



СвТ

КАФЕДРА СВЕТОТЕХНИКИ

В.П. Буда́к, Д.Н. Мака́ров

Компьютерная графика с приложением в светодизайн



УЧЕБНИК

1-е издание

**В.П. БУДАК
Д.Н. МАКАРОВ**

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА С ПРИЛОЖЕНИЕМ В СВЕТОДИЗАЙН

Учебник
для высших учебных заведений

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи» в качестве учебника для обучающихся по образовательным программам высшего образования уровня бакалавриат и магистратура по направлению подготовки «Электроника и нанoeлектроника»

Москва
Редакция журнала «Светотехника»
2022

ББК 32.972.131.2я73-1+31.294я73-1

УДК 004.92:628.9(075.8)

Б90

Научный руководитель проекта:

Г. В. Боос, заведующий кафедрой светотехники НИУ «МЭИ»

Рецензенты:

Д.С. Ефременко, д.т.н., научный сотрудник Института дистанционного зондирования (IMF), Германского аэрокосмического центра (DLR), доцент Мюнхенского технического университета М.Ю.

М.Ю. Катаев, д.т.н., профессор кафедры АСУ Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Будак Владимир Павлович, Макаров Денис Николаевич

Б90

Компьютерная графика с приложением в светодизайн: Учебник для высших учебных заведений / В.П. Будак, Д.Н. Макаров. – Москва, 2022. – 264 с.

ISBN 978-5-6043163-6-8

Книга полностью соответствует программе дисциплины «Компьютерная графика», более 20 лет читаемой авторами студентам, обучающимся по образовательным программам высшего образования уровня бакалавриат по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 11.00.00 «Электроника, радиотехника и системы связи», специализирующихся в области светотехники.

Книга состоит из трех частей. В первой части (лекции № 1–15) излагается теория создания синтетического изображения проектируемой осветительной установки (ОУ) на экране монитора компьютера. Вторая часть (лекции № 16–24 – мастер-классы) посвящена практическим занятиям по созданию моделей основных типов ОУ. Каждый проект мастер-классов сопровождается геометрической моделью освещаемой сцены, которую можно скачать с сайта, что позволяет студентам сосредоточиться только на вопросах освещения, почувствовать, что такое правильный свет. Третья часть учебника рассматривает темы курсового проектирования. Предлагаются темы проектов, даются рекомендации по созданию геометрии сцены, выбору и расположению светильников, анализу результатов освещения.

Книга предназначена для студентов, магистров и аспирантов, обучающихся по специальности «Светотехника» и «Светодизайн».

ББК 32.972.131.2я73-1+31.294я73-1

УДК 004.92:628.9(075.8)

ISBN 978-5-6043163-6-8

© В.П. Будак, Д.Н. Макаров

© ООО «Редакция журнала
«Светотехника», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	7
Лекция № 1: СВЕТОВОЕ ПОЛЕ.....	9
Изображение.....	9
Фотометрия.....	12
Световое поле.....	18
Задачи к лекции № 1.....	23
Лекция № 2: ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.....	25
Статистико-волновое содержание фотометрии.....	25
Оптическая система.....	28
Ограничение пучков в оптической системе.....	31
Задачи к лекции № 2.....	34
Лекция № 3: СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....	36
Оптическое изображение.....	36
Линейные системы.....	38
Пространственный спектр изображения.....	39
Задачи к лекции № 3.....	43
Лекция № 4: ЛОГИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА КОМПЬЮТЕРА.....	44
Кодирование информации.....	44
Хранение информации и выполнение программ.....	47
Видеосистема компьютера.....	49
Координаты пикселя в графическом режиме.....	54
Задачи к лекции № 4.....	56
Лекция № 5: РАСТРОВАЯ И ВЕКТОРНАЯ ГРАФИКА.....	58
Полутонные изображения.....	58
Растровое изображение.....	61
Векторное изображение.....	64
Преобразование цифровых изображений.....	64
Моделирование трехмерных объектов.....	65
Задачи к лекции № 5.....	67
Лекция № 6: ГЛОБАЛЬНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ.....	69
Реалистическое изображение.....	69
Отражение/пропускание света поверхностью.....	71
Уравнение глобального освещения.....	73
Интегральные уравнения.....	76
Трассировка лучей.....	78
Метод излучательности (<i>Radiosity</i>).....	79
Задачи к лекции № 6.....	80
Лекция № 7: МЕТОД ИЗЛУЧАТЕЛЬНОСТИ (РАДИОСИТИ).....	81
Метод конечных элементов.....	81
Итерационные методы решения задачи излучательности.....	84
Адаптивные сети.....	85
Задачи к лекции № 7.....	87

Лекция № 8: МЕТОД ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ.....	88
Решение УГО методом трассировки лучей	88
Построения траектории луча в обратном ходе	90
Преломление и отражение луча на поверхности раздела.....	94
Задачи к лекции № 8.....	96
Лекция № 9: ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗМ ПРОСТРАНСТВА	97
Проекция	97
Аффинные преобразования.....	99
Произведение преобразований	101
Аналитическое описание проекций	102
Задачи к лекции № 9.....	104
Лекция № 10: КРИВЫЕ И ПОВЕРХНОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕ	105
Моделирование поверхности на компьютере	105
Слайн функции одной переменной.....	106
Слайн-овые кривые.....	110
Слайн-овые поверхности	113
Поверхности вытягивания и вращения.....	114
Задачи к лекции № 10.....	115
Лекция № 11: АЛГОРИТМЫ ЗАТЕНЕНИЯ И ЗАКРАШИВАНИЯ.....	117
Затенения	117
Алгоритм плавающего горизонта (<i>Hi-Lo</i>)	118
Отбрасывание нелицевых граней.....	119
Сортировка по глубине	120
Закрашивание (тонирование).....	122
Сглаженное закрашивание.....	126
Текстуры.....	127
Задачи к лекции № 11.....	128
Лекция № 12: СТОХАСТИЧЕСКАЯ ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ.....	130
Рекурсивная трассировка.....	130
Метод Монте-Карло.....	131
Понятие вероятности.....	132
Вероятностное пространство	134
Моменты случайной величины.....	135
Закон больших чисел	137
Случайные функции.....	138
Корреляционная теория	140
Стационарность и однородность	141
Эргодичность.....	142
Задачи к лекции № 12.....	142
Лекция № 13: МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО.....	145
Математические основы метода	145
Расчет интегралов методом Монте-Карло	147
Генераторы случайных чисел.....	149
Моделирование непрерывных случайных величин	151
Однородный марковский процесс блужданий лучей	153
Задачи к лекции № 13.....	157

Лекция № 14: АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ	158
Фотометрическая сфера.....	158
Задача В.В. Соболева	160
Расчет форм-фактора.....	163
Форм-фактор грани на точку.....	165
Алгебра форм-факторов.....	166
Метод полукуба.....	167
Задачи к лекции № 14.....	169
Лекция № 15: МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ НА КОМПЬЮТЕРЕ	171
Светотехнический проект	171
Проектирование или моделирование ОУ на компьютере.....	174
Основные методы моделирования ОУ на компьютере и программы теории ГО	175
Создание и/или адаптация под светотехнический расчет 3М моделей освещаемых объектов	179
Задачи к лекции № 15.....	180
Лекция № 16: ОСНОВЫ РАБОТЫ С ПКГ НА ПРИМЕРЕ <i>DIALUX EVO</i>	182
Моделирование 3М помещения	182
Мебель, объекты, окна и двери	183
Выбор и установка светильников.....	185
Анализ освещения	186
Задачи к лекции № 16.....	189
Лекция № 17: 3М СВЕТОТЕХНИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ	190
Описание 3М лаборатории	190
Требования к самостоятельному заданию	191
Задачи к лекции № 17.....	191
Лекция № 18: ОСВЕЩЕНИЕ УЧЕБНОГО КЛАССА.....	193
Освещение школьных учреждений	193
Реализация освещения в учебных аудиториях	193
Требования к светильникам и нормируемые показатели освещения	196
Искусственное освещение	198
Естественное освещение	198
Совмещенное освещение	199
Задачи к лекции № 18.....	199
Лекция № 19: СВЕТ В МУЗЕЕ.....	200
Музейное освещение	200
Реализация освещения в музеях	201
Проектирование освещения в музее	209
Требования к самостоятельному заданию	210
Задачи к лекции № 19.....	212
Лекция № 20: ОФИСНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ	213
Офисное освещение	213
Функциональные зоны офиса	216
Нормирование офисного освещения	221
Требования к заданию по проектированию освещения офиса	221
Задачи к лекции № 20.....	224

Лекция № 21: ОСВЕЩЕНИЕ МАГАЗИНА ОДЕЖДЫ.....	225
Торговое освещение.....	225
Требования к заданию по проектированию освещения магазина.....	230
Задачи к лекции № 21.....	231
Лекция № 22: ОСВЕЩЕНИЕ АВТОСАЛОНА	232
Экспозиционное освещение	232
Требования к заданию по проектированию освещения автосалона	240
Задачи к лекции № 22.....	243
Лекция № 23: ДОРОЖНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ.....	244
Основные требования	244
Требования к заданию по проектированию дорожного освещения	249
Светотехнические расчеты и анализ	251
Задание на самостоятельную работу	252
Задачи к лекции № 23.....	252
Лекция № 24: АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ.....	253
Архитектурное освещение.....	253
Заливающее освещение	255
Локальное освещение	256
Требования к самостоятельному заданию по проектированию архитектурного освещения	258
Задачи к лекции № 24.....	260
Курсовая работа: МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММАХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ	261
Задание.....	261
Требования к выполнению курсовой работы	262
Критерии оценки.....	262
Требования к слайдам презентации.....	262
Доклад.....	263

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из самых ярких конца XX – начала XXI веков явлений в науке и технике является компьютерная графика (КГ), завершившая долгий процесс изучения изображений от наскальных рисунков до объектов современной виртуальной реальности. Этому способствовал мощный прогресс в физике процессов формирования и восприятия изображения, математических методах представления графической информации, мощности компьютеров и алгоритмов обработки изображений. Развитие КГ оказало серьезное влияние на многие направления прикладных наук и технологий, в том числе, по сути, изменило облик светотехники. Проектирование осветительных установок на сегодня просто немыслимо и невозможно без КГ. Но это не только облегчило труд проектировщика, но и изменило его сущность: проектировщик смог увидеть распределение света в проектируемой осветительной установке (ОУ) по ее синтетическому изображению на экране компьютера, что сменило парадигму проектирования от вычисления светотехнических характеристик в некоторых точках рабочей поверхности к мышлению световыми образами ОУ.

Традиционно понятие компьютерной графики подразумевает изучение различных компьютерных программ и методов их применения для моделирования трехмерных объектов, чаще всего, с последующей анимацией. КГ как область науки подразумевает теорию и соответствующие ей алгоритмы создания синтетического изображения трехмерных сцен на экране дисплея компьютера, что логически приводит к задачам визуализации пространственно-углового распределения яркости в этих сценах. Нетрудно видеть, что эти задачи являются по своей сути фотометрическими, и в этом случае компьютерная графика является светотехническим проектом, выполненным на компьютере. Данный учебник описывает основы проектирования систем освещения на базе компьютерной графики.

Весь курс дисциплины органично делится на четыре составные части: лекции (в настоящем учебнике № 1-15), где излагается теория и алгоритмы создания на экране компьютера реалистичного синтетического изображения трехмерных (3М) сцен освещения; лабораторные работы по практическому освоению программ КГ – они в данный учебник не вошли, изданы отдельным пособием в издательстве МЭИ; серия мастер-классов (они являются естественным продолжением лекций, поэтому для них сохранена общая нумерация как Лекции № 16-24) по проектированию некоторых специальных типов ОУ и курсового проекта, в рамках которого студенты создают собственную модель ОУ на компьютере. Тем самым достигается сущность инженерной подготовки в сочетании фундаментальной подготовки с умением практически решать реальные задачи проектирования ОУ.

Данный учебник является результатом более 20-летнего опыта преподавания дисциплины на кафедре светотехники НИУ «МЭИ». Именно опыт определил включение не-

которых разделов математики и оптики, без знания которых полноценное освоение КГ невозможно, а они студентами усвоены недостаточно для изучения данной дисциплины. Дисциплина в «НИУ «МЭИ» проводится одновременно с «Основами светотехники», на которую в значительной степени опирается, однако существенно дополняя теорию светового поля как пространственно-угловое распределение яркости.

Многие материалы, особенно задачи, заимствовались из различных учебников, монографий и статей. Мы бесконечно благодарны всем их авторам и одновременно извиняемся перед ними, поскольку, к сожалению, не представляется возможным перечислить их всех, да некоторых уже и трудно вспомнить, хотя они оказали существенное влияние на нас, когда мы сами осваивали математику, оптику, КГ. Нам представляется наиболее важным, что «рукописи не горят», а их идеи вдохновят новых специалистов.

На сегодня КГ является в теории развитым разделом математической физики, однако мы считаем, что в учебнике давать все материалы со строгими доказательствами в инженерном образовании нецелесообразно – может отбить всякую охоту к КГ. Нам виделось, что важнейшей задачей данного учебника является раскрыть основные методы и алгоритмы КГ, показать их возможности при решении конкретных задач при проектировании ОУ. Поэтому главный принцип при изложении был оставаться на физическом, качественном уровне строгости.

К материалам каждого мастер-класса (лекции № 16-24) необходимы компьютерные модели осветительных установок, которые выложены для свободного скачивания на сайте журнала «Светотехника / *Light & Engineering*»: *l-e-journal.com*. Для скачивания нужно только зарегистрироваться, сообщив свои ФИО, место работы (учебы) и код с Вашего экземпляра учебника. Если в лекциях излагается теория и предлагаются задачи для ее практического применения, то в основе мастер-классов лежит совместное с преподавателем выполнение проектов конкретных осветительных установок и последующая доработка их в соответствии с индивидуальными представлениями каждого студента. В этом и заключена последовательность материала: на первом этапе изучается теория КГ на лекциях, а на лабораторных работах студенты приобретают навыки работы в конкретных программах КГ, в рамках мастер-классов происходит обучения проектированию ОУ на базе программ КГ, а завершает образование самостоятельный проект ОУ.

Конечно, освоение КГ на этом не должно заканчиваться. Дисциплина специально проводится в первом семестре третьего курса в самом начале обучения специализации светотехники, чтобы студенты максимально использовали программы и методы КГ при изучении всех дальнейших предметов. Как утверждает древняя мудрость, что и один человек может привести лошадь на водопой, но и 10 человек не смогут заставить ее пить: только целенаправленное и осознанное применение программ и методов КГ для решения задач светотехники поможет в полной мере овладеть дисциплиной. Задача курса будет выполнена, если КГ станет реальным инструментом работы каждого студента во время обучения по специальности светотехника, а по окончании – инженерным средством при создании реальных проектов ОУ.