на выходе получить фотореалистичные изображения будущей осветительной установки;
5. Использование светотехнических программ, использующих метод глобального освещения, является единственным вариантом реализации качественного светотехнического проекта, позволяя на стадии проектирования получить результаты с наименьшим отклонением от реальности;
6. В результате перехода от инженерных методов расчета световых параметров к компьютерным, появляется проблема точности программного расчета;

2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

2.1. Требования и новые методы светотехнического проектирования

В мировой практике проектирования осветительных установок уже несколько лет в качестве основного инструмента для расчета и моделирования света используют специализированные светотехнические программы. Наверно уже ни у кого сейчас не возникает сомнений в превосходстве компьютерного моделирования над традиционным макетным (ручным) моделированием.

За последние 5- 6 лет на светотехническом рынке программного обеспечения (ПО) произошел бум в результате удешевления компьютеров до уровня каждому проектировщику, появились простые средства разработки программ, глобальное освещение открыло возможности точного численного расчета ОУ [10], в результате появились десятки светотехнических программ, разного уровня и специализации.

В настоящей главе мы попытаемся сравнить и дать оценку основным, используемым в проектной практике, компьютерным программам. Но для начала давайте попробуем ответить на вопрос: Какие основные функции должна выполнять программа, чтобы наиболее эффективно помочь проектировщику выполнить светотехнический проект?

- Программа должна иметь интуитивно понятный и привычный для проектировщика интерфейс (Graphical User Interface - GUI), что соответственно позволяло бы в достаточно малый срок обучить в ней работать большое количество проектировщиков;
- Светотехническая программа должна иметь удобную базу данных используемого светового оборудования, с возможностью внесения в неё (по необходимости) светильников сторонних производителей, что подчас играет не маловажную роль, т.е. база должна тем или иным образом работать со стандартными форматами описания светильников (IES,

LTD, ULD, TM14 и т.д.) Под форматами описания светильников понимается электронное описание КСС светового прибора по углам с краткой дополнительной информацией о нем, к таким форматам относятся IES, LTD. Также существуют форматы позволяющие иметь полное представление о световом приборе включая его КСС, трехмерное изображение, фотографии, габаритные чертежи и дополнительную информацию – примером такого формата является ULD, использующийся в программе Dialux;

- Желательным, но не обязательным, использование при светотехническом расчете параметров, регламентируемых в нормативных документах, как российских, так и зарубежных, с последующим выводом итоговой проектной документации;
- Программа должна представлять пользователю разнообразные светотехнические параметры (освещенность, яркость, показатель дискомфорта, изолюксы и т.д.), при этом точность расчета не должна быть менее 10%¹⁰ [32];
- Программа должна иметь, либо собственные средства для построения 3D сцен, либо иметь возможность импорта сцены из специализированных 3D редакторов (работа с 3ds или dxf/dwg-форматами);
- Иметь удобные и разнообразные методы расположения светильников;
- Желательна визуализация результатов – зрительная оценка качества освещения;
- Необходимо многообразие форм представления результатов для однозначной оценки освещения;
- Возможность активного диалога для итерационного расчета ОУ и выбора наилучшего проекта;

Это далеко не полный список требований, предъявляемых к качественной светотехнической программе. Очевидно, что создать программу, которая

¹⁰ Обусловлено суммарной погрешностью измерения КСС светового прибора, не точностью задания коэффициентов отражения поверхностей и не точностью аппроксимации КСС программой.

будет отвечать перечисленным требованиям, не только технически сложно, дорого, но и не рационально. Поэтому в основном программы имеют достаточно узкую специализацию. Скажем, одни прекрасно создают визуальные картинки и анимационное видео, прекрасно подходят для внутреннего и архитектурного освещения, другие специализируются на расчете дорожных развязок и магистралей, третьи служат рабочей лошадкой проектных электротехнических организаций и бюро. Для получения более подробной информации по классификации программ см. приложение табл. №1.

Как уже обсуждалось, для правильного выбора той или иной расчетной программы, проектировщику необходимо четко представлять поставленные перед ним требования по проектированию ОУ и попытаться использовать программу наиболее рационально.

Поэтому нами была разработана общая методика проектирования ОУ в светотехнических программах.

Стоит отметить, что светотехнический проект занимает, как правило, определенное место в проекте в целом; будь-то строительный проект, проект благоустройства или реконструкции [39]. В связи с этим исходными данными для начала светотехнического проектирования являются чертежи, фотографии планы и прочая электронная/цифровая информация, дающая исчерпывающую информацию об освещаемом объекте.

Основным положением, предлагаемой нами методики является правильный выбор расчетных программ по имеющимся исходным данным об объекте (вид светотехнического проекта).

Условно все светотехнические проекты можно разделить на несколько основных видов это:

- Архитектурное освещение
- Интерьерное освещение
- Спортивное освещение
- Дорожное, парковое освещение

К каждому виду светотехнического проекта требуется свой подход и программное обеспечение. На схемах (1-5) представлены этапы выполнения светотехнического проекта по видам.

Дорожное и парковое освещение:

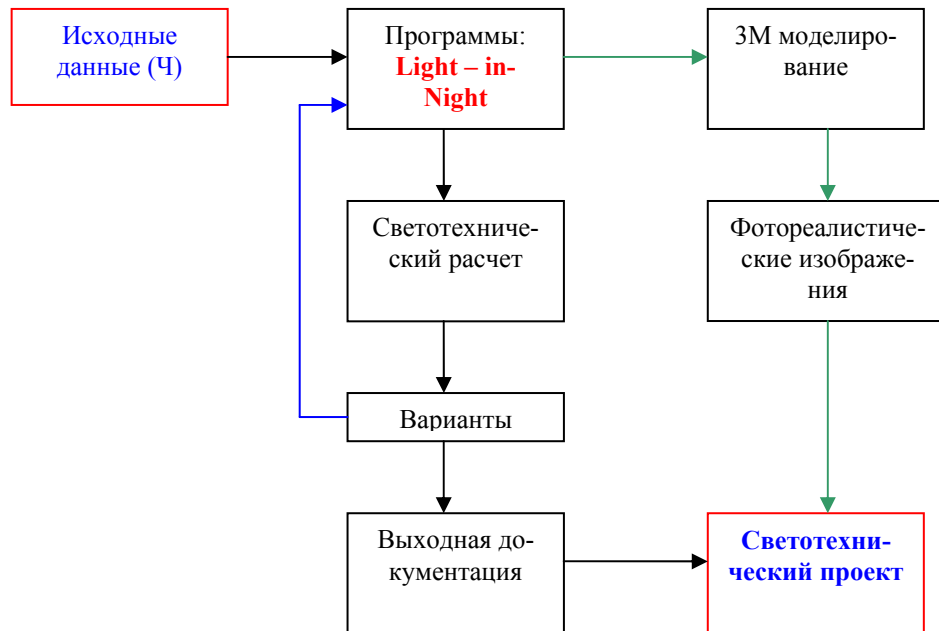


Схема 1. Дорожное и парковое освещение

Здесь и далее под *исходными данными* будет пониматься наличие чертежей (*Ч*), фотографий (*Ф*) или 3М моделей (*3М*).

Синим цветом - обозначена обратная связь, которая позволяет в отличие от инженерного метода расчета, в короткое время производить генерацию вариантов освещения.

Зеленым цветом - обозначен путь, по которому следует идти при выполнении сложных и не стандартных типов ОУ. Или в тех случаях, когда требуется визуально продемонстрировать ОУ вписанную в окружающее пространство.

Спортивное освещение:

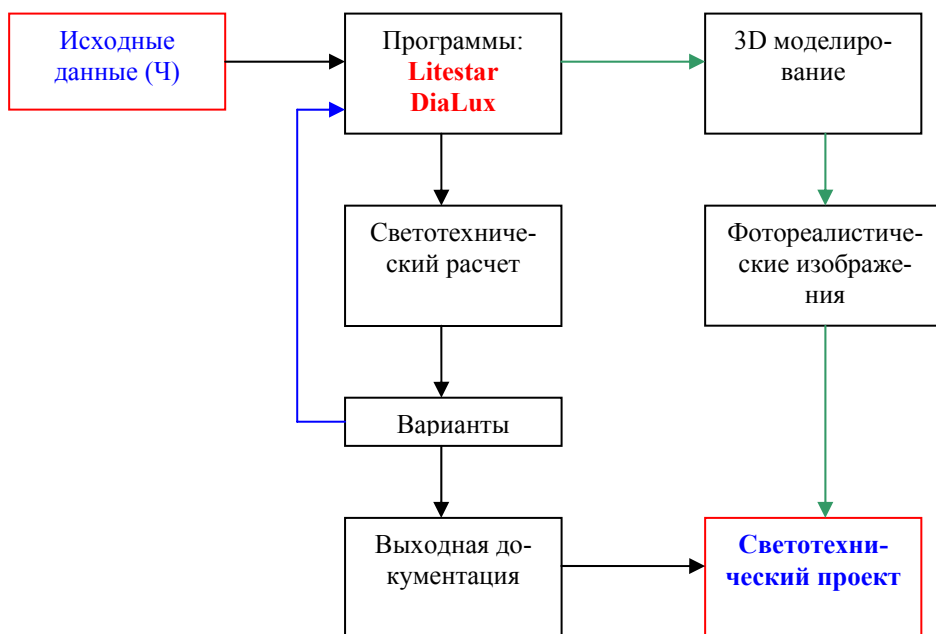


Схема 2. Спортивное освещение

Использование программы DIALux в данном случае обусловлено возможностью расчета естественного освещения на спортивной площадке. Зеленым цветом обозначен путь, по которому следует идти при расчете крытых спортивных сооружений с указанием конкретных мест привязок светового оборудования.

Интерьерное освещение

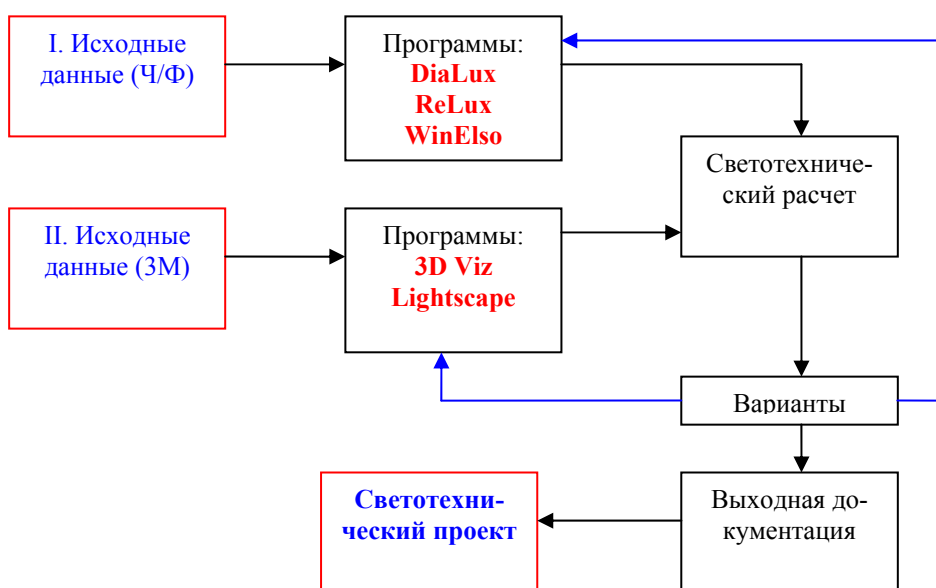


Схема 3. Интерьерное освещение

Освещение интерьеров – один из самых распространенных видов светотехнического проектирования, который условно можно разделить на два варианта, в зависимости от предлагаемых исходных данных. Отдельной группой стоит выполнение проекта освещения (*световой дизайн*), при котором требуется продемонстрировать и выбрать не только световое оборудование, но и показать на фотореалистических изображениях как оно вписывается в окружающую среду, дать рекомендации по выбору цветового решения интерьера, мебели, типов оконных проемов и т.п.

Интерьерное освещение (световой дизайн)

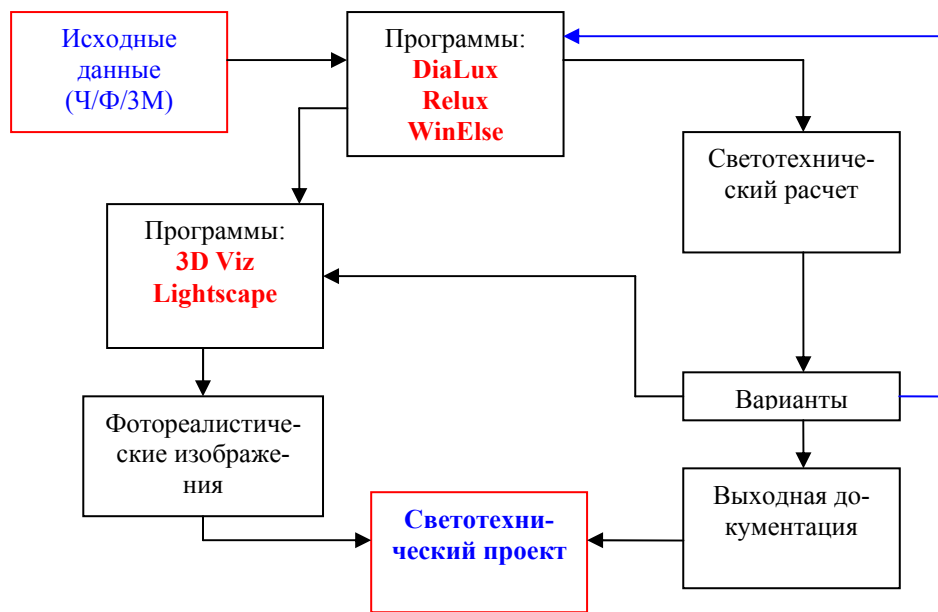


Схема 4. Интерьерное освещение (световой дизайн)

Использование при световом дизайне выраженной параллельности обусловлено не возможностью в классе программ (DiaLux, Relux, WinElse) проводить качественное 3М моделирование в отличие от 3D studio Viz, Lightscape. Однако использование этих программ параллельно становится весьма эффективным, позволяет в короткий срок выполнить качественный светотехнический проект в нескольких вариантах.

Архитектурное освещение:

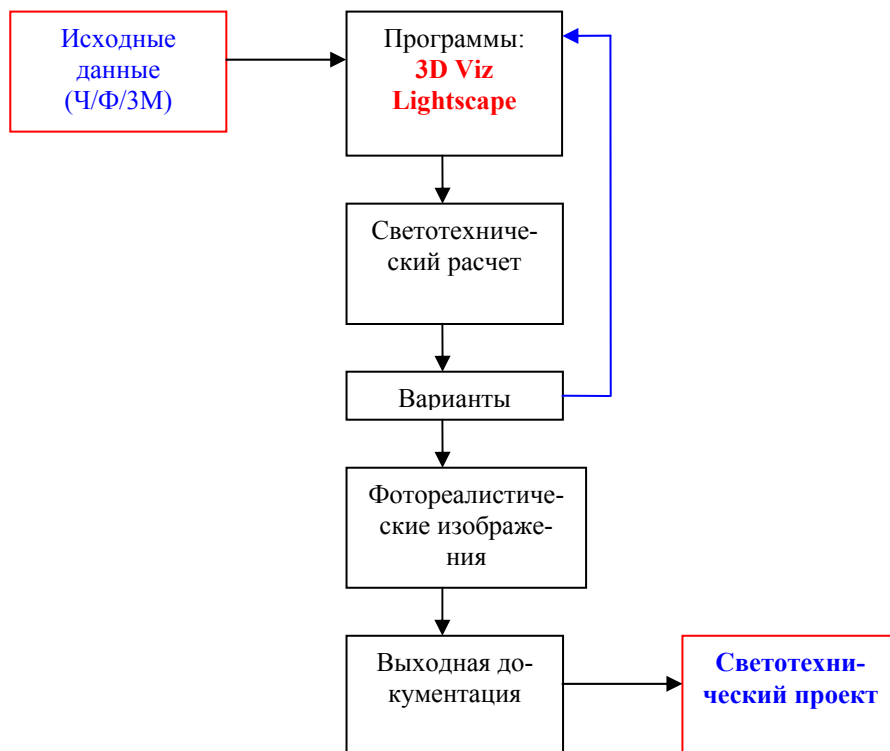


Схема 5. Архитектурное освещение

Особенность выполнения проекта архитектурного освещения состоит в неоднозначности исходных данных. Освещаемый объект может находиться в нескольких состояниях: проектирование, стадия строительства, реконструкция. Если здание находится в третьем состоянии, то возможно выполнение проекта освещения по имеющимся фотографиям, т.е. с привлечением редакторов 2М графики (Adobe Photoshop, Adobe Illustrator), в противном случае без 3М моделирования проект освещения реализован быть не может.

В целом, предлагаемая методика моделирования освещения состоит из совокупности шагов, которые необходимо предпринять, чтобы выполнить качественно проект освещения. Началом методики моделирования можно считать правильный выбор светотехнических программ, в чем поможет разработанная нами таблица сравнения. Далее – это использование *схем* моделирования освещения, разработанных для основного спектра осветительных установок: интерьерное, дорожное, архитектур, спортивное освещение и световой дизайн, как отдельная группа светотехнических проектов.

В каждой из этих схем центральное место занимают светотехнические программы 3М моделирования, использующие в расчетах метод радиосити. Данное обстоятельство вынуждает нас включать в методику, как описание основных принципов моделирования 3М сцен (в рамках светотехнических расчетов), так и подходы к правильному использованию метода конечных элементов. Заключительной частью методики можно считать разработанные нами подходы по анализу светового поля, для определения качества проектируемых осветительных установок.

Таким образом, нами формируется костяк определенных этапов (шагов) современного моделирования освещения с помощью светотехнических программ, в котором сами программы выступают только расчетными инструментами.

Излагаемая нами методика моделирования освещения далеко выходит за рамки *руководств* по пользованию программами, т.к. она практически не затрагивает конкретные функции той или иной светотехнической программы, а является обобщающей. Что позволяет использовать ее с любыми в дальнейшем появляющимися программами.

Не возможно не отметить, что предлагаемая методика моделирования освещения может быть успешно использована как методический материал для обучения студентов и действующих проектировщиков-светотехников в рамках повышения квалификации.

2.2. Возможности использования 3М моделирования для светотехнического проектирования

В настоящее время при светотехническом проектировании используется весь арсенал средств программного расчета и моделирования. Строительство сложных по форме архитектурных зданий и сооружений, использование специального светового оборудования, создание эффектной цветовой среды всего комплекса застройки требуют от проектировщика не только расчета дискретного или фрагментарного распределения освещенности и яркости на

освещаемой поверхности, но и представление визуального фотореалистичного изображения проектируемых объектов. Часто, а в дальнейшем на наш взгляд это станет нормой, заказчик для принятия решения о реализации требует представления ему визуального изображения результата работы будущей осветительной установки. Наиболее распространенной практикой в настоящий момент является графическая обработка (например в графическом редакторе Photoshop) полученных от заказчика, или сделанных цифровой фототехникой самим проектировщиком фотоснимков объекта. Этот путь визуализации предлагаемых светотехнических решений далеко не лучший. Качество самих снимков, их ракурс, наличие посторонних строений и деревьев, а особенно отсутствие объекта как такового (в стадии проектирования) или не полностью построенного не позволяют убедительно показать преимущества выбранной системы освещения.

С учетом развития компьютерной техники все чаще при разработке и выполнении светотехнического проекта используются программы 3М (трехмерной) графики, изначально созданных для других целей - детального моделирования объектов, пространств, конструкторских изделий, создания анимационных видеороликов и т.д. Ставший реальностью симбиоз светотехнических программ расчета и редакторов 2М и 3М графики является наиболее эффективным при проектировании ОУ любого уровня сложности. Попытаемся сформулировать и представить на примерах возможности использования 3М моделирования для светотехнических проектов.

И так, в чем разница между 3М моделированием и 3М светотехническим проектом. Изначально необходимо представлять, что оба этих способа проектирования преследуют разные цели:

- 3М моделирование, в основном, используется для разработки объектов находящихся на стадии проектирования¹¹, требующих достаточно точно-

¹¹ Здесь и далее будет идти речь только о архитектурных сооружениях, интерьерах и освещаемых пространствах

го объектного представления, зачастую с использованием специальных визуальных эффектов. Такое проектирование мы будем называть *дизайнерским*.

- Светотехнический проект *использует* созданную 3М модель в специализированных расчетных светотехнических программах (таких как Lightscape, DIALux и т.д.).

Необходимо отметить, что в последнее время появился новый класс компьютерных программ, в которых синтезированы оба способа проектирования: построение 3М объектов и расчет для них светотехнических характеристик (например - 3D Studio VIZ).

Дизайнерское проектирование требует намного больше производственных ресурсов по прорисовке детализации, чем светотехническое. Точные 3М модели дороги и трудоемки в исполнении и подчас на их создание уходят месяцы.

К примеру, существует задача наружного освещения условного здания произвольной сложности. Целью дизайнерского проектирования в данном случае будет детальное моделирование фасада здания (с прорисовкой архитектурных элементов) и взаимодействующего с ним окружающего пространства. Задача же светотехнического проектирования сводится не к детальному моделированию самого объекта, а к выделению значимых элементов здания, существенно влияющих на световосприятие в темное время суток. Особое внимание уделяется фотометрическим характеристикам освещаемых поверхностей. Если в объемном моделировании этот параметр сооружения играет второстепенную роль, то в светотехническом проекте ведущую роль занимает фотометрия материалов (коэффициент отражения, преломления, пропускания и т.д.) Ошибочное представление характеристик отражающих поверхностей может привести к значительным искажениям визуального восприятия освещения и как следствие неудовлетворительному результату реализации светотехнического проекта.

Существует несколько основных принципов построения 3М моделей для их последующего применения в светотехнических программах [28]:

- Использовать приемы и разумные упрощения для построения объектов с наименьшим количеством поверхностей, что позволит в дальнейшем, качественно сократить время светотехнического проектирования
- Создавать при построении модели только необходимых и достаточно больших, по сравнению с заданными для освещения, объектов. Не концентрировать свое внимание на несущественных элементах и тонкостях окружающего пространства, конечно, если не идет речь о строгой фотореалистичности.
- Предусматривать построение модели с учетом дальнейшего использования итоговых изображений заранее выбранных ракурсов объекта, не акцентируя внимания на деталях в них не вошедших.
- Сводить к минимуму использование сложных, составных и модифицируемых элементов построения
- Стремиться применять существующие базы сложных объектов, таких как деревья, машины, люди, и т.п. или похожими на них элементами
- Заменять как можно больше незначительные по величине объекты текстурами, сохраняя тем самым реалистичность изображений и существенно экономя время проектирования.

Для примера рассмотрим 3М модель для проекта освещения открытого теннисного корта (рис.2.1.)

При построении данной 3М модели стоит помнить, что мы занимаемся освещением исключительно корта, а не прилегающих к нему территорий. Поэтому доскональная прорисовка прилегающих к корту территорий не обязательна. Но и забывать о ней не стоит, так как ее наличие придает не только реалистичность выходному изображению, но и позволяет точно привязать спортивную площадку на изображении к местности¹². С этой задачей справиться достаточно просто, путем использования функции (environment) окружающего пространства, использующую либо растровое изображение, либо

¹² Другими словами узнать точное место виртуального наблюдателя

изображение с расширенным диапазоном яркости (HDRI). Стоит обратить внимание, что без потери качества выходного изображения, использование этой не хитрой манипуляции экономит значительное количество времени и сил, как при проектировании, так и при дальнейшем светотехническом расчете модели.

Проектирование архитектурного освещения в светотехнической практике занимает особое место. При подготовке проекта нужно не только художественно и точно создать вечерний цветосветовой образ объекта с учетом нормируемых уровней яркости фасада здания, но и показать его реальное местоположение в комплексе окружающей застройки. Чтобы справиться с этой задачей, можно создавать подробную 3М модель с прорисовкой окружающего пространства. Но лучше и целесообразнее использовать метод наложения созданного фотореалистического изображения на реальную фотографию местности (как показано на рис. 2.2-2.3).

Как видно из представленных материалов используемый метод прост и экономичен по времени проведения визуализации, но вместе с тем позволяет наглядно убедиться в том, что созданный световой образ объекта органично вписывается в окружающее его пространство.

В существующей практике инженеру – светотехнику часто приходится работать непосредственно с архитектурными бюро, которые по ряду причин обращаются к ним с задачей освещения проектируемых ими сооружений. Как правило, создающие проект архитектурные бюро сами или у сторонних организаций разрабатывают 3М модель будущего объекта. Перед светотехниками в данном случае стоит задача выбора и размещения светового оборудования на уже созданной 3М модели. При выполнении данной работы необходимо решить ряд вопросов, связанных с выполнением поставленной задачи. Во-первых, необходимо правильно выбрать расчетную светотехническую программу, в которой наиболее удобно и качественно можно осуществить соответствующий проект. В настоящее время рынок расчетных светотехнических программ достаточно обширен. Но как показано в [30], все расчетные

программы по большей части имеют относительно узкую специализацию и выбирать фактически приходится между двумя продуктами лидера программ компьютерного проектирования компании Autodesk: Lightscape 3.2. или 3D Studio VIZ. Два данных продукта отличает, то что в первом достаточно скудно реализована редакторная часть работы с 3М объектами, в отличии от второго, в который входит полноценный редактор 3М графики.

После выбора программы для проектирования освещения возникает новая дилемма. Дело в том, что архитектурные бюро создают свои 3М модели для детального проектирования и представления объекта. Это неминуемо влечет за собой большой объем файла 3М модели. К примеру, модель созданная в 3D Studio Max (*.max) занимает 80Мб, что уже является достаточно весомым для неспециализированных компьютеров. При конвертации данного файла с 3М моделью в формат *.lр, понятный для программы Lightscape, его размер достигает 650 Мб! Понятно, что при таких объемах информации светотехнический расчет может значительно усложниться (если вообще практически возможен). Использование программы 3D Studio VIZ ситуации не меняет, так как установка светового оборудования и дальнейший расчет освещенности такого объекта может занять огромное количество времени и ресурсов, даже ультрасовременного компьютера. Выход из данной ситуации должен быть простым и очевидным - необходимо изменять каким-то образом саму 3М модель. В этом нам может помочь любой 3М редактор, к примеру 3D Studio Max или тот же 3D Studio VIZ.

На рис.2.4. представлена 3М модель коттеджа с детальной прорисовкой архитектурных элементов, где стоит обратить внимание на мелкие, на первый взгляд, не значительные детали: перила, колонны, пилястры, лепнина и т.д. Процесс их моделирования кропотлив и относительно сложен - такие детали состоят из множества граней и элементов, что в значительной мере увеличивает объем файла всей модели. Простая замена или, в крайнем случае, их удаление, приводит к серьезному уменьшению объема 3М файла без зна-

чительного визуального ухудшения отредактированного изображения (рис 2.5.)

В результате проведенных изменений в модели, сохраняемый файл не превышает размера 7 Мб, что весьма приемлемо для светотехнического расчета в любой из предлагаемых нами программ, даже при использовании средней конфигурации компьютера.

Так же в практике проектирования осветительных установок часто предлагается разработать проект освещения на основе строительных чертежей рабочих помещений. При этом световое проектирование будет заключаться в выборе светового оборудования, которое позволит обеспечить регламентируемые уровни освещения на рабочих поверхностях. Как правило, в такого рода проектах не требуется разработка 3М модели помещений. При данном виде проектирования зачастую требуется только обозначить месторасположение выбранного светового оборудования на чертеже и при этом вполне логично проводить светотехнический расчет непосредственно на предлагаемой документации. И в настоящее время такая возможность существует. Она реализована в программном продукте «Русской Промышленной Компании» WinElso, осуществляющим светотехнический проект непосредственно на чертеже в программе AutoCAD. Стоит заметить, что в силу точности и технологичности это направление светотехнического проектирования стоит считать весьма перспективным. Тому свидетельствует то, что в 2005 году компания AG Informatic, выпустила платный plug-in Relux CAD к своей одноименной программе, реализующий выше описанную способность проведения светотехнического проектирования на чертеже в программе AutoCAD.

Существует и другой вариант создания проекта освещения с использованием черченной документации - использовании программы DIALux. Существенным отличием данной программы от WinElso является то, что светотехнический расчет проводится не на чертеже, а всего лишь использует его в виде вспомогательной маски для 3М моделирования. Такой подход имеет не-

которые существенные достоинства:

1. Светотехнический расчет проводится не на плоской 2М модели, а в 3М пространстве со всеми очевидными его плюсами.

2. Существенно оптимизируется сама модель, так как имеется возможность исключить из неё множество деталей, существенно не влияющих на распределение освещенности.

В настоящее время светотехническое проектирование, безусловно, смещается в сторону расчета ОУ на 3М моделях, качественно поднимая уровень расчета и предоставления проектной документации. При этом существует определенная междисциплинарные трения, между предметом компьютерной графики и светотехникой. Как уже отмечалось, 3М моделирование первоначально развивалось и развивается до сих пор (вероятно и будет развиваться) ориентируясь в первую очередь на нужды кинематографа, графики, анимации и объемному конструированию. В свою очередь светотехническое проектирование ранее (до 1998 года) вообще не применяло 3М моделирование. После же светотехническое проектирование на 3М моделях стало развиваться параллельно развитию 3М графики, интегрируя в себя все ее новые достижения.

Таким образом, рассматривая перспективы дальнейшего развития двух дисциплин, можно заключить, что они будут постепенно сходить, образуя тесную взаимосвязь. Мы считаем, что в сложившейся ситуации необходимо образование новой дисциплины – *моделирование освещения*, полем деятельности которой будет обучение методам работы в светотехнических программах, исследование методов проектирования ОУ (качественно отличающееся от существующих на сегодняшний день), разработка новых принципов учета качественных показателей освещения, использование и разработка управления освещением в ОУ, изучение основ дизайна и композиции, архитектуры, исследование цветосветовой среды, методы 3М моделирования, разработка и расчет новых световых приборов и много др. К сожалению, направление светотехнического 3М проектирования у нас в стране развито весьма слабо,

тому свидетельствуют малое количество публикаций на эту тему, и проводимых семинаров. Однако, учитывая все плюсы, которые приносит новая методика 3М светотехнического проектирования, мы уверены, что это направление будет стремительно развиваться. Если попытаться прогнозировать не далекое будущее светотехники, то нам видится итогом любого¹³ светотехнического проекта – видео ролик с фотореалистическим изображением будущей ОУ, кроме того, прилагаемая к нему исчерпывающая светотехническая документация по качественным и количественным показателям освещения, с описанием светотехнического оборудования.

Но уже сейчас, благодаря современному светотехническому программному обеспечению, описанному выше, и в [30] уже возможно сделать светотехническое проектирование высококачественным и комплексным - от выбора светового оборудования, расчета количественных и качественных показателей осветительных установок, до разработки сложнейших систем освещения¹⁴. Подробная детализация конструктивных и дизайнерских решений инсталляции световых приборов позволяет разрабатывать проекты освещения, которые ранее были бы слишком сложны в исполнении или невозможны.

2.3. Классификация и точность расчета светотехнических программ

В связи с повсеместным использованием светотехнических программ для расчета параметров ОУ. У пользователей часто возникает два вопроса: «Какова точность расчета показателей освещения в программе относительно аналитического (точного) решения?» и второй вопрос: «Какая программа ведет более точный расчет?». Чтобы ответить на эти и другие актуальные вопросы нами было решено провести тестирование светотехнических программ по их точности расчета значений освещенности на полу 3М тестового помещения от трех типов источников света (точечный, линейный и плоскостной).

¹³ По мере существующей необходимости и не типовые проекты

¹⁴ Цветодинамические световые системы, системы отраженного света, проектирование дорожных развязок, комплексное освещение районов и городов, освещение спортивных сооружений и т.д.

Сравнения программ проводилось на примере 3М модели стандартного помещения с размерами (h (высота) = 3 м, l (длина) = 5 м, b (ширина) = 3 м). При сравнении программ выбирались параметры расчета, используемые программами по умолчанию, тем самым мы ставим все программы в равное положение.

В компьютерной графике создание источника света и работа с ним ничем не отличается от работы с обычными объектами 3М сцены. Отличие их от всех остальных в том, что в свойствах источников света добавляются определенные светотехнические параметры. В целом любой объект виртуального мира можно сделать источником света или световым прибором, наделив его специфическим набором свойств и параметров (КСС, световой поток, тип источника, спектральный состав и т.д.).

Построения кривой силы света (КСС), для дальнейшего использования ее в виртуальном световом приборе сводится к заданию значений силы света (в канделах (kd)) по двум углам. Шаг, с которым мы будем вводить значения КСС, определит точность последующего светотехнического расчета распределения излучения в сцене.

В компьютерной графике для сохранения параметров КСС используются специализированные текстовые файлы с расширением (ies, ltd, uld и т.д.) такое разнообразие типов форматов обусловлено историческими факторами и пристрастиями программистов, создающие программное обеспечение. Создавать свою КСС пользователь может двумя способами, либо в ручную записывать значения силы света в том или ином типе файла, либо пользоваться специальными редакторами, к примером такого редактора может служить встроенная в программу Lightscape процедура *Photometric web*, позволяющая не только создавать КСС любой сложности, но и непосредственно видеть ее на экране монитора.

Для нашей тестовой работы мы воспользуемся процедурой *Photometric web* и создадим два¹⁵ типа тестовых КСС сложной формы т.к. мы не знаем, по какому закону программы аппроксимируют ее значения, а проверка программ на простых формах¹⁶ КСС не приносит результата. Программы могут вычислять силу света линейной интерполяцией, квадратичной или иной. Значения первой КСС вводились следующим образом: возьмем нашу модель помещения, поместим (виртуально) на потолке помещения точечный источник света, из него проводим прямые, пересекающие контрольные точки, находящиеся на полу помещения с шагом в 20 см, далее вычисляем вертикальные углы (α). Таким образом, мы получили 13 углов от 0 до 39 град. и каждому в соответствии задавалось определенное значение силы света рис 2.6.

Вторая же КСС, в отличие от первой имеет математическое описание:

$$I_{\alpha} = I_0(3 \cos(\alpha) + \cos^2 3\alpha) . \quad (2.1)$$

В формировании КСС принимали только значения силы света при α кратном 5 (0, 5, 10, 15 ...) град.

Теперь, когда мы имеем в своем распоряжении источник света с заданной КСС, нам понадобятся создать несколько видов световых тел: точка, линия и поверхность, что можно успешно сделать в 3М – редакторе. Так как существует вероятность того, что программы будут рассчитывать не точечные световые тела, как точечные.

В целом существующие и используемые в компьютерных программах методики расчета можно разделить на две группы – это методика, основанная на коэффициенте использования (Lght – in – Night, WinELSO-Light), позволяющая быстро провести поверочный расчет. В отличие от программ, использующих метод глобального освещения (Global Illuminating) (все остальные представленные программы), в который входят методы: радиосити (Radiosity) и трассировка лучей (Ray Tracing). Благодаря которым возможно создавать реалистическое изображение при точном моделировании яркости по-

¹⁵ Обе КСС осесимметричные

¹⁶ Кривая силы света описываемая простым соотношением $I(\alpha) = I_0 \cos(\alpha)$ или подобным.

верхностей в трехмерных сценах с учетом многократных диффузных и зеркальных отражений света от них.

Очевидно, что основной разброс значений, будет преобладать в случае многократных отражений, т.е. при использовании сцены имеющей как минимум две поверхности с не нулевыми коэффициентами отражения. С другой стороны некоторую долю погрешности в результат будет вносить способность программы аппроксимировать кривую силу света (КСС), задаваемую пользователем т.к. во всех программах ввод или создание КСС происходит путем ввода её узловых значений, и как правило осуществляется с шагом (5 – 10 град.) тем самым встает вопрос, какие значения КСС примет программа в промежуточных узлах (точках).

Таким образом, нами был придуман тест, в основу которого был положен метод Эмбрехта (J.J.Embrecchts), позволяющий получить полную картину о том какую погрешность (неточность), в результат вводят аппроксимация КСС и роль многократных отражений, относительно точного расчета.

В течение эксперимента изменялись коэффициенты отражения ρ внутренних поверхностей помещения ($\rho = 0, 0.3, 0.5, 0.7$). Расчет значений освещенности в случае «черного» ($\rho = 0$) помещения проводился в "ручную" по известным формулам [1.23] в контрольных точках рис.2.7., расположенных на полу виртуального помещения. Нами так же были смоделированы три вида световых тел: точка, линия и поверхность. Так как существует вероятность того, что программы будут рассчитывать плоскостные и линейные световые тела, как точечные.

На рис.2.8. представлены зависимости распределения освещенности на полу черного помещения в контрольных точках. Из рисунка видно, что значения, полученные во всех программах с погрешностью менее 3%, совпадают с точным (ручным) расчетом. В случае использования аналитической КСС погрешность возрастает (10 – 15%), это свидетельствует о наличии определенного алгоритма аппроксимации, по нашим предположениям в программах используется билинейная аппроксимация. Аналогичные значения

были получены и в случае изменения светового тела и КСС, где разброс не превышал 5%. Это связано с тем, что все программы хорошо «умеют» рассчитывать прямую составляющую освещенности (*Direct illumination*).

Далее мы рассмотрели случай с одним отражением. Для этого мы задали коэффициент отражения одной стене помещения ($\rho = 0.5$), остальные стены остались без изменения. Полученный результат (рис.2.9.) навел нас на мысль, что 3DViz и Lightscape используют одну и ту же методику расчета и в этом нет ничего странного, т.к. 3DViz является продолжением программы Lightscape 3.2. и компания Autodesk, естественно не стала менять расчетные алгоритмы. Результаты же полученные в двух других программах Relux и Dialux, получился несколько завышенным, в тоже время практически одинаковыми, что можно объяснить схожими используемыми алгоритмами расчета, причина же расхождения результатов авторам пока не известна, в связи с закрытостью исходных кодов программ.

Дальнейшие рассуждения приводят нас к рассмотрению случая многократных отражений рис.2.10. Для этого мы установили коэффициенты отражения поверхностей помещения следующими: $\rho_{\text{пол}} = 0.3$, $\rho_{\text{стены}} = 0.5$ и $\rho_{\text{потолок}} = 0.7$. Из рисунка видно, что тенденция расхождения результатов между двумя группами программ продолжается.

Для того, чтобы стало возможным сравнивать программы не между собой, а в сравнении с точным математическим решением, получено точное решение так называемой задачи Соболева, заключающейся в расчете распределения освещенности от точечного изотропного источника единичной силы света, расположенного между двумя бесконечными диффузными плоскостями. При этом освещенность на одной из поверхностей $E_1(r)$ рассчитывается по формуле:

$$E_1(r) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-hk} + \frac{\rho_2}{\pi} e^{-h_2k} \Phi(k)}{1 - \frac{\rho_2 \rho_1}{\pi^2} \Phi^2(k)} J_0(kr) k dk, \quad (12)$$

где $\Phi(k)$ представляется в виде:

$$\Phi(k) = \int_0^{\infty} \frac{r J_0(kr)}{(1+r^2)^2} dr = \frac{1}{2} k K_1(k), \quad (13)$$

r – расстояние до исследуемой точки в плоскости от основания перпендикуляра на плоскость из источника, h_i – расстояние от источника до i -той поверхности: $h_1+h_2=1$; ρ_i – коэффициент отражения i -той поверхности, $i = 1, 2$ – индексы плоскостей сцены; $J_0(x)$ – функция Бесселя первого рода 0 порядка, $K_1(x)$ – функция Мак Дональда 1 порядка.

Понятно, что мы с не можем создать в программе бесконечные поверхности – это противоречит компьютерной логике. Поэтому мы решили в качестве таких поверхностей использовать квадраты со сторонами 10 м, на одном из которых, по такому же принципу, как и в модели помещения, расположили равномерно контрольные точки, в которых и рассчитывали значение освещенности.

Полученный результат представлен на рис.2.11. Из рисунка видно, что с наибольшей точностью с этой задачей справился Lightscape (погрешность не превышает 3%), следом следует Dialux с Relux-ом. Расхождения в результатах, по нашим предположениям могут быть вызваны с использованием в программах стандартных расчетных параметров. Но не стоит забывать, что стандартные параметры адаптированы на некий средний уровень точности расчета. Установка расчетных параметров в зависимости от сложности сцены и задач выполняемый пользователем, может существенно влиять на точность результата расчета.

На рис.2.12. приведена общая субъективная оценка рассмотренных программ по десятибалльной шкале. В таблице №1 приложения, представлены некоторые из основных характеристик светотехнических программ и их возможности. Как можно убедиться, программы являются достаточно разнообразными, как по функциональности, так и по информации, предоставляемой пользователю. В одних программах это анимационных фильм, требующий от пользователя не только знаний светотехники, но и не в меньшей сте-

пени режиссерских способностей, а в других это 2D картинка со значениями освещенностей. Все программы в той или иной степени точно рассчитывают распределение освещенности в сцене, их погрешность укладывается в регламентированные допущения (+20% - 10% от нормируемого значения освещенности). Наиболее точные результаты были получены в двух программах фирмы Autodesk и Dialux 4.2.

2.4. Моделирование и расчет естественного освещения в программах

Проблема естественного освещения занимает отдельное место в светотехнической практике. В отличие от других направлений в данной тематике специалистам приходится работать с большими объектами: дома, улицы, небосвод и т.д. Учитывать не только количественные характеристики освещения, но что не мало важно, и качественные характеристики, регламентируемые в российских и зарубежных нормативных документах. Одной из основных проблем, так и не решенной до сих пор, данного направления является учет появляющихся многократных переотражений. В настоящее время эта тема актуальна в связи с увеличением плотности жилой застройки городов. Не стоит забывать, что с увеличением плотности застройки уменьшается доступ прямого естественного света в жилые и общественные здания, но при этом повышается доля переотраженного света. Выходом из данной ситуации является увеличение этажности зданий, но и этот вариант имеет ряд недостатков, важным из которых будет обеспечение большого открытого пространства вокруг таких зданий, что значительно повлияет на стоимость данного проекта.

Никому не секрет, что от недостатка естественного света не только уменьшается трудоспособность человека, но также оказывается и негативное влияние на его психо-эмоциональное состояние. В нормативных документах приводятся возможные минимальные расстояния между зданиями, исходя при этом из обеспечения необходимого доступа естественного света.

На сегодняшний день, проблема нормирования и расчета естественного освещения стоит весьма остро. Тому свидетелем, является ряд статей в журнале «Светотехника» за 2006г. Если попробовать сформулировать ряд важнейших вопросов, стоящих перед светотехниками, то на наш взгляд их существует всего два:

- Недостатки методологии расчета естественного света в условиях жилой застройки, представленные в СНиП 11-4-79 и МГСН 2.06-99. К недостаткам относятся, как трудоемкость вычисления КЕО по эмпирическим коэффициентам (происхождение которых подчас не совсем ясно), так и не возможность расчета естественного освещения в условиях приближенных к реальным (ограниченный учет коэффициентов отражения, отсутствие возможности учета влияния мебели в помещении и объектов вне и т.д.);
- Проблема перехода от ручного расчета показателей естественного освещения к применению компьютерных программ расчета;

Мы не будем подробно останавливаться в рамках данной работы на недостатках существующих в российских нормативных документах методиках расчета естественного освещения в частности коэффициента естественной освещенности (КЕО), об этом подробно изложено в соответствующих источниках [31,32]. Сконцентрируем наше внимание на второй проблеме – применении светотехнических программ в области анализа и расчета естественного освещения.

Расчетное ядро современных светотехнических программ, построено на методе *Radiosity* (излучательности), другими словами процесс формирования результата расчета светотехнических величин (освещенности, яркости, КЕО) основывается на решении уравнения глобального освещения [10]. Таким образом, программы, используя метод *Radiosity*, имеют возможность с заданной точностью¹⁷ предоставлять проектировщику значение интересующей его све-

¹⁷ Точность получаемого результата зависит от выставленных параметров расчета

тотехнической величины в любой точке трехмерной сцены. Применение самого метода *Radiosity* для расчета естественного освещения нами рассматривается как наиболее рациональное, и позволяющее наиболее точно (и не мало важно в короткое время) оценивать и рассчитывать значения естественного освещения [34].

Что даст нам применения светотехнических программ по расчету естественного освещения по сравнению с традиционным методом расчета? Чтобы достаточно полно ответить на этот вопрос давайте попытаемся сформулировать основные критерии (параметры) которые нам необходимо учитывать для вычисления достоверного значения КЕО и какие из этих параметров возможно учесть традиционным методом а какие нет. Перечислим основные и них:

- Модель небосвода должна соответствовать модели МКО, т.е. соответствовать следующему определению: Облачное небо МКО - небо, полностью закрытое облаками и удовлетворяющее условию, при котором отношение его яркости на высоте θ над горизонтом к яркости в зените равно $(1+2 \sin \theta)/3$;
- Учет затеняющего действия от противостоящих зданий и сооружений;
- Возможность составления графика инсоляции, с наглядным представлением данных;
- Использование в расчетах реально измеренных коэффициентов отражения поверхностей или к ним приближенных;
- Учет многократных отражений, как в пространстве прилегающей территории, так и в самом помещении, т.е. в полной мере использовать данные значения фотометрии объектов сцены;
- Производить расчет КЕО в помещениях с любой геометрией и местом нахождения световых проемов, с учетом их коэффициентов пропускания и отражения;

- Результатом расчета должны являться значения КЕО в расчетных точках, желательно представленные в виде графиков и всевозможных графикаций для облегчения анализа и наглядности расчета;
- Возможность изменения местоположения расчетного помещения (широта и долгота), выбор месяца, дня и времени суток для расчета КЕО и инсоляции;

Представленный список параметров далеко не полный, но в первом приближении дает представление о трудоемкости расчета естественного освещения. Рассматриваемые нами светотехнические программы в своем большинстве позволяют учесть все эти параметры. Причем в режиме хорошо продуманного и удобного интерфейса (GUI).

Для того чтобы рекомендовать светотехнические программы для расчета естественного освещения, целесообразно выяснить используют ли они при расчете одну и ту же модель небосвода. Не останавливаясь на принципах построения математической модели небосвода, встроенной в программы и отвечающей критериям МКО, проведем исследования их соответствия путем создания в каждой из них некоего подобия виртуального яркомера. Модель будет состоять из удлиненного цилиндра с коэффициентом отражения поверхностей равным 0 без одного основания (соотношение диаметра основания к высоте 1:10), таким образом, мы можем говорить о соответствии освещенности к яркости. Полученную модель мы будем поворачивать в продольной плоскости начиная от зенитного угла (90^0) до уровня горизонта (0^0) с шагом в 15 градусов. Критерием для определения соответствия нам послужит формула, представленная в определении облачного неба МКО. При проведении эксперимента использовались параметры расчета представленные в таблице №2.

Расчетные параметры для определения соответствия моделей небосвода

Модель неба	Местоположение	Расчетное время	Расчетная сетка
Cloudy	Москва (д.37,6/ш.55,7)	12:00 21 июня	Стандартная ¹⁸

Из рис.2.13. можно заключить, что во всех представленных нами светотехнических программах используется одинаковая модель облачного небосвода, отвечающая стандарту МКО и DIN 5035. Незначительные флуктуации зависимостей объясняются выбором *стандартной* расчетной сетки. Но даже в этом случае относительная погрешность полученных результатов не превышает 4%. Таким образом, используемая в программах модель облачного неба подходит для проведения расчетов естественного освещения.

Проведенные нами исследования подтверждают сходство моделей облачного неба, используемого в МГСН 2.06-99 и светотехнических программах. Но при этом полученные результаты совершенно не говорят о правомерности использования программ по расчету коэффициента естественной освещенности в моделях реальных помещений. Дабы ответить и на этот вопрос, мы провели исследование распределения КЕО в стандартной модели помещения, необходимые параметры которого представлены на рис. 2.14.

Исследуемое помещение для его применения в программе Lightscape 3.2. моделировалось в редакторе 3М графики 3D Studio Max8 (компания Autodesk), в других случаях использовались встроенные в программы редакторы. Этот момент играет одну из главных ролей в точности получаемых результатов, будь-то моделирование и расчет естественного освещения или искусственного. Из-за того, что программы при расчете используют метод Radiosity, и рассчитывают значение освещенности во всех узлах расчетной сетки 3М сцены, особое внимание стоит уделять точности ее моделирования. Избегать зазоров в местах стыков поверхностей и их пересечений, для избе-

¹⁸ Под стандартной расчетной сеткой понимаются параметры, используемые программой по умолчанию.

жания ошибки при расчете. В программе Relux 2005 на этот случай существует функция проверки сцены на её соответствие.

Исследование программ проводилось при аналогичных условиях и параметрах, что и для облачного неба в предыдущем параграфе. Полученные результаты представлены на рис.2.15.

Исследуемое помещение имеет средневзвешенный коэффициент отражения пола, стен и потолка равный 0.5. Это объясняется тем, что методика МГСН не позволяет проводить расчет КЕО в помещениях с коэффициентом отражения – 0%. Таким образом, это обстоятельство вынуждает нас учитывать возможную ошибку, которая неминуемо возникнет из-за расчета многократных отражений. Коэффициент пропускание светового проема был принят 90%, так как в Relux 2005 нам не удалось выставить его значение равное 100%, опять же для уменьшения ошибки, связанной с переотражениями. Расчетные точки располагаются на полу помещения с шагом 25см, как показано на рис.2.14. Затеняющее действие противостоящих зданий не учитывается. Все расчеты проводились на компьютере с характеристиками (*AMD Athlon 2000™ XP 2200+, PC3200 1Гб, HDD 160Гб, Asus GeForce 5600*) время расчета сцен не превышало 8 сек!

Из рис.2.15. видно, что полученные распределения в программах и по МГСН имеют расхождения, достигающие максимального значения в 35% в расчетных точках у окна помещения (точки с №3 по №7). Из рис.2. видно, в эти точки попадает прямая освещенность от открытого небосвода. Природа такого расхождения значений по методике МГСН с программами нам до конца не понятна, но на наш взгляд это связано с использованием в ней эмпирических коэффициентов. Но даже не смотря на это, в точках с №7 по №20 расхождение значений КЕО не превышает 7%, что является допустимым¹⁹, если принять в расчет, что нормирование КЕО в помещении как раз проводится в точке, отстоящей на один метр от самой удаленной стены относи-

¹⁹ По МГСН 2.06 – 99 погрешность расчета значений КЕО не должно превышать 10%

тельно светового проема светового проема, такой точкой является точка, лежащая между т.№16-№17.

Разброс расчетных значений КЕО полученных в программах по рис.2.15. в среднем составляет не более 8%, что само собой является допустимым, учитывая влияние многократных отражений внутри помещения и установку расчетных сеток в программах. Напомним, что во всех программах параметры расчетных сеток выбирались по умолчанию (стандартные). На основании проведенных нами исследований - влияния разбиения расчетных сеток в программах на получаемые расчетные показатели, мы можем заключить, что разброс значений КЕО в программах можно сократить как минимум в два раза, и он не будет превышать 3-4%, путем выставления при расчете параметров точности расчета на максимум.

Проделанная нами работа в 2003 году изложенная в [35] и получила продолжение в совместной работе бельгийских и нидерландских коллег [34]. В отличие от их работы, в которой проводится подробный математический анализ моделирования естественного освещения методом Radiosity и его реализация, мы проверяем ее правомерность, сравнивая полученные нами результаты с принятыми в МГСН значениями КЕО.

Частью проделанной нами в 2003 году работы было исследование влияния многократных переотражений на коэффициент естественной освещенности (КЕО), на примере типового помещения, расположенного на разных этажах многоэтажного дома. Исследования опираются на методику численного расчета светотехнических показателей при помощи соответствующего программного обеспечения (Lightscape), а также на широко используемую методику расчета КЕО, описанную в московских городских строительных нормах (МГСН 2.06-99).

На рис.2.16. представлен пример установки основных параметров расчета, оптимизированные для решения нашей задачи. Особое внимание при установке параметров стоит уделять значениям расчетной сетки (Mesh Spacing), ее значения высчитываются относительно размеров модели.

В настоящее время среди проектировщиков-светотехников бытует миф о сложности использования метода Radiosity в естественном освещении из-за использования в расчете больших вычислительных мощностей. Не стоит забывать, что при расчете естественного света создается 3М модель не только освещаемого объекта, но окружающего его пространства. Таким образом, получаемая 3М модель содержит повышенное количество объектов и как следствие - полигонов, что неминуемо ведет к увеличению расчетного времени. В связи с этим при расчете сцен с естественным освещением особое внимание стоит уделять к выбору расчетных параметров, а именно к значениям расчетной сетки (Mesh spacing). Проведенные нами исследования показывают, что увеличение значений расчетной сетки в 6 раз²⁰ от номинального, способствует экономии расчетного времени в 16 раз, при этом погрешность полученного результата не превышает 2%.

Так для исследования распределения КЕО нами была смоделирована следующая сцена, состоящая из дома с помещением, улицы и затеняющего дома.

Как видно из рис.2.17. модель можно условно разбить на основные части:

1. Расчетное помещение; стандартное - высота потолка 3м, глубина 5м, ширина 3м; оконный проем – высота 1,8м, шириной 1.4м²¹ ;
2. Модель здания в котором находится расчетное помещение: высота 48м и шириной 60 м, что моделирует стандартный 16-ти этажный жилой дом;
3. Модель затеняющего здания с теми же геометрическими параметрами;
4. Модель улицы: дорога шириной 14.5м и земля, находящиеся между дорогой и зданиями, ширина которой изменяется в зависимости от расстояния между зданиями;

²⁰ Количественные значения могут измениться в зависимости от параметров модели

²¹ коэффициенты отражения поверхностей приведены в табл.3. приложения

В светотехнической практике существуют две модели небосвода: облачное небо (*Cloudy*) и ясное небо (*Clear*). Обе из них мы будем использовать в нашей работе.

Перед тем как приступить к рассмотрению расчетных моделей, целесообразно сравнить результаты расчетов по методикам МГСН и Lightscape 3.2. на примере расчета КЕО в помещении, находящегося на цокольном этаже здания. При этом мы будем постоянно увеличивать расстояние между домами, предварительно записывая значения освещенностей в контрольных точках. Полученные результаты приведены на рис.2.18.

Рис.2.19. наглядно демонстрирует изменение значения КЕО внутри помещения с коэффициентами отражения ($\rho_{\text{пот}}=0,7$; $\rho_{\text{стен}}=0,5$; $\rho_{\text{пол}}=0,3$) в зависимости от удаления противостоящего здания. Измерения проводились в четырех контрольных точках расположенных на полу с одинаковым шагом в один метр. Возрастание значений КЕО при удалении здания характеризуется увеличением открытого участка небосвода «видимого» из контрольных точек, при этом в те моменты, когда прямое излучение от небосвода не попадает в контрольную точку, оно компенсируется многократными отражениями в помещении с тех участков, где существует некоторая избыточность излучения. Это явление и объясняет пологий спад кривых в глубине (точки 3,4) и более резкий спад кривых в начале помещения (точки 1,2).

Вторым рассматриваемым нами вариантом исследований является случай, когда расчетное помещение находится на уровне 7 этажа, при тех же условиях размещения зданий и видах небосвода.

Важным аспектом при расчете КЕО в случае ясного неба является выбор угла наклона солнца относительно горизонта. Ясно, что высота солнца над горизонтом изменяется не только с временем суток, но также в зависимости от времени года и от широты местности на которой проводятся исследования. В наших экспериментах мы будем оперировать расчетными данными для города Москвы, в день солнцестояния (21 июня), что будет соответствовать максимальному углу 45° градусов над горизонтом. Полученные зависи-

мости (рис.2.20.) были получены для помещения с коэффициентами отражения (0.3; 0.5; 0.7) в трех вариантах: первое - солнце искусственно находится в зените ($\theta = 90^\circ$), второе - когда угол наклона солнца с горизонтом составляет 45° и большая часть его излучения подает на здание в котором находится исследуемое помещение (*на дом*) и третье, когда излучение солнца соответственно падает на противостоящее здание (*на здание*).

Как видно из зависимостей их поведение при ясном небе качественно не отличается от аналогичных зависимостей для облачного неба. В связи с этим, мы можем рекомендовать проводить расчет КЕО для модели облачного неба не заботясь о том, что произойдет качественный сдвиг результата по сравнению с ясным небом. К тому же расчет влияния ясного неба с учетом многократных отражений возможен только при применении компьютерных программ использующих метод глобального освещения.

Для того чтобы оценить вклад многократных отражений в значение КЕО при изменении коэффициента отражения зданий (дорога не учитывается), нам будет необходимо первоначально получить значение КЕО в контрольных точках помещения только при одном отражении (в расчетах участвует модель облачного неба, расстояние между домами 20 м). Для этого мы зададим всем поверхностям сцены коэффициент отражения равный нулю, кроме поверхностей противостоящего здания, для которых коэффициент отражения ($\rho_{\text{здан}}$) будет изменяться в диапазоне от 20 до 60 % (рис.2.21.) Таким образом, мы получим зависимости КЕО от $\rho_{\text{здан}}$ для одного отражения (ОО). Далее мы будем синхронно изменять коэффициенты отражения уже обоих зданий, тем самым получая те же зависимости только с учетом многократных отражений (МО). Из рис.2.21. видно, что наибольший вклад (до 30 %) многократные отражения дают в точке 1 (см. рис.18), так как она наименее удалена от светового проема, и наименьший вклад (до 5 %) в точке 4.

Аналогичным образом было определено влияние многократных отражений при изменении коэффициентов отражения дороги и внутренних поверхностей помещения, полученные результаты приведены ниже.

Изменение коэффициента отражения $\Delta\rho=10\%$ объектов	Влияние многократных отражений на значение освещенности ΔE
Дорога	2-5 %
Здание	10-15 %
Помещение	20-30 %

- При изменении коэффициента отражения дороги на 10%, значение КЕО изменяется на (2-5)%, с увеличением площади дороги, при удалении зданий друг от друга КЕО увеличивается не значительно – менее чем на 1%;
- При изменении коэффициента отражения зданий на 10%, приводит к (10-15)% изменению КЕО, причем с увеличением расстояния между домами изменение значение КЕО падает;
- При изменении коэффициентов отражения помещения (потолка, стен и пола) на 10% , влечет изменение КЕО на (20-30)%;

Полученные результаты свидетельствуют о том, что:

- Методика расчета естественного освещения методом Radiosity дает хорошие результаты и имеет ряд преимуществ перед традиционным расчетом;
- В результате проделанной работы было экспериментально подтверждена целесообразность использования программного пакета Lightscape 3.2. для расчета и исследования естественного освещения, хотя существуют определенные ограничения. Наименее изучено использование программного продукта Lightscape для больших сцен и коэффициентах отражения более 70%. В этом случае существует вероятность получения не достоверного результата;
- В условиях современного мегаполиса большое внимание стоит уделять отделочным материалам зданий, и по возможности стараться доводить коэффициент отражения зданий до уровня 40%;

2.5. Качественные показатели освещения при компьютерном проектировании ОУ

Качественные показатели освещения, являются основной светотехнической характеристикой любой ОУ. В отличие от количественных показателей освещения (значение освещенности и яркости в контрольных точках), качественные показатели позволяют судить в некотором роде о визуальном восприятии будущей ОУ, учитывать степень комфортности пребывания людей, и возможность выполнения определенных зрительных работ.

В настоящее время в светотехническом проектировании наблюдается тенденция по внедрению все новых и новых качественных показателей, основанных на: тенеобразовании, отношении вертикальной освещенности к горизонтальной, распределении освещенности / яркости в поле зрения наблюдателя и т.д. Анализ существующих на сегодняшний момент российских, так и западных нормативных документов, не позволяет однозначно выделить определенные качественные показатели ОУ, которые удовлетворяли бы условиям освещения во всех вариантах осветительных установок [44]. Существенным является тот факт, что одни качественные показатели важны при анализе одного рода ОУ, и совсем не играют роли при проектировании ОУ другого рода. Поэтому в зависимости от типа ОУ установки и от назначения освещаемого объекта качественные показатели будут изменяться. Осложняет работу еще и то, что в нормативных документах (российских и зарубежных) не прослеживается однозначной линии по типу регламентированных качественных показателей ОУ, что вводит определенную путаницу в сам процесс проектирования.

При анализе имеющихся на сегодняшний день качественных показателей, а их не так уж и много:

- Вертикальная освещенность
- Цилиндрическая освещенность
- Полуцилиндрическая освещенность

- Сферическая освещенность
- Полусферическая освещенность
- Коэффициент пульсации
- Показатель дискомфорта
- Индекс цветопередачи источника света
- Отношение горизонтальной освещенности к вертикальной
- Отношения $E_{мин}/E_{макс}$, $E_{ср}/E_{макс}$ и т.д.
- Всевозможные распределения освещенности и яркости

Однозначно становится понятно, что все они тем или иным образом характеризуют зрительное восприятие ОУ наблюдателем. Не затрагивая подробностей физиологического восприятия человеком света, понятным становится, что человеческий глаз однозначно реагирует на не что иное, как на распределение яркости в поле зрения. Именно эта характеристика отвечает полностью всем показателям освещения любой осветительной установки. В современной светотехнике только начинают делаться определенные шаги по построению и моделированию распределения яркости (точнее можно говорить о построении тела яркости в каждой точке пространства). Но в данном направлении существуют сложности по получению и анализу получаемых распределений. Понятным является и то, что тела яркости будут содержать в себе полную информацию о проектируемой ОУ.

Существующие методики расчета показателей осветительных установок, особенно качественных показателей в своем большинстве опираются на «инженерные» методы расчета. Но на наш взгляд это совершенно не приемлемо при проектировании не типовых ОУ. В результате усложнения расчетов, растет погрешность, которую вносят такие методы расчета в итоговое значение показателей, из-за упрощения самого расчета (не учитываются: многократные отражения, объекты в сцене, визуальное восприятие и т.д.)

В настоящее время все существующие светотехнические программы, позволяют рассчитывать количественные показатели освещения. Сложнее

дело обстоит с расчетом качественных показателей ОУ. Одни программы позволяют рассчитывать большинство из них, другие нет, но пока не существует программы способной выдавать проектировщику – светотехнику весь спектр качественных показателей освещения. Тем более предоставлять и анализировать тело яркости.

Для того чтобы получить значения качественных показателей освещения в программах, нам понадобится воспользоваться дополнительными (вспомогательными) программными средствами. В общем случае любая расчетная программа после расчета освещения на гранях модели методом Radiosity имеет избыточную информацию о световых характеристиках моделируемой сцены. Поэтому наша задача будет сводиться, к возможности получения какой-то части этой информации. Существует несколько вариантов получения нужных нам световых характеристик:

- Ввод в сцену вспомогательных (расчетных) поверхностей, не влияющих на общее распределение излучения в сцене, для определения вертикальной и горизонтальной освещенности и их распределений в пространстве сцены (фиктивные поверхности);
- Ввод в сцену объектов (сфера, цилиндр, полусфера, полуцилиндр и т.д.) для определения соответствующих качественных показателей;
- В некоторых программах существует возможность установки виртуальных наблюдателей (observers) для получения значений показателя дискомфорта (UGR);
- Визуализация распределений освещенности и яркости на поверхностях сцены несет большую информацию, нежели в тех же условиях изолюксы;

Используя этот далеко не полный набор методов и их комбинации, нам будет под силу определить не только большинство качественных показателей освещения, но и смоделировать пространственное распределение освещенности внутри сцены. Последнее никак лучше подходит для оценки и проекти-

рования спортивных сооружений, в которых предполагается проведение цветных телетрансляций.

Данная совокупность методов оценки качественных показателей освещения, с определенной долей вероятности поможет проектировщику оценить реальные возможности осветительной установки на стадии проектирования. В большей степени уменьшает вероятность допущения ошибок всего комплекса светового проектирования, также дает возможность приближенно дать визуальную оценку эстетической составляющей ОУ. Последнее играет большую роль при проектировании помещений и объектов, в которых подразумевается длительное пребыванием людей.

Выводы по второму разделу:

1. В результате проделанной работы было экспериментально подтверждена, правомерность использования компьютерных светотехнических программ для расчета параметров осветительных установок;
2. Все рассмотренные программы в той или иной степени точно рассчитывают распределение освещенности в сцене, их погрешность укладывается в регламентированные допущения (+20% - 10% от нормируемого значения освещенности);
3. Формулируются новые подходы и методы проектирования ОУ на основе существующего программного обеспечения, позволяющие качественно и в короткий срок проводить расчет и анализ проектируемой ОУ;
4. Проведенные нами, исследования по моделированию и расчету естественного света, путем компьютерного моделирования на основе метода Radiosity, свидетельствуют о полном их соответствии с принятыми нормативными документами;

5. В процессе проведенных исследований было установлено, что математическая модель облачного неба, заложенная в исследуемых программах, полностью совпадает с моделью, принятой МКО;
6. На основе предлагаемых нами методов оценки качественных показателей освещения, возможно уменьшить вероятность допущения ошибок всего комплекса светового проектирования, также дать приближенную к реалии визуальную оценку эстетической составляющей ОУ, последнее играет большую роль при проектировании помещений и объектов, в которых подразумевается длительное пребывание людей;
7. При расчете естественного освещения увеличение значений расчетной сетки в 6 раз от номинального, способствует экономии расчетного времени в 16 раз, при этом погрешность полученного результата не превышает 2%;

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

3.1. Методы компьютерного светотехнического проектирования искусственного освещения в интерьере

Освещение интерьеров – это одно из интереснейших областей светотехнического проектирования. При проектировании интерьерного освещения необходимо учитывать множество факторов:

- Уровни освещенности на условных рабочих поверхностях должны соответствовать действующим нормативным документам [31-32];
- Выбор световых приборов и источников света должен проводиться из соображений экономии электроэнергии и положительного физиологического воздействия излучения от источников света, на прибывающих в помещении людей, в соответствии с действующими нормативными документами [31-33];
- Используемые для освещения световые приборы должны гармонично вписываться в существующий интерьер помещения;
- В помещениях с доступом естественного света, рекомендуется проведение расчета коэффициента естественной освещенности (КЕО), нормируемые значения которого определяется по соответствующим нормативным документам;
- Необходимо учитывать качественные показатели освещения: индекс цветопередачи (R_a), показатель ослепленности (P или UGR), коэффициент пульсации осветительной установки (K_p), значения которых также должны соответствовать нормативным документам;
- В помещениях с повышенными требованиями к освещению: выставочные и презентационные залы, медицинские и учебные кабинеты, мастерские и помещения в которых проводятся работы с повышенным уровнем зрительных работ (I-II), требуется проведение расчета качественных показателей освещения типа: цилиндрической и полу-

цилиндрической, сферической и полусферической освещенностей на фиктивных плоскостях;

В настоящем параграфе мы покажем, как возможно осуществить светотехнический проект освещения выставочного зала автосалона с применением комплекса светотехнических программ.

Для этого мы обращаемся ко второй главе настоящей работы, а именно к схеме №4 «*Интерьерное освещение (световой дизайн)*».

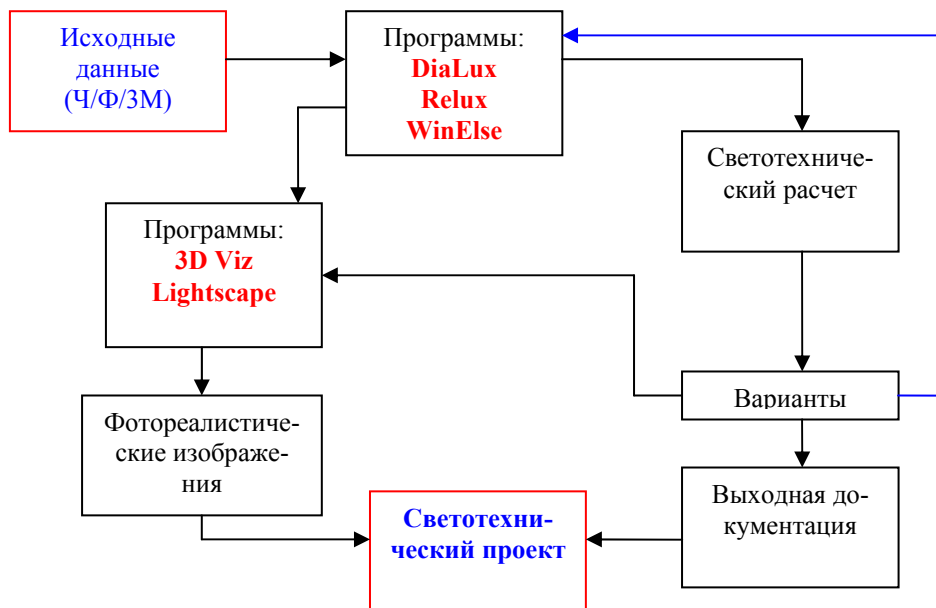


Схема №4. Интерьерное освещение (световой дизайн)

С её помощью мы разработаем светотехнический проект, имея в исходных данных только чертеж помещения с необходимыми конструктивными элементами и некоторым количеством мебели. План помещения представлен на рис. 3.1. Помещение состоит из следующих характерных рабочих зон:

Зона №I – выставочная, предполагается установка автомобилей, для их осмотра

Зона №II – менеджерская, предполагается работа с клиентами: проведение переговоров, подписание договоров и администрирование

Зона №III и Зона №IV – кафетерий и зона отдыха

Проектирование освещения, в данном случае, усложняется из-за необходимости учета существующих осветительных конструкций, обозначенных

на рис. 3.1. синим цветом. Световые конструкции представляют прямоугольные навесные короба, в нишах которых размещены люминесцентные светильники (ЛС) 4×18Вт, перекрытые опаловым стеклом. Данные световые конструкции будут нам служить для создания общего равномерного освещения выставочного зала.

Перед тем как приступить к выбору светового оборудования, нам необходимо определиться со значениями освещенностей по рабочим зонам.

Опираясь на существующие российские и зарубежные нормативные документы, в частности EN DIN 12464 и [31-32], выбираем следующие уровни освещенностей:

Зона №I – выставочная, среднее значение освещенности на рабочей поверхности 0.8 м от пола выбираем равным 600лк.

Зона №II – менеджерская, среднее значение освещенности выбираем на две ступени ниже – 400лк на рабочей плоскости.

Зона №III и Зона №IV – кафетерий и зона отдыха, среднее значение освещенности 300 лк, что на одну ступень ниже, чем для зоны №2.

Выбор таких уровней освещенности объясняется желанием выделить доминирующие объекты выставочного зала (Зона №1 - автомобили), но при этом не снижать условия освещения в смежных с ней зонах.

После проведения нами предварительного анализа освещаемого помещения можно приступить к определению концепции освещения.

Концептуально ОУ должна отвечать всем выше перечисленным критериям освещения, которые в свою очередь диктуют нам подход к выбору светового оборудования, а именно типов светильников, по их функциональности.

Выставочная Зона №I – наилучшим выбором светового оборудования для которой будут подвесные световые приборы направленного света, с возможностью изменения направления излучения. Таким образом, мы сможем не привязываться к конкретному местоположению автомобилей в зале. Для

нас важным будет только более-менее равномерное расположение световых приборов по зоне.

Менеджерская Зона №II, кафетерий Зона №III и зона отдыха Зона №IV – освещение данных зон, осуществляется в едином стиле (тип светового оборудования идентичен). Реализуется на декоративных подвесных световых приборах малой мощности.

Выбор подвесного светового оборудования объясняется достаточно большой высотой потолка 4.5м, так же подвесные световые приборы, в отличие от встраиваемых, позволят сократить нам общее количество светового оборудования.

В результате разработанной концепции освещения мы получаем примерную типизацию светового оборудования:

- Общее освещение реализуется световыми конструкциями с ЛС 4x18Вт;
- Акцентное освещение, реализуется подвесными световыми приборами направленного излучения;
- Местное освещение, реализуется подвесными декоративными светильниками малой мощности;

Теперь после выбора концепции освещения и проведенного анализа освещаемого помещения можно приступить к непосредственному светотехническому проектированию будущей ОУ. Для этого нам понадобятся воспользоваться таблицей №1 (см. приложение), чтобы правильно выбрать необходимое программное обеспечение. Опираясь на понимание того, что проектирование интерьерного освещения сопряжено с учетом в расчете большого количества поверхностей и объектов, расчетная программа должна использовать метод радиосити. Это позволит наиболее точно произвести светотехнический расчет показателей освещения, правильно выбрать световое оборудование и произвести итоговую визуализацию будущей осветительной установки.

Рассмотрим схему №4, которая диктует нам выбор следующего программного обеспечения: AutoCAD – как инструмент по редактированию и подготовке расчетного материала, 3D Viz 2006 – трехмерный редактор, который позволит создать нам 3D модель помещения и провести в ней визуализацию ОУ, DiaLux или OxyTech – программы по светотехническому расчету, имеющие обширные базы светового оборудования.

Опять же обращаясь к схеме №4, проводим первый этап светотехнического проектирования – редактирование и перенос имеющегося чертежа (плана помещения) в одну из светотехнических программ в масштабе 1:1. В нашем случае это будет программа компании Oxy tech LUXART 5.0. В результате преобразований в программе исходного чертежа, мы получаем условную 3D модель помещения.

После этого переходим ко второму этапу проектирования, который будет заключаться в выборе конкретных световых приборов участвующих в ОУ и размещению их на 3D модели рис. 3.2. На этом этапе проектирования появляется качественно новая возможность светотехнического расчета, по сравнению с инженерными методами расчета. Она заключается в том, что мы без особого труда (изменение светового оборудования по типам занимает не более 30 сек!!!) можем создавать сколь угодно много вариантов освещения, используя разнообразное световое оборудование отличающиеся, как фирмой изготовителем, так и световыми характеристиками. В результате генерации определенного набора вариантов, мы выбираем из них наиболее лучший, отвечающий всем критериям освещения, которые мы ввели ранее. Такой вариант и представлен на рис.3.2. На рис 3.2. синим цветом обозначено световое оборудование, а желтыми стрелками показаны направления световых пучков от приборов.

После завершения выбора светового оборудования и мест его расположения светотехническая программа дает разнообразные возможности по представлению расчетных данных. Ими могут являться как значения освещенности на рабочих поверхностях с определенным шагом, так и цветовые

градации освещенности (псевдоцвета). На рис.3.3. представлен пример отображения результата расчета освещенности на рабочей поверхности в градациях желтого цвета, в верхней части которого находится цветовая шкала, позволяющая определить конкретное значение освещенности в любой точке рабочей поверхности.

Теперь, когда мы удостоверились в правильности выбора светового оборудования и мест его установки, и проверили полученные значения освещенности на соответствие требованиям освещения. Наступило время расчета и анализа качественных показателей освещения. Более подробно об этом будет написано в параграфе 3.5. настоящей работы, а в данном параграфе мы только отметим, что расчет цилиндрической и полуцилиндрической освещенности, таких важных характеристик для определения насыщенности помещения светом, проводится путем выбора места расчета и установки соответствующих их параметров, что в целом занимает не более 5 сек!!! в отличие от традиционных методов расчета, проводимых инженерными методами.

Следующим пунктом светотехнического проекта, согласно схеме №4, является полноценное 3D моделирование выставочного зала автосалона в программе 3D Viz 2006 для последующей визуализации. Что даст нам проведение светотехнического 3D моделирования?

1. Позволит визуально оценить качество освещения в помещении, что весьма важно проектировщику при выборе цветовой температуры источников света и дизайна светового прибора;
2. Дает безграничные возможности по анализу светового поля, так как в результате расчета у нас имеется полная информация по распределению излучения в сцене;
3. Решается вопрос об органическом слиянии интерьера помещения с ОУ – эстетическая сторона освещения;
4. Позволит предоставить максимально приближенные виды (фотореалистические изображения) будущей ОУ заказчику, а не набор цифр и распределений;

5. Позволит, при желании, сделать анимационный ролик, положительное воздействие которого на заказчика трудно переоценить, а трудозатраты на который, минимальны;

Для проведения 3D моделирования помещения выставочного зала автосалона нам понадобится исходный чертеж помещения, который мы экспортируем в 3D Viz 2006, после чего по чертежу, приступаем к непосредственному 3D построению. Отметим, что светотехническое 3М моделирование несколько отличается от дизайнерского. Основные различия и положения светотехнического моделирования изложены во второй главе настоящей работы.

Если не останавливаться на самом процессе моделирования, а попытаться сформулировать основные этапы, то получается следующая картина:

Этап №1 «Геометрические построения»

На этом этапе по чертежу строится все необходимая геометрия помещения. При этом, чем подробнее удастся воссоздать элементы помещения: пол, потолок, стены, окна, двери, ниши и откосы и т.д. тем реалистичнее получится итоговое изображение.

Этап №2 «Фурнитура и элементы интерьера»

На этом этапе построенная геометрия помещения заполняется «3D мебелью» и необходимыми элементами декора. По возможности, дабы сократить время, рекомендуется пользоваться 3D библиотеками.

Этап №3 «Материалы и текстуры»

Важнейший этап моделирования. Именно на нем существует вероятность допущения ошибки, которая в последствии может сильно исказить итоговое изображение. Особое внимание стоит уделять коэффициентам отражения поверхностей и стараться не использовать материалы поверхностей с коэффициентом отражения близким к 100%. В свою очередь использование текстур позволит значительно сэкономить время построения, при замене ими мелких или одинаковых элементов декора.

Этап №4 «Свет и визуализация»

Итоговый этап светотехнического моделирования. На нем устанавливаются 3D модели светильников с реальными распределениями света, путем использования баз данных с КСС светового оборудования. Этап визуализация подразумевает правильную установку параметров расчета сцены с установкой параметров отвечающих за многократные отражения света в сцене и качество визуализации.

На рис.3.4. представлено фотореалистическое изображение будущей ОУ выставочного зала автосалона. Из которого видно, что мы не ошиблись, как с выбором дизайна светового оборудования, так и с фотометрическими параметрами светильников и источников света.

В заключение хотелось бы отметить, что возможности программы 3D Viz 2006 не ограничиваются 3D-визуализацией. Так же существует возможность получения значений освещенности/яркости в любой точке сцены выставочного зала и правильно учесть создаваемые тенеобразования. Имеется функция визуализации сцены в псевдоцветах, как освещенности, так и яркости. А так же программа позволяет создавать анимационное видео сферические и панорамные изображения и многое другое, что значительно улучшает презентационные возможности светотехнического проекта в целом и позволяет проводить на светотехнический проект на качественно новом уровне.

3.2. Проектирование архитектурного освещения. Совмещение 2D и 3D визуализации

В параграфе 3.1. мы рассмотрели методы и подходы к светотехническому проектированию искусственного освещения в интерьере. В этом параграфе мы поговорим о применении 3D моделирования, применительно к архитектурному освещению.

Проект архитектурного освещения может быть выполнен несколькими способами, в каждом отдельном случае используется свои методы светотехнического проектирования, описанные во второй главе настоящей работы. Это связано с тем, что исходные данные по проекту могут быть весьма раз-

нообразными, вот некоторые из них: чертежи фасадов, фотографии объекта, 3D модель. В редких случаях проектировщику-светотехнику доступны все перечисленные исходные данные по проекту. Часто на практике приходится довольствоваться только чертежами или фотографиями проектируемого объекта.

Какие требования возложены к проектированию архитектурного освещения? Чтобы ответить на этот вопрос, нам необходимо обратиться к действующим нормативным документам по освещению [31-32]. В них мы обнаружим допустимые значения яркости участков освещаемого здания, рекомендации по выбору световых приборов и источников света, так же таблицы по выбору цветовой температуры источников света в зависимости от материала облицовки зданий.

Что же должен содержать в себе качественный проект архитектурного освещения? Проект архитектурного освещения должен содержать в себе:

- Образ освещаемого объекта в дневное время суток;
- Расчетные значения распределения яркости по фасадам здания в соответствии с МГСН 2.06-99 и СНиП 23-05-95;
- Фотореалистические изображения будущей ОУ в вечернее/ночное время;
- При необходимости изображения, показывающие, как освещенный вечерний образ здания вписывается в окружающую застройку;
- Планы и чертежи здания с обозначением на них световых приборов;

Теперь, когда мы определились с перечнем необходимых работ, зададим вопрос «Что из перечисленного возможно выполнить без 3D моделирования?» Ответ весьма лаконичен, если исходными данными являются чертежи и фотографии, то возможно выполнить все пункты кроме второго. А в случае если здание еще не построено и существует только на «бумаге» нам удастся выполнить только последний пункт нашего перечня требований – обозначить на планах световое оборудование, которое выбрано и расположе-

но в соответствии с мастерством проектировщика и основано на его личном опыте.

В настоящей работе мы не будем рассматривать светотехнические проекты результатом, которых является хорошо реализованная ОУ, полученная в результате не выполнения требуемых нами пунктов светотехнического проектирования, а сосредоточим свое внимание на выполнении всего комплекса светового проектирования архитектурного освещения.

Теперь, когда мы определились с критериями светотехнического проекта и предъявленными к нему требованиями, самое время акцентировать наше внимание на том, как именно осуществить качественный светотехнический проект архитектурного освещения.

Существует два основных метода проектирования архитектурного освещения.

Первый метод - традиционный, заключается в представлении визуальной картины будущей осветительной установки на двухмерном изображении (фотографии); рисуется визуальное распределение света от светового прибора, что можно осуществить в любом 2D редакторе (Photoshop, Adobe Illustrator). Достоверность и светотехничность такого подхода весьма условна, так как не возможно нарисовать достаточно точное светораспределение (световое пятно) на поверхности фасада здания и учесть всевозможные затенения, а о светотехнических показателях, которые необходимо учитывать при архитектурном освещении, стоит и вовсе забыть. Такая псевдосветотехническая визуализация на сегодняшний день среди проектировщиков распространена весьма широко. И тому есть весьма веские основания: во-первых, метод в первом приближении достаточно прост, во-вторых, временные затраты на выполнения такого рода визуализации минимальны.

С другой стороны, существует светотехнический метод проектирования архитектурного освещения основанный на 3М моделировании, именно на нем мы остановимся более подробно. Достоинства 3М моделирования в светотехническом проектировании широко освещены во второй главе на-

стоящей работы. Но для начала попробуем сформулировать основные этапы, которые нам будет важно выполнить, чтобы в результате получить качественный светотехнический проект. Сами этапы выполнения проекта при помощи светотехнических программ представлены на схеме №5 второй главы настоящей работы.

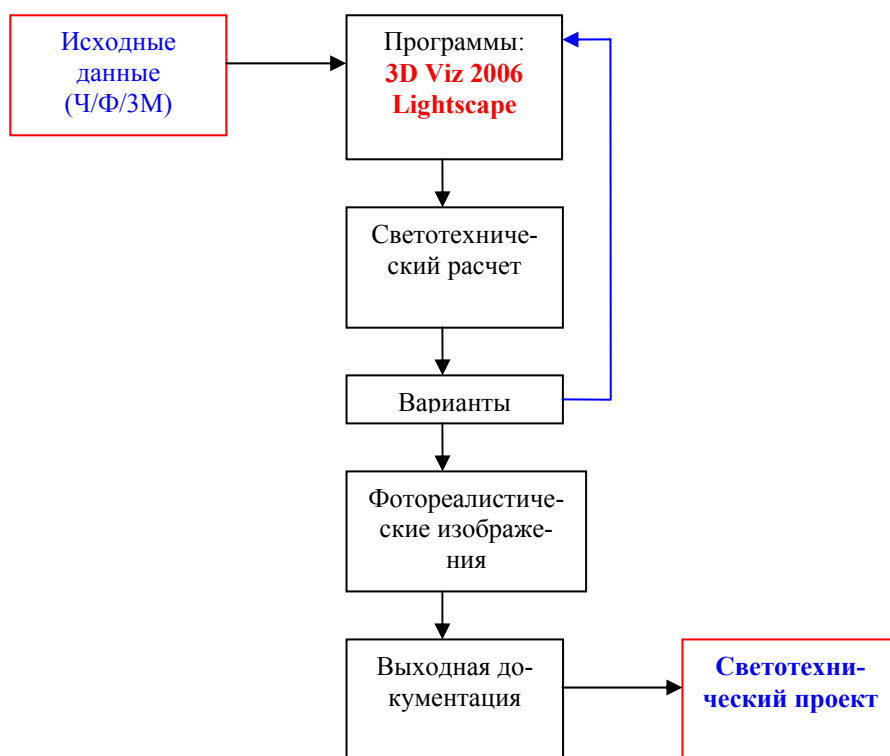


Схема №5. Архитектурное освещение

Из схемы видно, что для выполнения проекта нам потребуется чертежи фасадов здания или его 3D модель, программный пакет по 3D моделированию и/или непосредственно сама расчетная светотехническая программа. Идеальным вариантом программы для проектирования архитектурного освещения является 3D Viz 2006, совмещающий в себе полноценный трехмерный редактор и светотехническую программу.

Непосредственно сами методы проектирования архитектурного освещения мало отличается от методов интерьерного освещения. Но и здесь есть свои особенности:

- Предъявляются менее жесткие требования к детализации объектов, так как размеры здания велики и мелкие детали фасада будут не за-

метны в вечернее время. Широко используются текстуры, позволяющие сгладить не точности и огрехи моделирования, при этом экономится время моделирования;

- Выбор местоположения визируемой камеры, должен выбираться из соображений параметров условного наблюдателя (угол визирования, высота и т.д.);
- В случаях, когда сложно провести 3D моделирование всего здания целиком, целесообразно моделировать только подсветку отдельных архитектурных форм. Такой подход не даст фотореалистичного изображения всего здания, но поможет правильному выбору светового оборудования;
- В отличие от интерьерного освещения, где к ОУ предъявляются весьма строгие требования к светотехническим показателям, архитектурное освещение первоначально делает упор на эстетическую составляющую вечернего образа освещаемого объекта;

В настоящем параграфе мы рассмотрим новые возможности реализации архитектурного освещения при использовании светотехнических программ по сравнению с традиционными методами проектирования.

В качестве примера мы представим проект архитектурного освещения многоквартирного жилого здания, которое представлено на рис. 3.5.

Как можно видеть из рис.3.5. здание выполнено в модном сейчас стиле постмодернизма и сочетает в себе большое количество стекла и сложной формы бетонных и металлических конструкций. В настоящей работе мы не будем останавливаться на общих подходах к архитектурному освещению, а сосредоточим наше внимание на методах компьютерного моделирования.

И так, обозначим наши первоначальные цели:

1. Выбор светового оборудования отвечающего нормам и критериям архитектурного освещения;
2. Расчет распределения яркости на фасаде здания или его элементах

Предположим, что мы уже по имеющимся чертежам построили 3D модель освещаемого здания. Что дальше? Далее мы разбиваем здание на характерные/функциональные световые группы, такими могут являться: входная группа, балконы, навесы, цокольный этаж, колонны и т.д. Основываясь на этом, мы выбираем типы используемого светового оборудования, причем от группы к группе оно не обязательно должно изменяться. Теперь, когда мы определились с типами светильников, создаем их 3D модели или используем уже готовые модели (некоторые фирмы-производители светового оборудования официально предлагают 3D модели своих светильников с КСС в электронных каталогах и в Internet, примером такого каталога может являться сайт компании iGuzzini www.igguzini.com). Далее мы размещаем на фасадах 3D модели здания светильники с учетом их крепежных элементов в соответствии с выбранной концепцией. Здесь существует два варианта:

1. Единовременно размещать светильники по всем группам и фасадам здания;
2. Располагать светильники на отдельно взятом фасаде, который бы локально захватывал бы несколько световых групп;

Видно, что второй вариант размещения светового оборудования рациональнее первого и значительно экономит проектное время. Именно на этом этапе проектирования и возникает *инвариантность* архитектурного освещения, которая значительно затруднена при традиционном методе проектирования. Поясним, архитектурное освещение предполагает представление визуализации или фотореалистического изображения будущей ОУ, но если традиционным методом весьма затруднительно представить несколько концепций освещения из-за серьезных временных затрат (незначительное изменение концепции освещения выполненной традиционным образом, влечет за собой часто полную переделку изображения), то метод 3D моделирования, из-за своей универсальности, позволяет быстро, наглядно и качественно генерить концепции освещения, изменять типы светового оборудования и за

считанные минуты проводить необходимую светотехнический расчет и визуализацию.

Таким образом, работу по светотехническому проектированию при помощи 3D моделирования условно можно разбить на две части:

1. Геометрическое построение объекта освещения;
2. Установка световых приборов, генерация концепций освещения, светотехнический расчет параметров освещения, выбор наилучшей концепции и визуализация;

Обратим внимание, что вторая часть проектирования архитектурного освещения, весьма светотехнична, и включает в себя все необходимые критерии светотехнического проекта, учет которых позволит реализовать качественную ОУ.

Что нового в проектирование архитектурного освещения вносят светотехнические программы по сравнению с традиционным методом проектирования?

1. Способность рассчитывать распределения освещенности/яркости на всем фасаде здания или его участках и представлять фотореалистические изображения рис.3.6.;
2. Становится возможным учитывать затенения и многократные перетражения, возникающие в случаях, когда здание имеет большую часть стеклянных поверхностей;
3. В светотехническом расчете и визуализации учитывается точное распределение света от приборов на основе заданных КСС;
4. Существует возможность изменять видимые ракурсы здания, масштабировать отдельные его участки, моделировать его окружающее пространство;
5. Использование в совокупности 2D и 3D графики позволяет получить фотореалистические изображения показывающие, как еще реально не построенное здание вписывается в вечерний облик города или прочей застройки рис.3.7.;

6. На основе всего выше перечисленного имеется возможность создавать анимационные и видео ролики будущей ОУ. Это особенно важно при проектировании динамического цветного освещения и/или архитектурного освещения с применением спецэффектов;

Часто складывается ситуация, когда при проектировании архитектурного освещения не достаточно исходных данных для построения полноценной 3D модели. При этом требуется выполнить светотехнический проект освещения и провести все необходимые расчеты показателей освещения.

В этом случае мы предлагаем воспользоваться разработанным нами методом светотехнического проектирования, который позволит не только получить фотореалистические изображения ОУ, но и провести все необходимые светотехнические расчеты.

Предлагаемый нами метод основан на том, что вы имеете хотя бы одну дневную фотографию (изображение) объекта или здания. Это изображение импортируется в любую светотехническую программу, где с помощью внутренних настроек выставляется такой ракурс, чтобы линия визирования камеры была перпендикулярна плоскости изображения. В нашей работе мы опять же использовали программу 3D Viz 2006, при этом предлагаемый нами метод универсален и с незначительными изменениями может быть применен в любой светотехнической программе, работающей с 3D графикой.

После того как мы импортировали изображение и выставили камеру, приступаем к анализу изображения предлагаемого нам здания рис.3.8. Нам будет необходимо зрительно разбить здание на архитектурные элементы. Далее мы выделяем элементы, отступающие от плоскости фасада, и заменяем их на 3D аналоги. Особое внимание обращаем на те элементы, которые по концепции будут освещаться. Это делается для того, чтобы создать из 2D фотографии псевдо трехмерную модель, как показано на рис.3.9., содержащую в себе необходимый архитектурный объем, который мы будем освещать.

Далее согласно выбранной концепции уже на 3D модели расставляем световое оборудование с реальными КСС. Если фотография имеет изометри-

ческую проекцию, как в нашем случае, то попутно с расстановкой светильников проводим их масштабирование, в зависимости от удаления от камеры²².

Следующим шагом является визуализация ОУ и расчет распределения яркости по фасаду здания. В данном случае методы расчета и визуализации идентичны тем, что описаны в предыдущем методе. Результат использования предлагаемого нами метода показан на рис 3.10.

В чем достоинства представленного метода по сравнению с традиционным "рисованием" световых пятен на фотографии в программе Photoshop:

1. Мы используем при проектировании все достоинства 3D моделирования: проводим точный светотехнический расчет, учитывается реальное светораспределение от приборов и затенения;
2. Значительно возрастает гибкость выполнения визуализации. При переходе от одной световой концепции к другой достаточно внести необходимые изменения в проект, а не начинать его сначала;
3. Простота и время выполнения визуализации значительно превосходят традиционный метод;

3.3. Моделирование естественного освещения и инсоляции

В светотехнической практике, расчет и моделирование естественного света и инсоляции является одной из сложнейших задач. Сложность заключается в том, что при расчетах необходимо учитывать множество геометрических и светотехнических факторов, таких как: широта и долгота местоположения объекта, время суток и условия освещения, геометрические параметры помещений и затеняющих зданий, коэффициенты отражения и пропускания поверхностей и др.

На сегодняшний день существует только одна принятая и рекомендуемая в России методика расчета естественного освещения и инсоляции, опи-

²² В 3D моделировании геометрическое изменение масштаба светильника приводит к равносильному изменению его светотехнических характеристик

санная в МГСН 2.06-99, которая основывается на расчете геометрического коэффициента естественной освещенности (КЕО). Недостатки данной методики в полной мере изложены во второй главе настоящей работы. Там же мы ответили на вопрос о правомерности использования светотехнических программ по расчету естественного света в проектировании жилой застройки.

В данном параграфе мы постараемся сформулировать и дать общие рекомендации по расчету естественного освещения и инсоляции, применительно к светотехническим программам.

Для начала ответим на вопрос «Что нам необходимо для проведения расчета и моделирования естественного освещения и чем оно отличается от других типов светотехнического проектирования?»

В отличие от проектирования архитектурного или интерьерного освещения, где нам необходимо проводить моделирование характерных объектов: здание или помещение, в расчете и моделировании естественного освещения мы вынуждены учитывать, как внутреннее пространство помещения, так и прилегающее к нему внешнее пространство. Другими словами, моделирование естественного освещения в упрощенной форме сочетает в себе моделирование интерьера и архитектуры. В связи с тем, что такого рода проектирование сопряжено с моделированием больших пространств городской застройки, нам не обойтись без использования в светотехнических программах большого количества 3D построений. Которые будут проводиться специализированными 3D редакторами или средствами светотехнической программы.

Для того чтобы нам провести качественное моделирование естественного освещения нам будет необходимо иметь некоторые исходные данные:

1. Детальный план прилегающей жилой застройки, в электронном формате *.dwg или *.dxf;
2. Геоподоснову, опять же в электронном виде с указанием высот и географического местоположения объекта;

3. Геометрические параметры помещения, для которого проводится расчет;
4. Фотометрические данные об отделочных материалах помещения и прилегающей застройки;

Имея перечисленные данные, нам необходимо по ним произвести 3D моделирование.

Важно отметить, что большинство светотехнических программ поддерживают форматы электронных чертежей *.dxf и *.dwg, поэтому не возникает трудностей с экспортом исходных данных в программы. После проделанной операции мы не получим необходимую 3D модель, а только отобразим 2D чертеж/план в светотехнической программе. Для того чтобы нам получить 3D модель нам нужно будет воспользоваться любым из двух выше описанных методов моделирования.

Первый метод заключается в моделировании зданий и сооружений прилегающей застройки с помощью геометрических примитивов. Напомним, что при расчете естественного освещения нас в меньшей степени будут волновать архитектурные особенности моделируемых зданий, единственное, на что нам следует обращать внимание, так это на геометрию и фотометрические данные зданий и сооружений.

Второй метод моделирования прилегающего пространства в компьютерной графике называется экструдированием (extrude). Поясним смысл метода, он позволяет просто и точно создавать из 2D объектов полноценные 3D модели путем "вытягивания" контура объекта на необходимую высоту. Метод настолько прост и удобен, что появился в новейшей версии программы DiaLux 4.2. И входит во все известные 3D редакторы.

После того как мы провели плановое 3D моделирование прилегающего пространства, нам необходимо приступить к моделированию здания или сооружения, в котором будет проводиться расчет естественного света. Причем 3D моделирование этого расчетного здания будет отличаться от моделирования прилегающей к нему территории. Отличие будет заключаться в его более

детальном моделировании, так как именно в нем будут находиться помещения, в которых мы рассчитываем КЕО или инсоляцию, поэтому мы должны по геометрическим данным точно воссоздать внутренний и внешний облик здания. Часто здания имеют балконы, атриумы, лестничные пролеты и технические ниши, которые могут создавать затенения в внутри помещения, поэтому им уделяется повышенное внимание при моделировании.

И так после выполнения этапов моделирования, описанных выше, приступаем непосредственно к расчету естественного освещения.

Моделирование естественного освещения и его расчет в светотехнических программах будет произведен по методу радиосити, таким образом, мы получим необходимые светотехнические показатели для всех!!! объектов сцены: зданий и помещений – одновременно. При этом в случаях экономии расчетного времени (оно растет как n^2 – от количества поверхностей в сцене), возможно, производить локальный расчет естественного света в той части сцены где это необходимо, путем «выключения» не попавших в этот участок поверхностей и объектов.

Во второй главе настоящей работы нами приводятся результаты исследований по сравнению двух методик расчета естественного освещения по МГСН и предлагаемый нами по методу радиосити. И делается заключение о правомерности использования метода радиосити в естественном освещении.

Для проведения расчета нам понадобится переключить программу в режим расчета естественного освещения и установить контрольные точки или рабочие поверхности, в которых будет проводиться расчет. В нашем случае это будет рабочая поверхность, расположенная на уровне пола помещения. Далее устанавливаем долготу и широту местоположения расчетной сцены или указываем название города из списка, выбираем ориентировку на север, устанавливаем дату, время и тип неба (облачное, ясное или промежуточное), в условиях которого будет проводиться расчет.

В некоторых программах данных установочных параметров достаточно для расчета, в других, таких как Lightscape 3.2. и 3D Viz 2006 имеется воз-

возможность более гибко их изменять. Т.е. Существует возможность: исключать некоторые объекты сцены из расчета, устанавливать точность расчетной сетки, как на поверхностях сцены, так и модели неба.

Какие данные мы можем получить в результате расчета естественного освещения?

Основными расчетными данными будут являться:

1. Значения КЕО на рабочей поверхности, которые могут представляться как в виде отдельных числовых значений в контрольных точках, так и в виде цветовых градаций;
2. Значения и распределения освещенности/яркости на поверхностях помещения;
3. Визуализация и расчетные параметры инсоляции солнечного света в помещении и вовне;
4. Сводная таблица параметров расчетной сцены: коэффициенты отражения и пропускания, данные о местоположении объекта, расчетное время и т.п.;

Какие новые результаты и аналитические данные позволяют получить светотехнические программы по расчету естественного освещения в отличие от традиционной методики?

1. Расчет КЕО в помещениях со сложной геометрией, в условиях затенений противостоящими зданиями и с учетом расположения мебели и элементов декора внутри помещения;
2. Программы позволяют проводить комплексный расчет естественного освещения в помещениях всей жилой застройки одновременно;
3. Такие программы как DiaLux и Relux2005, позволяют рассчитывать вероятность появления солнечного света, строить графики инсоляции по месяцам и в течение суток, дают рекомендации на основании нормативных данных по возможности проведения работ в помещении без искусственного света;

4. Проведение совместного расчета естественного и искусственного освещения в помещении и получение экономического обоснования по использованию светового оборудования в течение заданного времени;
5. Скорость расчета и получение выходных данных на порядки выше, чем при традиционном методе расчета;

На рис. 3.12. представлена модель расчетного помещения²³. В левой части рисунка представлено цветовое представление распределения освещенности при естественном освещении, значения освещенности можно определить по цветовой шкале в нижней части рисунка. В правой части рисунка мы можем наблюдать фотореалистичное изображение помещения с элементами внутреннего декора, причем оно же будет являться отображением трехмерного распределения яркости.

Все светотехнические программы без исключения дают возможность представления всевозможных цветовых, числовых диаграмм распределения освещенности/яркости в сцене. Что открывает перед проектировщиком новые горизонты светового дизайна, которые ранее, без светотехнических программ были невозможны. В частности, появляется возможность не только точно рассчитывать значения КЕО и инсоляции, но и проектировать дизайн помещения взаимосвязи с естественным светом. Наибольшее значение здесь приобретает, тот факт, что мы можем в живую наблюдать за изменением световой картины, созданной естественным светом на модели помещения, в зависимости от времени года и суток, географической широты местоположения объекта и т.п.

Важно отметить, что светотехническое моделирование естественного света не останавливается на расчете КЕО и инсоляции. Благодаря использованию в светотехнических программах 3D моделирования, появляется возможность проектировать системы отраженного света, солнцезащитные экра-

²³ Модель объекта: Bahnhof Ostermundigen, выполнено компанией LAX

ны и пленки, жалюзи и т.п. для обеспечения оптимального уровня освещения помещения естественным светом. Программы также позволяют производить расчет совмещенного освещения (освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным), моделирование управления освещением по режимам, проектирование эвакуационного освещения.

На примере расчетного помещения мы покажем, как проводится расчет совмещенного освещения и какую информацию можно получить при таком расчете. На рис. 3.13 показано распределение яркости/освещенности в помещении при совмещенном освещении. В установке искусственного освещения задействовано 11 световых приборов – двух типов: 8 – светильников Downlight с двумя компактными люминесцентными лампами мощностью 26Вт и 3 – линейных люминесцентных светильника с двумя лампами T26 по 58Вт. Из характера распределения освещенности по помещению можно заключить, что использование светильников в их полном объеме при наличии естественного света не целесообразно. Имеется характерная засветка зоны с максимальным значением освещенности, прилегающей к световому проему. Для избежания переосвещенности выключим 3 световых прибора, находящихся в непосредственной близости к окну и проведем повторный расчет, полученное распределение освещенности можно увидеть на рис. 3.14.

Теперь, когда мы определили оптимальную работу световых приборов в условиях естественного освещения, программа может нам представить табличные экономические данные о рентабельности использования искусственного освещения. Пример такой таблицы представлен на рис. 3.15.

Таблица строится в автоматическом режиме и учитывает множество факторов, описанных в её нижней части: место положение, долгота, широта, рабочее время, минимальная горизонтальная освещенность, КЕО и т.д. Результатом представленной оценки рентабельности ОУ является определение процентной части рабочего времени, при дневном освещении в среднем за год, достаточном для проведения работ. В нашем случае процентная часть

составляет 83.9%. Соответственно по этим данным можно рассчитать затраты на электроэнергию и эксплуатацию электрооборудования в течение года.

3.4. Некоторые методы по оценке светового поля в ЗМ сценах

В настоящем параграфе мы поговорим об анализе светового поля, на примере универсального спортивного комплекса; затронем вопросы нормирования и расчета показателей освещения в спортивных сооружениях; рассмотрим общие подходы к проектированию ОУ с помощью светотехнических программ.

Как уже отмечалось во второй главе настоящей работы, традиционные методы проектирования ОУ значительно уступают методам компьютерного моделирования освещения. Особенно остро эта разница проявляется в случаях проектирования ОУ в сооружениях с повышенными требованиями к качественным показателям освещения. К таким сооружениям в первую очередь относятся спортивные и зрелищные объекты, в которых подразумевается проведения теле и видео съемки.

Напомним, что все спортивные сооружения делятся на 4 класса - по уровню проводимых на них соревнований [45,46]

Класс TV – проведение телетрансляций

Класс I – проведение национальных соревнований

Класс II – проведение региональных соревнований

Класс III – проведение любительских соревнований

В существующих российских и зарубежных нормативных документах [32-33,46] для каждого класса спортивного сооружения регламентируются нормируемые показатели освещения, причем в зависимости от вида спорта нормируемые показатели и их значения отличаются. Отличительной особенностью российской нормативной базы является, то что в них регламентируются минимальные величины ($E_{г\text{мин}}$, $E_{в\text{мин}}$), в то время как в западных нормах используются средние значения ($E_{г\text{ср}}$, $E_{в\text{ср}}$). В связи с этим нами и в [45] предлагается, в качестве нормируемых показателей принимать значения, по-

лученные в результате пересчета от $E_{гмин}$ к $E_{гср}$ или на оборот, во избежание разночтений. Для примера мы рассмотрим регламентируемые показатели освещения для крытого универсального зала, класс проведения соревнований – II (таблица №4-6).

Таблица №4. Показатели освещения для универсального зала по российским нормативным документам

Класс	$E_{гмин}$, ЛК	$E_{гмин} / E_{гмакс}$	$E_{вмин}$, ЛК	Ra	Кз	Кп, %	М
II	300	0,5	150	60	1,5	20	50

Таблица №5. Показатели освещения для универсального зала по европейским нормативным документам

Класс	$E_{гмин}$, ЛК	$E_{гмин} / E_{гмакс}$	$E_{вмин}$, ЛК	Ra	Кз	Кп, %	М
II	500	0,7	150	60	1,3	20	50

Таблица №6. Приведенные показатели освещения для универсального зала

Класс	$E_{гмин}$, ЛК	$E_{гмин} / E_{гмакс}$	$E_{вмин}$, ЛК	Ra	Кз	Кп, %	М
II	350	0,55	150	60	1,3	20	50

Как видно из таблиц №4-6, показатели освещения ОУ можно разделить на количественные и качественные показатели. К качественным показателям будут относиться: вертикальная, цилиндрическая, сферическая освещенности, показатель дискомфорта (М), коэффициент пульсации (Кп) и индекс цветопередачи (Ra). Только два последних показателя Кп и Ra, по своей природе, не могут быть рассчитаны средствами светотехнических программ и соответственно рассчитываются инженерными методами.

Важно отметить, что в СНиП 25-05-99 и ВСН 1-73 рекомендуется производить расчет всех качественных показателей освещения инженерными методами. С другой стороны, мы попытаемся продемонстрировать, как возможно произвести расчет качественных показателей освещения в светотехнических программах, которые помогут правильно спроектировать ОУ.

Перед началом компьютерного моделирования ОУ универсального

спортивного зала, обратимся к схеме №2 второй главы настоящей работы, для определения основных этапов проектирования.

Необходимые исходные данные для проектирования ОУ:

1. Детальный план и разрезы спортивного сооружения в форматах *.dxf или *.dwg, с обозначением главной ТВ – камеры;
2. Сведения о классе проведения соревнований;
3. Данные об отделочных материалах и конструкциях, их цвет и коэффициенты отражения;
4. Ориентировочные места установки световых приборов;

Теперь, когда мы имеем необходимые данные для моделирования, нам следует обратиться к действующим нормативным документам, для определения светотехнических требований к проектированию. Особое внимание, на этом этапе стоит уделить тому, что кроме нормативных документов [32,33,46], существуют рекомендации по освещению различных спортивных федераций, таких как: ФИФА, УЕФА, федерации тенниса, баскетбола, волейбола и пр. Причем приоритет выбора нормируемых величин остается за спортивными федерациями.

Следующим этапом проектирования ОУ согласно схеме №2 является 3D моделирование спортивного сооружения. Проведение моделирования по своей структуре будет таким же, как и в интерьерном моделировании, только с одной особенностью: как правило, спортивные арены и сооружения захватывают сотни квадратных метров, поэтому детальное моделирование зрительских сидений, перил, ступенек, рекламных щитов не обязательно, т.к. их влияние на общее перераспределение излучения в сцене будет незначительно. Если, конечно, результатом проектирования не являются фотореалистические изображения или видео ролики освещенного спортивного сооружения.

На этом этапе появляется проблема выбора светотехнической программы. Для того чтобы правильно сделать выбор, необходимо четко себе представлять что:

1. Проектирование освещения на спортивных сооружениях всегда сопряжено с большим количеством световых приборов различных типов, поэтому в программе должно быть хорошо продуманное управление их массивами;
2. Для получения итогового положительного результата проектирования требуется многовариантность, а это как следствие изменение и переориентирование десятков световых приборов за вариант;
3. Светотехническая программа должна быстро и качественно проводить расчет на рабочих плоскостях объекта;
4. В программе должны быть средства по расчету качественных показателей освещения и возможность изменения шага расчетной сетки;

Поэтому мы рекомендуем для проведения светотехнического расчета спортивных сооружений пользоваться программами DiaLux, Relux или Oxytech. Эти программы отвечают всем описанным выше требованиям и имеют все средства для проведения качественного светотехнического расчета.

На рис.3.16. показана 3D модель универсального крытого спортивного сооружения смоделированная средствами программы Oxytech. Из рисунка видно, что модель упрощена, в ней присутствуют только необходимые конструктивные элементы, непосредственно участвующие в перераспределении светового потока от световых приборов в сцене.

На рис.3.17. представлена модель универсального зала, моделирование которого проводилось детально. Такая модель позволяет не только получить фотореалистические изображения осветительной установки, но и более точно рассчитать и спрогнозировать качественные показатели освещения.

Далее исходя из рекомендуемых уровней освещенности на рабочих поверхностях (в зависимости от вида спорта это может быть поверхность игровой площадки – плоскость, проходящая на уровне 1,5 м от пола) и условий освещения выбираем ту или иную схему расстановки световых приборов. В нашем случае мы используем линейное расположение прожекторов вдоль

игровой площадки как показано на рис.3.16-17.

Выбираем приблизительную мощность прожекторов и проводим расчет горизонтальной и вертикальной освещенности на игровой площадке. Мы настоятельно рекомендуем проводить расчет вертикальной освещенности вкуче с горизонтальной даже в тех случаях, когда она не регламентируется нормативными документами. Как легко показать, что при выдерживании по нормативам уровня горизонтальной освещенности, мы можем получить провалы вертикальной освещенности в различных частях игрового поля, что приведет к ухудшению качества телетрансляций.

После проведения предварительного расчета, выводим результаты освещенностей. Анализируя полученные данные, делаем выводы о правильности выбора светового оборудования, его ориентации, местоположении или производим изменения и повторяем расчет. На наш взгляд, именно эта часть проектирования ОУ с помощью светотехнических программ сильно отличается от традиционного метода расчета ОУ, где по соображениям трудозатрат, сложно качественно произвести несколько вариантов расчета показателей освещения.

Какие же качественные показатели освещения мы можем рассчитать с помощью светотехнических программ?

Естественно, светотехнические программы предоставляют своим пользователям возможность получить большинство традиционных качественных показателей освещения это:

- вертикальная освещенность;
- цилиндрическая освещенность;
- сферическая освещенность;
- показатель дискомфорта/UGR;

Но также светотехнические программы предлагают пользователю и иные оценки качества освещения. Одной из таких характеристик являются распределения освещенности или яркости по поверхностям сцены. Распределения представляются как в виде изолюкс, так и в виде цветовых градаций с

привозкой к конкретным значениям освещенности или яркости. Данные качественные характеристики очень важны для правильной оценки распределения освещенности на рабочих плоскостях. Благодаря тому, что в их построении учувствует сотни расчетных точек, они в полной мере отображают световую картину распределения света в сцене в результате многократных отражений и затенений.

Еще одной особенностью светотехнических программ является то, что они позволяют разрабатывать новые оценки светового поля, под конкретную ОУ. Как уже упоминалось, большинство светотехнических программ использует в расчете показателей освещения метод Radiosity, согласно которому в результате расчета мы имеем значение облученности в любой точке сцены. Таким образом, получается что, вводя в сцену объекты, с которыми непосредственно выполняется зрительная работа, мы можем детально (приблизительно к реальности) получить представление о качестве освещения в сцене. Более того, мы можем, приблизительно к реальности, смоделировать распределение облученности в ползунке виртуального наблюдателя, реакция которого на распределение света в сцене будет адекватна реальному распределению. К сожалению, сегодняшний технический уровень не позволяет нам проводить моделирование, расчет и визуализацию со стопроцентной реалистичностью и тому есть весьма серьезные научно-технические препятствия:

1. Не представляется возможным проведение моделирования сцены с детальностью реального мира, а в свою очередь это приводит к погрешности в расчетах и визуализации;
2. Не возможен учет всех физических явлений и процессов, происходящих в пространстве (глаз - объект);
3. Яркостной динамический диапазон существующих мониторов, видео панелей и прочих видео устройствах значительно меньше, чем у человеческого глаза (3 против 12), что приводит к неминуемым яркостным искажениям в изображении;

4. Технически не возможно проведение моделирования объектов и получение их изображений в масштабе 1:1, а это приводит к искажению физиологического восприятия;

Таким образом, в результате проведения визуализации системы освещения, полученные изображения будут отличаться от изображений, полученных при фотосъемки реальной осветительной установки или её видении. С другой стороны, такие изображения как нельзя лучше подходят для представления заказчику концепции освещения на стадии проектирования.

Настоящая работа не ставит перед собой задачу описания трудностей визуализации и компьютерной графики. Поэтому нас в большей степени интересуют числовые или цветовые представления светотехнических величин в моделируемой сцене.

На рис.3.18. представлен вид модели универсального зала глазами виртуального игрока в псевдоцветах. Где красным цветом обозначены области с повышенным значением освещенности/яркости, а синим цветом, напротив области с недостаточным значением этих величин. Стоит отметить, что генерация такого рода изображений занимает считанные минуты, а проектировщик получает полную светотехническую информацию об осветительной установке.

Другим вариантом получения качественных показателей освещения может служить введение в сцену так называемых *фиктивных поверхностей*. *Фиктивные поверхности* – это поверхности не участвующие в перераспределении излучения в сцене, имеют коэффициент отражения (0%), пропускания (100%) и не участвуют в визуализации, при этом на них рассчитываются значения освещенности. Установка таких поверхностей в продольном и поперечном сечении сцены с определенным шагом позволит получить численно или в псевдоцветах значения освещенности внутри освещаемого пространства. В первом приближении суммарные распределения на таких поверхностях дадут нам тело освещенности адекватное телу яркости (при диффузных поверхностях). Благодаря которому, мы однозначно можем оценить насыщен-

ность светом помещения, произвести прогноз тенеобразования, выявить слабо освещенные или переосвещенные области в пространстве. Другими словами, такое тело освещенности/яркости дает проектировщику полную информацию о проектируемой осветительной установке.

Выводы по третьему разделу:

1. Предлагаемая нами новая универсальная методика компьютерного светотехнического проектирования, дает возможность проведения светотехнического проектирования осветительных установок всех типов, экономя время разработки и поднимая качество получаемых результатов;
2. Применение светотехнических программ по расчету и анализу осветительных установок позволит получить традиционные качественные показатели освещения, так и новые оценки светового поля (цветовые распределения, визуализация распределения яркости, фиктивные плоскости, и т.д.);
3. Компьютерное моделирование естественного освещения, позволяет производить расчет КЕО в помещениях со сложной геометрией, в условиях затенений противостоящими зданиями и с учетом расположения мебели и элементов декора внутри помещения;
4. Совмещение методов Radiosity и Ray tracing в светотехническом моделировании, позволяет получить распределения освещенности и яркости с учетом реальных отражающих и фотометрических свойств материалов, на поверхностях сцены;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе разработаны новые методики проектирования осветительных установок при использовании светотехнических программ. Методики реализованы в виде общих положений (шагов) и рекомендаций по проектированию ОУ и претендует на учет в нормативных документах и рекомендациях к проектированию. А так же проведен сравнительный анализ современных светотехнических программ по их точности расчета в сравнении с аналитическими решениями. Рассмотрены актуальные вопросы расчета и моделирования естественного освещения и инсоляции, и аналитически доказана правомерность их использования в данной области светотехники.

Основные выводы из работы:

1. Применение теории ГО к проектированию ОУ позволяют перейти от точечных методов расчета к моделированию ОУ, основанному на расчете распределения световых величин по сцене наблюдения;
2. Основой оценки качества ОУ является оценка яркостной и цветовой композиции в 3М сцене освещения по моделированию распределений световых величин. Наиболее эффективна оценка распределений по псевдоцветам с использованием фиктивных плоскостей;
3. Аналитическое решение уравнение ГО позволяет проводить однозначную оценку эффективности и точности моделирования ОУ на компьютере различными программами;
4. При создании 3М сцен, используемых для проектирования и анализа ОУ, необходимо использовать объекты простейшей геометрии (параллелепипеды, цилиндры, конусы и т.д.) и объекты стандартных библиотек, заменяя сложные объекты текстурами карт отражения. Это позволяет сократить на порядок время подготовки и расчета сцен, сохраняя точность вычислений;
5. Программы, реализующие теорию ГО, не только применимы для расчета

и анализа естественного освещения, но и позволяют включить в расчет многократные переотражения, доля которых составляет порядка 20 %;

Список литературы:

1. Мешков В.В., Епанешников М.М. Осветительные установки. М.: Энергия, 1972.
2. Нюберг Н.Д. Теоретические основы цветной репродукции. М.: Советская наука, 1948.
3. Ferwerda J.A. *Fundamentals of Spatial Vision // Program of Computer Graphics, Cornell University, 1996*
4. Blakemore C, Campbell F.W. *On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. J. Physiol. 1969, 203, 237-260.*
5. Hood D.C, Finkelstein M.A. *Visual sensitivity. In K.Boff, L. Kaufman, J. Thomas (Eds.), Handbook of Perception and Human Performance (V. 1) 1986.*
6. van Nes F., Bouman M.A. *Spatial Modulation Transfer in the Human Eye // JOSA, 1967, V.57, p.401-406.*
7. Роджерс Д. *Алгоритмические основы машинной графики // М.: Мир, 1989.- 512С.*
8. Foley J.D., van Dam A., Feiner S.K., Hughes J.F. *Computer graphics: principles and practice. – Addison-Wesley, 1997. – 1176P.*
9. Льюис М. *История физики. – М.: Мир, 1970. – 464С.*
10. Будаков В.П. *Визуализация распределения яркости в трехмерных сценах наблюдения. – М.: МЭИ, 2000. - 136С*
11. Sillion F.X., Puech C. *Radiosity and global illumination. - San Francisco: Morgan Kaufman Pub., 1994. – 252P.*
12. Ashdown I. *Radiosity. A Programmer's perspective. - JOHN WILEY & SONS, 1994. –496P.*
13. Kajiya J.T. *The rendering equation // Computer Graphics (Proc. SIG-GRAPH'86), 1986. V.20, N4. - P.143-150.*

14. Поляк Г.Л. Лучистый теплообмен тел с произвольными индикатрисами отражения поверхностей/ в кн.: Конвективный и лучистый теплообмен. – М. АН СССР, 1960. – С. 118-132.
15. Moon P. On Interreflections //JOSA. 1940 Vol. 30. N2. P. 195 –205.
16. Yamauti Z. The light flux distribution of a system of interreflecting surfaces //JOSA, 1926. V.13, N5. – P.561-571.
17. Heckbert P.S. Simulating Global Illumination Using Adaptive Meshing. Diss. PhD. University of California, 1991
18. Hoowell J.R., Monte Carlo solution of thermal transfer through radiant media between gray walls // J. Heat Transfer, 1964. V.C86. - P.116-122.
19. Cook R., Porter T., Carpenter L. Distributed ray tracing. Computer Graphics, 18(4), 1984. ACM Siggraph'84 Conference Proceedings.
20. Shirley P., Wang C. Distribution Ray Tracing: Theory and Practice. Indiana University.
21. www.dialux.de
22. www.relux.biz
23. www.oxytech.it
24. www.lightscape.com
25. www.usa.autodesk.com
26. www.svetosrv.ru
27. www.cad.ru
28. Будаков В.П., Макаров Д.Н. Возможности использования 3М моделирования для светотехнического проектирования / Светотехника. – 2005. -№6. - с. 36-39
29. Будаков В.П., Макаров Д.Н., Смирнов П.А. Компьютерные программы для светотехнических расчетов осветительных установок / Светотехника. – 2004. - №6. – с. 75-79
30. В.П. Будаков, Д.Н. Макаров « Программы расчета и визуализации осветительных установок» Новости светотехники. Выпуск 1 (41) // Под редакцией Ю.Б. Айзенберга / М.: Дом Света, 2004г., 56 стр.

31. МГСН 2.06 – 99 *Естественное, искусственное и совмещенное освещение.*
32. СНиП 23-05-95 *Естественное и искусственное освещение.*
33. *Нормы электрического освещения спортивных сооружений. ВСН-1-73. Спорткомитет СССР, Вильнюс, 1975.*
34. В Geebelen, M van der Voorden «Fast and accurate simulation of long-term daylight availability using the Radiosity method» *Lighting Res. Technol.* 37,4 (2005) pp.295-312
35. Д.Н. Макаров, В.П. Будаков «Роль многократных переотражений при естественном освещении улиц» *Вестник МЭИ. №2. 2005г.*
36. Дарула С., Киттлер Р. *Метод расчета естественного освещения и современные тенденции оценки естественного света / Светотехника. – 2006. - №1. – с. 28-35*
37. Щепетков Н.И. *О некоторых недостатках норм и методик расчета инсоляции и естественного освещения / Светотехника. – 2006. - №1. – с. 55-57*
38. Бахарев Д.В. *О методике расчета естественного освещения / Светотехника. – 2006. - №1. – с. 57-60*
39. *Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга.- 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1995г.- 528 с..*
40. Кнорринг Г.М. *Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Л.: Энергия, 1973.- 200с.*
41. www.alware.de
42. В. Ван Боммель. *Зрительные, биологические и эмоциональные аспекты освещения. Результаты последних исследований и их назначение для светотехнической практики / Светотехника. – 2005. - №4. – с. 4-6*
43. Соболева В.В. *Точечный источник света между параллельными плоскостями"//ДАН СССР, 1944. Т.42, №4. – С.176-177.*

44. Пекарев Л.Д. Самоучитель 3D Studio Max 4.0. – Спб.: BHV - Петербург, 2001. – 668.
45. Царьков В.М. Нормы освещения спортивных сооружений / Светотехника. – 2005. - №1. – с. 23-28
46. DIN EN 12193 “Light and lighting – Sorts lighting” 1999г.
47. V.P. Budak, D.N. Makarov, P.A. Smirnov «Computer programmes for lighting design» / Light & Engineering Vol.13, No. 2, pp. 18-24, 2005
48. V.P. Budak, D.N. Makarov, P.A. Smirnov «Computer programmes for lighting design» / SVETLO, No. 1, pp. 51-54, 2006

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пояснительные рисунки к методам компьютерного моделирования осветительных установок и таблицы

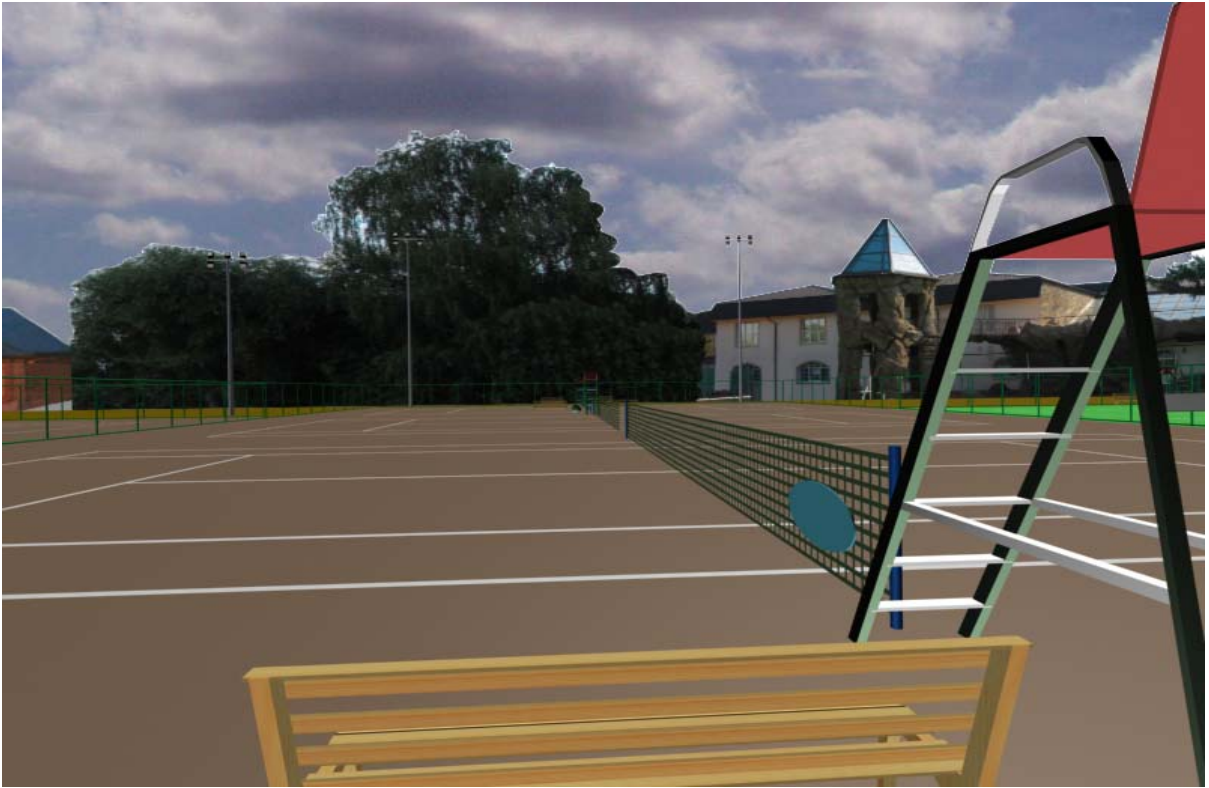


Рис.2.1. 3М модель открытого теннисного корта



Рис.2.2. Реальная фотография освещаемого объекта



Рис.2.3. Наложение фотореалистического изображения освещенного объекта на фотографию.



*Рис.2.4. 3М модель объекта с детальной прорисовкой (объем *.max файла - 80 Мб)*



*Рис.2.5. Отредактированная 3М модель с минимальной прорисовкой архитектурных элементов (объем * .max файла - 7 Мб)*

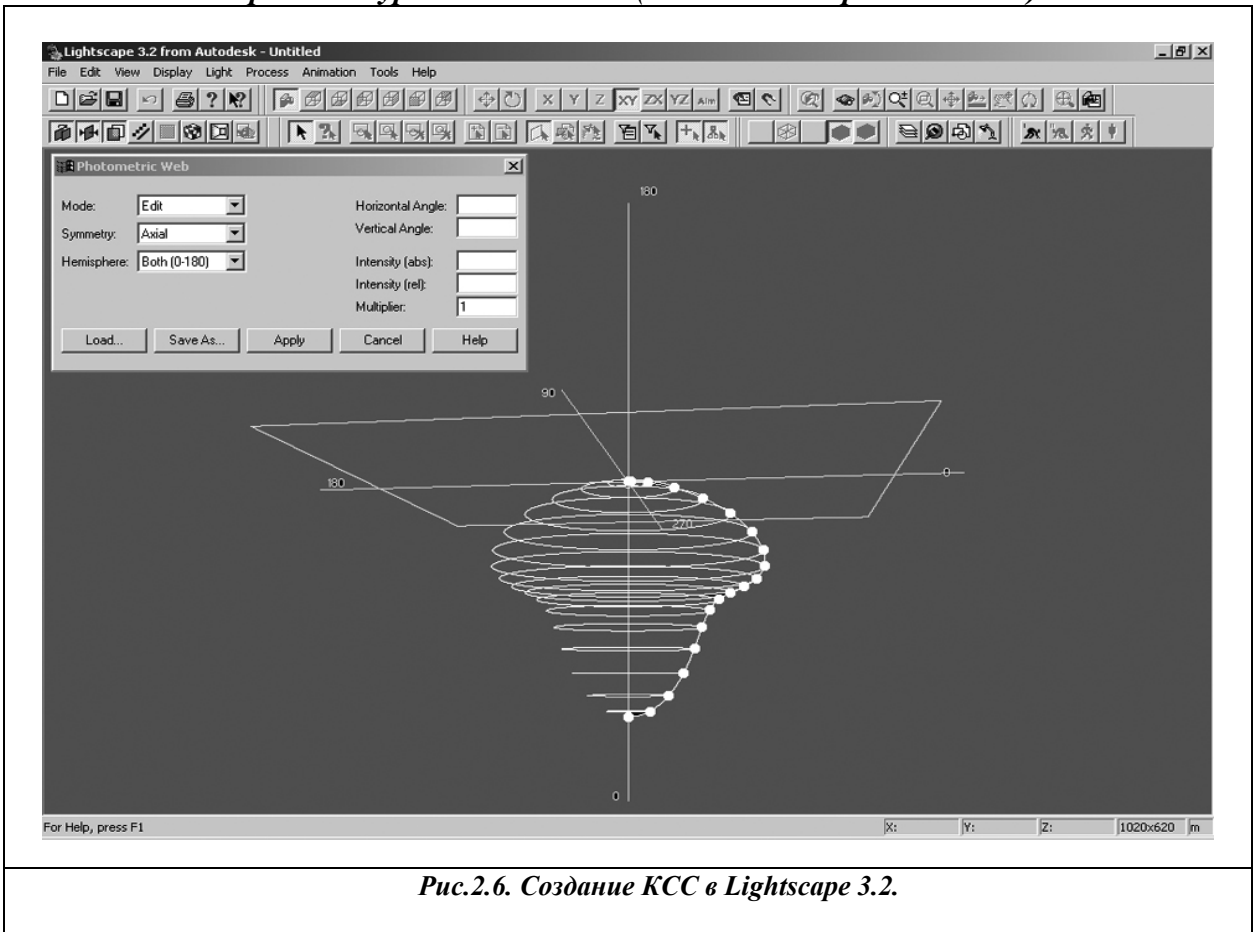


Рис.2.6. Создание КСС в Lightscape 3.2.

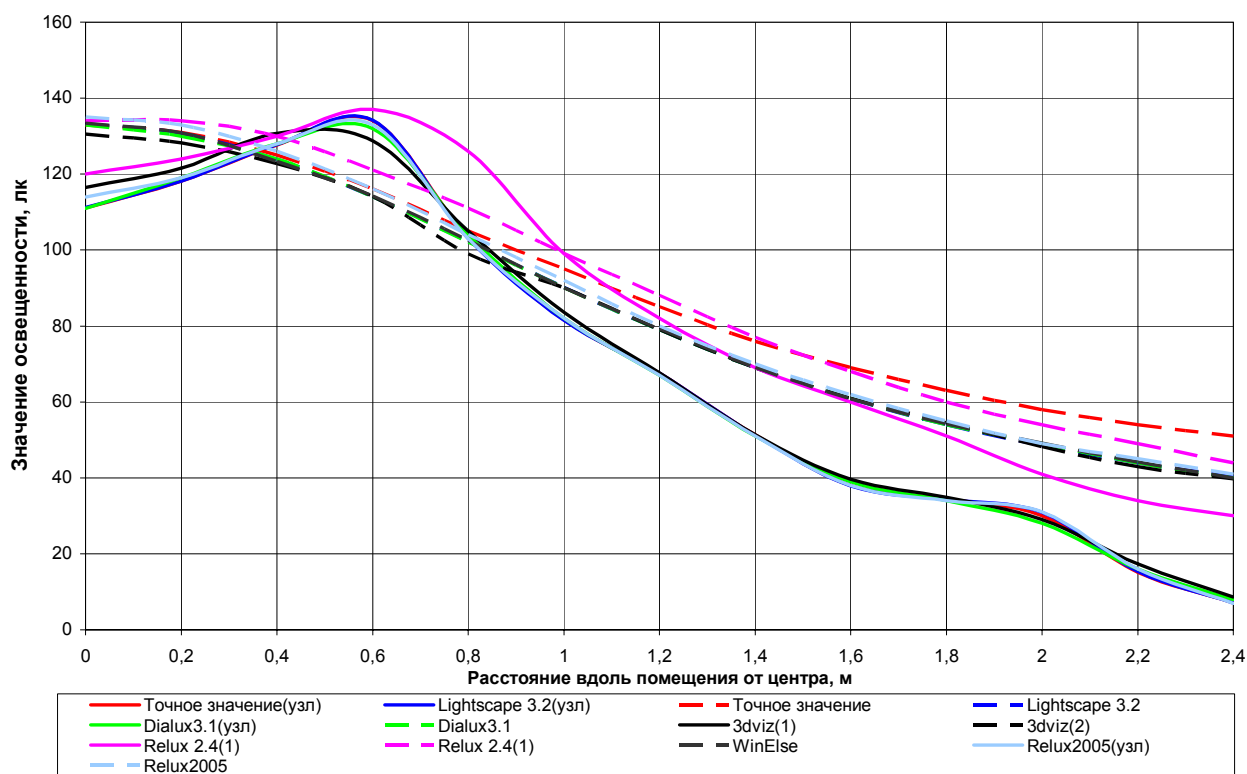
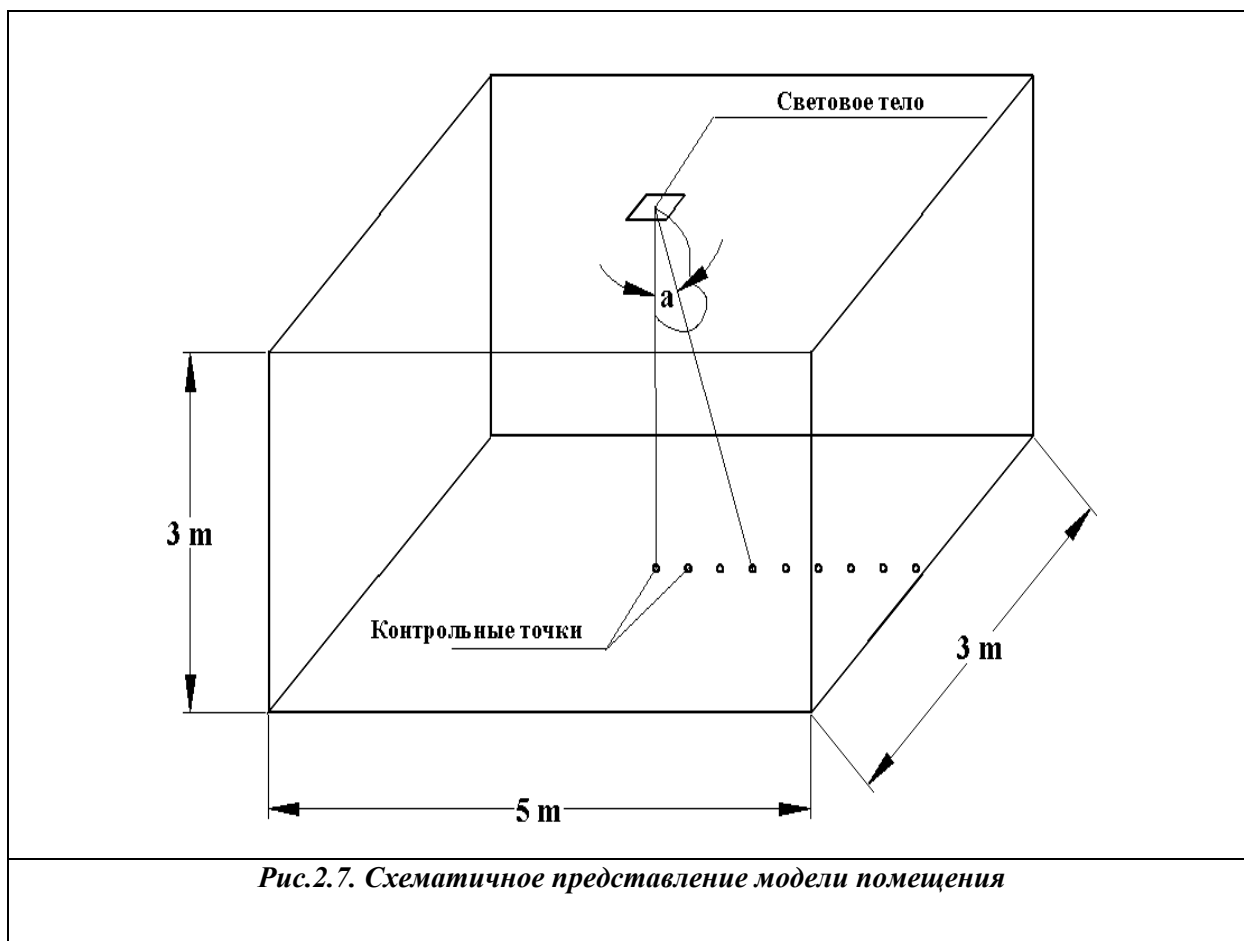


Рис.2.8. Распределение освещенности в программах (источник точечный, «черное» помещение), где сплошной линией обозначены результаты, полученные при использовании узловой КСС, а пунктиром аналитической КСС

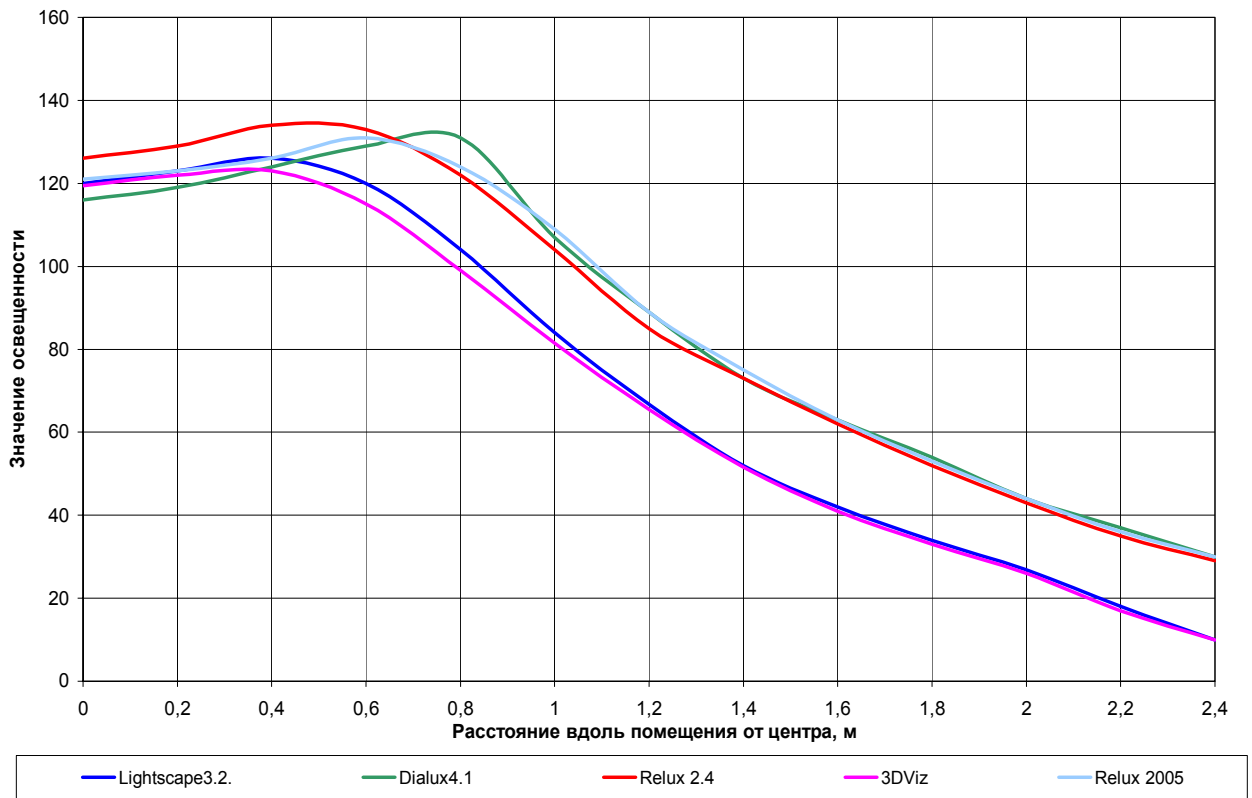


Рис.2.9. Распределение освещенности в программах (источник поверхность, одно отражение)

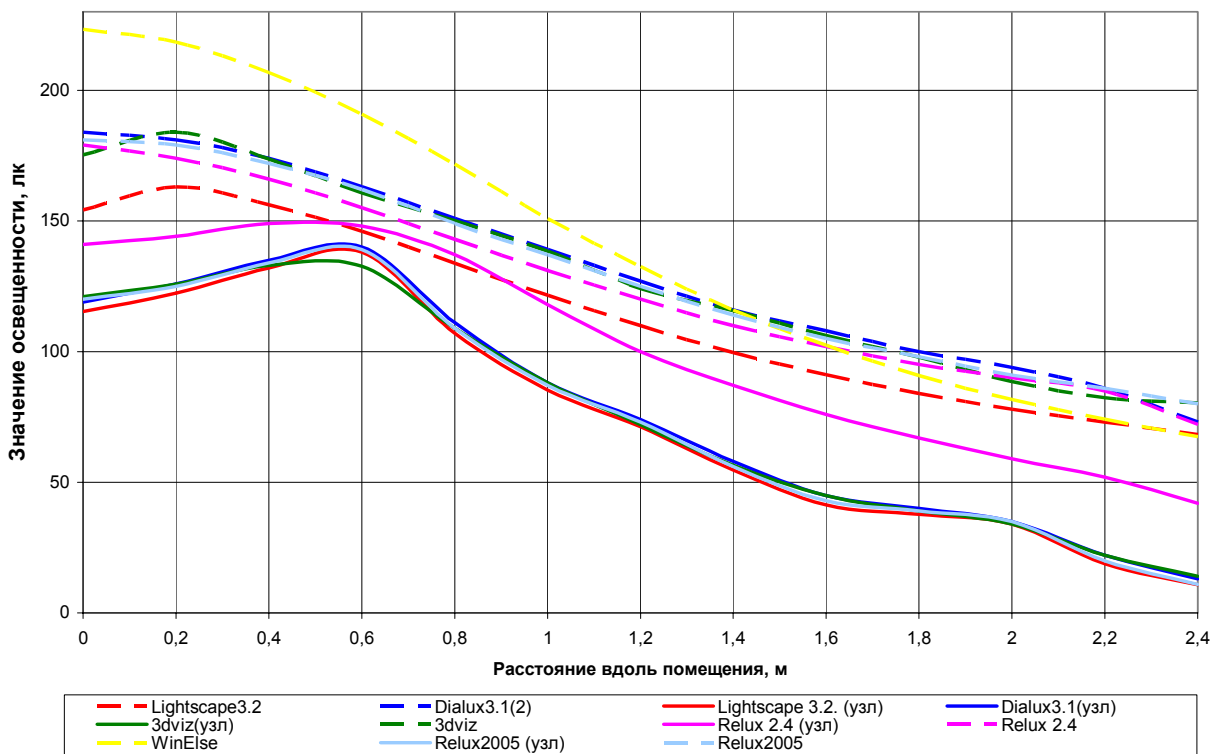


Рис.2.10. Распределение освещенности в программах в случае многократных отражений (источник точечный), где сплошной линией обозначены результаты, полученные при использовании узловой КСС, а пунктиром аналитической КСС

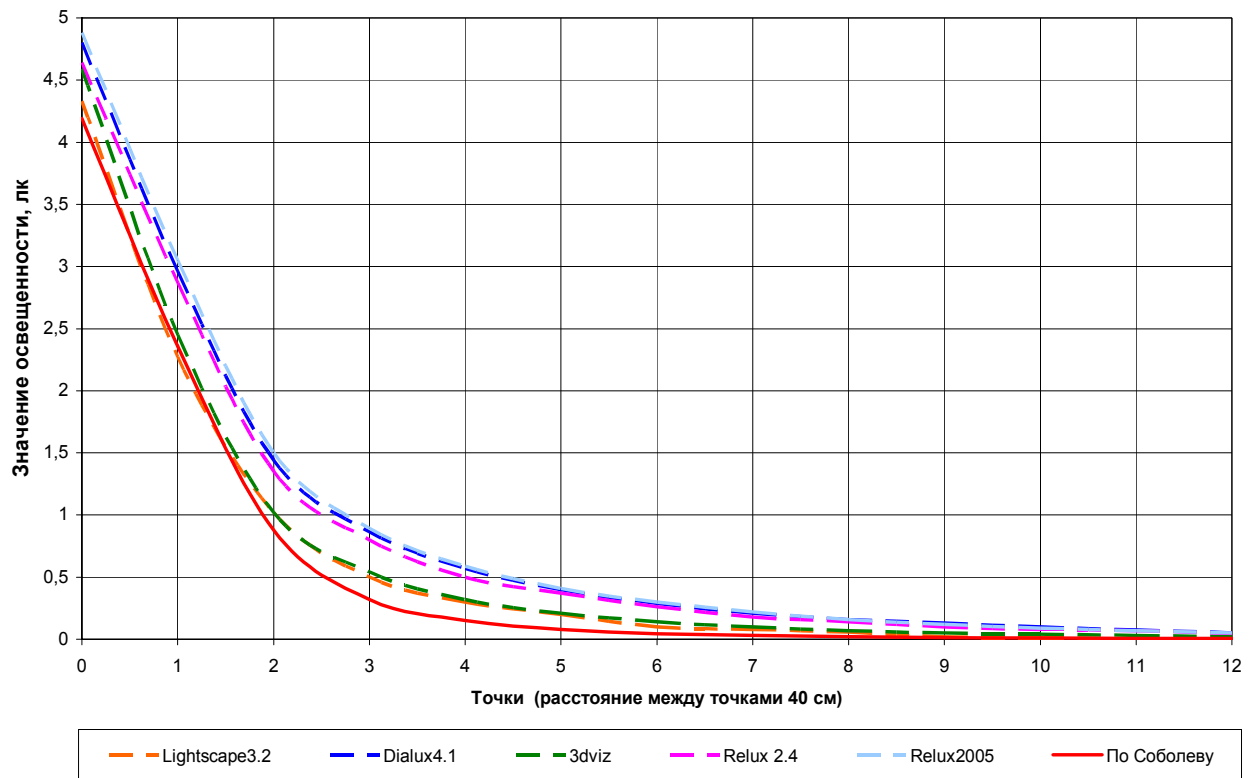


Рис.2.11. Распределение освещенности в программах в случае точечного источника между двумя плоскостями, где сплошной линией обозначен результат, полученный по формуле (2.2), а пунктиром в соответствующих программах

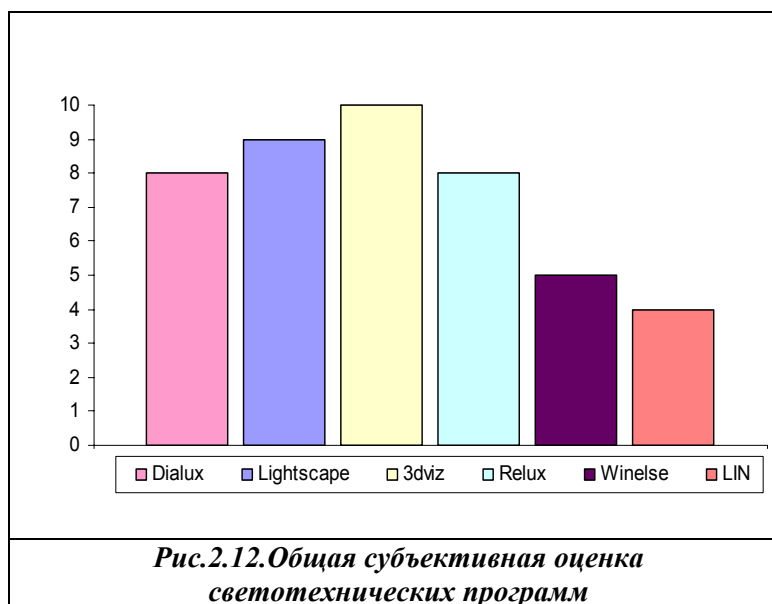


Рис.2.12. Общая субъективная оценка светотехнических программ

Распределение яркости по моделям небосводов

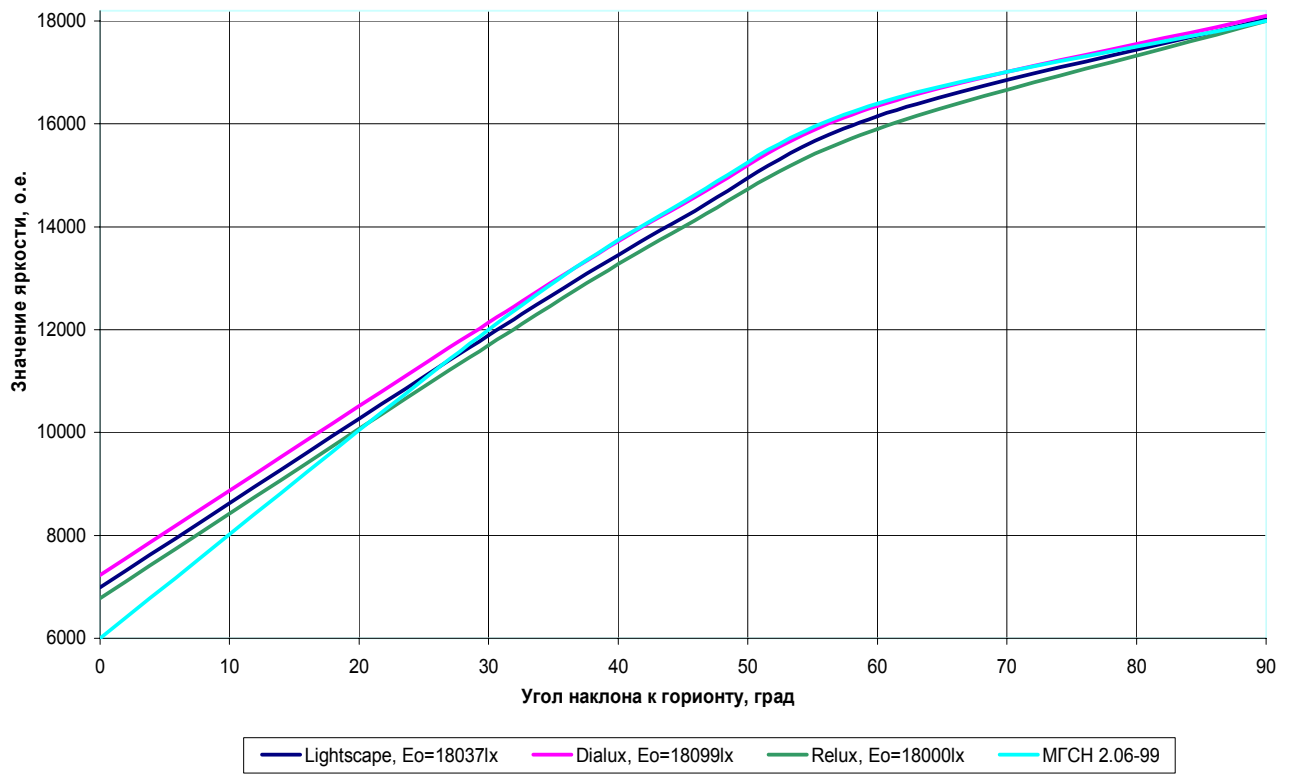


Рис.2.13. Распределение яркости по моделям небосвода в программах

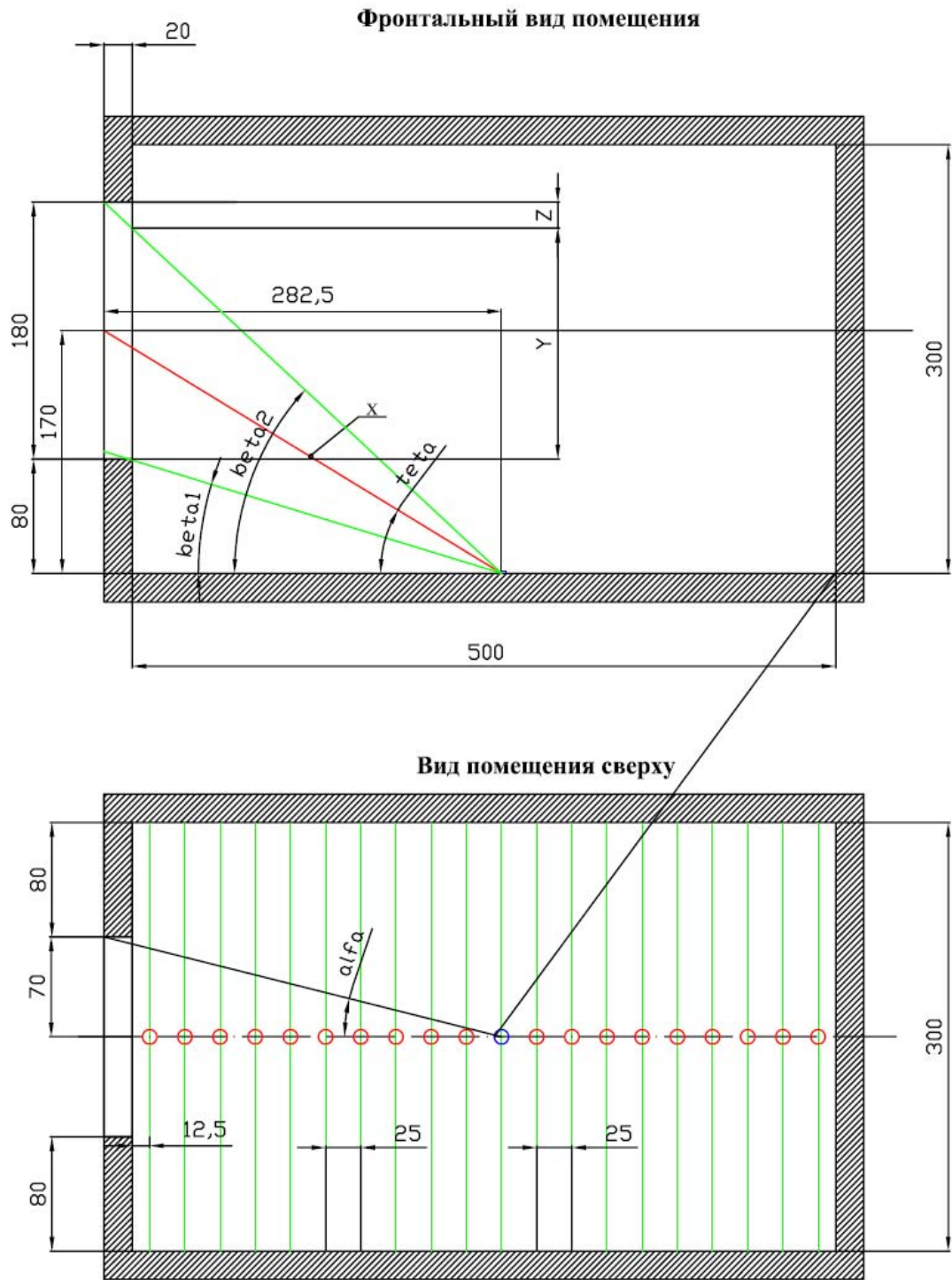


Рис.2.14. Схематичное представление плана расчетного помещения с необходимыми обозначениями для расчета КЕО по МГСН 2.06-99.

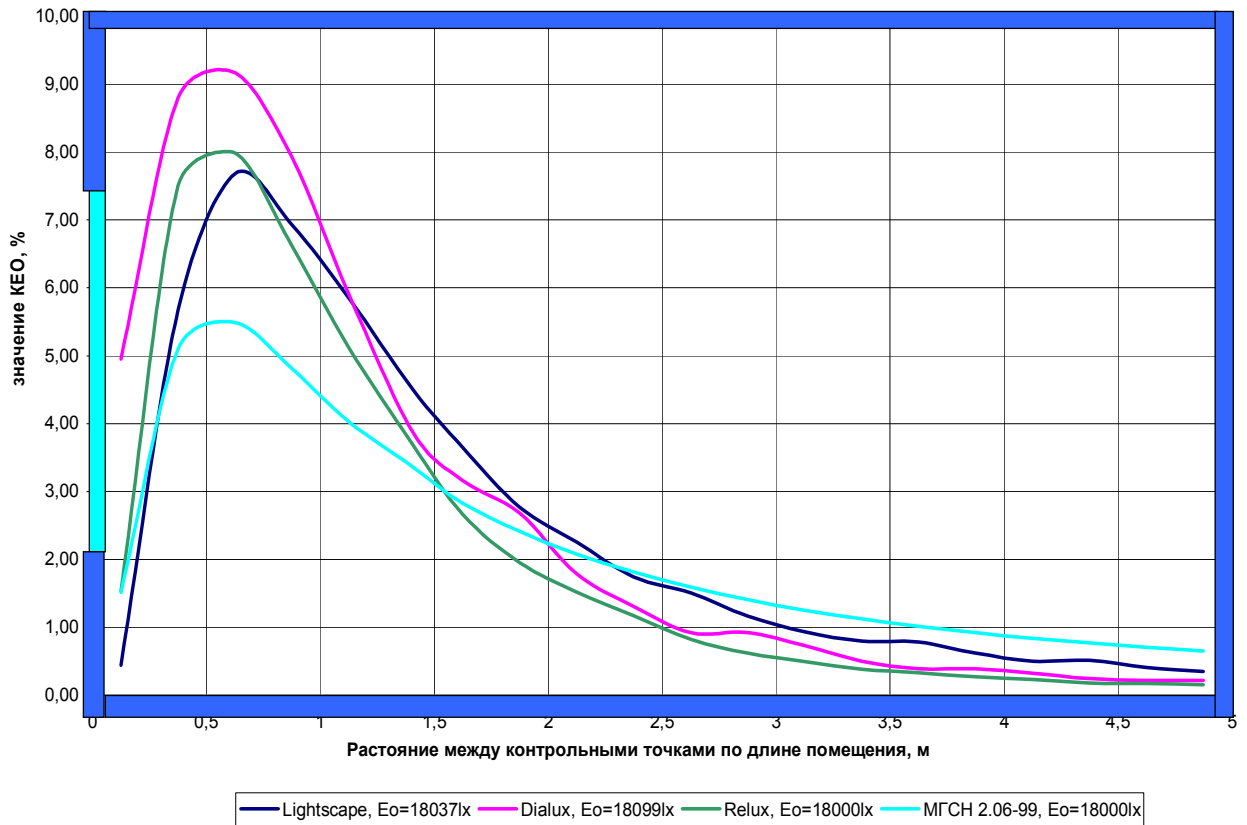


Рис.2.15. Распределение КЕО по помещению Москва 21 июня 12:00

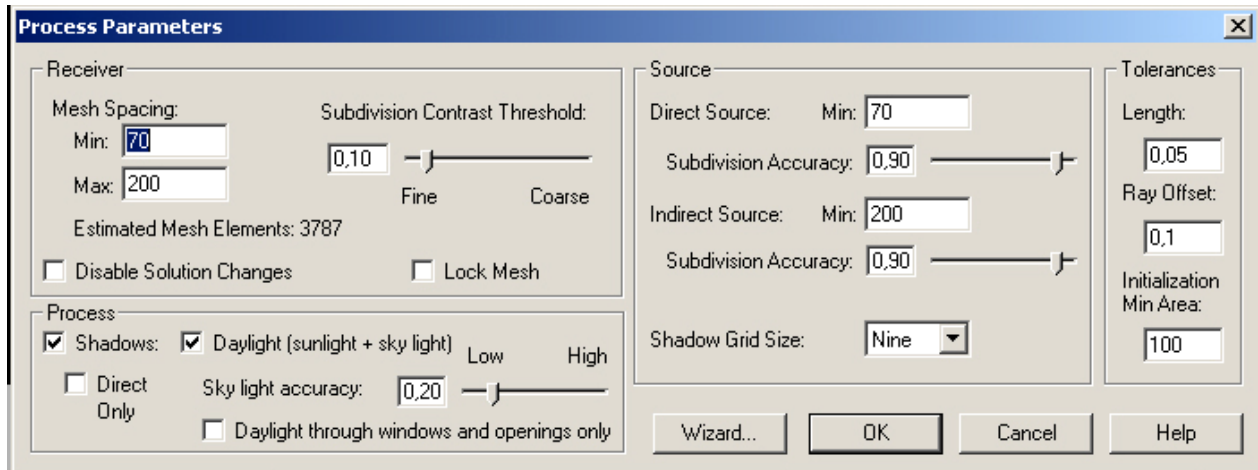


Рис.2.16. Окно параметров расчета программы Lightscape 3.2.

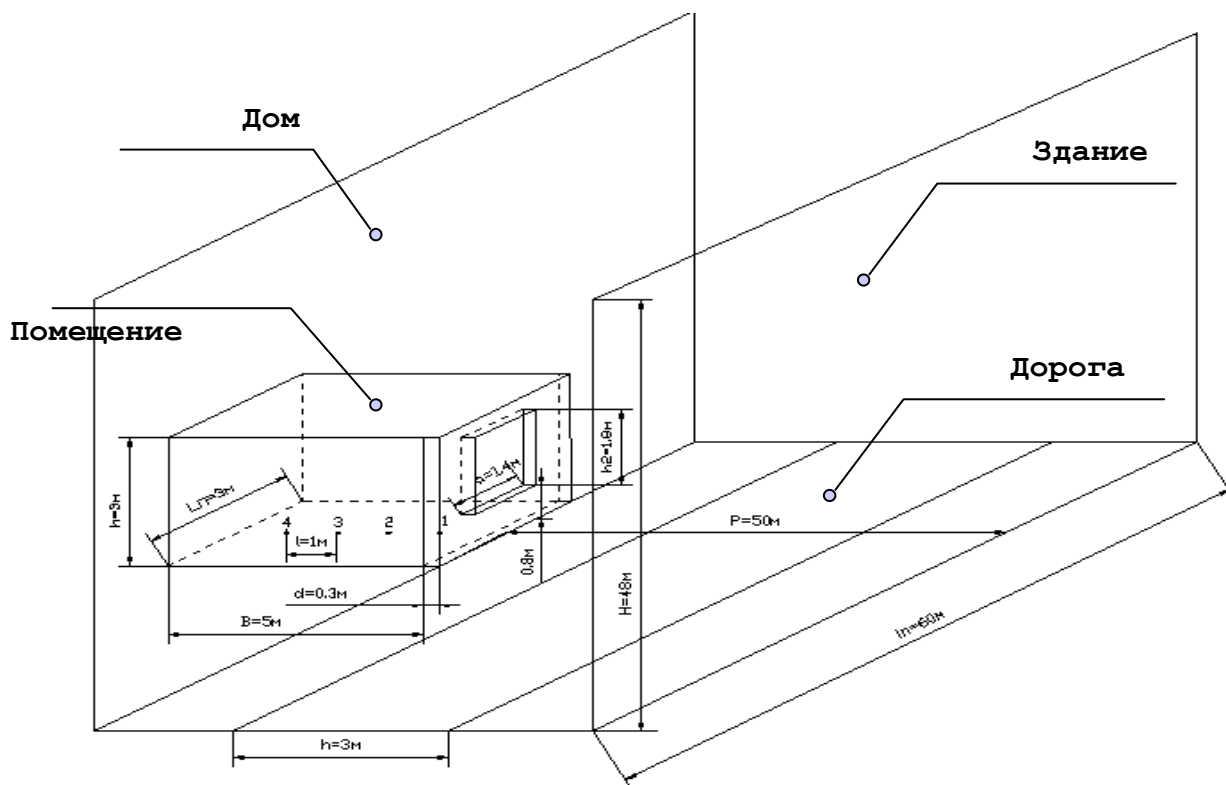


Рис.2.17. Схема моделируемой сцены

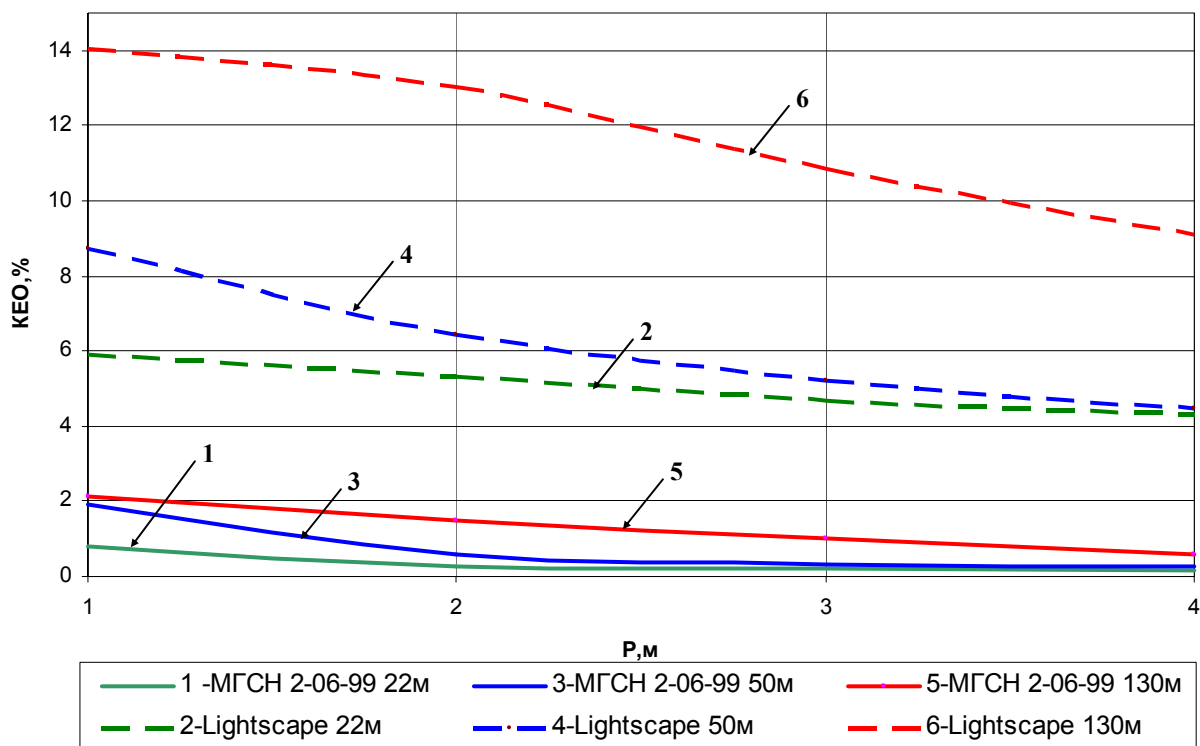


Рис.2.18. Распределение КЕО в помещении, в случае облачного неба

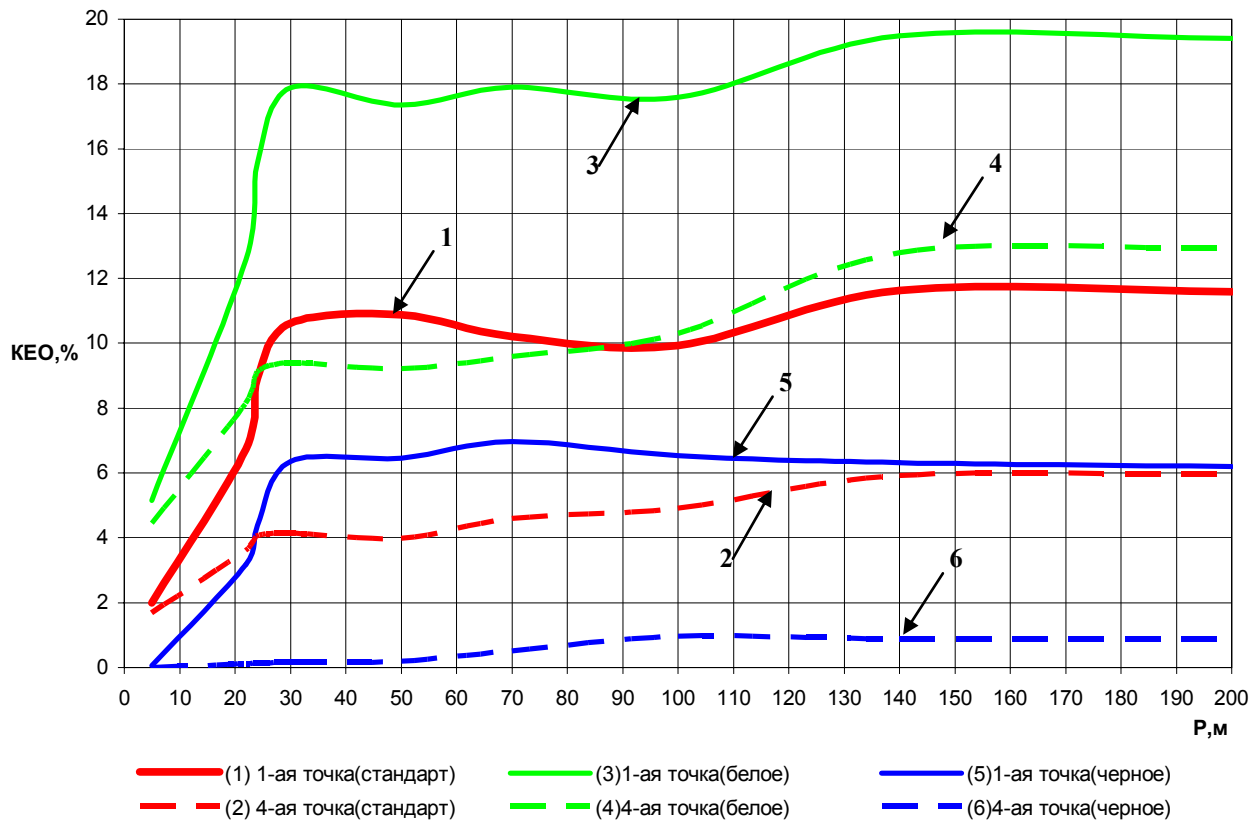


Рис. 2.19. Распределение КЕО в помещении, при облачном небе и разных значениях коэффициента отражения поверхностей помещения

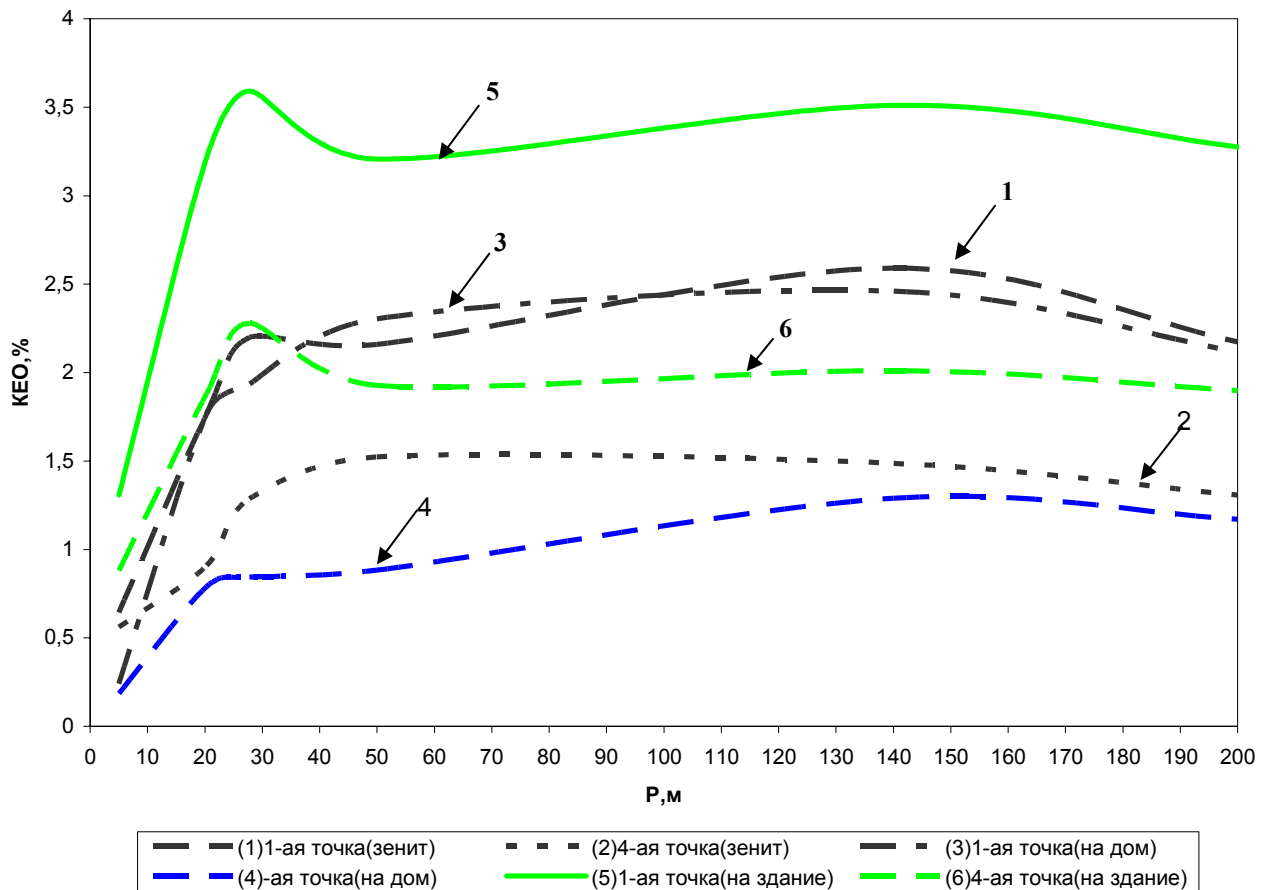


Рис. 2.20. Зависимость КЕО в контрольных точках при различных положениях солнца

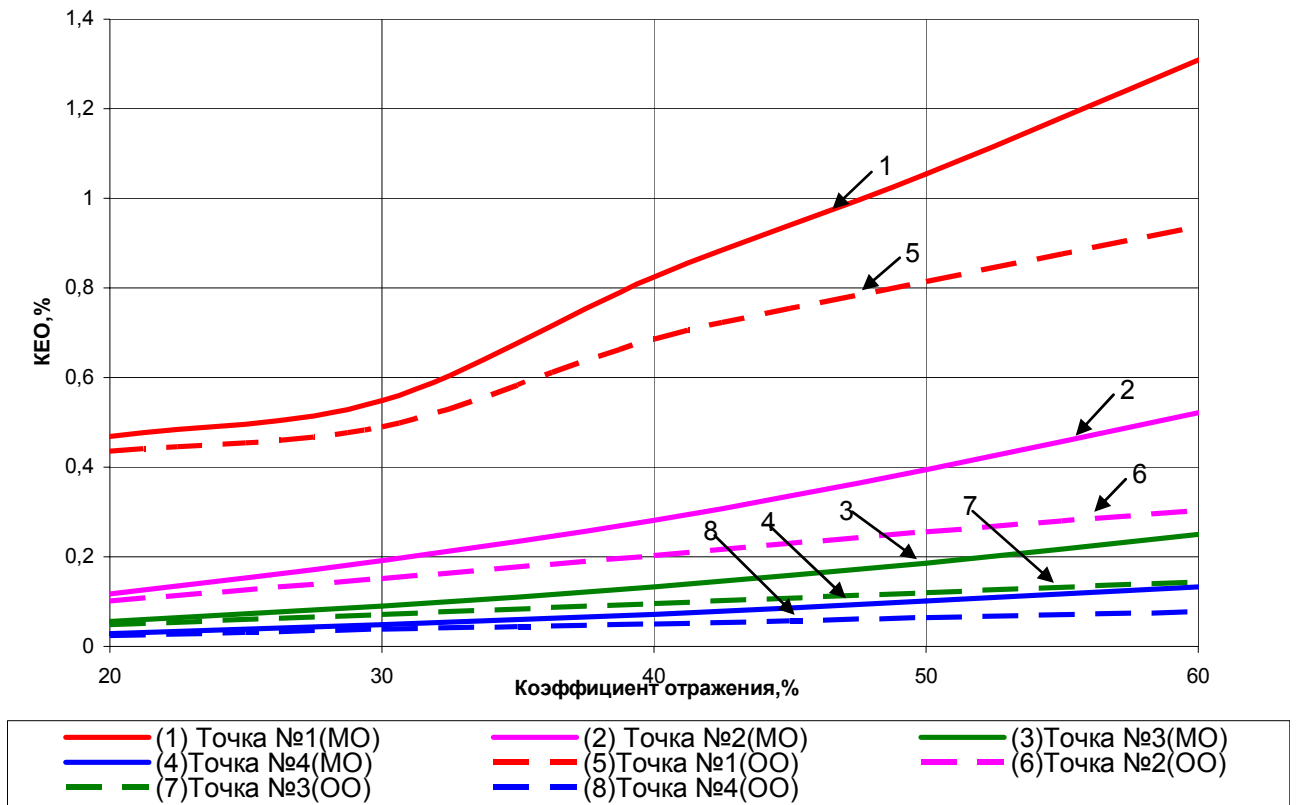
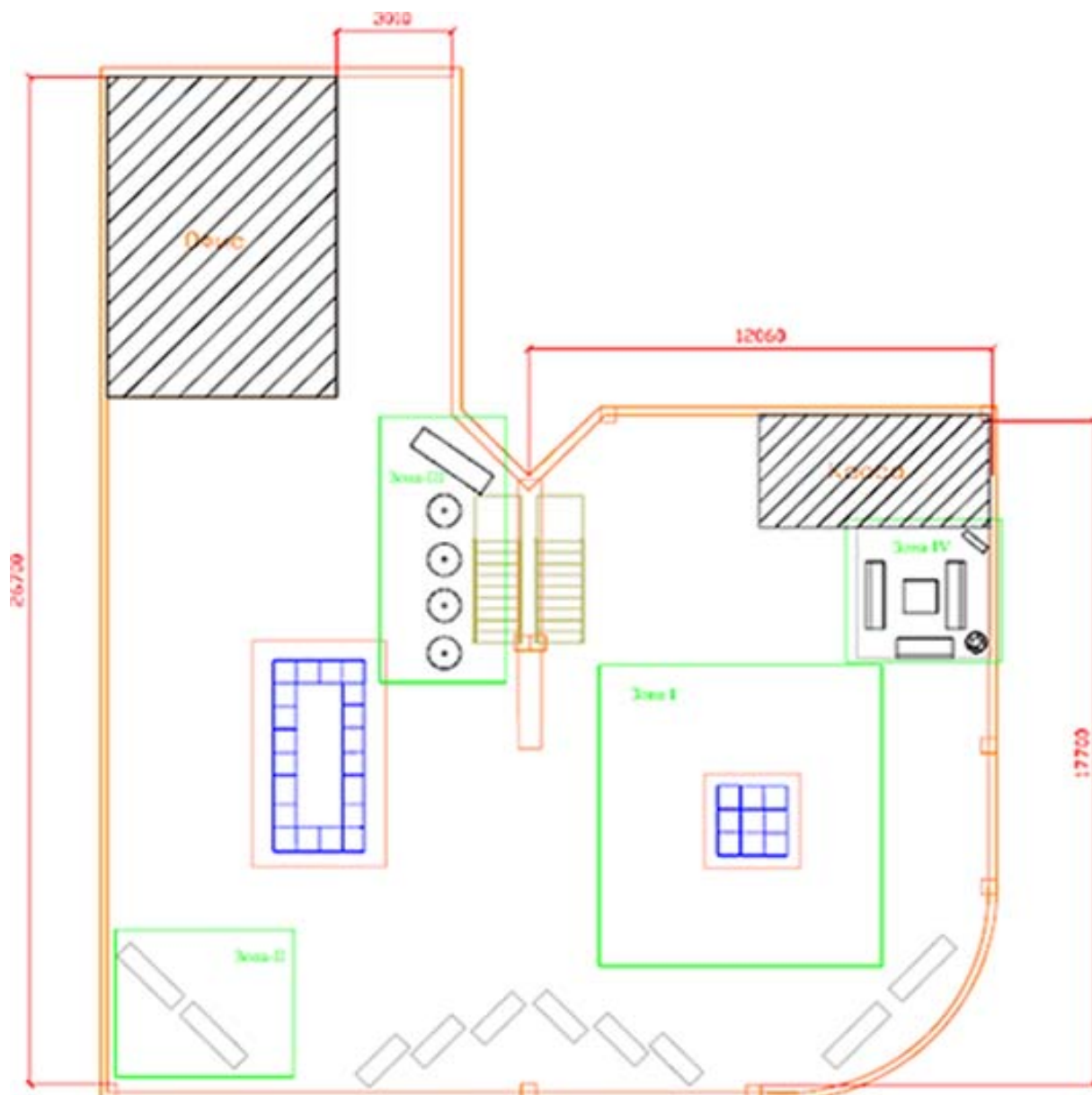


Рис. 2.21. Распределение КЕО в помещении на уровне седьмого этажа, при изменении расстояния до противостоящего здания при различных коэффициентах отражения



*Рис. 3.1. План освещаемого помещения с обозначением зелёным цветом рабочих зон.
Высота потолка 4.5м.*

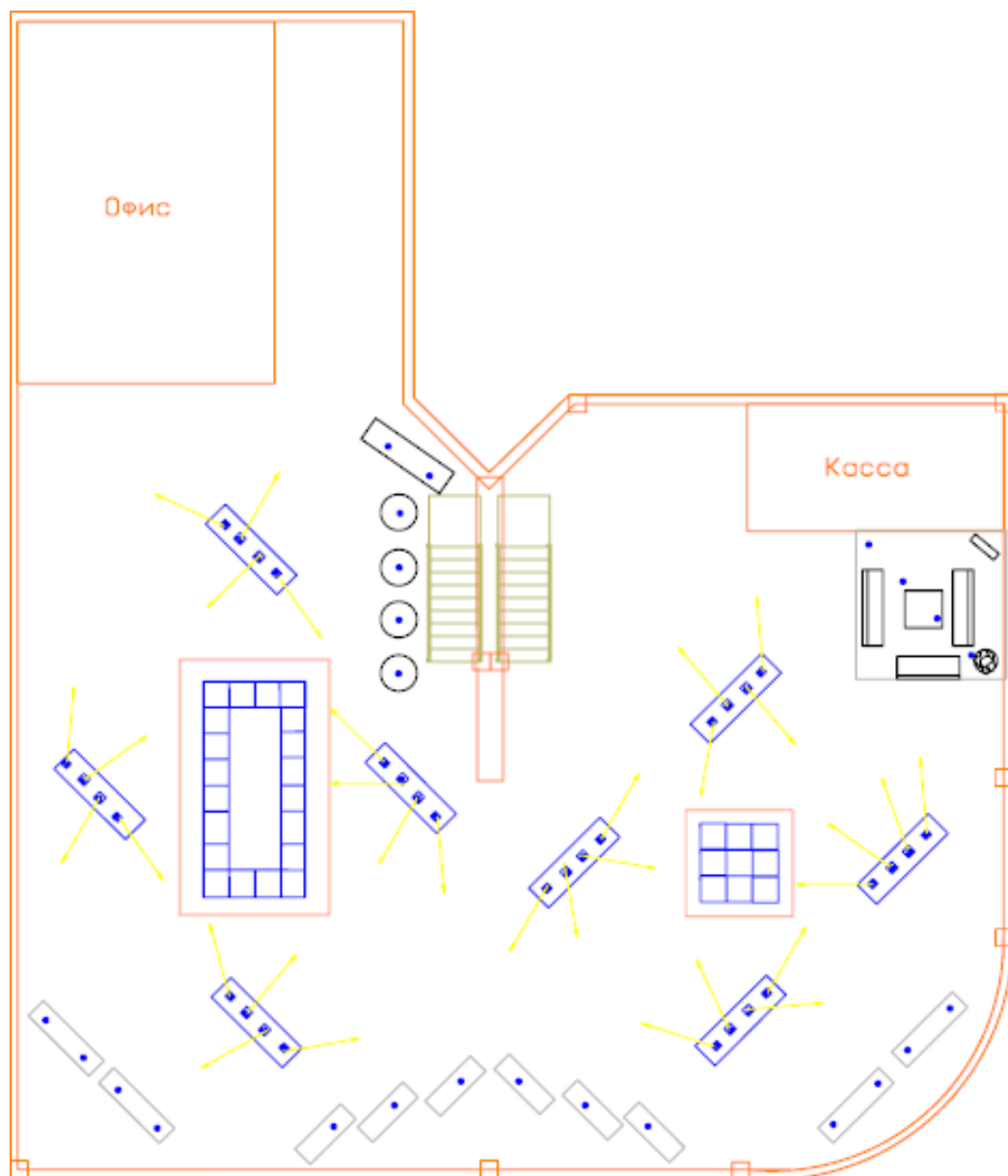


Рис.3.2. Размещение светового оборудования на 3D модели выставочного зала, вид сверху

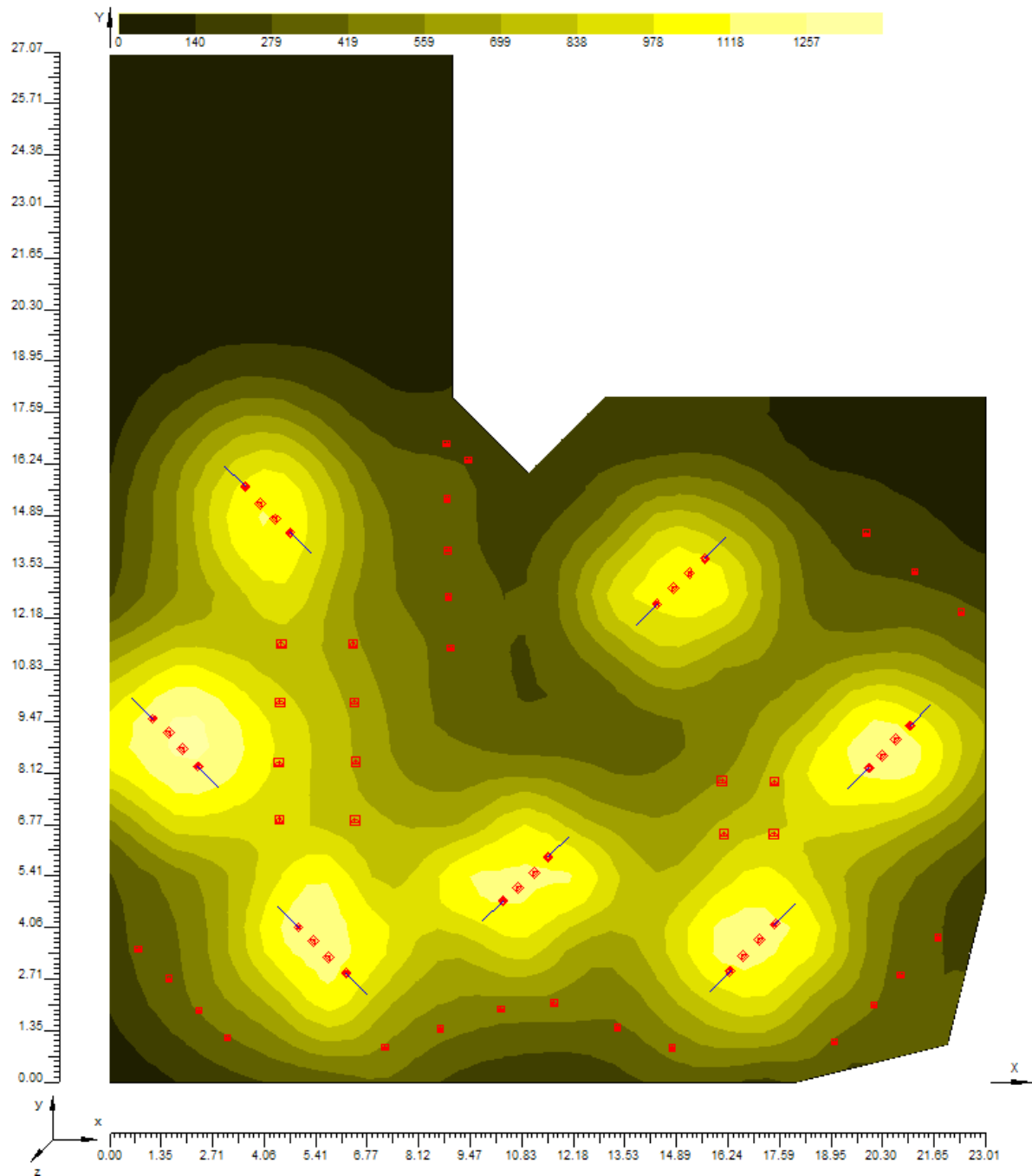


Рис.3.3. распределение освещенности в выставочном зале автосалона на условной рабочей поверхности в псевдоцветах



Рис.3.4. Итоговое фотореалистическое изображение проектируемой ОУ



Рис.3.5. 3D модель многоквартирного жилого здания

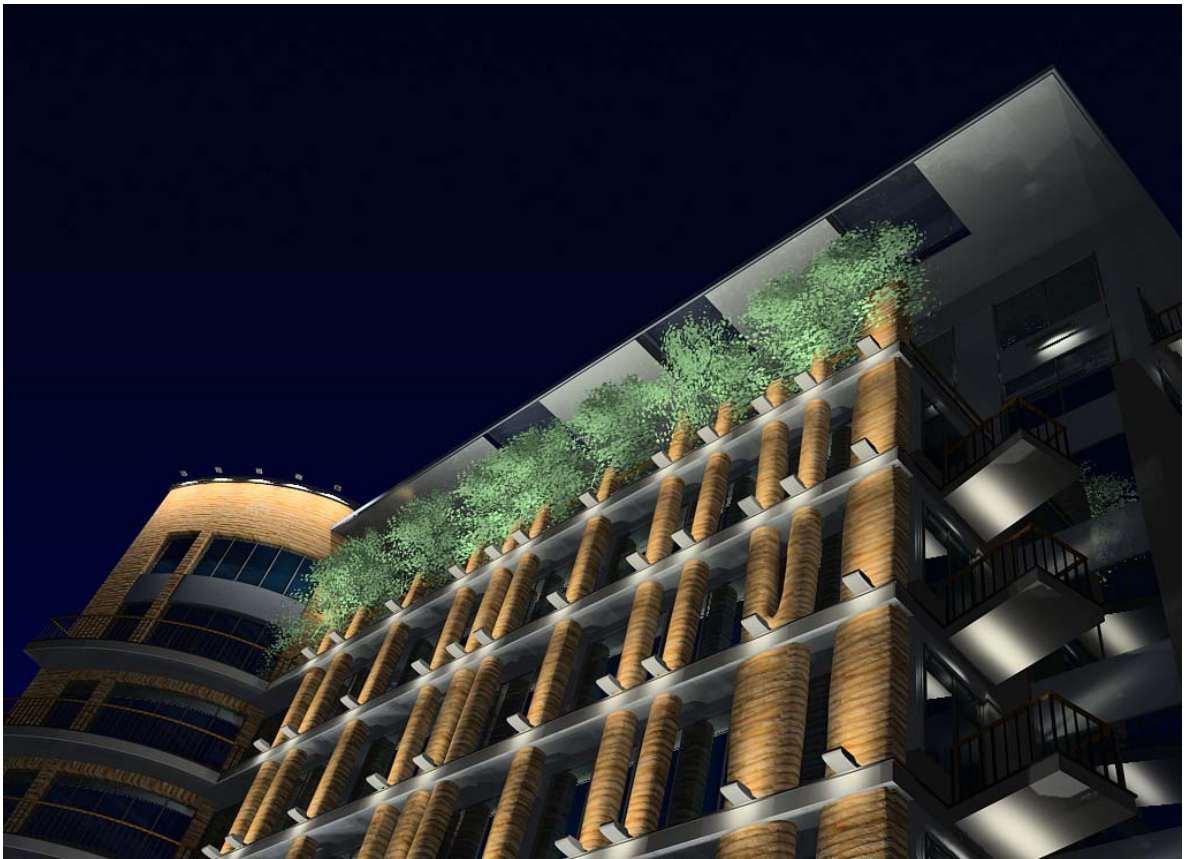


Рис.3.6. Распределение яркости на фасаде здания



Рис.3.7. Фотореалистическое изображение ОУ, вписанное в реальное окружение



Рис.3.8. Исходная фотография освещаемого объекта



Рис.3.9. Выделение отступающих от фасада здания архитектурных элементов для замены их на 3D аналоги



Рис.3.10. Итоговая визуализация работы ОУ на псевдо-3D модели здания

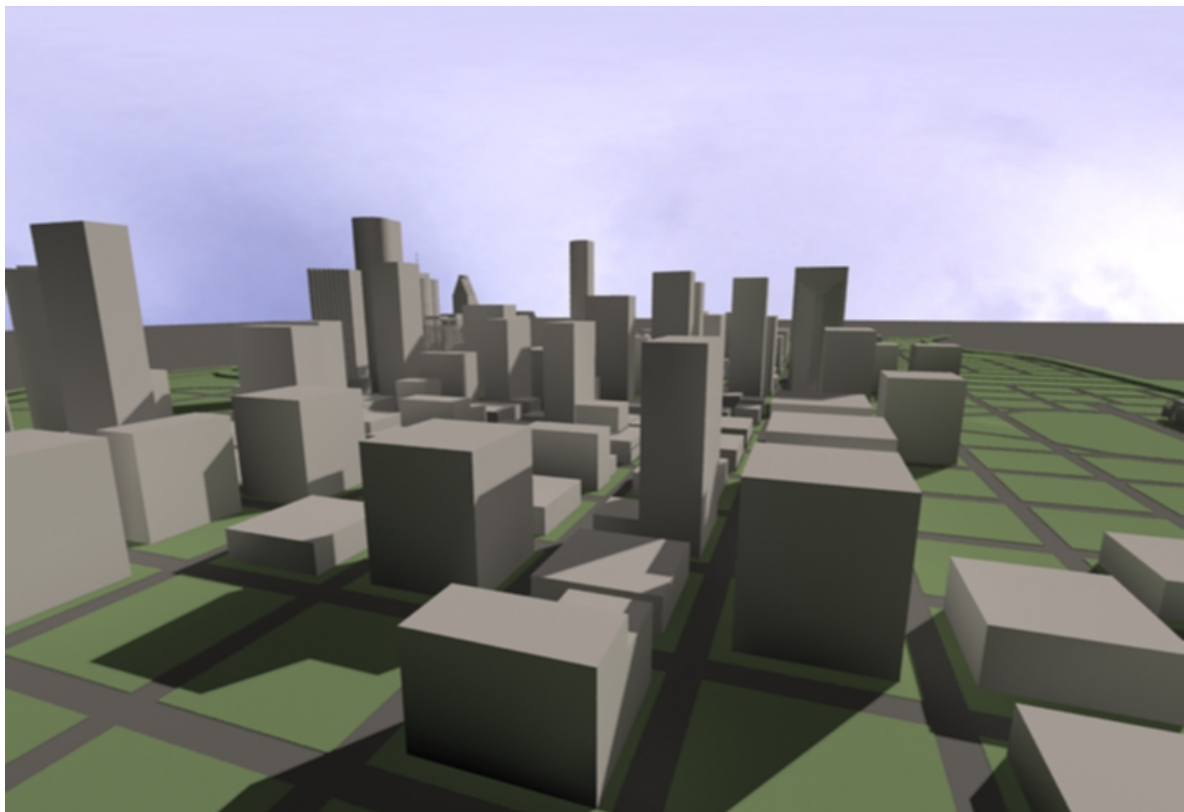


Рис. 3.11. Модель городской застройки, выполненная методом экструдирувания с обозначением расчетного здания

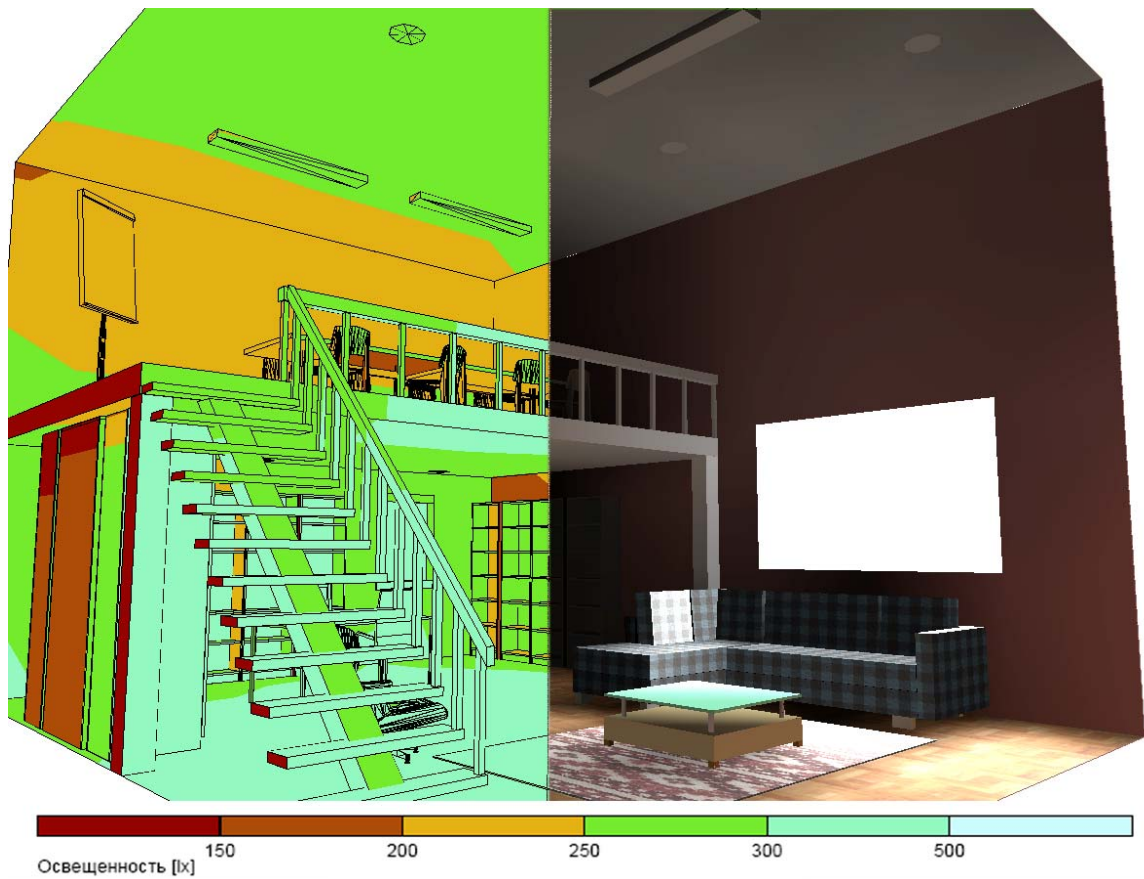


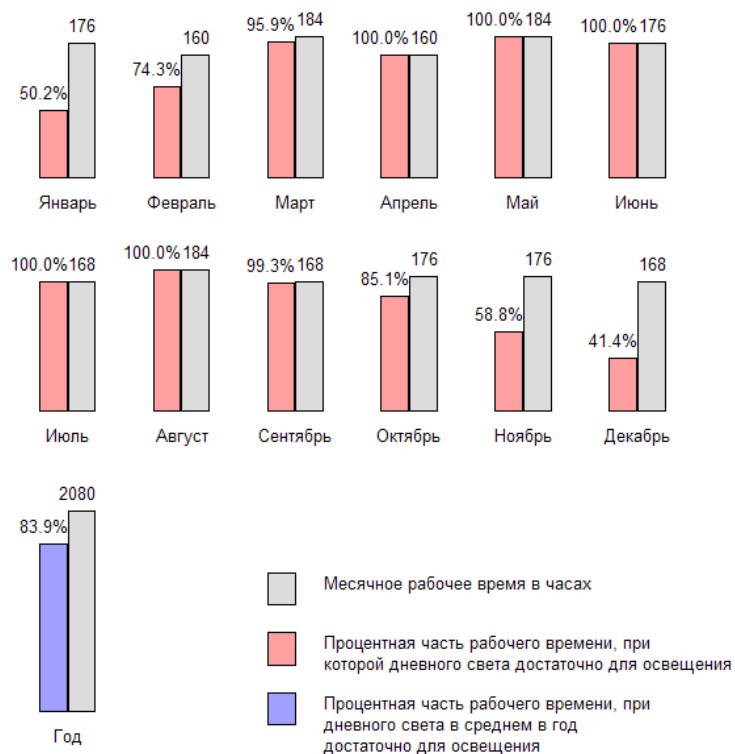
Рис. 3.12. Распределение яркости и освещенности в помещении при моделировании естественного освещения



Рис. 3.13. Распределение освещенности в помещении при моделировании совмещенного освещения (включены все световые приборы)



Рис. 3.14. Распределение освещенности в помещении при моделировании совмещенного освещения (оптимальное включение световых приборов)



Место: Basel
 Долгота (градусы): 7.6
 Широта (градусы): 47.5
 рабочее время: 18:00 - 17:00
 1. Время перерывов: 12:00 - 13:00

выбранная минимальная освещенность: 500 Lux
 Коэффициент естественной освещенности: 5.00 %
 необходимая наружная освещенность: 10000 Lux

Рис. 3.15. Таблица оценки рентабельности использования системы искусственного освещения по сравнению с естественным освещением в течение одного года

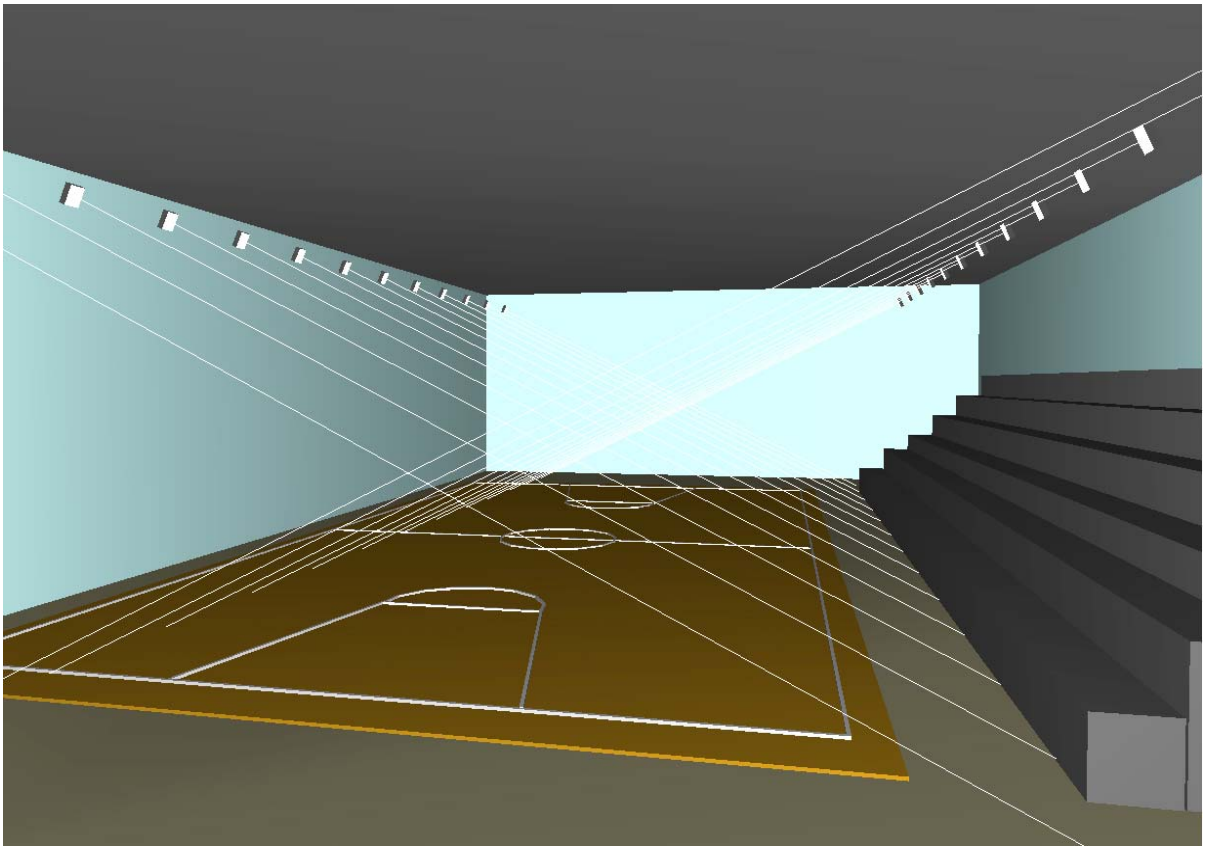


Рис. 3.16. Расчетная модель универсального игрового зала



*Рис. 3.17. Фотореалистическое изображение универсального игрового зала
(детальное моделирование)*

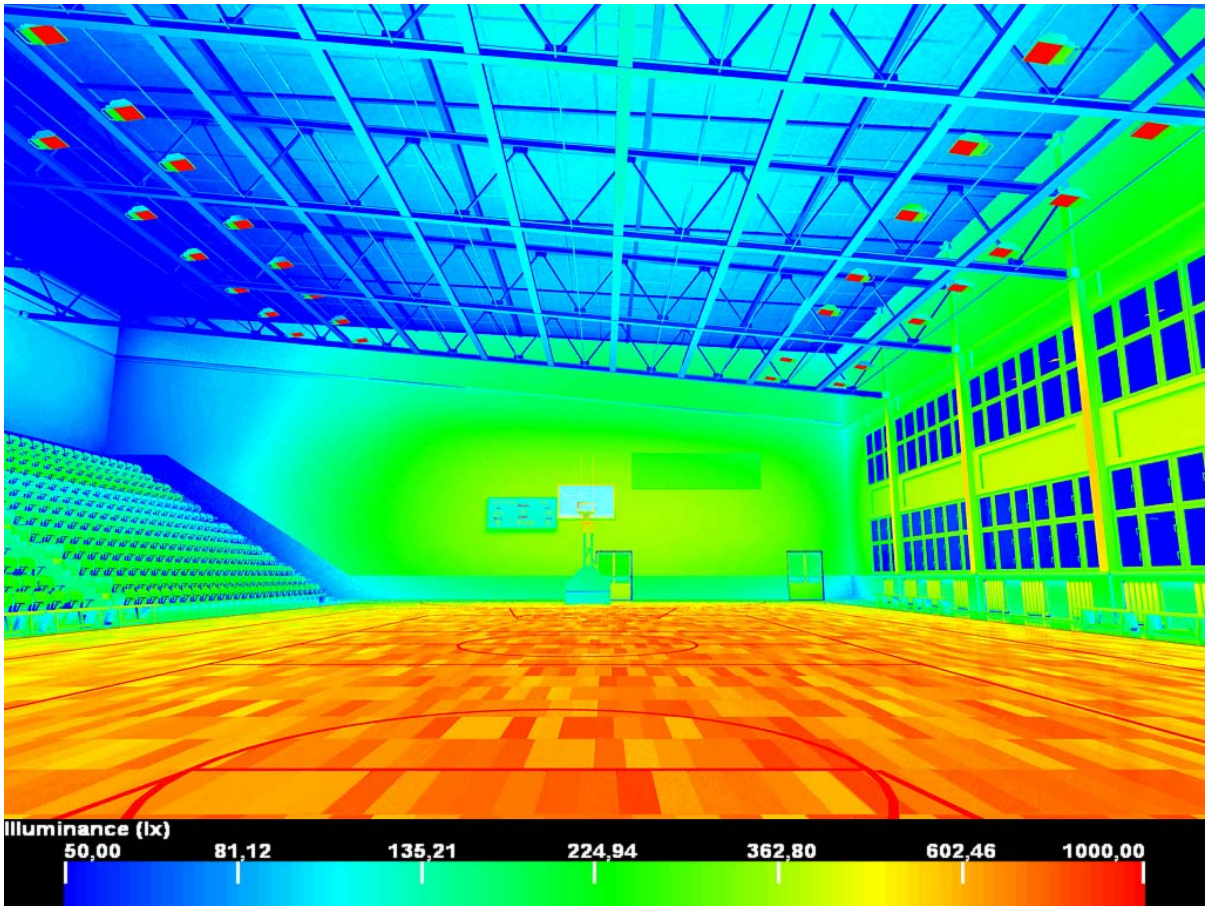


Рис. 3.18. Изображение универсального игрового зала глазами игрока в псевдоцветах

Таблица 1. Основные характеристики светотехнических программ

	Dialux 4.2	Lightscape 3.2	3DViz 2006	Relux 2.4 / 2005	WinElso Свет 5	LITESTAR v.6.00	Light - In - Night 2.71
<i>Адрес</i>	www.dialux.de	www.lightscape.com	http://usa.autodesk.com	www.relux.biz	www.cad.ru	www.oxytech.it	www.svetosrv.ru
<i>Распространение</i>	Бесплатно	платно	платно	платно	платно	Бесплатно	Бесплатно
<i>Создания собственной базы светильников</i>	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Да
<i>Возможность выбора нескольких видов проектов</i>	Да	Нет	Нет	Да	Нет	Да	Нет
<i>Рендлинг</i>	Да	Да	Да	Нет / Да*	Нет	Да	Нет
<i>Сложность в эксплуатации</i>	Легко	Трудно	Трудно	Средне	Легко	Легко	Легко
<i>Разработка рабочей документации</i>	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	Нет
<i>Разнообразное представление расчетных значений (освещенность и яркость в точке, изолюксы, градации серого)</i>	Да	Да	Да	Да	Нет	Да	Да
<i>Моделирование естественного света</i>	Да	Да	Да	Нет / Да	Нет	Нет	Нет
<i>Поддержка форматов IES, LDT</i>	IES, LDT	IES	IES	IES, LDT	Нет	Нет	Нет
<i>Поддержка форматов 3ds, dxf</i>	Dxf	3ds, dxf	3ds, dxf	Нет / Да**	dxf	dxf	Нет
<i>Возможности работы с материалами и текстурами и возможностью создания собственных</i>	Средние	Высокие	Высокие	Сред. / Высокие **	Низкие	Средние	Низкие
<i>Создание анимационного видео</i>	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
<i>Установки расчетных параметров</i>	Ограничены	Да	Да	Ограничены	Нет	Ограничены	Нет
<i>Уровень реализации 3D редактора</i>	Средний	Средний	Высокий	Сред. / Высокий	Высокий	Средний	Низкий
<i>Использование при выборе оборудования и расчете данных из нормативных документов (ГОСТ, СнИП, МГСН, DIN)</i>	DIN, EN 12464	Нет	Нет	DIN, EN 12464	ГОСТ, СнИП, МГСН	DIN, EN 12464	МГСН, СнИП

*При использовании Plug-in ReluxVision2005

** При использовании Plug-in ReluxCAD 2005

Таблица 3. Значения коэффициентов отражения поверхностей, используемых в модели

	Здания	Асфальтовое дорожное покрытие	Земля	помещение		
				потолок	стены	пол
Коэффициенты отражения	0,41	0,4	0,2	0,7	0,5	0,3