

Г.М.КНОРРИНГ

**СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
В УСТАНОВКАХ
ИСКУССТВЕННОГО
ОСВЕЩЕНИЯ**



6П2.19
К 53
УДК 628.931

Кнорринг Г. М.

К53 Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Л., «Энергия», 1973.

200 с. с ил.

Книга посвящена вопросам теории и методики светотехнических расчетов, выполняемых при проектировании установок искусственного освещения помещений и открытых пространств.

Особое внимание уделено составлению расчетно-вспомогательных таблиц и графиков.

Из числа новых качественных характеристик освещения рассматриваются те, расчет которых непосредственно связан с расчетом освещенности, т. е. коэффициент пульсаций и цилиндрическая освещенность.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных организаций и заводских энергобюро, а также для студентов светотехнических специализаций вузов и техникумов.

К $\frac{3311-320}{051(01)-73}$ 145-73

6П2.19

Рецензент *Волоцкой Н. В.*

© Издательство «Энергия», 1973

ГЛЕБ МИХАЙЛОВИЧ КНОРРИНГ
СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В УСТАНОВКАХ
ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Редакторы: **Ю. А. Бычков, В. А. Кипрушев**
Художественный редактор **Г. А. Гудков**
Технический редактор **О. С. Нитникова**
Корректор **А. Ф. Кузнецова**

Сдано в набор 9/IV 1973 г. Подписано к печати 16/VIII 1973 г.
М-18406. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 2 Печ. л. 12,5.
Уч.-изд. л. 14,9. Тираж 20000 экз. Заказ № 168. Цена 89 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия». 192041, Ленинград, Марсово поле,

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

Несколько упрощая вопрос, можно сказать, что книга, посвященная расчету искусственного освещения, могла бы быть написана на одном из трех уровней, условно говоря, рассчитанных, соответственно, на техников, на инженеров и на ученых-исследователей.

На первом уровне достаточно было бы ограничиться конкретными указаниями по технике расчета, на втором — необходимо подробно обосновать приводимые рекомендации, привести выводы основных формул и показать не только, как пользоваться расчетно-вспомогательными материалами, но и как их составлять, на третьем — рассмотреть, по возможности, все полезные предложения в области светотехнических расчетов, содержащиеся в мировой литературе, с использованием, при необходимости, аппарата специальных разделов высшей математики.

Содержание данной книги определяется тем, что она написана на втором уровне, все же существенно более высоком, чем тот, на котором автор излагал вопросы расчета в своих предшествующих работах.

Книга отражает, преимущественно, материалы и предложения по расчету освещения, накопленные советскими организациями и с учетом принятого в СССР для большинства случаев нормирования наименьшей освещенности.

Данная книга выходит в свет вскоре после внедрения в нашей стране новых светотехнических норм, в связи с чем особое значение приобретает сейчас расчет качественных характеристик освещения, предусмотренных этими нормами. Автор, однако, нашел возможным рассмотреть в книге расчет только цилиндрической освещенности и коэффициента пульсации как потому, что расчет этих характеристик тесно примыкает к основной теме книги — расчету освещенности, так и потому, что задача расчета именно этих характеристик уже решена достаточно удачно.

Того и другого нельзя сказать в отношении показателей дискомфорта, хотя результативные таблицы для оценки этого показателя достаточно удобны, и ослепленности, а кроме того методы расчета последнего приводят к результатам, вызывающим у нас сомнения.

Книга не содержит неустойчивых во времени справочных материалов, необходимых для повседневных расчетов (за исключением

приводимых в качестве примера), но включает справочные данные, необходимые для составления таких материалов.

Автор не считает себя вправе скрыть от читателей и свой основной замысел: приближаясь к завершению своего творческого пути, он хотел бы возможно полнее передать свой личный сорокалетний опыт в области светотехнических расчетов новому поколению советских светотехников, которому он от всей души желает успехов в работе.

По техническим причинам к данной книге не приложен указатель литературы, в связи с чем автор считает необходимым перечислить хотя бы тех лиц, чьими трудами он в наибольшей степени пользовался в своей работе. Это, прежде всего, Р. А. Сапожников и Е. Н. Яковлев (учеником которых автор имеет честь себя считать), а также А. А. Гершун, Б. А. Гольдштейн, М. М. Гуроров, М. С. Дудионов, И. С. Дубинкин, М. М. Епанешников, В. В. Мешков и Е. С. Ратнер.

Из зарубежных авторов хотелось бы особо выделить Ейнхорна, Нейдхарта, Роха, Штека, Штольценберга и, конечно, обоих Джонсов.

Автор приносит благодарность Н. В. Волоцкому за тщательный просмотр рукописи.

Пожелания и замечания по книге просьба направлять по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

1-1. Задачи и принципы светотехнических расчетов

Под светотехническим расчетом, в широком смысле слова, можно понимать совокупность математических операций, связывающих параметры осветительной установки (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.

Весьма разнообразны также способы расчета. Прежде всего это определяется характером решаемых задач: осветительные приборы или устройства могут быть точечными, линейными или двухмерными; светораспределение их может быть круглосимметричным, иметь две, одну или ни одной плоскости симметрии; освещаемые поверхности могут быть горизонтальными, наклонными или вертикальными; интерес может представлять среднее, наибольшее или наименьшее значение светотехнических показателей и т. д.

Особенно разнообразны в деталях способы расчета архитектурного освещения, в значительной степени определяемые принятым способом выполнения освещения.

Вместе с тем нельзя не отметить, что для решения одной и той же конкретной задачи часто разными авторами предлагаются различные пути, в практике же апробируются и получают применение лишь некоторые предложения, выбор которых часто основан на случайности, а не на подлинной оптимальности.

Работы по усовершенствованию методики расчета освещения продолжаются во всем мире. Литература по этому вопросу поистине неисчерпаема. Однако многие предложения, даже представляющие научный интерес, не могут быть рекомендованы для практики либо потому, что достигаемая ими точность не окупает усложнения

вычислений, либо потому, что уже существуют и используются практически равноценные способы расчета. В этой связи отметим, что мы считаем оправданным и известный консерватизм в методике расчетов, так как пересматривать каждый раз весь комплекс расчетно-вспомогательных материалов и заставлять людей менять свои привычки далеко не всегда целесообразно.

Помимо формул, таблиц и графиков, так сказать, общего применения, для решения частных задач используется много специфических материалов, например графики для нахождения числа светильников определенного типа в конторских помещениях. В отношении таких материалов рассматриваются лишь некоторые примеры.

Ниже, в порядке «вынесения за скобки», рассматриваются некоторые наиболее общие вопросы методики расчета.

а. Светотехнические расчеты являются одними из наиболее массовых инженерных расчетов, что определяет особую эффективность внесения в них даже незначительных упрощений. В этом отношении у нас в стране сделано очень многое, хотя отнюдь не закрыта дорога и для дальнейшей рационализации. Говоря «упрощения», мы отнюдь не имеем в виду огрубления или примитивизации расчетов, но все же учитываем, что возможности разного рода упрощений благоприятствует относительно невысокая потребная и достижимая точность светотехнических расчетов вообще (далее § 1-2).

б. Нередко возникает вопрос о целесообразности использования для светотехнических расчетов электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Обычные светотехнические расчеты, включая и расчет архитектурного освещения, доведены до такой степени простоты, что даже при большом их числе использование ЭВМ едва ли целесообразно. Немеханизированные расчеты имеют и то преимущество, что выполняющее их лицо может уже на промежуточных этапах корректировать те или иные параметры установки. Эти суждения учитывают и тот факт, что ЭВМ, как правило, не находятся в непосредственном распоряжении рассчитывающего.

Напротив, для составления разного рода расчетно-вспомогательных материалов и для теоретических анализов, т. е. когда объем вычислений может быть очень большим, а точность требуется повышенная, мы, конечно, рекомендуем пользоваться ЭВМ. Применение их целесообразно и при выработке ответственных типовых решений, когда необходимо рассчитать ряд вариантов и сопоставить их технико-экономические показатели.

в. Обычно в светотехнических расчетах участвует большое число переменных. Достаточно сказать, что положение элементарной площадки по отношению к точечному источнику с любым светораспределением определяется, в общем случае, тремя линейными и одной угловой координатами, освещенность же, кроме того, зависит от типа осветительного прибора, светового потока лампы и ряда других факторов. Отсюда понятно стремление — выработку того или иного упрощенного способа расчета начать с анализа возможности уменьшения числа переменных или приближенного учета влияния некоторых из них.

г. Весьма важен выбор способов графического изображения функциональной зависимости, и в частности, шкал графиков.

Полярные графики очень наглядны, но затрудняют интерполирование, в силу чего чаще графики строятся в прямоугольных коор-

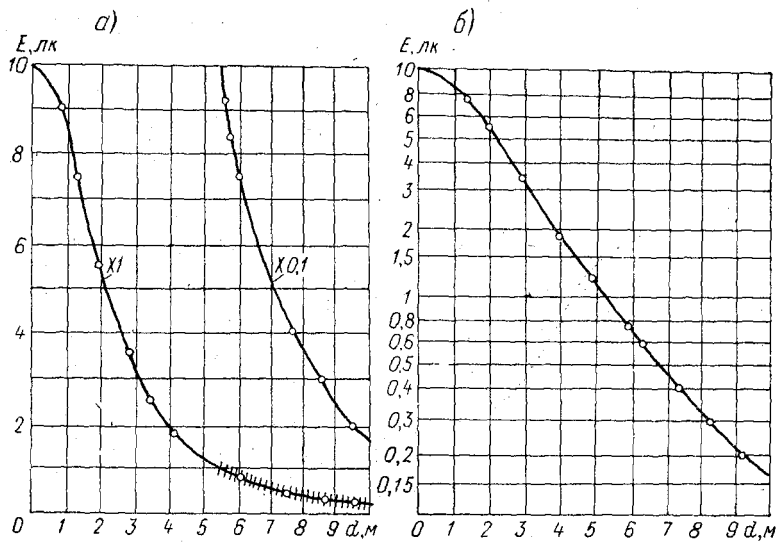


Рис. 1-1. Кривые $E = f_x(d)$, построенные различным образом

динатах. Если аргумент и функция (или одна из этих переменных) изменяются в широких пределах, то либо производится изменение масштаба по ходу кривой (рис. 1-1, а), либо выбираются логарифмические шкалы (рис. 1-1, б).

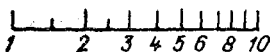
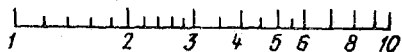
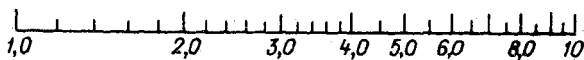
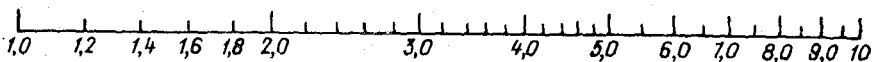


Рис. 1-2. Логарифмические шкалы (на одну декаду)

На рис. 1-1 сопоставлено применение обоих способов для графика, изображающего зависимость освещенности E от расстояния, а на рис. 1-2 дан пригодный для практического использования набор логарифмических шкал на одну декаду. Логарифмические шкалы не

имеют нуля, но их несомненное преимущество состоит в том, что они обеспечивают в пределах всего графика одинаковую относительную погрешность при отсчете по кривым.

д. Большое число графиков представляют собой кривые, соединяющие точки с равными значениями освещенности, которые мы будем называть общепринятым, хотя, формально, не вполне пра-

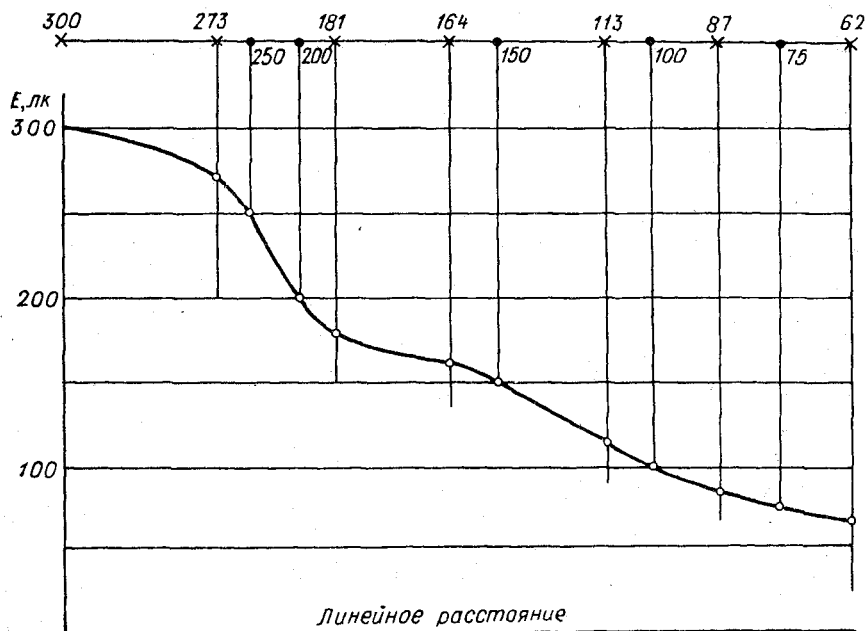


Рис. 1-3. Нахождение точек изолюксы помощью переноса их с графика; × — точки, в которых измерена или рассчитана освещенность, ● — точки изолюксы

вильным названием «изолюксы». Эти кривые могут быть построены путем измерений или вычислений, либо непосредственно, либо путем приема, который мы называем переносом точек.

На верхней горизонтальной рис. 1-3 крестиками отмечены точки, в которых рассчитаны или измерены значения освещенности, естественно не «круглые», тогда как изолюксы строятся для «круглых» значений. Чтобы не находить положение точек изолюксы на глаз, строится вспомогательная кривая, и ее абсциссы, соответствующие «круглым» значениям, переносятся на ось будущего графика.

1-2. О точности светотехнических расчетов

Если точно известны все исходные данные, то, в принципе, светотехнический расчет может быть выполнен с любой желаемой степенью точности, практически же все применяемые способы расчета в той или иной степени являются приближенными.

Так, точечный метод основан в большинстве случаев на том, что источник света конечного размера принимается за математическую точку или линию (далее § 1-3). В случаях, когда вводится понятие условной лампы с потоком 1000 лм, а данный тип светильника может использоваться с различными лампами, то пренебрегают изменением формы кривой силы света при разных лампах. Отраженный свет, при освещении помещений всегда играющий определенную роль, учитывается приближенно-известным коэффициентом.

Еще большие погрешности заложены в обычные формы метода коэффициента использования. Первичные потоки на поверхности чаще всего определяются по десятиградусным зонам, что дает приближенный результат. При учете многократных отражений принимается, что ограждающие поверхности помещения являются диффузными и что первичные потоки равномерно распределены по каждой из них. Весьма ориентировочно известен коэффициент перехода от средней освещенности к наименьшей.

Если, однако, говорить о возможных отклонениях фактически достигнутой освещенности (или других показателей) от заданной, то основную роль играют не погрешности расчета, а неизбежная неточность, с которой известны исходные данные. Световой поток лампы может, согласно стандартам, отличаться от номинального в пределах от 9 до 20%. Для светильников нормированы только значения их к. п. д., но до сих пор не предпринято никаких мер для нормализации допустимых отклонений силы света в данном направлении от каталожного значения. Фактические коэффициенты отражения ограждающих поверхностей в момент выполнения расчета, как правило, неизвестны. Коэффициент запаса, определяющий эксплуатационный уровень освещенности, хотя и дается в нормах, но зависит от столь многих особенностей конкретного помещения и условий эксплуатации, что является величиной, известной весьма приближенно. Напряжение у ламп в каждый данный момент времени и в среднем может отличаться от учтенного при расчете уровня.

Известны случаи, когда при безукоризненно выполненном расчете фактическая освещенность на много десятков процентов, а то и вдвое отличалась от заданной.

Очевидно, и на светотехнические расчеты можно распространить известное правило, что вычисления следует вести с той же точностью, с какой известны исходные данные.

Если, однако, идет речь о сопоставлении вариантов, то положение существенно изменится. Так, если сравнивается, например, экономичность применения зеркального и диффузного светильников, то все случайные отклонения исходных данных одинаково возможны для обоих светильников и позволительно утверждать что любое, даже незначительное, превосходство одного из них окажется в среднем наиболее вероятным.

Нечего и говорить, что повышенная точность необходима при разного рода теоретических анализах, без чего не могут быть выявлены интересные нас зависимости.

1-3. Излучатели и их характеристика

При светотехнических расчетах излучатели¹, кроме редких, специальных случаев, принимаются за математические точки, линии или поверхности. Возможность представления излучателя, всегда имеющего не менее двух измерений, в виде точки или линии определяется соотношением размеров самого излучателя и расстояния до

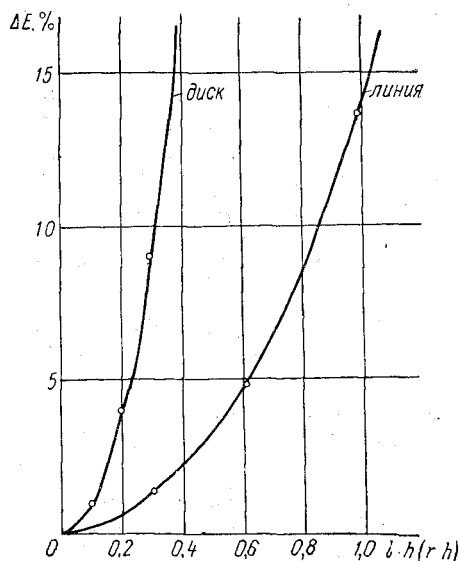


Рис. 1-4. Погрешность от замены реальных источников точками

точки, в которой определяется освещенность, а также потребной точностью расчета.

Величина относительной погрешности, получаемой при замене точкой диска или линии конечных размеров, иллюстрируется рис. 1-4 для положения точки по отношению к излучателю, показанного на рис. 1-5, и для случая, когда диск и линия излучают диффузно.

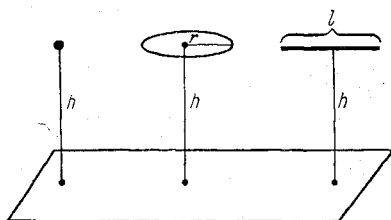


Рис. 1-5. Светящиеся точка, диск и линия

Погрешность меняется по величине, а иногда и по знаку, в зависимости от положения точки по отношению к проекции излучателя на плоскость, но, в общем, уменьшается с удалением точки от излучателя. Из кривых рис. 1-4 видно, что если допустить погрешность до 5%, то можно принимать за точечные излучатели диски, радиусом до 0,2 их высоты над освещаемой плоскостью и линии, длиной до 0,6 той же высоты. Иначе говоря, даже мощные светильники с лампами ДРЛ при диаметре 0,5 м могут рассматриваться как точки, начиная от высоты 1,25 м, а светильники с люминесцентными лампами длиной 1,5 м — начиная от высоты 3 м. На практике следует, однако, проявлять осторожность и несколько увеличивать указанные значения высоты, вследствие дополнительного обстоятельства, трудно учитываемого в общем виде, а именно несформированности светового потока излучателей на близких расстояниях. Так, на рис. 1-6 показан элемент зеркального отражателя, направляющий свет под углом 15° к вертикали, но при использовании на малых расстояниях

¹ Мы применяем термин «излучатели» как общий для осветительных приборов, осветительных устройств, не являющихся «приборами», и отражающих поверхностей.

он участвует в создании освещенности точки A , принадлежащей направлению 0° . «Дистанция оформления» светового пучка особенно велика для прожекторов, расчет освещенности от которых по силе света достаточно точен при расстояниях не менее, примерно, 50 м (имеются в виду прожекторы «заливающего освещения»).

Для излучателей, принимаемых за точечные, основными характеристиками являются меридиональные кривые света, которые, чаще всего, даются для условной лампы 1000 лм (при многоламповых светильниках — для суммарного потока всех ламп 1000 лм). Можно пользоваться обычными полярными кривыми силы света, но для целей расчета удобнее цифровые значения, приводимые в таблицах. При необходимости определения силы света в промежуточных направлениях рекомендуется строить вспомогательные графики $I_\alpha = f(\alpha)$ в прямоугольных координатах. По кривым силы света могут быть определены необходимые для расчета значения к. п. д. светильника, зональные потоки и потоки в каждой из полусфер.

При круглосимметричном светораспределении достаточно иметь одну меридиональную кривую, в остальных случаях, вообще говоря, необходимы кривые для нескольких меридиональных плоскостей, через каждые 30° или 45° экваториального угла.

Основным случаем, когда мы встречаемся с некруглосимметричным светораспределением, являются приборы с горизонтально расположенными трубчатыми лампами. Чаще всего светораспределение этих приборов имеет две плоскости симметрии: главную поперечную и главную продольную (слово «главная» опускается, когда это не может вызвать недоразумений). Соответственно для этих приборов даются две кривые силы света: продольная и поперечная. При резком различии между этими кривыми их желательно иметь кривые в промежуточных меридиональных плоскостях. Светораспределение, однако, может быть задано и в нескольких, различно наклоненных, продольных плоскостях, образно называемых «книжными листами». Н. Н. Ермолинским было показано подобие кривых силы света во всех продольных плоскостях. Этот вывод подтвержден нашими исследованиями как для диффузных, так и для зеркальных светильников, а также для прожекторов с трубчатыми лампами. Наличие такого подобия позволяет ограничиться для расчета только продольной и поперечной кривыми силы света. Все упоминавшиеся плоскости изображены на рис. 1-7.

К линейным излучателям понятие силы света не приложимо, но оно применяется для отдельных конструктивных элементов, образующих линию, или для отрезков единичной длины. То же можно сказать и о светящихся поверхностях: здесь понятие силы света приложимо к отдельным элементам этих поверхностей и именно в этом смысле мы говорим, например, что светораспределение светового потолка с экранирующей решеткой имеет такой-то характер.

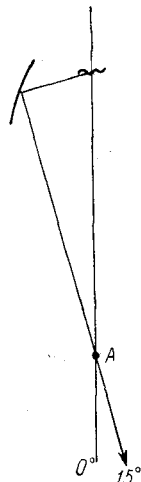


Рис. 1-6. К понятию формирования светового пучка

Что касается вторичных излучателей, в частности стен и потолков помещений, то чаще всего они принимаются диффузно отражающими и их характеристиками являются коэффициенты отражения и яркость или светимость.

Формы кривых силы света неограниченно разнообразны. Автором совместно с Ю. Б. Айзенбергом проведена работа по классифицированию наиболее часто встречающихся кривых, положенная в основу ГОСТ 13828—68. Этот ГОСТ устанавливает 7 основных типов кривых силы света (рис. 1-8) и дает количественные критерии для отнесения кривых промежуточной формы к тому или иному типу.

Кривые, не укладывающиеся в сетку ГОСТ, признаются «специальными». Некруглосимметричные светильники могут иметь в различных меридиональных плоскостях кривые разных типов.

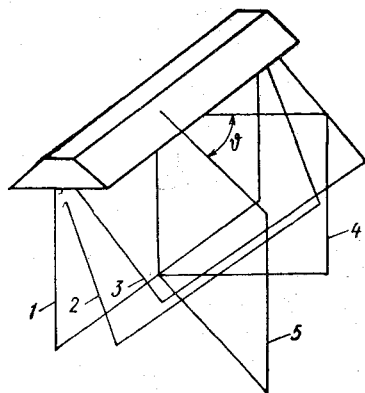


Рис. 1-7. Характерные плоскости светильника с трубчатыми лампами

1 — главная продольная; 2 и 3 — продольные наклонные («книжные листья»); 4 — главная поперечная; 5 — меридиональная; Φ — экваториальный угол

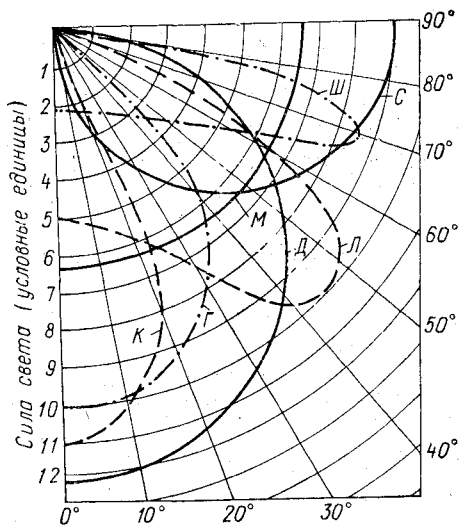


Рис. 1-8. Типовые формы кривых силы света по ГОСТ 13828-68:

К — концентрированная, Г — глубокая, Д — косинусная, Л — полуширокая, Ш — широкая, М — равномерная, С — синусная

При некоторых исследованиях, а отчасти и при практических расчетах, удобно иметь аналитические выражения зависимости силы света от меридионального угла α .

В своих работах автор часто пользовался выражением

$$I_{\alpha} = I_0 \cos^m \alpha. \quad (1-1)$$

Характерные кривые, отвечающие этому выражению, показаны на рис. 1-9. В их числе равномерная ($m = 0$) и косинусная ($m = 1$) кривые по ГОСТ. Часто нас наиболее интересует закон изменения силы света в пределах углов $\alpha = 35^{\circ} \div 55^{\circ}$, и многие кривые, целиком не аппроксимируемые (1-1), достаточно хорошо следуют этому уравнению в указанных пределах. Логарифмируя (1-1), находим

$$m = \frac{\lg I_{\alpha} - \lg I_0}{\lg \cos \alpha}.$$

Построив зависимость $\lg I_\alpha$ от $\lg \cos \alpha$ (причем шкалы координатных осей должны иметь равные масштабы и на них должны указываться значения не логарифмов, а соответственно I_α и α), определяем m как тангенс угла наклона спрямленного участка кривой в пределах интересующих нас углов (рис. 1-10).

Исследуя кривые силы света светильников для общественных зданий, М. М. Епанешников пришел к выводу, что в большинстве случаев они отвечают выражению (1-1) при значениях m , равных 1, 2 и 3, и ввел дополнительные уравнения:

$$I_\alpha = I_0 \frac{1 + 2 \cos \alpha}{3} \quad (1-2)$$

и

$$I_\alpha = I_0 \frac{\cos \alpha + \cos^2 \alpha}{2} \quad (1-3)$$

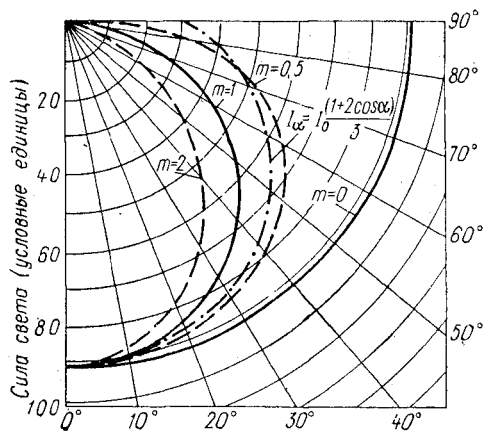


Рис. 1-9. Кривые, аппроксимируемые выражениями (1-1) и (1-2)

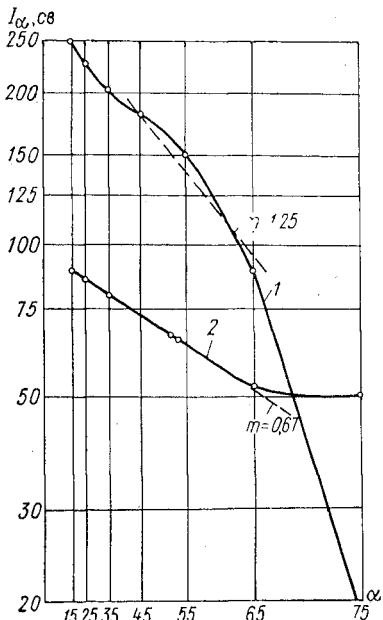


Рис. 1-10. Графическое определение показателя m
1 — глубоководный, 2 — плафон двухламповый

Кривая, соответствующая уравнению (1-2), показана на рис. 1-9; кривая по уравнению (1-3) почти не отличается от обычной косинусной.

Применительно к расчету люминесцентного освещения И. Рох предложил рассматривать кривые силы света как эллипсы.

Некоторые кривые могут быть описаны уравнением, предложенным Н. Г. Болдыревым, которое в упрощенном варианте имеет вид:

$$I_\alpha = A \cos \alpha + B \cos^3 \alpha + C \cos^5 \alpha. \quad (1-4)$$

Уравнение в некоторых случаях применяется, но в ограниченном объеме, отчасти из-за кропотливости определения его коэффициентов в каждом конкретном случае.

ОСВЕЩЕННОСТЬ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ

2-1. Освещенность точек горизонтальной поверхности от точечных излучателей с круглосимметричным светораспределением

Рассматриваем данную точку как принадлежащую элементарной площадке dS . Для определения освещенности необходимо знать величину направленной к площадке силы света I , расстояние r до излучателя и угол падения света, т. е. угол α между лучом и нормалью N к площадке (рис. 2-1).

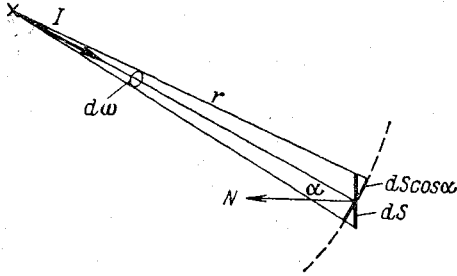


Рис. 2-1. Освещенность элементарной площадки

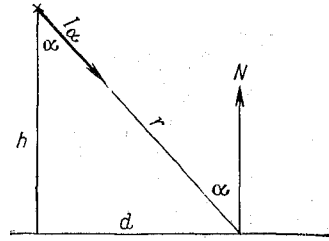


Рис. 2-2. Освещенность точек горизонтальной поверхности

Строя элементарный телесный угол $d\omega$, опирающийся на dS , и считая, что в этом угле излучается поток dF , получим:

$$E \doteq \frac{dF}{dS}; \quad dF = I d\omega; \quad d\omega = \frac{dS \cos \alpha}{r^2}$$

и окончательно

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (2-1)$$

Для практических целей эту формулу чаще всего преобразуют применительно к случаю освещения горизонтальной поверхности (рис. 2-2), когда положение точки по отношению к излучателю определяется координатами d («горизонтальное расстояние») и h («расчетная высота»), а угол падения света α равен углу, определяющему направление силы света.

В этом случае выражению (2-1) может быть придана одна из следующих форм:

$$E = \frac{I_\alpha \sqrt{r^2 - d^2}}{r^3} = \frac{I_\alpha h}{(h^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{I_\alpha \cos \alpha \cdot \sin^2 \alpha}{d^2} = \frac{I_\alpha h}{r^3} = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{h^2}, \quad (2-2)$$

последняя из которых наиболее употребительна. Хотя в этом виде формула кажется сложнее, чем (2-1), но она удобнее тем, что при неизменном для ряда точек значения h она содержит две, а не три переменные. Необходимые для светотехнических расчетов значения тригонометрических функций приведены в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Сокращенная таблица тригонометрических функций

α°	$\operatorname{tg} \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos^2 \alpha$	$\cos^3 \alpha$
0	0,000	1,000	1,000	1,000
5	0,087	0,996	0,992	0,989
10	0,176	0,985	0,970	0,955
15	0,268	0,966	0,933	0,901
20	0,364	0,940	0,884	0,830
25	0,466	0,906	0,821	0,744
30	0,577	0,866	0,750	0,649
35	0,700	0,819	0,671	0,550
40	0,839	0,766	0,587	0,449
45	1,000	0,707	0,500	0,353
50	1,192	0,643	0,413	0,266
55	1,428	0,574	0,330	0,189
60	1,732	0,500	0,250	0,125
65	2,145	0,423	0,179	0,076
70	2,747	0,342	0,117	0,040
75	3,732	0,259	0,067	0,017
80	5,671	0,174	0,030	0,0052
85	11,43	0,087	0,0076	0,0007
90	∞	0	0	0

Непосредственное вычисление освещенности по формуле (2-2) не вызывает затруднений, но при массовых расчетах требует много времени. Некоторые упрощенные приемы расчета освещенности предложены еще в прошлом столетии. Например, для графического определения числителя выражения (2-2) предлагалось трехкратное проецирование стрелки, изображающей силу света, как то показано на рис. 2-3.

В годы первых пятилеток, когда светотехническое проектирование приняло особо массовый характер, упрощенные способы расчета предлагались десятками и неоднократно были предметом критического обсуждения научной общественностью. Ниже описываются некоторые приемы, не утратившие значения и интереса, но не рекомендуемые в качестве типовых. Последним специально посвящен § 2-2.

Элементарные кривые освещенности. Эти кривые, иногда называемые люксбергами, представляют собой построенную в прямоугольных координатах зависимость освещенности от расстояния d при данной высоте h и могут строиться для светильников как с лам-

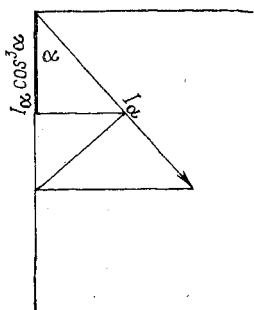


Рис. 2-3. Графическое определение $I_\alpha \cos^3 \alpha$

пами определенной мощности, так и с условной лампой 1000 лм. На каждом графике могут быть совмещены кривые для нескольких высот. Масштабы шкал выбираются, как указано в § 1-1.

Хотя аргументом является расстояние d , при расчете удобнее задаваться углами α через каждые 10° , а после 45° — через каждые 5° . Порядок расчета ясен из табл. 2-2, на основании которой построен график рис. 2-4.

Подобные кривые очень удобны для массовых расчетов при одной неизменной высоте, но непригодны в случаях, когда высота может

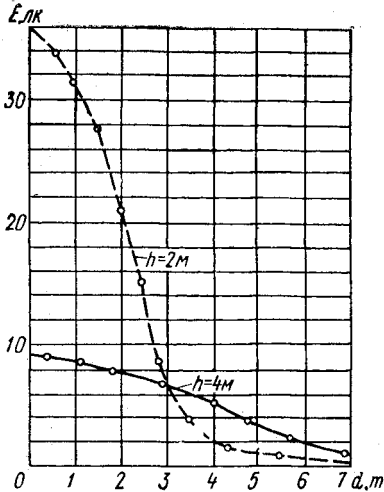


Рис. 2-4. Кривые $E = f(d)$ для светильника СО с лампой 1000 лм

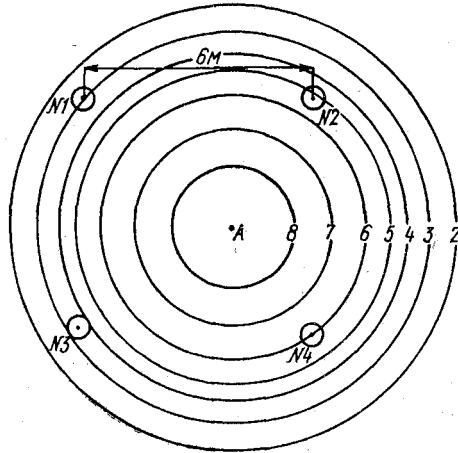


Рис. 2-5. Круговые изолюксы светильника СО для $h = 4$ м и определение с их помощью освещенности точки A

принимать различные значения: в случае, когда на графике нанесены кривые для разных высот, они пересекаются (см. рис. 2-4; обращается внимание на то, что в удаленных точках освещенность возрастает с увеличением высоты) и интерполирование при промежуточных высотах почти невозможно.

Круговые изолюксы. График строится на основе элементарных кривых освещенности, являясь их дальнейшим развитием. Методом переноса точек (§ 1-1) находят значения d , соответствующие «круглым» величинам освещенности, и через эти значения, построенные в необходимом масштабе, проводятся окружности (рис. 2-5). В центре построения предполагается проекция источника света, но так как при перемене местами этой проекции и точки, в которой определяется освещенность, значение d сохраняется, при работе удобнее совмещать центр графика с контрольной точкой на плане (имеющем тот же масштаб, что и график) и для каждого светильника по положению изображающего его символа между изолюксами находить освещенность. Так, для случая, представленного на рис. 2-5, светильник № 1 создает в точке A 3 лк, № 2 — 5,3 лк и т. д.

Фрагмент вычислений при построении графика освещенности
на рис. 2-4 для $h = 4$ м

α°	$\text{tg } \alpha$	$\cos^3 \alpha$	I_α	$d = h \text{ tg } \alpha$	E
0	0	1	145	0	9
5	0,087	0,989	145	0,35	8,9
15	0,268	0,901	150	1,07	8,4
45	1,00	0,353	236	4,0	5,2
50	1,19	0,266	222	4,77	3,7
65	2,14	0,076	70	8,58	0,33

Чрезвычайно удобный график почти не получил у нас применения из-за привязанности его не только к определенной высоте, но и к определенному масштабу плана помещения.

Таблицы М. С. Рябова (табл. 2-3). Таблицы применялись некоторыми организациями в продолжение ряда лет и только в последнее время были окончательно вытеснены пространственными изолюксами (§ 2-2). Таблицы имеют два входа: d и h , каждая их клетка соответствует определенному сочетанию этих размеров и содержит значение горизонтальной освещенности, обычно рассчитанное для светильника с условной лампой 1000 лм.

Таблица 2-3

Фрагмент таблицы Рябова

Высота $h, \text{ м}$	Расстояние $d, \text{ м}$							
	0	0,5	1,0	1,5	...	9,5	10	11
1,0	100	71,6	35,4	17,1		0,115	0,098	0,066
1,5	44,4	37,9	25,6	15,7		0,17	0,145	0,12
2,0	25	22,8	17,9	12,8		0,22	0,189	0,13
7,5	1,77	1,76	1,73	1,66		0,41	0,38	0,32
8,0	1,56	1,55	1,53	1,48		0,41	0,38	0,32

В отличие от разного рода графиков таблицы дают вполне точное значение освещенности, но только для тех сочетаний d и h , которые содержатся в таблице, при промежуточных же значениях интерполирование крайне затруднительно. По сравнению с графиками, в частности с пространственными изолюксами, таблицы отличаются меньшей наглядностью.

Расчеты для составления таблиц Рябова выполняются по формуле (2-2) и являются довольно кропотливыми.

2-2. Рекомендуемые приемы определения горизонтальной освещенности

Из описанных ниже приемов два первых получили широчайшее применение, третий же, представляя большой принципиальный интерес, в практике почти не используется.

Кривые относительной освещенности (Р. А. Сапожников). Числитель формулы (2-2) в ее последнем начертании есть функция только угла α , не привязанная к конкретным условиям применения светильника. Он может рассматриваться как такая же самостоятельная, полнопровная характеристика светильника, как и его светораспределение. Его значения, рассчитанные для лампы 1000 лм, численно равны освещенности, создаваемой светильником при высоте $h = 1$ м; они называются относительной освещенностью и обозначаются символом ε . Таким образом,

$$\varepsilon = I_{\alpha} \cos^3 \alpha. \quad (2-3)$$

Освещенность, создаваемую светильником с условной лампой при конкретной высоте h , будем называть условной освещенностью и обозначать символом e . Обратимся к рис. 2-6. Для точек A и a , лежащих на одном луче, освещенности относятся как квадраты высот, следовательно,

$$e = \varepsilon/h^2. \quad (2-4)$$

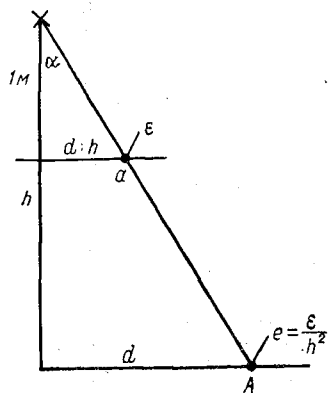


Рис. 2-6. К понятию относительной освещенности

Точка A имеет координаты (d, h) ; точка a имеет координаты $(d/h, 1)$. Ясно, что именно значение $d : h = \operatorname{tg} \alpha$ удобно принять за аргумент при построении графиков ε .

Автором построения предложен остроумный прием расширения пределов шкалы аргумента без увеличения ее протяженности. Как скоро d , увеличиваясь, достигает значения h , производится обращение аргумента, т. е. вместо $d : h$ за аргумент принимается $h : d$. Соответственно кривая ε , продолжая снижаться, поворачивает обратно, причем начало координат для прямой, верхней ветви кривой, соответствует $d = 0$, для обратной, нижней, $d = \infty$. Кроме того, для повышения точности отсчета, часть кривой строится в десятикратном увеличении (рис. 2-7). В последнее время мы часто применяем для ε логарифмическую шкалу.

Расчеты, необходимые для построения кривой относительной освещенности, отличаются от приведенных выше для элементарных кривых лишь тем, что принимается $h = 1$ м, значения d не рассчитываются, и после угла 45° фиксируется не $\operatorname{tg} \alpha$, а $\operatorname{ctg} \alpha$.

Кривые относительной освещенности сохраняют свое значение для расчетов повышенной точности (например, наружное освещение), для разного рода теоретических анализов и в некоторых других случаях.

Интересно отметить, что хотя мы всегда говорим «относительная освещенность составляет столько-то люксов», строго говоря, размерность этой величины не люксы, а люмены, так как люксы получаются при делении ϵ на квадрат высоты.

Пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности (А. А. Труханов). Этот простой и изящный график был предложен А. А. Трухановым почти «случайно», в составе многоквadrантной номограммы, и оказался непревзойденным до сих пор способом определения условной освещенности. График прост не только для использования, но и очень легко строится: при достаточном опыте построение графика для какого-либо светильника требует три-четыре часа.

Разрежем освещаемое пространство вертикальной плоскостью, проходящей через светильник, по отношению к которому эта плоскость будет одной из меридиональных. Помещенная в одну из точек этого разреза элементарная горизонтальная площадка будет определяться в координатной системе $d-h$ и, в зависимости от ее положения, будет иметь ту или иную освещенность. Выбрав из бесчисленного множества таких площадок все, имеющие заданную условную освещенность e , соединим их плавной кривой — изолюксой.

То, что любой луч, проведенный под углом α к вертикали, будет пересекать изолюксы любой освещенности e (если только I_α не равна нулю), видно из формулы (2-2), которую можно представить в виде:

$$h = \sqrt{\frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{e}} = \sqrt{\frac{I_\alpha}{e}} = \sqrt{I_\alpha} \sqrt{\frac{\cos^3 \alpha}{e}}. \quad (2-5)$$

Эта последняя формула дает вторую координату точки с освещенностью e на направлении α , так как первой координатой является сам угол α . На этой формуле и основано построение графика.

Выбираем пределы шкалы h , в которых вероятно использование данного светильника, и пределы шкалы d , начиная от нуля и примерно до $1,5h$. Вычерчиваем заготовку графика, причем, для того чтобы он имел удобную форму, масштабы шкал d и h могут быть различными. На заготовке должна быть показана и точка светильника, т. е. точка с координатами (0; 0). Через эту точку проводим лучи, соответствующие $\alpha = 5^\circ-15^\circ-25^\circ-35^\circ-45^\circ-50^\circ-55^\circ-60^\circ-65^\circ-70^\circ-75^\circ$, строя их по тангенсам углов, а не проводя по транспортиру. Для значений e принимаем шкалу, приведенную в табл. 2-4, после чего для каждого луча и каждого значения e находим h , определяющее положение точки изолюксы.

Для этого визирную линию бегунка логарифмической линейки ставим против числа на квадратичной шкале, обозначающего e для данного направления (обратить

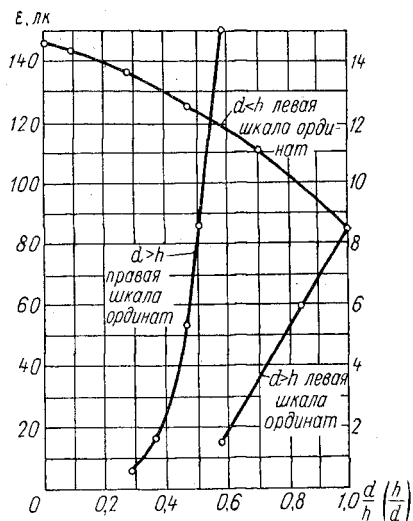


Рис. 2-7. Кривые относительной освещенности для светильника СО

внимание на порядок числа!) и совмещаем с ней последовательно деления квадратичной же шкалы движка, соответствующие различным e . Против единицы основной шкалы движка читаем h . Как вариант, можно использовать последний вид формулы (2-5), составить вспомогательную таблицу значений второго корня и умножать на эти значения $\sqrt{I_\alpha}$.

Таблица 2-4

Расчеты для построения графика пространственных изолук на рис. 2-8 (приводятся фрагментарно, для четырех значений угла α)

α°	0	25	45	65
I_α	145	169	236	70
$\cos^2 \alpha$	1,00	0,74	0,35	0,076
e	145	125	83	5,3
e	$h, м$			
15	3,1	2,9		
10	3,83	3,55	2,9	
7	4,57	4,22	3,45	
5	5,4	5,0	4,1	
4	6,05	5,6	4,55	
3	7,0	6,5	5,25	
2	8,5	7,9	6,45	
1,5	9,8	9,15	7,5	
1		11,2	9,1	
0,7			10,9	2,74
0,5				3,25
0,4				3,64
0,3				4,2
0,2				5,15
0,15				5,95
0,1				

Для каждого направления расчет выполняется для таких значений e , при которых h лежит в выбранных пределах плюс по одному запредельному значению в каждую сторону для более уверенного проведения кривых. При окончательном оформлении графика все лучи, точка светильника и запредельные участки кривых стираются или не копируются. В табл. 2-4 и на рис. 2-8 фрагментарно показан ход построения графика для светильника СО.

Пользоваться графиком элементарно просто: желая, например, определить условную освещенность для точки $h = 7,5 м$, $d = 3 м$, находим ее на графике и, интерполируя между значениями e для двух ближайших изолук, получаем $e = 2,5 лк$. Необходимость такого интерполирования — единственный недостаток графика. Достоинством является наглядность в том отношении, что те его точки, в которых касательная к данной изолуке вертикальна, соответствуют наиболее выгодному значению h при данном d , и если при определении освещенности от ближайших светильников, контрольная точка при найденном d оказывается значительно выше этих точек, то это указывает на неудачное расположение светильников.

Пределы шкал графика отнюдь не соответствуют пределу применимости светильника данного типа (такого предела вообще не существует). Более того, график дает в ряде случаев возможность определения e и для значений d и h , выходящих за пределы шкал. Пусть, например, пользуясь рис. 2-8, мы хотим найти освещенность при $h = 14$ м и $d = 8$ м. Изменяем оба эти размера в любое, но одинаковое число раз, так, чтобы точка с измененными координатами лежала в пределах графика; в данном случае проще всего и h и d уменьшить вдвое. Точка $h = 7$ м, $d = 4$ м лежит в пределах графика и имеет освещенность 2,5 лк. Так как для точек, лежащих на одном луче, освещенности обратно пропорциональны квадратам высот, то освещенность заданной точки равна $2,5 : 2^2 = 0,62$ лк.

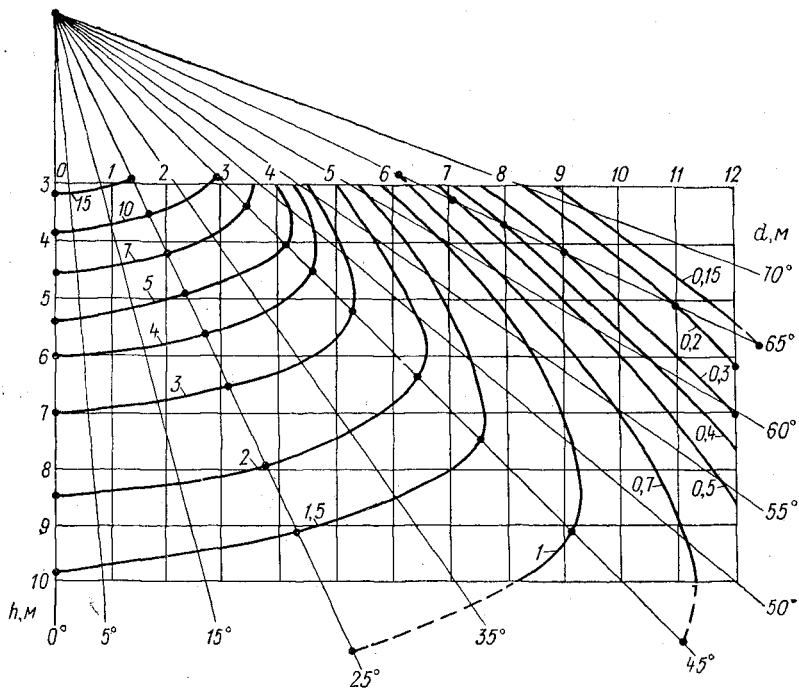


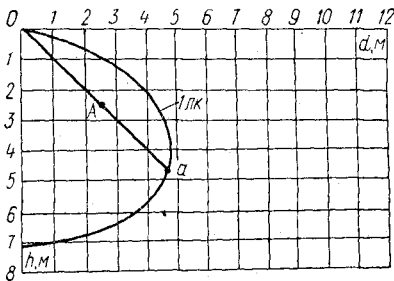
Рис. 2-8. Пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности для светильника СО. Точками отмечены данные, приведенные в табл. 2-4.

Вполне аналогичные графики применяются для расчета освещенности на таких малых расстояниях от светильника, когда последний не может быть принят за точку или когда его световой поток еще не сформирован, в частности для расчета местного освещения. В этом случае, однако, график строится не путем расчета, а на основе непосредственных измерений освещенности. По данным последних строятся вспомогательные графики зависимости освещенности от d или h , точки которых переносятся на заготовку окончательного графика.

При отсутствии готового графика изолюксов для какого-либо светильника и нежелании строить новый график можно пользоваться приводимым в справочниках графиком пространственных изолюксов для условного светильника, имеющего по всем направлениям силу

света 100 св. Этот график отличается от описанных тем, что на нем изображаются лучи, соответствующие различным α , и указываются значения этого угла. Для точки, найденной на графике по ее d и h , прочитывается не только освещенность, но и угол α , по кривой силы света или таблице находится сила света светильника I_α и условная освещенность определяется умножением прочитанного по графику значения на $I_\alpha/100$.

Пространственные изолюксы условной освещенности 1 лк (Р. А. Сапожников). Как указано выше, недостатком обычных пространственных изолюксы является необходимость интерполирования. Его можно избежать, показав на графике единственную изолюксы



$e = 1$ лк и выполнив график так, чтобы на нем сохранялась точка 0 (рис. 2-9). Тогда, имея точку A с координатами h и d , мы отмечаем ее на графике и промеряем расстояние OA , а также расстояние Oa до пересечения того же луча с изолюксой 1 лк. Искомая освещенность точки A

$$e = \left(\frac{Oa}{OA} \right)^2.$$

Рис. 2-9. Изолюксы условной освещенности 1 лк

Рассмотренные способы исчерпывают предложения, практически широко используемые для нахождения условной освещенности. Так как конечной задачей является определение действительной освещенности, имеющей место при потоке лампы (или группы ламп) в светильнике в F люменов и с учетом коэффициента запаса k , то последним этапом является пересчет освещенности к этим реальным данным, производимый по очевидной формуле

$$E = \frac{eF}{1000k}. \quad (2-6)$$

2-3. Освещенность точек горизонтальной поверхности от светильников с некруглосимметричным светораспределением

При круглосимметричном светораспределении освещенность точки есть функция двух геометрических размеров: d и h , что дает возможность использовать для ее определения либо одну кривую относительной освещенности, построенную для значения $h = 1$ м, либо семейство изолюксы в плоскости $d-h$.

При некруглосимметричном светораспределении положение точки A горизонтальной поверхности относительно светильника определяется тремя размерами, в качестве которых могут быть выбраны h , d и β или h , x и y , или, наконец, h , γ и δ (рис. 2-10).

В этих условиях, исключая в принципе возможное, но совершенно нереальное построение в пространстве поверхности равной осве-

ценности, неизбежно пользование семейством кривых относительной освещенности.

Говоря о семействе кривых, мы подразумеваем обычный график относительной освещенности, на котором нанесены кривые, каждая из которых соответствует определенному углу β и пользование которым производится так же, как обычными кривыми относительной освещенности. Для построения такого графика необходимо иметь кривые силы света для нескольких меридиональных плоскостей, недостатки же графика те же, какие указаны для элементарных кривых освещенности: крайняя трудность интерполирования при промежуточных значениях β и возможность пересечения кривых, усугубляющая эту трудность.

От этих недостатков свободны изолюксы относительной освещенности, которые мы для краткости будем называть условными изолюксами, поскольку они строятся для условной плоскости, по отношению к которой светильник подвешен на высоте 1 м. В этом случае координирование точек может производиться как в системе d, β , так и в системе x, y . В последнее время мы предпочитаем вторую из этих систем, что сближает методику расчета для данного случая с методикой расчета прожекторного освещения. Координатам x и y на реальной

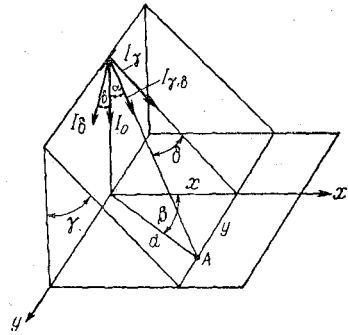


Рис. 2-10. Освещение точки светильником с некруглосимметричным светораспределением

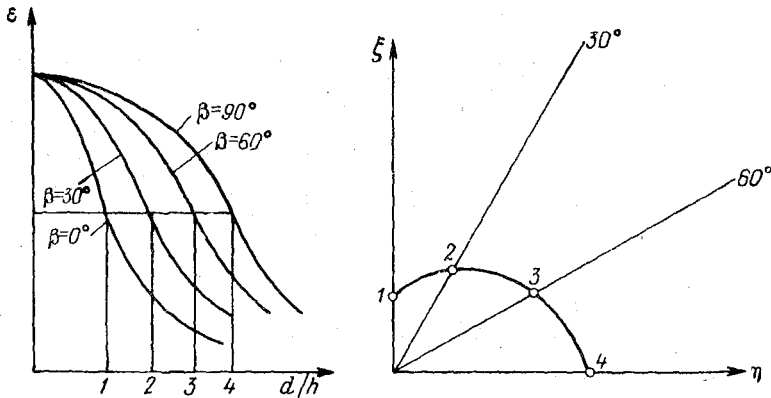


Рис. 2-11. Схема построения условных изолюкс

плоскости соответствуют координаты $\xi = x/h$ и $\eta = y/h$ на условной плоскости.

Для построения графика, вообще говоря, необходимо знать светораспределение светильника в нескольких меридиональных плоскостях, например, соответствующих значениям $\beta = 0^\circ - 30^\circ - 60^\circ - 90^\circ$.

Предварительно для каждого β надо построить вспомогательную кривую относительной освещенности, отличающуюся от обычной лишь тем, что производить обращение независимого переменного не следует. Точки вспомогательных графиков, соответствующие «круглым» значениям e , переносятся на заготовку окончательного графика, как это схематически показано на рис. 2-11. Аргументом при построении

спомогательного графика является $d : h$ и при переносе точек размеры откладываются по радиусам-векторам.

Если светораспределение излучателя мало отличается от круглосимметричного (как это имеет место у многих люминесцентных светильников), то можно строить условные изолюксы только на основании кривых силы света в продольной и поперечной плоскостях. В этом случае для каждой изолюксы определяются лишь две точки, на осях ξ и η , сама же изолюкса проводится как эллипс.

Если фотометрическое тело излучателя не имеет плоскостей симметрии, то график условных изолюкс должен иметь 4 квадранта, при наличии одной плоскости симметрии — 2 квадранта, при двух плоскостях — 1 квадрант.

Дальнейшее изложение относится к светильникам с горизонтально расположенными трубчатыми лампами (люминесцентными, галогенными, ксеноновыми и т. д.) и основано на наших исследованиях в светотехнической лаборатории Л. О. Тяжпромэлектропроекта.

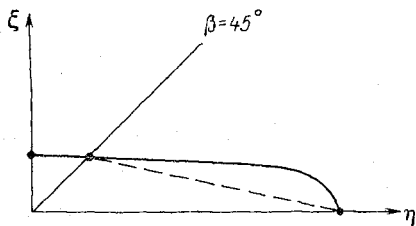


Рис. 2-12. Варианты проведения изолюксы по трем точкам. Штриховая линия соответствует экспериментальным данным

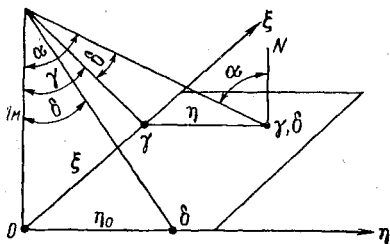


Рис. 2-13. К построению условных изолюкс

При резкой асимметрии светораспределения для уверенного построения изолюксы недостаточно даже трех точек, соответствующих $\beta = 0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$. На рис. 2-12 показано, как различно может быть проведена изолюкса по этим точкам, произведенное же нами построение изолюксы по данным измерения освещенности показало, что, в частности, для зеркальных глубоководных излучателей изолюксы ничего общего с эллипсами не имеют.

За основу построения изолюкс оказалось наиболее целесообразным принять установленный Н. Н. Ермолинским факт подобия кривых силы света в различно наклоненных продольных плоскостях, дополнительно подтвержденный нами при испытании ряда макетов светильников с галогенными лампами и заводских светильников с люминесцентными лампами. Испытанные светильники имели в поперечной плоскости светораспределение от косинусного до концентрированного, во всех же продольных плоскостях подобие кривых для каждого светильника сохранялось с достаточной точностью, а сами кривые по форме были близки к косинусным, кроме светильника с экранирующей решеткой.

Подобие кривых в различно наклоненных продольных плоскостях не только дает возможность достаточно точного построения изолюкс, имея только поперечную и продольную кривые силы света, но и позволяет по этим кривым восстановить всю форму фотометрического тела и, в частности, построить кривые силы света для любых зна-

чений экваториального угла β . Подобного рода переходы основаны на аналитическом выражении закона подобия, которое имеет вид (см. рис. 2-10):

$$\frac{I_{\gamma, \delta}}{I_{\gamma}} = \frac{I_{\delta}}{I_0}, \quad (2-7)$$

причем значения I_0 , I_{δ} и I_{γ} заданы поперечной и продольной кривыми силы света.

Обратимся к рис. 2-13, изображающему условную плоскость, по отношению к которой высота установки светильника составляет 1 м. Кривые относительной освещенности вдоль осей η и ξ могут быть построены обычным путем, по всегда известным кривым силы света в основных плоскостях, и путем переноса точек с этих кривых на осях могут быть намечены точки будущих изолюкс. Нанесем теперь на плоскость ξ — η ряд прямых, параллельных оси η , каждая из которых соответствует определенному значению ξ и угла γ (см. также рис. 2-10). Интервал между этими прямыми определяется желаемой точностью построения.

На рис. 2-13 показаны 4 точки, маркированные углами, определяющими их положение и направления силы света. Искомой является освещенность произвольной точки γ , δ . Положение точек O и γ очевидно; точку δ надо выбрать так, чтобы угол, определяющий ее положение в главной продольной плоскости, был равен углу, определяющему положение точки γ , δ в продольной плоскости γ . Для этого должно быть соблюдено условие

$$\eta_0 = \eta \cos \gamma.$$

Для определения абсциссы η_0 этой точки приводится табл. 2-5.

Таблица 2-5

Переход от значений η при различных ξ
к соответствующим тем же углам δ значениям
 η_0 на оси абсцисс, т. е. при $\xi = 0$

ξ	η при данном ξ													
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,5	3,0
0	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,50	1,80	2,00	2,50	3,00
0,1	0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,60	0,80	1,00	1,19	1,49	1,79	1,99	2,48	2,98
0,2	0	0,10	0,20	0,29	0,39	0,59	0,78	0,98	1,17	1,47	1,76	1,96	2,45	2,94
0,3	0	0,10	0,19	0,29	0,38	0,58	0,77	0,96	1,15	1,44	1,72	1,92	2,39	2,87
0,4	0	0,09	0,19	0,28	0,37	0,56	0,74	0,93	1,11	1,39	1,67	1,85	2,31	2,78
0,6	0	0,09	0,17	0,26	0,34	0,51	0,69	0,86	1,03	1,28	1,54	1,71	2,14	2,57
0,8	0	0,08	0,16	0,23	0,31	0,47	0,63	0,78	0,94	1,17	1,41	1,56	1,95	2,34
1,0	0	0,07	0,14	0,21	0,28	0,42	0,56	0,71	0,85	1,06	1,27	1,41	1,76	2,12
1,2	0	0,06	0,13	0,19	0,26	0,38	0,51	0,64	0,77	0,96	1,15	1,28	1,60	1,92
1,5	0	0,06	0,11	0,17	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,83	1,00	1,11	1,38	1,66
1,8	0	0,05	0,10	0,15	0,19	0,29	0,39	0,48	0,58	0,73	0,87	0,97	1,21	1,45
2,0	0	0,04	0,09	0,13	0,18	0,27	0,36	0,45	0,53	0,67	0,80	0,89	1,11	1,33
2,5	0	0,04	0,07	0,11	0,15	0,22	0,30	0,37	0,45	0,56	0,67	0,74	0,93	1,12
3,0	0	0,03	0,06	0,10	0,13	0,19	0,25	0,32	0,38	0,48	0,57	0,63	0,79	0,95

Составим выражения относительной освещенности для всех четырех точек:

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= I_0; \\ \varepsilon_\delta &= I_\delta \cos^3 \delta; \\ \varepsilon_\gamma &= I_\gamma \cos^3 \gamma; \\ \varepsilon_{\gamma, \delta} &= I_{\gamma, \delta} \cos^3 \gamma \cos^3 \delta.\end{aligned}$$

Решая их совместно и учитывая (2-7), получаем

$$\varepsilon_{\gamma, \delta} = \varepsilon_\gamma \frac{\varepsilon_\delta}{\varepsilon_0}. \quad (2-8)$$

На основе изложенного определение промежуточных точек изолюкс производится в следующем порядке.

Задаемся значением ξ , определяющим положение линии $\gamma-\gamma$, δ , и последовательно выбираем на этой линии точки с возрастающими значениями η (по табл. 2-5). Для каждой точки в строке, соответствующей выбранному ξ , прочитываем значение η_0 . По формуле (2-8) определяем освещенность каждой точки на линии $\gamma-\gamma$, δ , поскольку все значения освещенности, входящие в (2-8), могут быть прочитаны по кривым относительной освещенности вдоль осей ξ и η . Строим график распределения освещенности вдоль линии $\gamma-\gamma$, δ и переносим с него точки на сетку окончательного графика. Таким путем может быть получено любое число точек каждой изолюксы, вполне достаточное для ее уверенного построения.

Сравнение графиков, построенных описанным путем, с графиками, ранее построенными как эллипсы по двум вершинам, под-

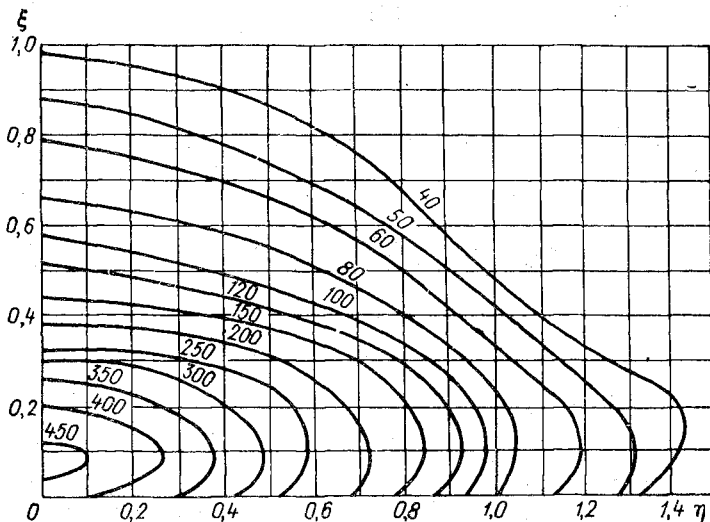


Рис. 2-14. Условные изолюксы для глубоководного прожектора с галогенной лампой (фрагмент графика)

твердил, что при резкой разнице между кривыми силы света в продольной и поперечной плоскостях последние графики безусловно недостоверны. Особое значение имеет описанная методика построения графиков для прожекторов с трубчатыми лампами.

На рис. 2-14 представлен в качестве образца фрагмент графика условных изолюкс зеркального глубокоизлучателя с галогенной лампой накаливания.

Пример. Найти освещенность точки с координатами $x = 7,5$ м, $y = 14$ м с учетом коэффициента запаса $k = 1,5$; светильник снабжен двумя лампами по 2000 вт, имеющими, каждая, световой поток 44 000 лм, и установлен на высоте $h = 18$ м над расчетной плоскостью.

Определяем $\xi = 7,5/18 = 0,42$ и $\eta = 14/18 = 0,78$. Найдя соответствующую точку на графике, прочитываем ее относительную освещенность $\varepsilon = 80$ лк. Переход к действительной освещенности производим по формуле

$$E = \frac{\varepsilon F}{1000 k h^2} = \frac{80 \cdot 88\,000}{1000 \cdot 1,5 \cdot 18^2} = 145 \text{ лк.}$$

Выше (§ 2-1) мы отметили нецелесообразность применения графика круговых изолюкс даже с учетом возможности его наложения на план освещаемой поверхности. При расчете с помощью изолюкс наложение графика на план вполне целесообразно, так как дает возможность устранить определение ξ и η , но для этого масштабы графика и плана должны быть согласованы.

Пусть на графике изолюкс единица ξ или η имеет размер a , мм. Для возможности совмещения графика и плана последний должен быть перерисован в таком масштабе, чтобы любой отрезок, длина которого равна высоте h , также изображался отрезком a , мм.

Так, для рис. 2-14 $a = 60$ мм. При высоте $h = 18$ м план должен быть перерисован в масштабе $1 : \frac{18\,000}{60} = 1 : 300$, конечно, в сильно упрощенном виде на кальке.

После этого план накладывается на график так, чтобы начало координат совпало с контрольной точкой, а оси ξ и η были ориентированы по осям светильников. Тогда освещенность от каждого из светильников непосредственно прочитывается по изолюксам (см. также рис. 2-5). Можно, конечно, перерисовывать не план, а график изолюкс, но это требует значительно большего времени.

Считаем необходимым подчеркнуть, что подобного рода упрощения в практике расчета отнюдь не являются мелочью, не стоящей внимания. Именно совокупность множества таких «мелочей» сделала светотехнические расчеты простой и, можно сказать, изящной операцией и способствовала многократному повышению производительности труда проектировщиков.

2-4. Освещенность точек горизонтальной поверхности от линейных излучателей

Вопросы расчета освещенности от линейных излучателей широко освещены в мировой литературе и, в деталях, различно решаются разными авторами. Здесь рассматривается принятая в СССР методика расчета, в значительной степени основанная на работах автора, но учитываются и некоторые другие предложения.

Линейный излучатель состоит (или может рассматриваться как состоящий) из отдельных элементов, характеризующихся кривыми силы света в продольной и поперечной плоскостях. Первоначально примем, что в главной продольной плоскости (а по закону подобия, и в остальных продольных плоскостях) светораспределение является

косинусным. Длина линии L и указанные на рис. 2-15 размеры h и p однозначно определяют взаимное положение линии и точки A . Задача может быть решена и для точек, не лежащих против начала

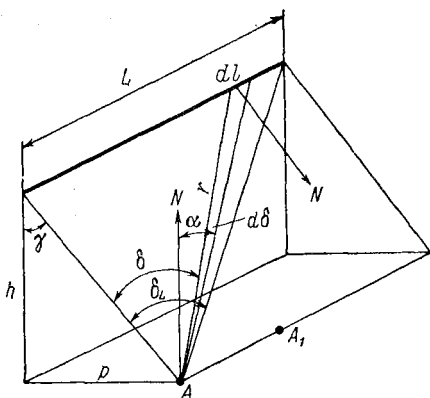


Рис. 2-15. Линейный излучатель, расположенный горизонтально

линии (например, A_1), по проще, что и принято в нашей практике, находить освещенность подобных точек по схеме, указанной на рис. 2-16, т. е. разделяя линию на две части и суммируя освещенности E_1 и E_2 от этих частей или дополняя линию условным отрезком и затем вычитая освещенность E_3 от этого отрезка.

Не более просто, но интересно, решает такую же задачу Штек. Он берет за основу линии бесконечной длины и рассматривает освещенность в функции расстояния x (рис. 2-17). Тогда освещенность точки A от линии, состоящей из отрезков x_1 и x_2 определится как сумма освещенностей от линий, неограниченно простирающихся вправо (E_1) и влево (E_2) минус освещенность от бесконечной линии (E_3).

Возвратимся к рис. 2-15 и определим освещенность точки A от элемента dl . Если сила света линии в плоскости γ , в направлении

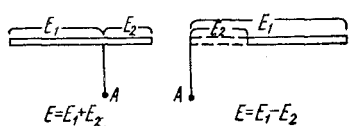


Рис. 2-16. Освещенность точек, не лежащих против конца линии

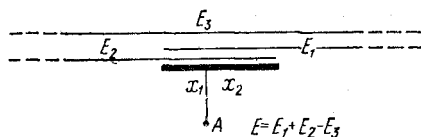


Рис. 2-17. Освещенность точки, не лежащей против конца линии по Штеку

нормали N , отнесенная к единице длины линии есть I'_γ , то сила света элемента dl , направленная к точке A ,

$$dI = I'_\gamma \cos \delta \, dl,$$

а учитывая, что

$$dl = \frac{r \, d\delta}{\cos \delta},$$

получаем

$$dI = I'_\gamma r \, d\delta.$$

Общая формула освещенности от точки примет в данном случае вид:

$$dE = \frac{dI \cos \alpha}{r^2}.$$

Заменяя dI его выражением и учитывая, что

$$\cos \alpha = \frac{h}{r} \text{ и } r^2 = \frac{h^2 + p^2}{\cos^2 \delta},$$

получим окончательно

$$dE = \frac{I'_\gamma h \cos^2 \delta d\delta}{h^2 + p^2}$$

и

$$E = \frac{I'_\gamma h}{h^2 + p^2} \int_0^{\delta_L} \cos^2 \delta d\delta. \quad (2-9)$$

Интегрируя это выражение, находим

$$E = \frac{I'_\gamma h}{2(h^2 + p^2)} \left(\delta_L + \frac{\sin 2\delta_L}{2} \right) \text{ или } E = \frac{I'_\gamma \cos^2 \gamma}{2h} \left(\delta_L + \frac{\sin 2\delta_L}{2} \right). \quad (2-10)$$

Обращаем внимание на следующие принципиальные обстоятельства.

а. Множитель в скобках (2-10) при изменении δ от 0 до $\pi/2$, что соответствует изменению L от 0 до ∞ , возрастает от 0 до $\pi/2$, как это показано на графике (рис. 2-18). Он быстро приближается к предельному значению и линии, видимые из точки под углом более 70° (для точек, лежащих непосредственно под линией, это соответствует примерно $L > 3h$), уже могут рассматриваться как бесконечно длинные.

б. Если L достаточно велико и двучлен в скобках близок к своему пределу, то для точек, лежащих непосредственно под линией ($p = 0$), освещенность обратно пропорциональна первой степени высоты, а не второй, как для точки.

Для практических расчетов несколько преобразуем выражение (2-10). Введем понятие удельного потока линейного излучателя F' , понимая под ним отношение суммарного светового потока ламп F к длине линии L :

$$F' = F/L. \quad (2-11)$$

Фотометрической характеристикой линии будем считать I_γ — силу света в поперечной плоскости в направлении γ , рассчитанную для потока лампы (или нескольких ламп) 1000 лм, причем I_γ не привязывается к какой-либо длине. Тогда, очевидно,

$$I'_\gamma = \frac{I_\gamma F'}{1000}. \quad (2-12)$$

Заменим, далее, в выражении (2-10) угловые координаты на линейные, т. е.

$$\sin 2\delta = \frac{2L \sqrt{h^2 + p^2}}{L^2 + h^2 + p^2}; \quad \delta = \arctg \frac{L}{\sqrt{h^2 + p^2}}; \quad \cos \gamma = \frac{h}{\sqrt{h^2 + p^2}},$$

после чего основное уравнение примет вид:

$$E = \frac{F'}{1000} I_{\gamma} \frac{h}{2(h^2 + p^2)} \left(\frac{L\sqrt{h^2 + p^2}}{L^2 + h^2 + p^2} + \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{h^2 + p^2}} \right). \quad (2-13)$$

Полученные выражения показывают, что при заданных светотехнических характеристиках излучателя (т. е. кривых силы свет в двух плоскостях и удельном потоке F') освещенность точек горизонтальной поверхности есть функция трех геометрических параметров, в качестве которых наиболее удобно выбрать L , h и p (см. рис. 2-15). Для уменьшения числа независимых переменных целе-

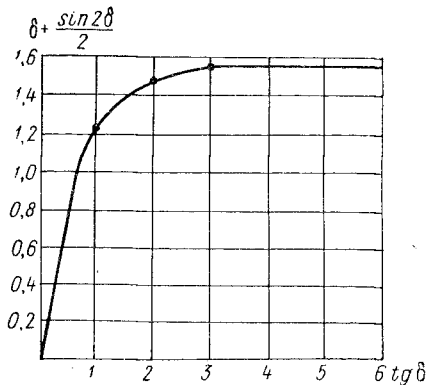


Рис. 2-18. Зависимость $\delta + \sin 2\delta/2$ от $\operatorname{tg} \delta$

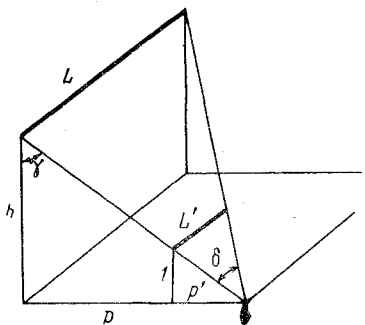


Рис. 2-19. Приведенные размеры при линейных излучателях

сообразно, как мы поступали и ранее, принять $h = 1$ м, а размеры L и p заменить приведенными, введя обозначения $L' = L/h$ и $p' = p/h$.

Обращаем внимание на следующую деталь: при точечных источниках, переходя к единичной высоте, мы воображали условную плоскость соответственно приближенной к светильнику (рис. 2-6). При линейных излучателях следует воображать источник приближенным к плоскости и имеющим соответственно уменьшенную длину (рис. 2-19).

Заменяя в (2-13) фактические размеры на приведенные, получим

$$E = \frac{F'}{1000h} I_{\gamma} \frac{1}{2(1 + p'^2)} \left(\frac{L' \sqrt{1 + p'^2}}{L'^2 + p'^2 + 1} + \operatorname{arctg} \frac{L'}{\sqrt{1 + p'^2}} \right) = \frac{F'}{1000h} I_{\gamma} f(p', L'), \quad (2-14)$$

где первый множитель является «привязочным» для данных конкретных условий, второй — характеризует светораспределение элемента в поперечной плоскости, а третий является не связанной с характеристиками излучателя (при косинусном светораспределении в продольной плоскости; о поправках в иных случаях см. далее) функцией геометрических размеров. Эта функция может быть вы-

числена раз и навсегда и представлена, например, семейством кривых в функции L' , каждая из которых относится к определенному ρ' (рис. 2-20).

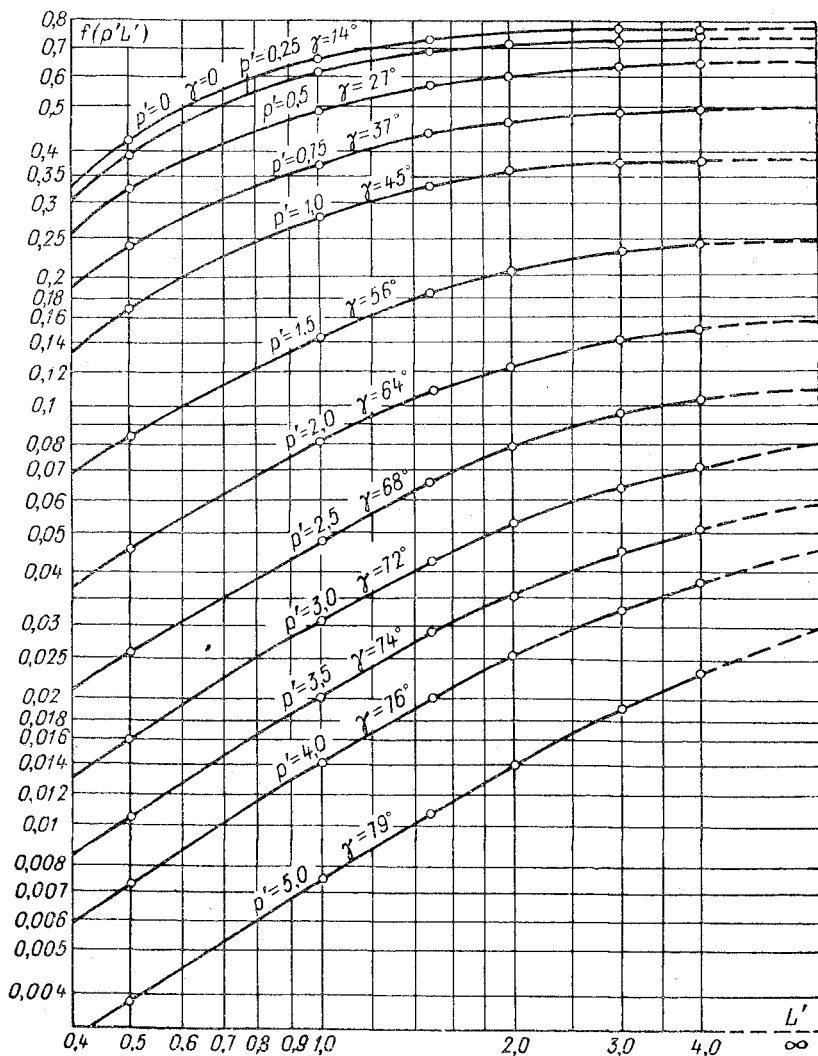


Рис. 2-20. График для расчета освещенности от горизонтальной линии (косинусное светораспределение в продольной плоскости)

Произведение этой функции на I_γ мы будем обозначать ϵ , так как это есть не что иное, как относительная освещенность, т. е. освещенность, отнесенная к условному удельному потоку и при единичной высоте.

Из формулы (2-14) вытекает формула перехода от относительной освещенности к действительной

$$E = \frac{F'\epsilon}{1000h}, \quad (2-1)$$

в которую, при необходимости, может быть введен коэффициент запаса.

Для определения ϵ , зная размеры L , h и p , находим приведенные размеры L' и p' , по графику рис. 2-20 читаем значение $f(p', L')$ и угол γ , по фотометрическим характеристикам светильника — значение I_γ , после чего находим

$$\epsilon = I_\gamma f(p', L'). \quad (2-16)$$

Реже встречается необходимость определения освещенности от линейного излучателя, расположенного вертикально (рис. 2-21), но решение этой задачи будет в дальнейшем использовано для нахождения освещенности вертикальной поверхности. Действуя вполне аналогично вышеизложенному, составляем и интегрируем дифференциальное уравнение, после чего получаем формулу

$$\begin{aligned} E &= \frac{I'_\gamma \cos \gamma \sin^2 \delta}{2h} = \\ &= \frac{F'I_\gamma}{1000h} \frac{1}{2\sqrt{1+p'^2}} \frac{L'^2}{L'^2+p'^2+1} = \\ &= \frac{F'}{1000h} I_\gamma f(p', L') = \frac{F'\epsilon}{1000h}. \end{aligned} \quad (2-17)$$

Рис. 2-21. Линейный излучатель, расположенный вертикально

Как видим, разница с ранее рассмотренным случаем заключается в ином содержании функции $f(p', L')$, значения которой представлены графиком на рис. 2-22. Отмечаем, что из приведенных формул для горизонтального излучателя при неограниченном увеличении L' следует, что эта функция имеет пределом $\pi/4$, а для вертикального излучателя соответствующий предел всего 0,5.

Излучатели с некосинусным светораспределением в продольной плоскости. Применяемые на практике элементы линейных излучателей не имеют в продольной плоскости светораспределения, точно соответствующего закону косинуса (в дальнейшем, поскольку речь идет только об этой плоскости, ее название опускается). Даже открытая люминесцентная лампа имеет суженное светораспределение, которое, так же как светораспределение открытого диффузного светильника без торцов, относительно точно выражается уравнением

$$I_\delta = I_0 \frac{\cos \delta + \cos^2 \delta}{2}. \quad (2-18)$$

Торцы светильника увеличивают отклонение светораспределения от косинусного, в наибольшей же степени играют роль экранирующие решетки, сильно концентрирующие светораспределение, которое при больших защитных углах аппроксимируется высокими степенями косинуса, вплоть до четвертой и выше.

В случаях, когда светораспределение является более концентрированным, чем косинусное, относительно снижается роль «боковых» сил света в создании освещенности точки, и, при данных значениях ρ и F' , освещенность окажется меньшей, чем при косинусном све-

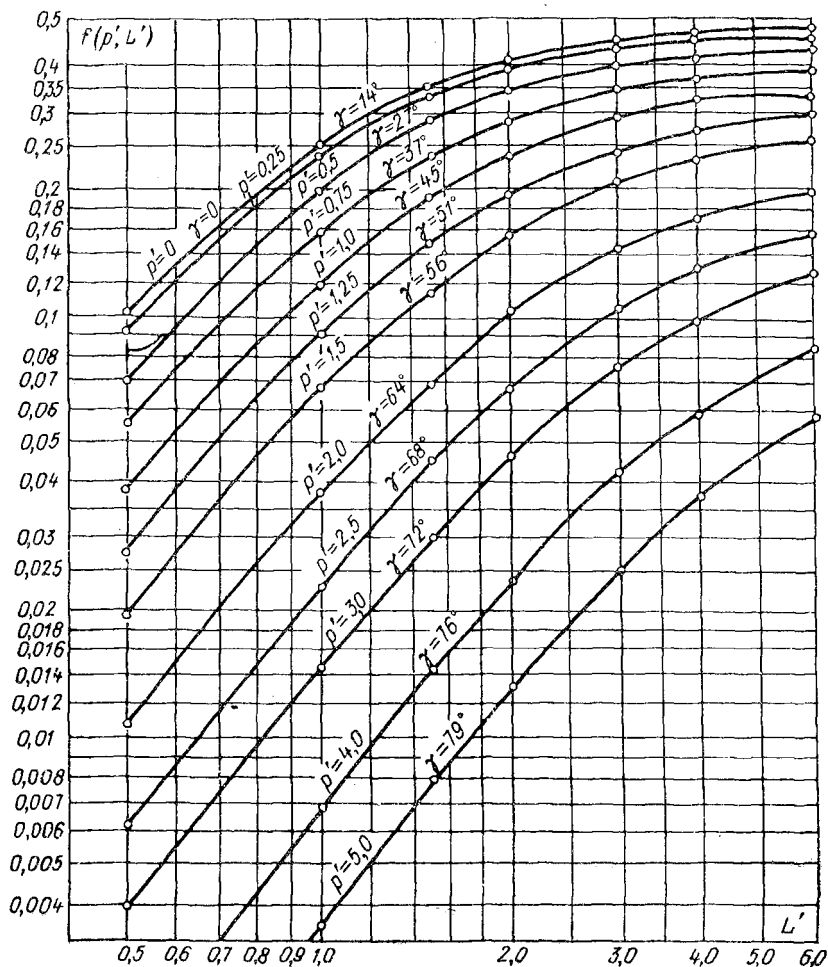


Рис. 2-22. График для расчета освещенности от вертикальной линии (косинусное светораспределение в продольной плоскости)

тораспределении, тем в большей степени, чем под большим углом виден излучатель из освещенной точки. Это снижение, в принципе, может быть учтено умножением $f(p', L')$ на коэффициент $k_m < 1$.

Надо, однако, отметить, что сказанное не свидетельствует о «неэкономичности» повышенной концентрации светораспределения: наши рассуждения даются только с точки зрения методики расчета и относятся, как сказано, к неизменным значениям I_γ и F' , между тем

как при данном F' с повышением концентрации кривой, I_v в принципе сильно возрастает.

Задача учета отклонения светораспределения от косинусного представляет не только математический, но и практический интерес и может быть решена разными путями.

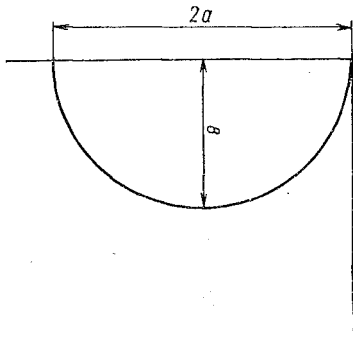


Рис. 2-23. Определение $d = b/a$ по Роуху.

В. В. Мешков приводит решение задачи для кривых, аппроксимируемых уравнением Болдырева (1-4), но для практического применения полученная им формула сложна, определение же параметров уравнения Болдырева, как отмечено, является кропотливой задачей.

Роух предлагает заменять кривые силы света эллипсами и характеризует их отношением d меньшей полуоси к большей (рис. 2-23). По его данным для открытой люминесцентной лампы $d = 0,94$, для светильника с торцами $d = 0,88$ и для светильника с решеткой $d = 0,76$. Роухом составлено интегральное выражение для определения освещенности, взамен (2-9), в которое входит d , интеграл легко берется, что дает возможность построить кривые, аналогичные нашим кривым $f(p', L')$. Для линий бесконечной длины, соответственно указанным значениям d , k_m равен 0,99, 0,95, 0,87.

Штек, как и мы, исходит из уравнения

$$I_\delta = I_v \cos^m \delta. \quad (2-19)$$

В этом случае формула (2-9) принимает вид:

$$E = \frac{I_v h}{h^2 + p^2} \int_0^{\delta_L} \cos^{m+1} \delta d\delta. \quad (2-20)$$

Интеграл берется для целых значений m ; получаемые значения k_m для линий бесконечной длины представлены на рис. 2-24, который, также, дает взаимосвязь параметров m и d . Анализ показывает, что семейство кривых $\cos^m \delta$ близко к эллипсам, отличаясь от них наиболее сильно в области больших углов, и что уравнение (2-19) лучше описывает форму кривых типовых светильников, чем уравнение эллипса. В последнем можно убедиться построением этих кривых на сетке графика 1-10. Для некоторых современных светильников значения m оказываются равными: ШОД 2,4; Од 1,35; ОДР 1,5; ПВЛ-1 и ПЛУ 1,25.

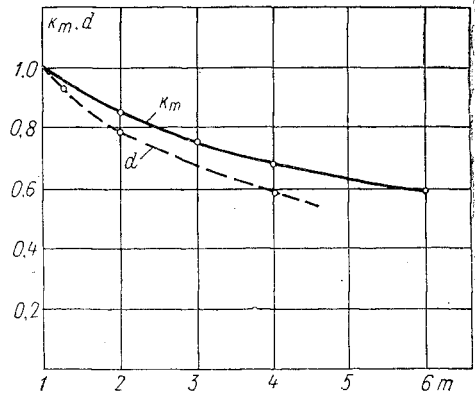


Рис. 2-24. Графики коэффициентов k_m и d .

При светораспределении, подчиняющемся выражению (2-19), для вычисления освещенности может быть использован следующий вид формулы вспомогательной функции:

$$f(p', L') = \int_0^{L'} \frac{(1 + p'^2)^{\frac{m}{2}}}{(1 + p'^2 + L'^2)^{\frac{m+3}{2}}} dL' \quad (2-21)$$

Значения определенного интеграла с помощью ЭВМ могут быть вычислены для любых, в том числе и дробных m , и для всех характерных сочетаний p' и L' . Приводимая табл. 2-6 вычислена с точностью до 1%. Строка этой таблицы для $m = 1$ содержит «обычные» значения $f(p', L')$, данные остальных строк могут рассматриваться, как произведения этих значений на k_m , и показывают, что при m , существенно превышающих единицу и при сколько-нибудь значительных L' , пренебрежение поправкой на отличие кривой от косинусной недопустимо.

Для случая вертикально расположенных линейных излучателей значения $f(p', L')$ при некосинусном светораспределении могут быть найдены непосредственным интегрированием выражения для освещенности от элемента линии, при любых m , что дает

$$f(p', L') = \cos \gamma \frac{1 - \cos^{m+1} \delta}{m+1} \quad (2-22)$$

Пользуясь и в этом случае коэффициентом k_m , мы убеждаемся, что его значения существенно ниже, чем для горизонтальных линий, так как в этом случае относительно больше роль удаленных участков линии. В частности, для линий неограниченной длины $k_m = 2/(m+1)$ и уже при $m = 2$ получаем $k_m = 0,67$.

Линейные изолуксы. Как было показано выше, относительная освещенность ε зависит от фотометрических характеристик элементов излучателя и от двух геометрических параметров, p' и L' , определяющих положение точки по отношению к излучателю. Это дает возможность для каждого типа светильника построить кривые равных значений ε в системе прямоугольных координат p' и L' . Такие графики получили условное, но ставшее общепринятым, название линейных изолукс.

Методику их построения рассмотрим на примере линейных изолукс светильника ОДР (рис. 2-25).

Заготовим сетку $p' - L'$, приняв для L' логарифмическую шкалу, так как в области больших L' изменение ε замедляется; непосредственно за значением $L' = 4$ покажем условную точку $L' = \infty$. Вспомогательные вычисления выполним по форме, указанной в табл. 2-7; значения p' , L' , γ и $f(p', L')$ заимствуем из табл. 2-6 с учетом того, что для данного светильника $m = 1,5$; I_v определим по поперечной кривой силы света светильника, причем чтобы облегчить интерполирование, построим вспомогательную кривую $I_v = f(\gamma)$. В каждой клетке табл. 2-7 верхнее число $f(p', L')$, нижнее — ε .

Умножением значений $f(p', L')$ на I_v находим ε и строим вспомогательные графики $\varepsilon = f(p')$ для всех табличных значений L' .

Значения $f(p', L')$ для расчета освещенности от линейных излучателей при различных m

p'	0	0,25	0,5	0,75	1,00	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	
γ°	0	14	27	37	45	56	64	68	72	74	76	79	
L'	m	$f(p', L')$											
0,25	1,0	0,24	0,23	0,18	0,127	0,088	0,043	0,0226	0,013	0,0080	0,0053	0,0036	0,0019
	1,25	0,24	0,22	0,176	0,127	0,088	0,043	0,0226	0,013	0,0080	0,0053	0,0036	0,0019
	1,5	0,24	0,22	0,176	0,127	0,088	0,043	0,0226	0,013	0,0080	0,0053	0,0036	0,0019
	2,0	0,24	0,22	0,175	0,126	0,088	0,043	0,0226	0,013	0,0080	0,0053	0,0036	0,0019
	4,0	0,24	0,22	0,172	0,125	0,087	0,043	0,0225	0,013	0,0080	0,0053	0,0036	0,0019
0,50	1,0	0,44	0,40	0,32	0,236	0,166	0,083	0,044	0,0255	0,0159	0,0104	0,0072	0,0038
	1,25	0,43	0,40	0,32	0,234	0,165	0,082	0,044	0,0254	0,0158	0,0104	0,0072	0,0038
	1,5	0,43	0,40	0,317	0,233	0,165	0,082	0,044	0,025	0,0158	0,0104	0,0072	0,0038
	2,0	0,423	0,39	0,313	0,23	0,163	0,0817	0,0437	0,025	0,0158	0,0104	0,0072	0,0038
	4,0	0,396	0,366	0,296	0,22	0,157	0,080	0,043	0,025	0,0156	0,0103	0,0071	0,0038
1,00	1,0	0,648	0,602	0,495	0,376	0,275	0,145	0,0806	0,0478	0,0302	0,0201	0,014	0,0075
	1,25	0,633	0,59	0,485	0,37	0,27	0,143	0,080	0,0476	0,030	0,020	0,014	0,0075
	1,5	0,62	0,576	0,476	0,363	0,267	0,142	0,0797	0,0473	0,030	0,020	0,014	0,0075
	2,0	0,593	0,553	0,456	0,35	0,26	0,14	0,0782	0,0468	0,0297	0,0199	0,0139	0,0074
	4,0	0,508	0,476	0,398	0,31	0,233	0,129	0,074	0,045	0,0288	0,0194	0,0136	0,0074

1.5	1,0	0,725	0,678	0,566	0,44	0,33	0,184	0,107	0,0653	0,042	0,0285	0,020	0,0109
	1,25	0,702	0,657	0,55	0,428	0,323	0,18	0,105	0,0646	0,0418	0,0283	0,020	0,0109
	1,5	0,68	0,64	0,534	0,417	0,315	0,178	0,104	0,064	0,0414	0,028	0,0198	0,0108
	2,0	0,64	0,60	0,506	0,397	0,30	0,171	0,10	0,0626	0,0408	0,0278	0,0196	0,0107
	4,0	0,53	0,50	0,42	0,333	0,256	0,15	0,091	0,058	0,0383	0,0264	0,0189	0,0105
2,0	1,0	0,755	0,708	0,60	0,47	0,358	0,207	0,124	0,078	0,0514	0,0353	0,0252	0,014
	1,25	0,727	0,683	0,575	0,454	0,347	0,20	0,121	0,0767	0,0508	0,035	0,025	0,014
	1,5	0,702	0,66	0,556	0,44	0,337	0,197	0,118	0,0747	0,050	0,0346	0,0248	0,014
	2,0	0,657	0,617	0,522	0,413	0,318	0,187	0,114	0,073	0,049	0,034	0,0244	0,0136
	4,0	0,532	0,50	0,425	0,334	0,263	0,159	0,10	0,0653	0,0445	0,0314	0,0229	0,013
3,0	1,0	0,775	0,73	0,617	0,49	0,38	0,227	0,142	0,0927	0,063	0,045	0,033	0,019
	1,25	0,743	0,70	0,592	0,47	0,365	0,22	0,137	0,090	0,062	0,044	0,0323	0,0187
	1,5	0,714	0,67	0,57	0,454	0,352	0,212	0,133	0,088	0,061	0,0434	0,0318	0,0186
	2,0	0,664	0,62	0,53	0,423	0,33	0,20	0,126	0,084	0,058	0,042	0,031	0,018
	4,0	0,533	0,502	0,426	0,34	0,266	0,163	0,105	0,0712	0,050	0,037	0,0276	0,0166
4,0	1,0	0,78	0,734	0,623	0,497	0,387	0,235	0,15	0,10	0,070	0,0505	0,0376	0,0224
	1,25	0,747	0,703	0,60	0,476	0,37	0,225	0,144	0,097	0,0678	0,049	0,0368	0,022
	1,5	0,717	0,675	0,573	0,458	0,356	0,217	0,14	0,094	0,066	0,048	0,036	0,0218
	2,0	0,666	0,623	0,532	0,425	0,33	0,203	0,13	0,088	0,0626	0,046	0,0345	0,021
	4,0	0,533	0,502	0,427	0,34	0,266	0,164	0,106	0,0728	0,0523	0,039	0,030	0,0185
∞	1,0	0,785	0,74	0,628	0,503	0,393	0,242	0,157	0,108	0,0785	0,0595	0,046	0,030
	1,25	0,755	0,71	0,603	0,482	0,377	0,232	0,151	0,104	0,0755	0,057	0,044	0,029
	1,5	0,725	0,685	0,58	0,465	0,363	0,224	0,145	0,10	0,0725	0,055	0,0425	0,028
	2,0	0,675	0,635	0,54	0,433	0,338	0,208	0,135	0,093	0,0675	0,051	0,0396	0,026
	4,0	0,535	0,503	0,427	0,342	0,266	0,164	0,107	0,0735	0,0535	0,0405	0,0312	0,0206

Точки этих графиков, соответствующие выбранным значениям ε , переносим на сетку окончательного графика. Перенос точек значительно облегчается, если масштаб шкалы ρ' на вспомогательных и

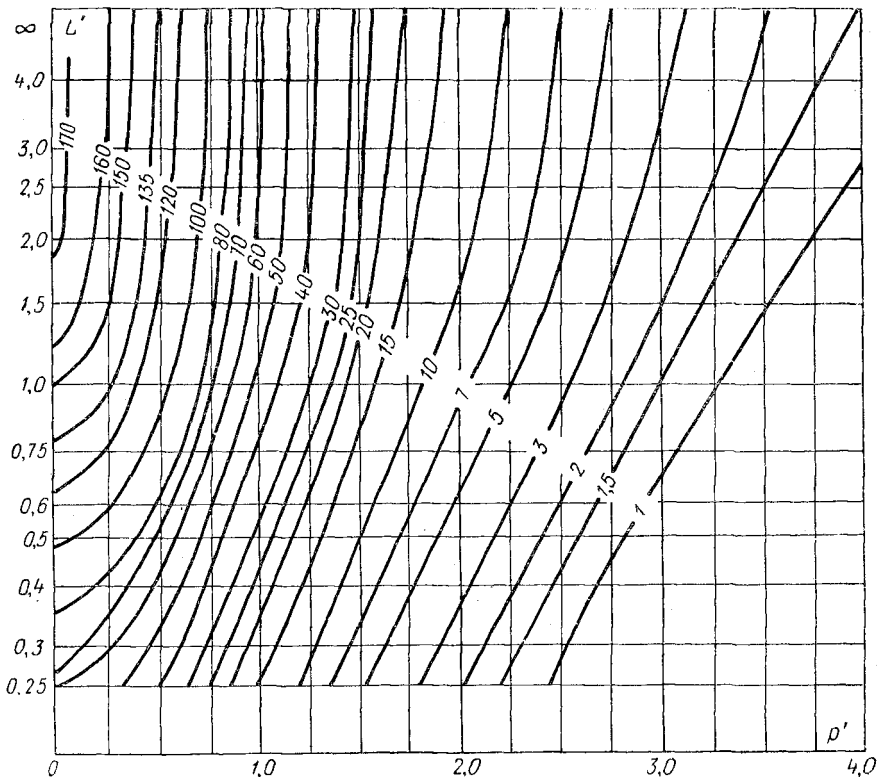


Рис. 2-25. Линейные изолюксы для светильника ОДР

на окончательном графике одинаков. Через полученные точки проводим плавные кривые. Целесообразно дополнительно построить вспомогательный график $\varepsilon = f(L')$ для $\rho' = 0$, данные для которого уже имеются в табл. 2-7. Этот график позволяет уточнить места пересечения изолюксы с осью L' .

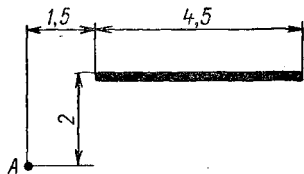


Рис. 2-26. Задание к примеру

Пример. Определим ε для точки А на рис. 2-26, считая, что ряд составлен из светильников ОДР, установленных на высоте 2 м. Дополнив линию отрезком 1,5 м до нормали, опущенной из точки А, получаем $L = 6$ м; $L' = 6 : 2 = 3$; $\rho' = 2 : 2 = 1,0$. По изолюксам рис. 2-25 находим $\varepsilon = 60$ лк. Добавленный, фактически не существующий, отрезок линии характеризуется $L' = 0,75$ и $\rho' = 1,0$; он создавал бы $\varepsilon = 38$ лк, с учетом чего окончательно получим $\varepsilon = 60 - 38 = 22$ лк.

Аналогично линейные изолюксы можно построить также для вертикальных излучателей или вертикальных поверхностей, но так как

Фрагмент вычислений для построения линейных изолок

ρ'	0	0,25	0,5	0,75
γ°	0	14	27	37
I_γ , св	246	238	223	204
L'	верхнее число — $f(\rho', L')$, нижнее число — ε			
0,25	0,24 59	0,22 52,5	0,176 39	0,127 26
0,5	0,43 106	0,40 95	0,317 70,5	0,233 47,5
1,0	0,62 152	0,576 137	0,476 106	0,363 74
4,0	0,717 176	0,675 161	0,573 128	0,458 94
∞	0,725 178	0,685 164	0,58 130	0,465 95

эти случаи более редки, то чаще ε находится непосредственным умножением $f(\rho', L')$ на I_γ . Значения $f(\rho', L')$ могут быть взяты из графика рис. 2-22 с учетом k_m .

В связи с произведенным нами уточнением значений k_m в подавляющем большинстве случаев отпадает надобность пользования ранее нами рекомендованным методом построения линейных изолок путем «наращивания». Все же кратко остановимся на этом методе, поскольку не исключены случаи, когда продольная кривая явно не подчиняется (2-19), например у светильников с экранирующими решетками из зеркальных или матовых планок.

Первоначально для элемента линии строятся условные изолоксы, как это описано в § 2-3. В дальнейшем линейный излучатель рассматривается как состоящий из ряда отрезков (рис. 2-27), длина каждого из которых в 4 раза меньше высоты, и который, как подтверждается кривыми рис. 1-4, может быть заменен точкой, помещенной в его центре. Освещенность от каждого отрезка находится по графику условных изолок, но для того, чтобы окончательно

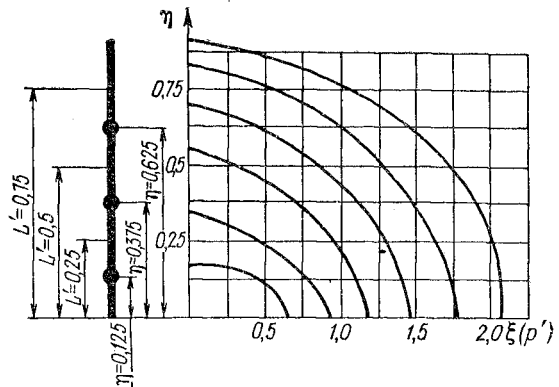


Рис. 2-27. Схема метода «наращивания»

ный график был привязан к $F' = 1000 \text{ лм/м}$, она должна быть уменьшена в 4 раза, если условные изолюксы, как обычно, построены для лампы 1000 лм.

Последующие операции схематично показаны на рис. 2-27. Первый отрезок соответствует $L' = 0,25$, а его центр по графику условных изолюкс имеет координату $\eta = 0,125$. Придавая последовательно возрастающие значения p' (что на графике условных изолюкс соответствует ξ), находим ряд значений ε , строим вспомогательный график $\varepsilon = f(p')$ и переносим его точки на сетку графика линейных изолюкс при $L' = 0,25$. Совокупность отрезков 1 и 2 дает $L' = 0,5$. Второй отрезок на графике условных изолюкс имеет $\eta = 0,375$. Определив от него освещенность при разных p' (ξ), суммируем ее с ранее найденной освещенностью от отрезка 1, строим график $\varepsilon_{1,2} = f(p')$ и переносим его точки на график линейных изолюкс при $L' = 0,5$. «Наращивание» продолжаем до значения $L' = 4$.

Остановимся в заключение на некоторых специфических случаях расчета освещения от линейных излучателей.

а. Для ряда отраслей промышленности характерны цехи, где линейные излучатели имеют очень большую протяженность и при расчетах можно во всех случаях принимать $L' = \infty$. В этих случаях целесообразно пользоваться не линейными изолюксами, а более простыми кривыми $\varepsilon = f(p')$ для $L' = \infty$, причем на одном графике могут быть нанесены кривые для нескольких типовых светильников.

Если, кроме того, расчетная высота h имеет одно или несколько типовых значений, то для каждого из них может быть рассчитана уже не относительная, а условная освещенность e и построен график $e = f(p')$. В этом случае

$$e = \frac{I_{\nu} f(p', L')}{1000h}, \quad (2-23)$$

где $f(p', L')$ определяется по табл. 2-6 для $L' = \infty$ и для p' , соответствующих данным значениям p и h .

б. При использовании линейных излучателей на малых расстояниях, в частности для местного освещения, расчетные графики можно строить только по данным непосредственных измерений, в координатных осях, определяющих взаимное положение точки и излучателя, при определенной длине последнего и, конечно, при определенном значении высоты (для вертикальной поверхности — при определенном расстоянии до этой поверхности).

в. Иногда приходится выполнять расчеты освещения при светильниках, для которых отсутствуют линейные изолюксы и ввиду единичного характера расчетов строить их заново нецелесообразно. В этих случаях ε можно определять по формуле $\varepsilon = I_{\nu} f(p', L')$, причем значения $f(p', L')$ предпочтительно определять по графику, а не по таблице, так как последняя неудобна для интерполирования. Если светораспределение в продольной плоскости существенно отличается от косинусного, то должен быть учтен коэффициент k_m , который достаточно точно может быть оценен по табл. 2-6 для близких значений p' и L' .

Линии с разрывами. До сих пор мы рассматривали линейные излучатели как непрерывные, например, образованные стыкованными люминесцентными светильниками. Если между элементами излучателя имеются незначительные разрывы, равномерно распределенные по всей его длине, то, пока эти разрывы не превышают определенной величины, расчет освещенности можно вести так же, как от сплошных линий, с той, конечно, разницей, что значение удельного потока F' должно определяться не для светящихся элементов «нетто», а для всей линии, включая и разрывы.

Когда разрывы, увеличиваясь, превысят определенный размер, то периодические изменения освещенности вдоль линии станут значительными и освещенность, рассчитанная от сплошной линии, не будет характеризовать освещенности отдельных точек.

Для установления предельной величины разрывов, при которых линию еще можно считать сплошной, нами произведены расчеты для случая $p' = 0$ (когда влияние разрывов максимально) и для

косинусного светораспределения в продольной плоскости. Линии принимались неограниченной длины, контрольные точки размещались: A — под серединой разрыва λ' , B — под серединой сплошного участка l' ; расчеты выполнялись для единичной высоты. Среднее значение освещенности принималось равным $(E_A + E_B)/2$. Погрешность в процентах от принятия линии за сплошную характеризовалась отношением $(E_B - E_A)/(E_A + E_B)$ и представлена на рис. 2-28 кривыми в функции λ' и l' . Как видно из кривых, погрешность возрастает с увеличением как λ' , так и l' , причем в большом диапазоне соотношения этих величин остается пренебрежимо малой. Если исходить из реально возможных значений l' , соответствующих наибольшим размерам светильников с люминесцентными лампами, то можно считать, что при $\lambda' = \lambda : h \leq 0,5$ погрешность во всяком случае не превышает 5%, причем она уменьшается с увеличением p' .

Таким образом, большая часть фактически встречающихся линий с разрывами может при расчете рассматриваться как непрерывные и только при относительно больших λ' разрывы должны учитываться. В этом последнем случае каждый элемент линии должен учитываться отдельно, рассматриваясь, в зависимости от значения l' , либо как отрезок линейного излучателя, либо как светящая точка.

Представляет интерес случай $l = 0$, соответствующий ряду точечных излучателей, установленных на равных расстояниях λ . В этом случае погрешность от принятия ряда за линейный излучатель не превысит 5% при $\lambda' \leq 1,0$. Это позволяет принимать за линейные излучатели такие, например, установки, как ряд прожекторов, равномерно размещенных вдоль бровки спортивной арены, особенно если это прожекторы с трубчатыми лампами, имеющие в продольной плоскости светораспределение, близкое к косинусному.

Выше было отмечено, что при линиях с разрывами удельный поток F' находится как отношение всего потока ламп в линии к ее полной, без вычета разрывов, длине. Иногда удобнее определять F' для одного «периода», т. е. как отношение потока лампы сплошного участка l к сумме $l + \lambda$. Этот способ — приближенный и дает меньшее значение F' . Можно рассчитать, что если излучатель состоит из n сплошных элементов, то отрицательная погрешность второго способа определения F' , в долях единицы, определяется выражением

$$\frac{1}{n(l/\lambda + 1)} \quad (2-24)$$

и не приводит к существенной погрешности только при $n > 10$.

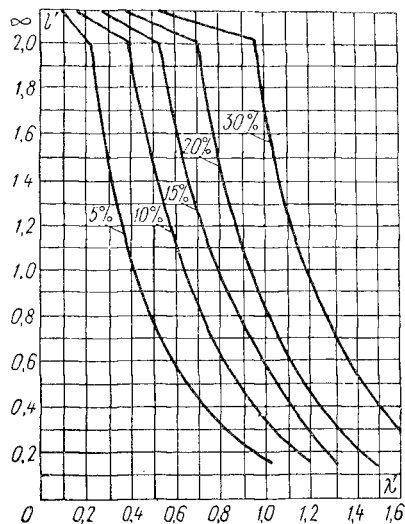


Рис. 2-28. Погрешность от замены линии с разрывами непрерывной линией

2-5. Освещенность от поверхностей

С увеличением числа измерений излучателя расчет создаваемой им освещенности прогрессивно усложняется, и в теоретической фотометрии теория расчета освещения от поверхностей занимает значительный объем. Это отчасти связано с тем, что варьируемыми в данном случае являются три группы переменных: размеры и форма излучателя, его положение по отношению к точке и фотометрические характеристики самого излучателя.

Представим себе две параллельные плоскости, площадь каждой из которых S и расстояние между которыми исчезающе мало по сравнению с их линейными размерами. Верхняя плоскость диффузно излучает, имея яркость B и светимость $R = B\pi$, нижняя плоскость — освещаемая.

При указанных условиях можно пренебречь световым потоком «рассеяния», не попадающим с верхней плоскости на нижнюю, а также спаданием освещенности у краев последней, и считать, что любая точка нижней плоскости имеет освещенность

$$E = R = B\pi. \quad (2-25)$$

Подчеркиваем принципиальный момент: в формулы для расчета освещенности от точечных источников высота h входит в квадрате, от линий неограниченной длины — в первой степени, от плоскости неограниченных размеров — в нулевой степени.

Формула (2-25) сохраняет силу для светящихся поверхностей любой формы, занимающих все пространство над освещаемой плоскостью или, иначе говоря, видимых из точек последней под телесным углом 2π .

Как правило, светящие поверхности видны из точек плоскости под телесным углом меньшим 2π и создают, соответственно, меньшую освещенность, которую можно определить как

$$E = qR = qB\pi, \quad (2-26)$$

где q — коэффициент, меньший единицы и лишь в пределе равный ей.

Задача расчета освещения от поверхностей и сводится, в основном, к определению q , которое основано на законе проекции меры телесного угла.

Окружим точку A полусферой единичного радиуса (рис. 2-29). На светящей поверхности S выделим элемент dS , который создает в точке A освещенность

$$dE = \frac{B dS \cos \beta \cos \alpha}{r^2},$$

но так как

$$\frac{dS \cos \beta}{r^2} = d\omega \text{ и } dE = B d\omega \cos \alpha,$$

то

$$E = B \int_S d\omega \cos \alpha. \quad (2-27)$$

Независимо от того, берется ли этот интеграл, ясно, что он численно равен отмеченной на рисунке площади, т. е. проекции вырезки на полусфере единичного радиуса, являющейся мерой телесного угла, под которым видна поверхность S из точки A . Что касается коэффициента q , то, поскольку площадь экваториальной плоскости равна π , то

$$q = \frac{\int_S d\omega \cos \alpha}{\pi}. \quad (2-28)$$

Простейшим является случай определения освещенности от диска (рис. 2-30). Из подобия треугольников следует, что

$$\rho = \frac{R}{\sqrt{h^2 + R^2}},$$

где ρ — радиус проекции меры телесного угла. Отсюда освещенность от диска

$$E = \frac{B\pi R^2}{h^2 + R^2}. \quad (2-29)$$

Отметим, что в случае принятия диска за точку, совпадающую с его центром, в знаменателе формулы отсутствовал бы член R^2 .

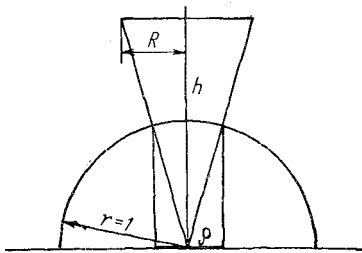


Рис. 2-30. Освещенность от диска

$$E = \frac{R}{2\pi} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + h^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} \right); \quad (2-30)$$

для вертикального прямоугольника

$$E = \frac{R}{2\pi} \left(\arctg \frac{b}{p} - \frac{p}{\sqrt{p^2 + h^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{p^2 + a^2}} \right); \quad (2-31)$$

все обозначения в формулах соответствуют указанным на рис. 2-31.

Обе эти формулы могут быть приведены к виду: $q = f(a', b')$, где $a' = a/h$ (или a/p), $b' = b/h$ (или b/p), что является основой для построения рабочих графиков.

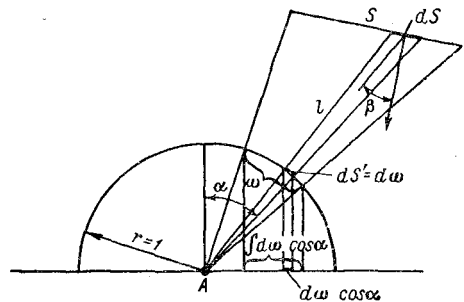


Рис. 2-29. Закон проекции меры телесного угла

Основой большинства практических расчетов являются результаты интегрирования выражения (2-27) для светящихся прямоугольников, расположенных по отношению к точке, как показано на рис. 2-31. Получаемые выражения, известные под названием формул Хигби—Левина, имеют вид:

для горизонтального прямоуголь-
ника

Дедун дает такие графики в координатных осях α' — q , строя отдельные кривые для характерных значений b' ; более удобны и приняты у нас графики, предложенные Е. С. Ратнером, представленные на рис. 2-32 и 2-33, кривые на которых соответствуют равным значениям q .

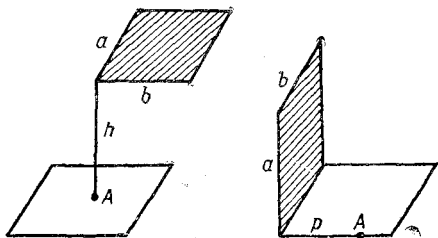


Рис. 2-31. Схемы расположения светящихся прямоугольников

Подобно тому, как это имело место в отношении линейных излучателей, при расположении прямоугольников, не соответствующем рис. 2-31, приходится их разделять на части или дополнять условными площадями. Последний прием, как более сложный, поясним на примере расчета освещенности от диффузного светового окна, расположенного по отношению к точке A , как показано на рис. 2-34. Светимость окна задана 3000 лм/м^2 .

От собственно окна — прямоугольника $bвд$ — найти непосредственно освещенность нельзя, поэтому будем рассматривать прямоугольник $авиж$, расположение которого соответствует рис. 2-31. Для получения истинного значения q надо вычесть его значения для несуществующих прямоугольников $абзж$ и $геиж$, но, чтобы q от

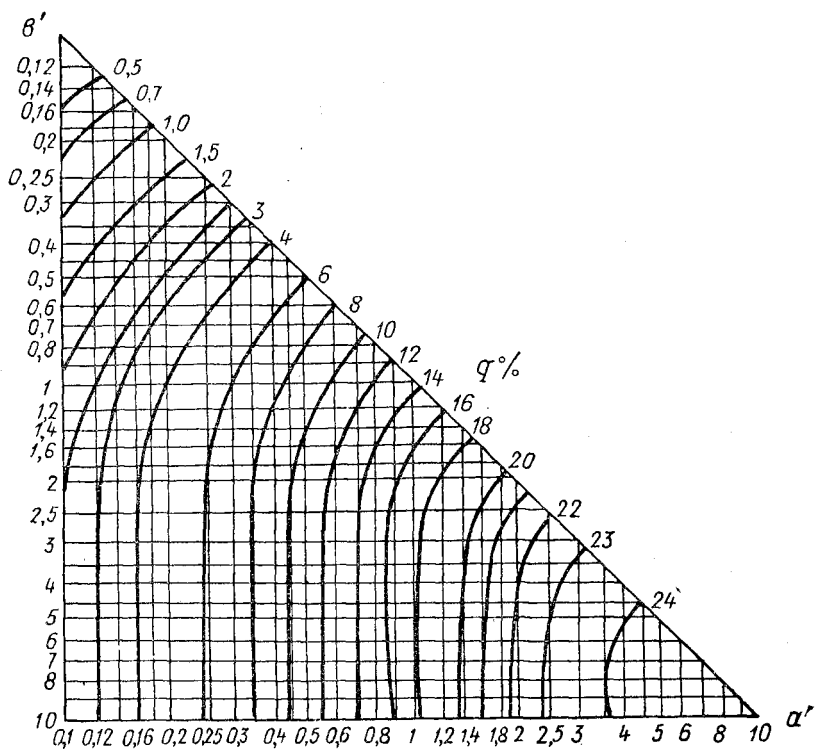


Рис. 2-32. График для расчета освещенности от горизонтального прямоугольника

прямоугольника *гдэж* не оказалось вычтенным дважды, добавить его к разности. Расчет выполняем с помощью графика рис. 2-33 и сводим в следующую табличку:

Прямоугольник	a'	b'	q
<i>авжж</i>	1,17	1,33	+7,6
<i>абэж</i>	1,17	0,67	-5,2
<i>гвиж</i>	0,50	1,33	-2,3
<i>гдэж</i>	0,50	0,67	+1,7
			1,8%

Искомая освещенность $E = qR = 0,018 \cdot 3000 = 54$ лк.

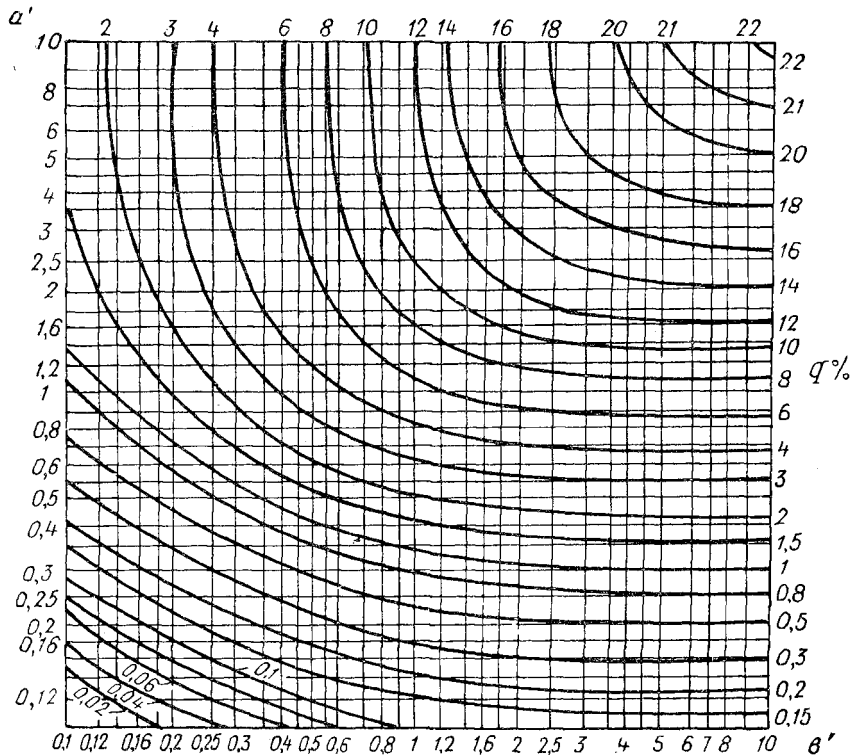


Рис. 2-33. График для расчета освещенности от вертикального прямоугольника

Интересны и, можно сказать, изящны графики, предложенные А. А. Гершуном для определения освещенности от поверхностей произвольной формы. Рассмотрим построение графика для случая горизонтально расположенного излучателя.

Окружим точку, в которой ищется освещенность, полусферой радиуса R . Поставим себе задачей разделить касательную горизонтальную поверхность $\Gamma-\Gamma$ (рис. 2-35) на $m \times n$ элементов, каждый из которых, будучи светящим, одинаково освещает точку A , т. е. имеет одинаковую меру проекции телесного угла. Для этого разделим экваториальную плоскость полушара на n равных секторов, проведя радиусы через $360: n$ градусов, и m равных по площади колец. Ра-

диус ρ_k k -го кольца определится из условия $\rho_k^2/R^2 = k/m$, откуда $\rho_k = R\sqrt{k/m}$. То же кольцо, будучи перенесено на поверхность полушара и затем центрально спроецировано на плоскость $\Gamma-\Gamma$, должно иметь радиус r_k , определяемый из условия

$$\frac{r_k^2}{r_k^2 + R^2} = \frac{\rho_k^2}{R^2},$$

откуда

$$r_k = \frac{R\rho_k}{\sqrt{R^2 - \rho_k^2}}.$$

В результате такого построения площадь плоскости $\Gamma-\Gamma$ окажется разделенной на $m \times n$ равно освещающих точку элементов, из которых замкнутые контуры имеют $n(m-1)$ элементов, так как для $k=m$ оказывается $r = \infty$. На рис. 2-36 показана половина

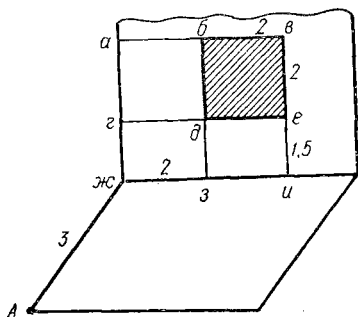


Рис. 2-34. К примеру расчета

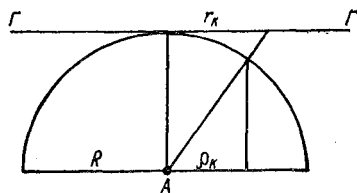


Рис. 2-35. К построению графика Гершуна

плоскости $\Gamma-\Gamma$, на которой выполнено построение для $m \times n = 800$ и $R = 25$ мм. В принципе аналогично строится график равноосвещающих элементов на вертикальной плоскости (рис. 2-37).

При работе с графиками Гершуна надо перечертить план той плоскости, в которой расположен излучатель, в таком масштабе, чтобы h или p (см. рис. 2-31) изображались отрезком, равным R . Так, при работе с приводимыми графиками и если $h = 4$ м, масштаб плана должен быть $1 : (4000/25) = 1 : 160$. После этого проекция контрольной точки на плоскость расположения излучателя совмещается с полюсом графика и подсчитывается, сколько элементов занимает изображение излучателя (z). Тогда $q = z/(m \times n)$.

Используем рис. 2-37 для решения уже рассмотренной задачи со световым окном (рис. 2-34). Так как $p = 3000$ мм, то план стены с окном должен быть вычерчен в масштабе $1 : 120$. Контур светового окна, вычерченного в таком масштабе, показаны штриховой линией на рис. 2-37. Он занимает 13 элементов и $q = 13 : 800 = 0,016$, откуда $E = 0,016 \cdot 3000 = 48$ лк.

Расхождение с ранее полученным результатом характеризует не принципиальную, но практическую погрешность графиков при их относительно мелком масштабе, особенно сказывающуюся при небольших (как в данном случае) размерах излучателя. Любопытно отметить, что приняв окно за точечный источник, расположенный в его центре, мы по формуле (2-1) нашли бы освещенность 49 лк.

В связи с выполненным примером уместно напомнить, что отнюдь не обязательно каждую светящую поверхность рассматривать как излучатель, имеющий два измере-

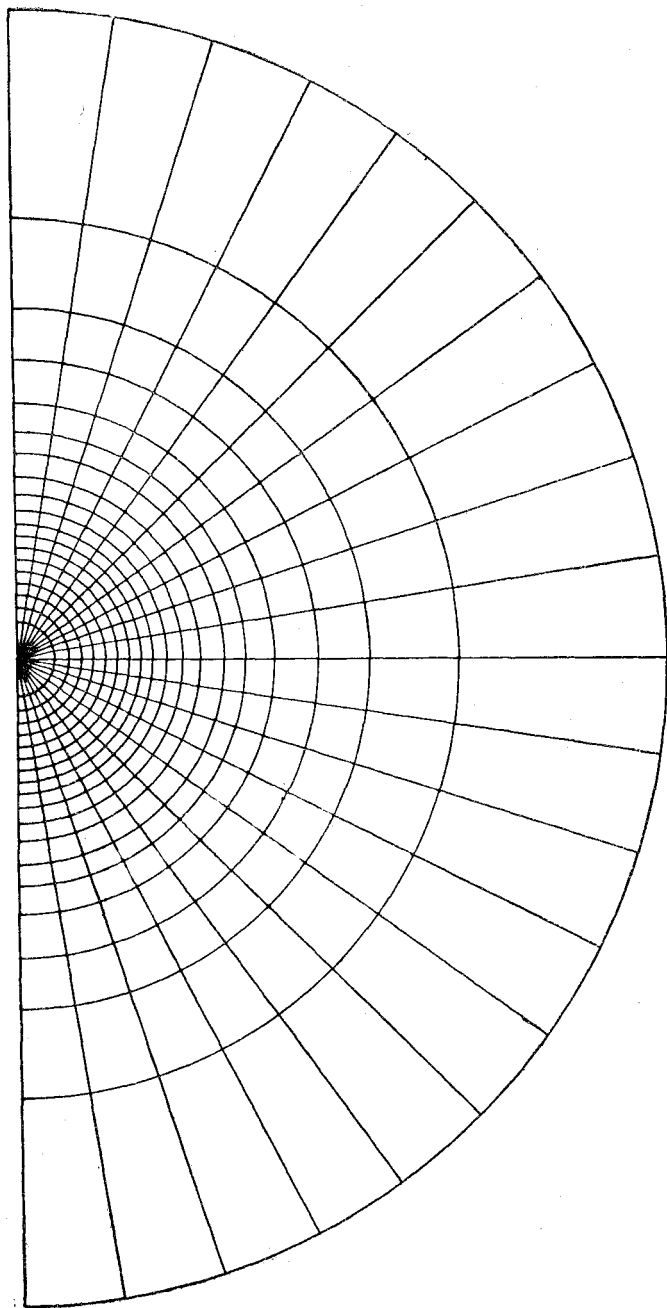


Рис. 2-36. Сетка равноосвещающих элементов на горизонтальной плоскости, $R = 25$ мм, $m = 800$ (показана половина всего графика)

ния, тем более, что часто и светотехнические характеристики подобных излучателей известны лишь приближенно. Очень часто при расчете освещения светящие поверхности могут быть либо заменены точечными излучателями, либо разделены на ограниченное число таких излучателей.

Замену светящей поверхности точкой можно считать оправданной, если наибольший из линейных размеров излучателя не превосходит, примерно, 0,3 его расстояния до контрольной точки.

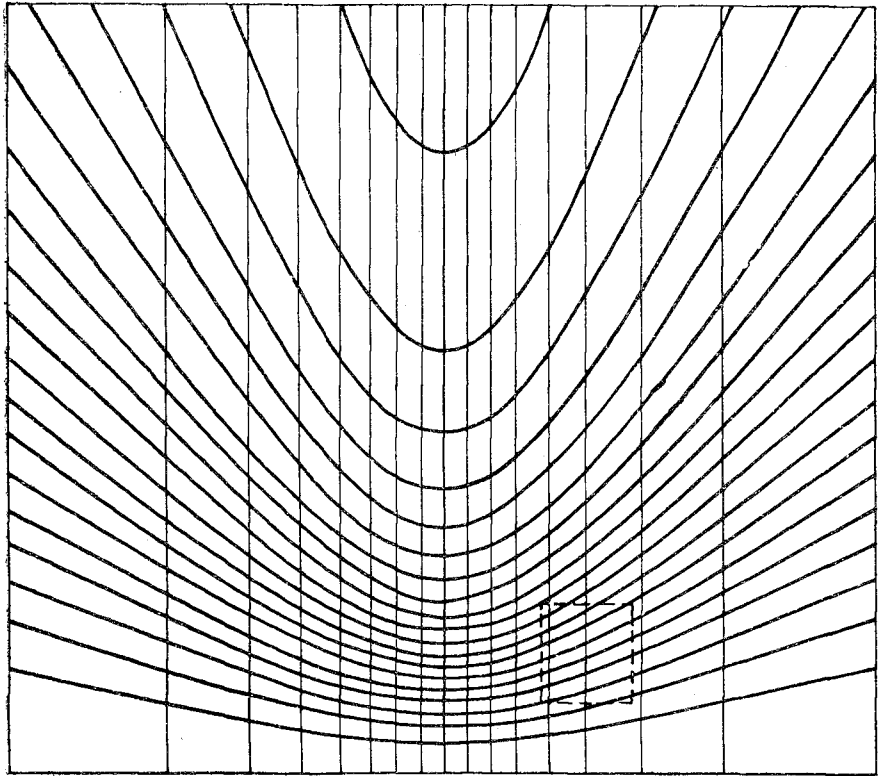


Рис. 2-37. Сетка равноосвещающих элементов на вертикальной плоскости, $R = 25$ мм, $mn = 800$

Если излучатели могут быть приняты за диффузные, то их сила света определяется по формуле

$$I = BS \cos \alpha, \quad (2-32)$$

где B — яркость излучателя, nt , S — его площадь, m^2 и α — угол между нормалью к поверхности излучателя и направлением к контрольной точке.

Излучатели с известным, но не косинусным светораспределением могут быть в некоторых случаях разделены на отдельные полосы, рассматриваемые как линейные излучатели.

В § 2-4 мы привели данные, достаточные для расчета освещенности от полос любого светораспределения, число же отдельных полос, на которые следует, например, расчленить потолок, выполненный из экранирующих решеток и при соблюдении условия, чтобы ширина каждой полосы не превышала 0,3 расчетной высоты, всегда будет ограниченным.

При массовом выполнении подобных расчетов не представляет особого труда с помощью метода наращивания (см. § 2-4, с той разницей, что в данном случае наращивание производится по ширине, а не по длине) построить график изолюкс на условной плоскости, приняв за координаты отношения к высоте длины и ширины излучателя. Точка определения освещенности предполагается совмещенной с проекцией одной из вершин излучателя; данные должны быть отнесены к светимости последнего 1000 лм/м^2 .¹

2-6. Освещенность негоризонтальных плоскостей и освещенность от наклонных излучателей

Расчет освещения наклонных и, как частный случай, вертикальных поверхностей приобретает в последнее время все большее значение, так как осознается роль освещения этих поверхностей и для зрительного процесса, и для создания в помещении определенной световой обстановки. К наклонной установке излучателей приходится прибегать очень часто в силу самых разных причин.

Методически наиболее подробно разработан расчет освещения горизонтальных поверхностей и для этого случая предназначается большая часть расчетных графиков и таблиц. Поэтому определение освещенности наклонных поверхностей часто начинают с определения освещенности в той же точке пространства, но на проведенной через нее горизонтальной плоскости. Найденная на этой плоскости освещенность E умножается затем на переходный коэффициент ψ .

Нахождение коэффициента ψ основывается на законе, устанавливающем соотношение освещенностей в общей точке пересекающихся плоскостей. Из рис. 2-38, видно, что освещенность точки A в плоскости 1 есть $I \cos \alpha_1 / r^2$, а той же точки в плоскости 2 — $I \cos \alpha_2 / r^2$. Отсюда

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{h_1}{h_2}. \quad (2-33)$$

Таким образом, освещенности в данной точке пространства, рассматриваемой поочередно как принадлежащая двум плоскостям, находятся в том же соотношении, как высоты установки излучателя над соответствующей плоскостью.

В дальнейшем освещенности горизонтальных, наклонных и вертикальных плоскостей мы будем отмечать индексами, соответственно, «г», «н», и «в».

В случае освещения вертикальных плоскостей (рис. 2-39) из (2-33) следует, что в общем случае (точка B) $\psi = p/h$, для точки же A , кроме того, $\psi = \operatorname{tg} \alpha$.

На рис. 2-40 показаны два характерных положения наклонной плоскости и определена «высота» установки светильника над этой плоскостью. Используя и в этом случае (2-33) и обобщая оба положения наклонной плоскости, получим

$$\psi = \cos \Theta \pm \frac{p}{h} \sin \Theta. \quad (2-34)$$

¹ В недавнее время автором предложен простой способ построения измерительных номограмм Гершуна для всех случаев, когда действительно выражение (2-19), что решает задачу расчета освещенности от поверхностей произвольной формы с некосинусным светораспределением, см. стр. 164.

Знак минус в этой формуле соответствует, как видно из рисунка, такому положению наклонной плоскости, когда ее освещенная сторона не видна из проекции излучателя на горизонтальную плоскость. Угол Θ отсчитывается от неосвещенной стороны наклонной плоскости и может быть как меньше, так и больше 90° .

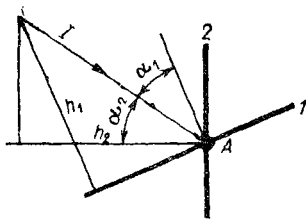


Рис. 2-38. Освещенность общей точки двух плоскостей

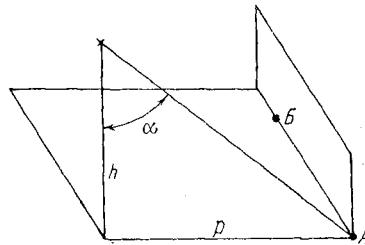


Рис. 2-39. Освещенность вертикальной плоскости

Тот факт, что при данном Θ значение ψ есть линейная функция p/h , дал возможность Е. Н. Яковлеву построить простой график для определения ψ (рис. 2-41). Штриховые прямые на графике соответствуют знаку минус в (2-34).

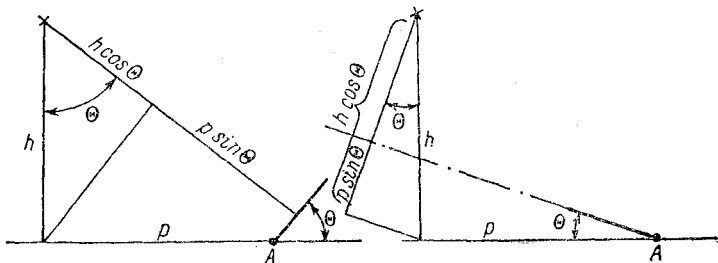


Рис. 2-40. Освещенность наклонной плоскости

Имея, таким образом, возможность простого определения ψ , всегда можем вычислить

$$E_n = \psi E_r \text{ или } E_b = \psi E_r. \quad (2-35)$$

Пример. Определим, например, условную освещенность от светильника типа СО в точке А наклонной плоскости, расположение которой показано на рис. 2-42, и считая, что точка удалена на 3 м за плоскость чертежа (т. е. за плоскость ph). В данном случае $d = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4,25$ м, и по графику рис. 2-8 при таком значении d и при $h = 4$ м находим $e_r = 4,8$ лк. При $p/h = 0,75$ и пользуясь штриховыми прямыми рис. 2-41 находим $\psi = 0,49$ и $e_n = 4,8 \cdot 0,49 = 2,35$ лк.

Существенно, что ψ имеет одинаковое значение для всего ряда светильников, если ось ряда параллельна линии пересечения наклонной и горизонтальной поверхностей. При этом последнем условии через ψ может быть определена освещенность и от линейного излучателя.

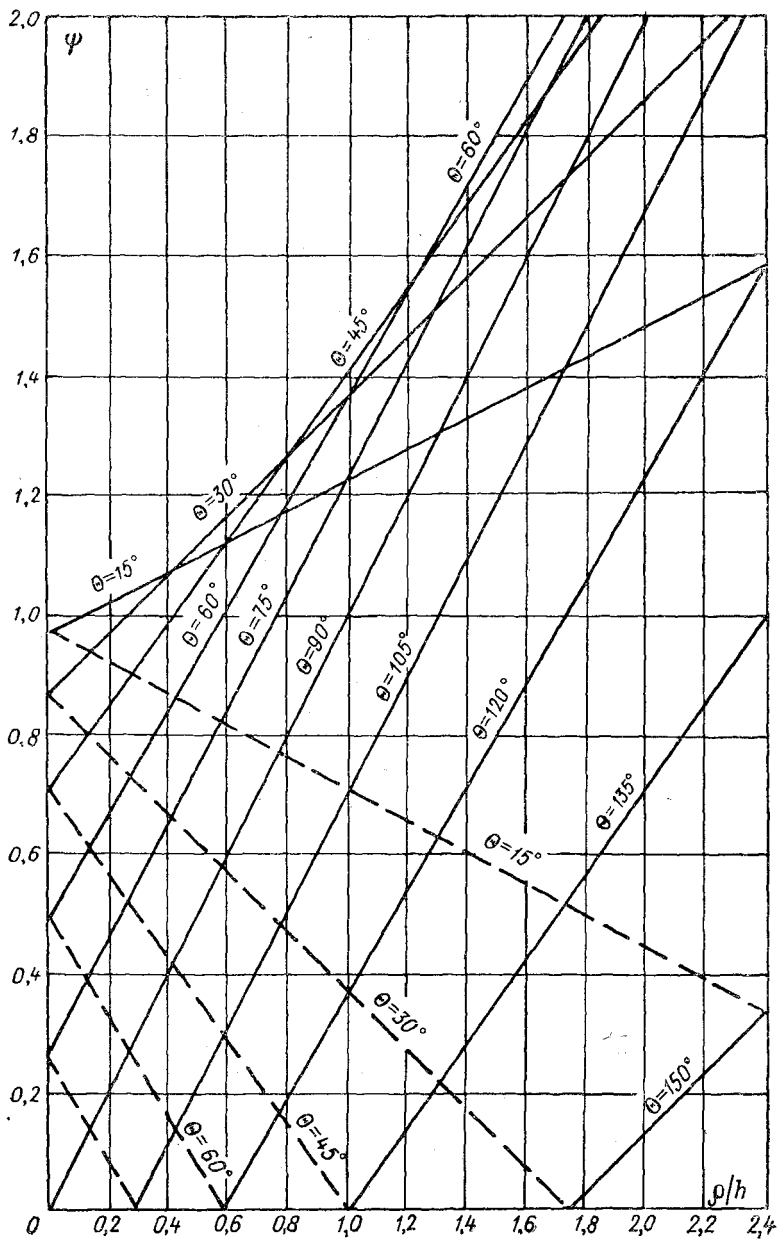


Рис. 2-41. График для определения ψ

При ином расположении наклонной плоскости по отношению к линейному излучателю, а также для определения освещенности наклонных плоскостей от излучателей двух измерений, нередко предлагаются сложные, малопригодные для практического использования выражения. Однако задача имеет и очень простое решение, притом универсальное в том отношении, что оно пригодно и для точечных, и для линейных излучателей, и для светящихся поверхностей при любом характере светораспределения.

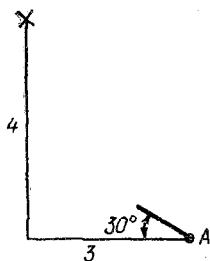


Рис. 2-42. К примеру расчета

Предположим сначала, что левая сторона наклонной плоскости, показанной на рис. 2-43, освещается группой точечных излучателей. Определенную от каждого из них горизонтальную освещенность надо умножить на коэффициент ψ по (2-34), причем для излучателей 1—3 второй член формулы войдет со знаком плюс, а для излучателей 4—5 — со знаком минус. Излучатели 6—7 данную поверхность не освещают. Очевидно,

$$E_n = E_{r1} \left(\cos \Theta + \frac{p_1}{h} \sin \Theta \right) + E_{r2} \left(\cos \Theta + \frac{p_2}{h} \sin \Theta \right) + \\ + E_{r3} \left(\cos \Theta + \frac{p_3}{h} \sin \Theta \right) + E_{r4} \left(\cos \Theta - \frac{p_4}{h} \sin \Theta \right) + \\ + E_{r5} \left(\cos \Theta - \frac{p_5}{h} \sin \Theta \right)$$

или, учитывая что все вторые члены слагаемых есть составляющие вертикальной освещенности,

$$E_n = E_r \cos \Theta + (E_{в. л} - E_{в. п}) \sin \Theta. \quad (2-36)$$

Формула не изменится, когда отдельные точечные излучатели сольются в линейный излучатель или в поверхность, любым образом ориентированные, т. е. она является вполне универсальной.

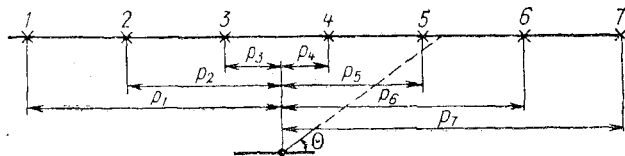


Рис. 2-43. Общий случай освещения наклонной плоскости

Итак, чтобы найти освещенность любой наклонной плоскости, надо определить горизонтальную освещенность в той же точке пространства, разность между вертикальными освещенностями в этой точке с освещаемой и с противоположной сторон наклонной плоскости и затем выполнить операции, указанные в (2-36). При определении всех составляющих освещенности должны учитываться

только те излучатели или их участки, которые фактически участвуют в освещении данной стороны плоскости, т. е. на рис. 2-43 лежащие левее штриховой линии.

Проверим достаточность приведенных материалов для определения освещенности как угодно расположенной плоскости. Все возможные положения плоскости по отношению к горизонтальной линии (все нижесказанное может быть повторено и для плоскости) исчерпываются 7 случаями, показанными на рис. 2-44. Для плоскостей 1 и 4 освещенность может быть рассчитана непосредственно по формулам и графикам § 2-4. Освещенность плоскостей 2 и 3 может быть получена умножением освещенности плоскости 1 на ψ . Освещенность плоскости 5 может быть найдена по формуле (2-36), все составляющие которой определимы. Относительно труднее найти освещенность плоскости 6; для этого вводим в рассмотрение вспомогательные плоскости $6a$ — ус-

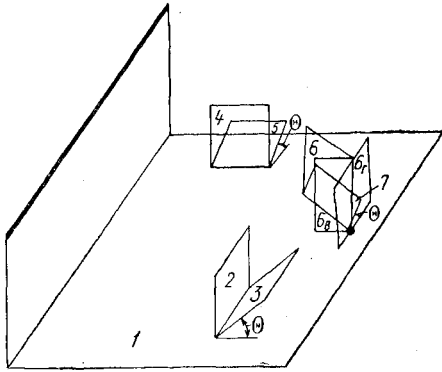


Рис. 2-44. Различные положения освещаемых плоскостей

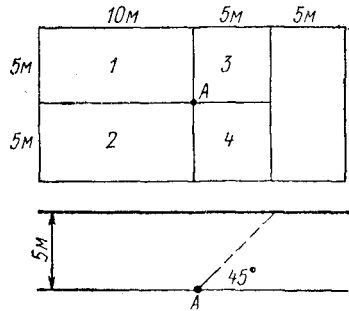


Рис. 2-45. К примеру расчета

ловно горизонтальную и $6a$ — условно вертикальную. Освещенности этих плоскостей определимы, а через них по формуле (2-36) находится и освещенность плоскости 6. Зная эту последнюю освещенность и освещенность плоскости 1, переходим к плоскости 7.

Пример. В качестве примера пользования формулой (2-36) определим коэффициент освещенности q (см. 2-26) для точки A в плоскости, наклоненной под углом 45° , освещаемой плоскостью, показанной в плане и на разрезе на рис. 2-45. В ее освещении участвуют прямоугольники 1, 2, 3 и 4. Определяя отношения их сторон к высоте и пользуясь рисунками 2-31, 2-32, 2-33, находим:

$$q_{r1} = q_{r2} = 0,17; \quad q_{r3} = q_{r4} = 0,135; \quad q_r = \sum q = 0,61; \quad q_{b1} = q_{b2} = 0,095;$$

$$q_{b3} = q_{b4} = 0,06;$$

$$q_n = 0,61 \cdot 0,71 + (0,19 - 0,12) \cdot 0,71 \approx 0,48.$$

В предшествующем изложении мы уже пользовались приемом, который теперь обобщим, и который можно назвать обращением условий задачи.

Речь идет о том, что любую пространственную схему освещения можно, если это облегчает расчет, повернуть таким образом, чтобы освещаемая поверхность оказалась горизонтальной и, соответственно, изменили бы свое положение излучатели.

Часто в практике возникает необходимость расчета освещенности от светильников круглосимметричного светораспределения, накло-

ненных к вертикали на угол Θ (рис. 2-46). Основным затруднением является здесь определение угла γ , по которому находится сила света светильника. Б. А. Гольдштейном дается следующее решение этой задачи.

Через контрольную точку A проводим плоскость, перпендикулярную оси светильника. Из рис. 2-46 видно, что

$$\cos \gamma = \frac{OB}{OA} = \frac{h \cos \Theta + p \sin \Theta}{h/\cos \alpha} = \psi \cos \alpha. \quad (2-37)$$

Это дает возможность построить график $\gamma = f\left(\psi, \frac{d}{h}\right)$, так как угол α проще всего определить по его тангенсу. Если масштабы обеих осей этого графика принять такими же, как графика для определения ψ (рис. 2-41), то оба графика можно совместить, или же, выполнив график для определения γ на кальке, накладывать его при пользовании на график ψ .

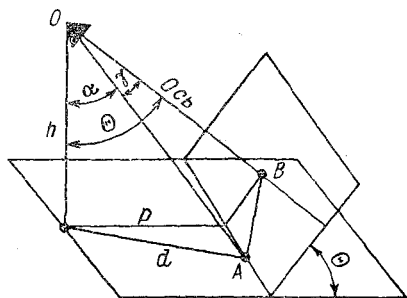


Рис. 2-46. Наклонные светильники

Для такого накладывания предназначен график рис. 2-47. Пользование совмещенными графиками производится следующим образом: от значения p/h на оси абсцисс поднимаемся до прямой, соответствующей данному Θ , и от точки пересечения с этой прямой движемся вправо, до ординаты, соответствующей данному d/h , где и прочитываем угол γ , при необходимости интерполируя между ближайшими кривыми.

Пример. Пусть $\Theta = 60^\circ$, $h = 5$ м, $p = 3$ м и $d = 4$ м. Поднимаясь по совмещенному графику от абсциссы $p/h = 0,6$ до прямой $\Theta = 60^\circ$, перемещаемся вправо до ординаты, соответствующей $d/h = 0,8$ и находим $\gamma = 35^\circ$.

Когда γ определено, то по кривым силы света данного светильника может быть найдена сила света, для определения же условной освещенности рекомендуется пользоваться пространственными изолуксами, построенными для условного светильника, имеющего по всем направлениям силу света 100 св.

Если тот или иной светильник часто устанавливается с наклоном, то для определения от него освещенности Б. А. Гольдштейн предлагает дальнейшее развитие своего построения. Учтем, что каждая кривая на графике 2-47 для данного светильника соответствует определенному значению силы света, т. е. является изосвечой, и что каждому значению d/h соответствует определенное значение $\cos^3 \alpha$. Это дает возможность на сетке графика, подобного 2-47, нанести вместо кривых равных значений γ изолуксы относительной освещенности. Для их построения задаемся последовательно возрастающими значениями d/h , для каждого из этих значений вычисляем $\varepsilon = I \cos^3 \alpha$ для нескольких значений ψ , строим вспомогательные кривые $\varepsilon = f(\psi)$ и переносим их точки на сетку графика на рис. 2-47.

В практике наряду со способом Гольдштейна, а особенно при отсутствии для данного светильника готовых изолукс, оправдало себя непосредственно определение освещенности от наклонных све-

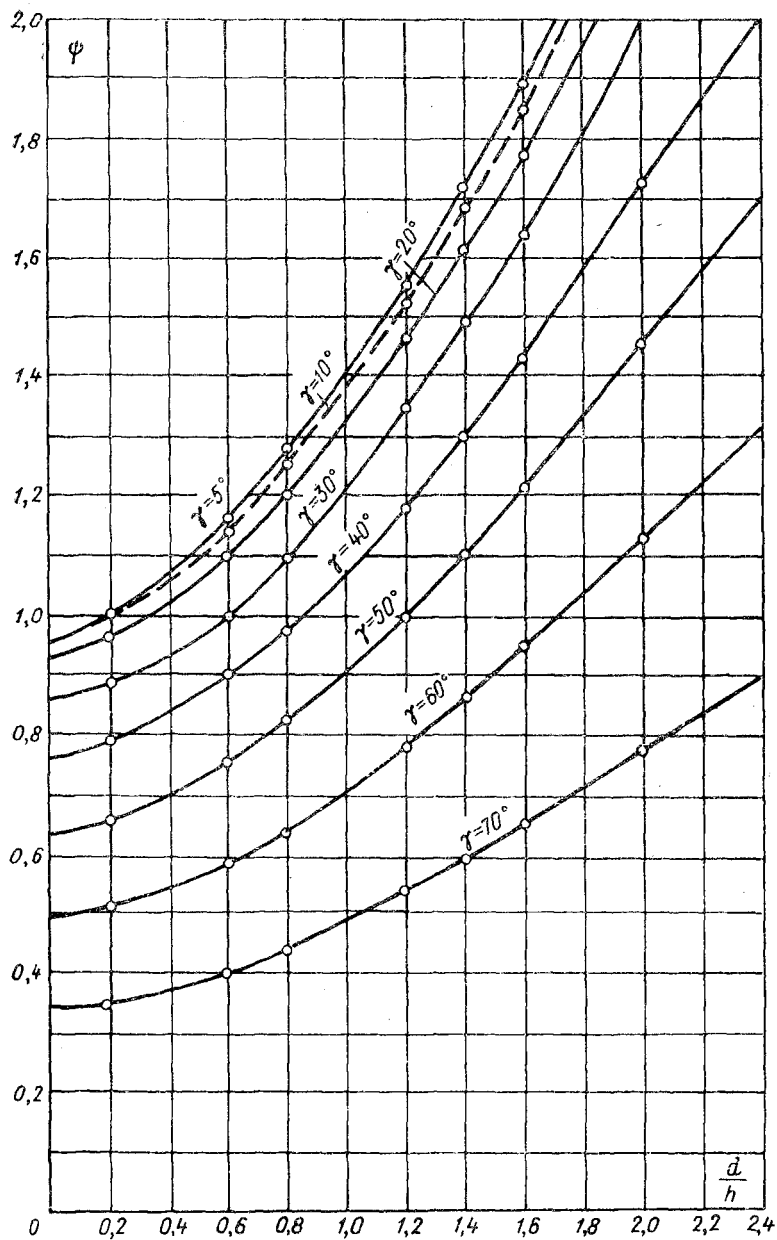


Рис. 2-47. График для определения γ

тильников, основанное на обращении условий задачи. Ход расчета в этом случае поясним на конкретном примере (рис. 2-48).

Пример. Ряд светильников «Универсаль» расположен и наклонен, как показано на рис. 2-48 в плане и на разрезе. Требуется найти условную освещенность точки A с учетом двух ближайших светильников. Проводим через A плоскость, перпендикулярную оси светильника. Эту плоскость рассматриваем как условно горизонтальную, по отношению к которой светильники установлены без наклона. Высоту светильников над этой плоскостью обмеряем по масштабу, в данном случае $OB = 6$ м. Расстояние $d = \sqrt{AB^2 + BC^2} = \sqrt{2,3^2 + 3^2} = 3,8$ м, причем AB находим обмером, а $BC = L/2$. При найденных таким образом высоте и расстоянии по пространственным изолюксам светильника «Универсаль» (см. любой справочник по проектированию) находим $e = 3,3$ лк, а от двух светильников — $6,6$ лк. Чтобы перейти от

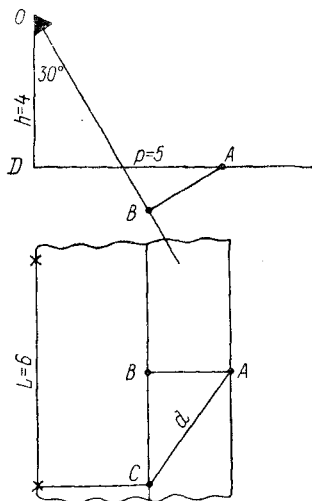


Рис. 2-48. К примеру расчета

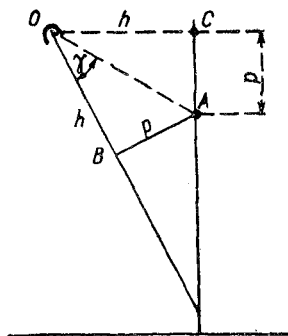


Рис. 2-49. Освещение наклонными линейными излучателями

плоскости AB к действительно горизонтальной плоскости AD , надо умножить условную освещенность на отношение OD/OB , что дает окончательный результат $6,6 \cdot 4/6 = 4,4$ лк.

Рассмотрим еще один характерный случай, а именно освещение вертикальной плоскости рядом наклонных линейных излучателей (рис. 2-49).

При наличии для элементов излучателя линейных изолюкс проводим плоскость, перпендикулярную главной продольной плоскости излучателей, и с помощью линейных изолюкс определяем e точки A в функции $r = AB$, $h = OB$ и длины излучателей L . Для перехода от относительной освещенности к фактической [см. (2-15)] в качестве h учитываем OB , переход к освещенности в плоскости AC производим умножением на $\psi = OC/OB$.

При отсутствии линейных изолюкс целесообразна другая схема расчета (штриховая линия на рис. 2-49). Плоскость AC считаем горизонтальной; принимая $h = OC$ и $r = AC$, находим f (r' , L') и умножая его на I_v получаем e . Переход к действительной освещенности производим, как и в первом варианте, по формуле (2-15), считая $h = OC$.

2-7. Освещенность от прожекторов

Методика расчета освещенности от прожекторов определяется тремя характерными особенностями: светораспределение почти всех прожекторов не является круглосимметричным, но чаще всего имеет две плоскости симметрии; прожекторы, как правило, устанавливаются наклонно; зависимость силы света от угла выражена столь резко, что должна быть учтена с повышенной точностью.

Практически важная и математически интересная задача расчета освещенности от прожекторов различно решалась довольно многочисленными авторами. Мы ограничиваемся описанием принятого в большинстве проектных организаций способа расчета, предложенного Р. А. Сапожниковым и дополненного автором.

По этому способу в качестве исходной характеристики прожектора принимается график изолюкс на условной плоскости, перпендикулярной оси прожектора и удаленной от него на 1 м (в некоторых других способах расчета используются так или иначе построенные графики изосвечей). В отношении этого графика и методики его построения можно повторить все, сказанное в § 2-3 относительно графика условных изолюкс, со следующими дополнительными замечаниями.

а. На расстоянии 1 м луч прожектора еще далеко не сформирован и фактически измеренная на этом расстоянии освещенность, конечно, не совпала бы с рассчитанной и показанной на графике, который в этом отношении носит условный характер.

б. Если (что бывает редко) светораспределение прожектора круглосимметрично, то график изолюкс может быть построен для одного квадранта, самые же изолюксы являются дугами окружностей. При светораспределении, имеющем две плоскости симметрии, график занимает также один квадрант, но изолюксы уже не являются окружностями; при наличии одной плоскости симметрии необходим двухквадрантный график, при отсутствии плоскостей симметрии — четырехквадрантный.

в. Применительно к прожекторам плоскость, проходящая через световой центр и ось η , называется горизонтальной, хотя при наклоне прожектора она также становится наклонной; такая же плоскость, проходящая через ось ξ , называется вертикальной и всегда остается таковой.

г. При прожекторах с трубчатыми лампами, имеющих цилиндрические отражатели (подразумевается цилиндр в математическом смысле этого понятия, а отнюдь не только круговой), кривые силы света в плоскостях различных «книжных листов» с достаточной точностью подобны и построение изолюкс на условной плоскости можно вести так же, как для светильников с трубчатыми лампами (см. § 2-3). В остальных случаях, в частности при прожекторах с лампами накаливания и лампами ДРЛ, такое подобие не гарантируется. При незначительной асимметрии светораспределения изолюксы можно строить как эллипсы по двум полуосям, в остальных случаях — на основе данных о светораспределении также в промежуточных плоскостях.

д. В отличие от условных изолюксы для светильников изолюксы прожекторов на условной плоскости строятся не для лампы 1000 лм, а для ламп номинальной для данного прожектора мощности. Сохраняя здесь принятый в литературе термин «относительная освещенность» мы, строго говоря, должны считать его неточным.

Пусть прожектор установлен на высоте h и его ось наклонена к горизонту на угол Θ (рис. 2-50).

Требуется найти освещенность E точки M горизонтальной плоскости с координатами x и y . На том же луче лежит точка m услов-

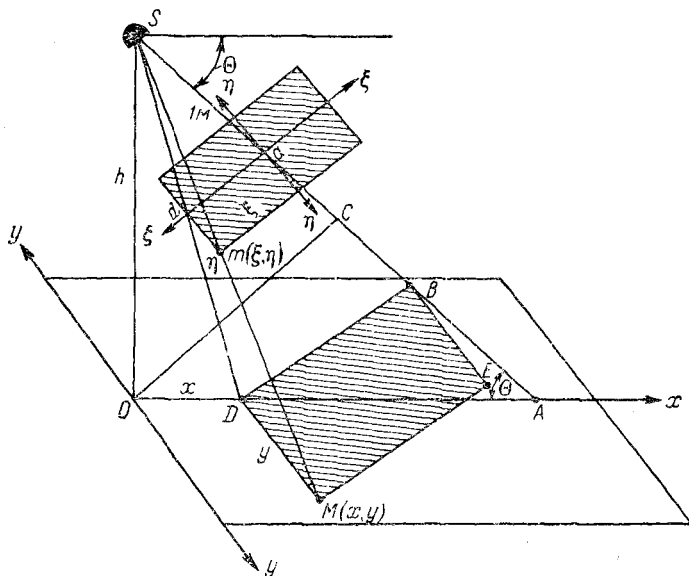


Рис. 2-50. Освещенность от прожектора

ной плоскости, с координатами ξ и η , освещенность которой обозначим ϵ . Заметим, что координатные оси на условной и горизонтальной плоскостях находятся в определенном соответствии: ось y параллельна оси η ; ось x является проекцией оси ξ .

Проведем через M плоскость $MDBE$, перпендикулярную оси прожектора; освещенность точки M в этой плоскости обозначим E_n . Обозначая SB через r , получим $E_n/\epsilon = 1/r^2$, и используя теорему об освещенностях в общей точке двух плоскостей, имеем

$$\frac{E}{E_n} = \frac{h}{r} \text{ и } E = \frac{\epsilon h}{r^3}. \quad (2-38)$$

Из подобия треугольников Sdm и SDM , а также Sda и SDB находим

$$\frac{y}{\eta} = \frac{DS}{dS} = \frac{BS}{aS} = \frac{r}{1},$$

откуда

$$y = \eta r. \quad (2-39)$$

Из подобия тех же треугольников Sda и SDB получаем

$$\frac{\xi}{1} = \frac{DB}{r} = \frac{DA \sin \Theta}{r},$$

но так как

$$DA = OA - x = h \operatorname{ctg} \Theta - x,$$

то окончательно

$$\xi = \frac{h \cos \Theta - x \sin \Theta}{r}. \quad (2-40)$$

Наконец,

$$r = SC + CB = h \sin \Theta + x \cos \Theta. \quad (2-41)$$

Полученные соотношения дают возможность найти все искомые величины по заданным.

Для упрощения расчетов нами предложено ввести новые переменные $x' = x/h$ и $\rho = r/h$, после чего формулы (2-38) — (2-41) примут следующий вид:

$$E = \frac{\varepsilon}{\rho^3 h^2} \text{ или } \varepsilon = E \rho^3 h^2; \quad (2-42)$$

$$y = \eta \rho h; \quad (2-43)$$

$$\xi = \frac{\cos \Theta - x' \sin \Theta}{\rho}; \quad (2-44)$$

$$\rho = \sin \Theta + x' \cos \Theta. \quad (2-45)$$

При вычислении ξ по формуле (2-44) знак не играет роли, так как любое направление осей ξ и η мы можем считать положительным. Вместе с тем в случае, когда график изолукс на условной плоскости имеет верхний и нижний квадранты, должно быть обращено внимание на то, что при малых x' точка m находится в нижнем квадранте, при увеличении x' уменьшается, ξ становится равным нулю, после чего точка m переходит в верхний квадрант и ξ снова возрастает.

В формулах (2-42) — (2-45) значения ξ , ρ и ρ^3 являются функциями двух переменных Θ и x' , что дало нам возможность составить для их определения табл. 2-8. Эта таблица приводится в сокращенном виде. В каждой клетке табл. 2-8 верхнее число есть ξ , среднее ρ , нижнее ρ^3 .

С помощью приведенных формул и таблицы решаются две характерные задачи: определение освещенности в заданной точке и отыскание точки с заданной освещенностью. Последнее необходимо для построения изолукс на освещаемой плоскости, о чем подробнее см. в главе четвертой.

Приведем примеры решения обеих задач, используя график изолукс на условной плоскости, представленный на рис. 2-51.

Пример 1. Проектор ПЗС-45 с лампой 1000 *вт*, 220 *в* установлен на высоте 30 *м* и наклонен на угол $\Theta = 20^\circ$. Найти горизонтальную освещенность в точке $x = 90$ *м*, $y = 15$ *м*.

Таблица для расчета прожекторного освещения

θ°	x'								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	0,75 1,13 1,43	0,335 2,1 9,5	0,185 3,1 30	0,105 4,1 68	0,056 5,1 132	0,025 6,1 225	0,00 7,1 353	0,015 8,1 520	0,03 9,1 740
12	0,65 1,18 1,65	0,25 2,17 10,2	0,115 3,14 31	0,035 4,1 70	0,01 5,1 132	0,045 6,1 225	0,07 7,05 350	0,085 8,0 515	0,1 9,0 730
16	0,56 1,24 1,89	0,185 2,2 10,6	0,04 3,16 31,5	0,035 4,1 70	0,08 5,1 130	0,115 6,0 220	0,14 7,0 343	0,155 8,0 500	0,17 8,9 710
20	0,47 1,28 2,1	0,115 2,2 11	0,025 3,16 31,5	0,105 4,1 68,5	0,15 5,0 128	0,185 6,0 216	0,21 6,9 330	0,23 7,9 485	0,24 8,8 680
24	0,385 1,33 2,3	0,045 2,24 11,2	0,1 3,15 31	0,18 4,06 67	0,225 5,0 123	0,26 5,9 205	0,285 6,8 315	0,305 7,7 460	0,32 8,6 640
28	0,305 1,352 2,47	0,025 2,24 11,2	0,17 3,1 30	0,25 4,0 64	0,3 4,9 116	0,335 5,8 192	0,36 6,65 295	0,38 7,5 425	

Определяем $x' = 90 : 30 = 3$. Из табл. 2-8 выписываем $\xi = 0,025$, $\rho = 3,16$, $\rho^3 = 31,5$. По (2-43) находим $\eta = y/(\rho h) = 15/(3,16 \cdot 30) = 0,16$. По графику рис. 2-51 для данных ξ и η читаем $\varepsilon = 48\ 000$ лк, по формуле (2-42) определяем

$$E = \frac{\varepsilon}{\rho^3 h^2} = \frac{48\ 000}{31,5 \cdot 900} = 1,7 \text{ лк.}$$

Пример 2. При всех тех же условиях найти при $x = 90$ м точку, в которой освещенность равна 0,5 лк, т. е. найти y этой точки. Значения ξ , ρ и ρ^3 остаются прежними. По (2-42) находим $\varepsilon = E\rho^3 h^2 = 0,5 \cdot 31,5 \cdot 900 = 14\ 000$ лк.

По графику на рис. 2-51, зная ξ и ε , находим $\eta = 0,24$, следовательно, по (2-43) $y = \eta \rho h = 0,24 \cdot 3,16 \cdot 30 \approx 22,7$ м.

Если, как в данном случае, график изолукс на условной плоскости имеет один квадрант, то данное значение y определяет две точки изолуксы, расположенные по разные стороны от оси X , в противном случае y определяется отдельно для каждого квадранта.

Отмечаем, что для практических расчетов графики изолукс на условной плоскости должны, конечно, иметь значительно больший масштаб, чем рис. 2-51, и что при построении изолукс по ряду точек (что является наиболее частой задачей), когда вычисления приобретают «оптовый» характер, они существенно облегчаются.

При расчете прожекторного освещения переход к освещенности вертикальных или наклонных поверхностей производится в обычном порядке; наиболее часто анализируется освещенность вертикальной плоскости, перпендикулярной оси X , когда $\psi = \alpha'$.

Из других способов расчета освещенности от прожекторов назовем применяемый в некоторых организациях способ Дадногова

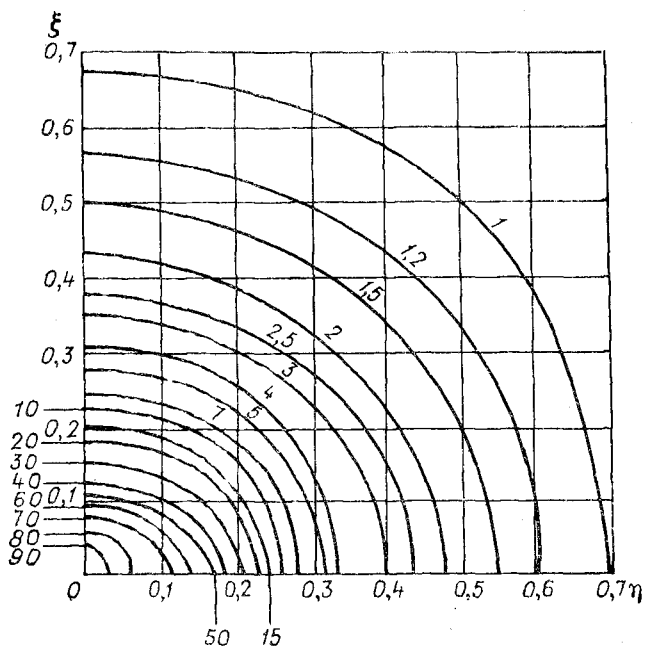


Рис. 2-51. Изолюксы на условной плоскости для прожектора ПЗС-45, 1000 *вт*, 220 *в*; у кривых указаны килолюксы

и оригинальный графический способ Родионова — Кузнецова. Не имея возможности уделить место описанию этих способов отметим, что их использование, конечно, не встречает никаких возражений, но объективный анализ приводит нас к убеждению, что в отношении простоты и точности они не имеют преимуществ перед способом Сапожникова.

В этой связи отметим что к точности расчета прожекторного освещения мы, вообще, относимся довольно скептически. В отличие от светильников прожектор очень «капризный» осветительный прибор, о характеристиках которого можно говорить только в среднем, поскольку они резко меняются не только от образца к образцу, но и для каждого данного образца в зависимости от индивидуальных особенностей устанавливаемой в нем лампы и от точности фокусировки последней.

СРЕДНЯЯ ОСВЕЩЕННОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

3-1. Характеристика задачи и определение светового потока излучателей

Разнообразные задачи, решаемые в данной главе, могут быть в большинстве случаев сведены к следующей обобщенной схеме.

Имеется совокупность первичных излучателей, светотехнические характеристики которых известны, поверхность, средняя освещенность которой ищется, и ограждающие поверхности помещения,

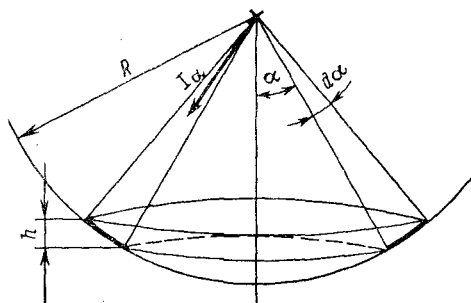


Рис. 3-1. К определению зонального потока

участвующие в перераспределении светового потока в качестве вторичных излучателей. Первичные излучатели направляют непосредственно на освещаемую поверхность (или, как часто говорят, «расчетную поверхность») первичные световые потоки. Остальная часть потока излучателей падает на ограждающие поверхности и в результате многократных отражений между этими поверхностями, а также расчетной поверхностью, на последнюю падает дополни-

тельный световой поток, который, складываясь с первичным потоком, образует «установившийся» световой поток, определяющий величину освещенности.

Рассмотрению задач такого рода посвящена тем более обширная литература, что в зарубежных странах преимущественно выполняются расчеты на среднюю освещенность, а не на минимальную, как это принято в нашей практике.

По ходу изложения нам придется вводить для рассматриваемых величин ряд обозначений, в связи с чем отмечаем, что в отечественной литературе применяются, в основном, две системы таких обозначений. Отдавая должное работам МЭИ и, в частности, доктора технических наук М. М. Епанешникова и широко используя результаты этих работ, мы не считаем себя вправе отказываться от обозначений, применявшихся в наших прежних публикациях, которые, к тому же, являются более наглядными.

Для определения первичных и установившихся потоков, падающих на поверхности, необходимо, прежде всего, знать полный или в пределах определенной зоны световой поток излучателей. Хотя эта задача рассматривается в общих курсах светотехники, считаем уместным кратко остановиться на ней в порядке напоминания.

Световой поток обычно определяется на основании известной кривой силы света. При излучателях с круглосимметричным светораспределением чаще всего используется способ угловых коэффициентов, другие же способы, такие как построение Руссо и способ равных телесных углов, применяются в практике расчетов освещения крайне редко.

Окружим излучатель сферой радиуса R (рис. 3-1) и выделим на этой сфере кольцевую зону, положение которой определяется углом α и которая опирается на центральный угол $d\alpha$. По известной формуле геометрии площадь кольца

$$dS = 2\pi R h = 2\pi R^2 \sin \alpha d\alpha.$$

Опирающийся на кольцо телесный угол

$$d\omega = \frac{dS}{R^2} = 2\pi \sin \alpha d\alpha.$$

и поток в этом угле

$$dF = I_\alpha d\omega = 2\pi I_\alpha \sin \alpha d\alpha.$$

Отсюда поток в любой круговой зоне, ограниченной направлениями α_1 и α_2

$$F_{\alpha_1-\alpha_2} = 2\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I_\alpha \sin \alpha d\alpha. \quad (3-1)$$

Таблица 3-1

Зональные телесные углы

Интервал угла α , °		Телесный угол, стерадианы
в нижней полусфере	в верхней полусфере	
0—10	170—180	0,095
10—20	160—170	0,283
20—30	150—160	0,463
30—40	140—150	0,628
40—50	130—140	0,774
50—60	120—130	0,897
60—70	110—120	0,992
70—80	100—110	1,058
80—90	90—100	1,091
		6,28

В общем случае интеграл не берется, и пространство приходится разбивать на круговые зоны такого размера, т. е. с таким интервалом $\alpha_1-\alpha_2$, чтобы в пределах данной зоны можно было считать силу света постоянной, равной ее значению в направлении середины зоны. Тогда

$$F_{\alpha_1-\alpha_2} = 2\pi I_{(\alpha_1+\alpha_2)/2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = I_{\alpha_1-\alpha_2/2} 2\pi (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (3-2)$$

В практике чаще всего выбираются десятиградусные зоны, т. е. $0^\circ-10^\circ, 10^\circ-20^\circ, \dots, 80^\circ-90^\circ, 90^\circ-100^\circ, \dots, 170^\circ-180^\circ$, середины которых определяются направлениями $5^\circ, 15^\circ, \dots, 85^\circ, 95^\circ, \dots, 175^\circ$. Произведение $2\pi (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$ в формуле (3-2) есть не что иное, как телесный угол зоны; его значения для десятиградусных зон приведены в табл. 3-1

Таким образом, поток, заключенный в какой-либо круговой зоне, ограниченной направлениями α_1 и α_2 , может быть найден по формуле

$$F_{\alpha_1-\alpha_2} = I_{(\alpha_1+\alpha_2)/2} \omega_{\alpha_1-\alpha_2}, \quad (3-3)$$

а поток, излучаемый в пределах нескольких зон или всей полусферы — суммированием зональных потоков в соответствующих пределах.

Если зависимость силы света от угла задана аналитически, то в ряде случаев выражение (3-1) поддается интегрированию. Так, если принять $I_\alpha = I_0 \cos^m \alpha$, то световой поток в пределах любой круговой зоны

$$F_{\alpha_1-\alpha_2} = 2\pi I_0 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^m \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{2\pi I_0}{m+1} (\cos^{m+1} \alpha_1 - \cos^{m+1} \alpha_2), \quad (3-4)$$

а в пределах всей полусферы

$$F = \frac{2\pi I_0}{m+1}. \quad (3-5)$$

Для поверхностей, излучающих диффузно, когда $m = 1$,

$$F = \pi I_0 = BS\pi = RS, \quad (3-6)$$

где B — яркость, $нт$; R — светимость, $лм/м^2$; S — площадь излучателя, $м^2$. Последняя формула наиболее часто используется для определения потока вторичных излучателей большой площади.

При излучателях с некруглосимметричным светораспределением до некоторой степени отступления от круговой симметрии еще можно пользоваться понятием круговых зон и определять зональные и полные потоки с помощью угловых коэффициентов. При наличии двух плоскостей симметрии и при малом различии между кривыми силы света в этих плоскостях за силу света можно принимать среднее арифметическое значение для данного угла α в обеих плоскостях. По-видимому, несколько более точные результаты можно получить, используя формулы, заимствованные из зарубежных материалов, согласно которым полный или зональный поток излучателей с двумя плоскостями симметрии, продольной и поперечной, равен:

при концентрированном светораспределении $\frac{3F_{\text{попер}} + F_{\text{прод}}}{4}$;

в остальных случаях $\frac{4F_{\text{попер}} + 3F_{\text{прод}}}{7}$.

В этих выражениях $F_{\text{попер}}$ и $F_{\text{прод}}$ определяются по кривым силы света в соответствующих плоскостях путем умножения сил света на зональные телесные углы по табл. 3-1.

Наиболее часто с некруглосимметричным светораспределением мы встречаемся в осветительных приборах с трубчатыми лампами. Здесь, при значительной разнице между кривыми силы света в продольной и поперечной плоскости, понятие зонального потока вообще утрачивает значение с точки зрения светотехнического расчета и вместо него рассчитывается поток, заключенный в двугранном угле, ограниченном двумя продольными плоскостями.

Методика определения потока в этом случае предложена Н. Н. Ермолинским и основана на уже использованном нами факте подобия кривых силы света в различно наклоненных продольных плоскостях.

На рис. 3-2 показан элементарный телесный угол $d\omega$, опирающийся на элемент поверхности $dS = r d\delta \times r \cos \delta d\gamma$,

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \cos \delta d\delta d\gamma.$$

В пределах конечных интервалов углов δ и γ

$$\omega = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \cos \delta d\delta d\gamma = (\gamma_2 - \gamma_1) \times \\ \times (\sin \delta_2 - \sin \delta_1) \frac{\pi}{180}. \quad (3-7)$$

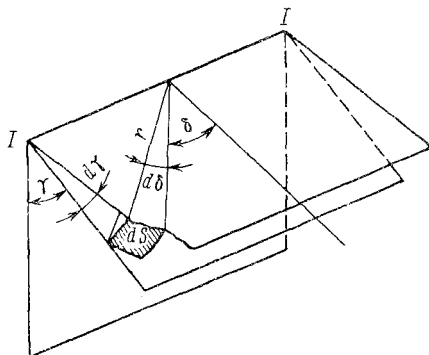


Рис. 3-2. Двугранный телесный угол

Последний множитель введен для перехода от градусной меры угла γ к радианной. Если, как и при определении потока круглосимметричных источников, принять интервал как γ , так и δ равным 10° , то можно получить следующую табличку четырехгранных телесных углов, величина которых, кстати, не зависит от γ :

Интервал угла $\delta, ^\circ$	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90
Четырехгранный телесный угол ω , стерадианы	0,0303	0,0294	0,0276	0,0249	0,0215	0,0174	0,0129	0,0079	0,0027

Определение потока, излучаемого в одной (любой) из полусферы производится в следующем порядке.

К главной продольной плоскости примыкает телесный угол, ограниченный плоскостями $\gamma = +5^\circ$ и $\gamma = -5^\circ$. Поток в этом угле может быть определен по формуле

$$F_{-5+5} = 2 \sum_{\delta=0}^{\delta=90} \omega_{\delta_1-\delta_2} I_{\delta_1+\delta_2/2}, \quad (3-8)$$

где значения ω принимают по вышеприведенной табличке, а $I_{(\delta_1+\delta_2)/2}$ — обычные силы света в продольной плоскости. Множитель 2 учитывает симметрию светораспределения относительно поперечной плоскости (или, можно сказать, область отрицательных значений δ). Отношение определенного таким образом потока к силе света в направлении $\gamma = 0, \delta = 0$ является своеобразной характеристикой формы продольной кривой силы света и обозначается k_f (не смешивать с коэффициентом формы по ГОСТ 13828—68!). Подобие кривых силы света во всех продольных плоскостях равносильно постоян-

ству k_f . Отсюда, а также из определения k_f следует, что поток, заключенный в каждом двугранном телесном угле, соответствующем интервалу $\gamma_2 - \gamma_1 = 10^\circ$, может быть найден как произведение k_f на силу света в поперечной плоскости в направлении середины интервала γ , а полный поток полусферы

$$F = 2k_f \sum_{\gamma=5}^{\gamma=85} I_\gamma. \quad (3-9)$$

Здесь множитель 2 учитывает симметрию относительно продольной плоскости.

Метод Ермолинского, чаще всего используемый для определения к. п. д. светильников, вполне может быть применен и для расчета зональных потоков, понимая в данном случае под зоной часть пространства между двумя продольными плоскостями («книжными листами»), угол между которыми составляет 10° . Если коэффициент k_f определен, то достаточно умножить на него значение силы света в поперечной плоскости, в направлении середины зоны.

Можно, однако, не ставить никаких ограничений и считать фотометрическое тело излучателя имеющим вполне произвольную форму, без каких-либо плоскостей симметрии. Если только значения силы света во всех необходимых направлениях известны, то можно найти и зональные потоки, умножая эти силы света на приведенные значения ω .

В заключение вообразим чертеж на рис. 3-2 повернутым так, что линии I—I занимает вертикальное положение. Тогда двугранный угол, соответствующий интервалу $\gamma = 10^\circ$, можно рассматривать как $1/36$ всего пространства вокруг оси I—I, угол δ переходит в меридиональный угол α (рис. 3-1) и, распространяя γ на все 360° , мы получим уже знакомую нам кольцевую зону. Отсюда следует, что приведенные выше значения ω для четырехгранных телесных углов, соответствующих линейным углам $10^\circ \times 10^\circ$, есть не что иное, как поделенные на число 36 значения зональных телесных углов по табл. 3-1.

3-2. Индекс помещения

Распределение светового потока между отдельными поверхностями не нарушается при одновременном, пропорциональном изменении всех размеров, т. е. определяется не абсолютными, а относительными значениями размеров. Рассматривая освещенность точки, мы уже широко пользовались относительными размерами; еще большее значение они имеют при решении задач, связанных с определением средней освещенности поверхности.

Если квадрат со стороной A освещается точечным излучателем, расположенным на высоте h над его центром, то относительные размеры квадрата уместно характеризовать отношением $A/2h$, т. е. тангенсом угла, под которым видна из излучателя половина стороны квадрата. Рассматривая определение коэффициента использования светового потока «потолка» прямоугольного параллелепипеда относительно «пола», Маргулис показал, что прямоугольник $A \times B$ можно заменить эквивалентным квадратом со стороной $2AB/(A + B)$ или, переходя к относительному размеру стороны, $2AB/1h(A + B)$.

В большинстве случаев постоянный множитель 2 не учитывается, и в качестве основной геометрической характеристики, определяющей распределение световых потоков по поверхностям прямо-

угольного параллелепипеда (форму которого имеет большая часть помещений) принимается половина относительной стороны эквивалентного квадрата:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)} = \frac{S}{h(A+B)}. \quad (3-10)$$

Величина i называется индексом помещения, а формула (3-10) известна у нас под названием формулы Маргулиса—Сапожникова.

Не следует считать эту формулу эмпирической, случайно, хотя бы и удачно, отображающей влияние размеров помещения или пространства на распределение потоков. Помимо ее уже указанного смысла, она представляет собой вполне определенную геометрическую характеристику: отношение площади пола или потолка к половине площади стен и, как мы увидим далее, величина i , так сказать, «сама собой» появляется в ряде формул, характеризующих распределение потока по поверхностям помещения.

В частных случаях формула (3-10) приобретает вид: для квадратных помещений со стороной A $i = A/(2h)$; для неограниченно длинных помещений шириной B $i = B/h$.

Нельзя все же считать, что во всех случаях величина i исчерпывающе характеризует влияние геометрических размеров на распределение потоков. Так, О'Брайен при определении некоторых коэффициентов получил величины, зависящие при данной величине индекса также от соотношения сторон, хотя и в незначительной степени. Значение соотношения сторон еще больше возрастает при светильниках, кривые силы света которых в поперечной и продольной плоскостях резко различаются. В таких случаях большее значение, чем индекс, имеют характеристики A/h и B/h .

Определение индекса по формуле (3-10) преобладает в практике большинства стран. Тем не менее, в литературе можно встретить и некоторые другие формулы для индекса, например $i = \frac{2AB}{h(A+B)}$; $i = \frac{0,2A + 0,8B}{h}$; $i = \frac{2B + A}{6h}$ и т. д. Пользуясь зарубежными источниками, надо всегда проверять, «тем ли» индексом оперируют авторы.

Понятие индекса требует некоторого уточнения в отношении значения входящей в него высоты. Если рассматривается распределение светового потока между поверхностями помещения (которые могут быть как первичными, так и вторичными излучателями), то в формулу (3-10) входит строительная высота помещения или, когда расчетная плоскость лежит выше уровня пола, высота потолка над расчетной плоскостью. При освещении помещения светильниками прямого света или с преобладающим излучением в нижней полусфере высота, естественно, определяется от пола или расчетной плоскости до светового центра светильников.

В остальных случаях, т. е. когда преобладающая часть светового потока излучается в верхней полусфере, положение усложняется. Некоторые схемы расчета основаны на том, что первичное распределение потоков находится по индексу, определенному через высоту светильников, распределение же отраженных потоков — по индексу, соответствующему строительной высоте помещения. Многие авторы

сохраняют и в этом случае единый индекс, но дают для него измененную формулу, учитывающую среднее соотношение расстояний светильников от потолка и расчетной плоскости. Так, Валь, приводя для установок прямого света формулу

$$i = \frac{2B + A}{6h},$$

для отраженного или преимущественно отраженного освещения заменяет ее формулой

$$i = \frac{2B + A}{4H}.$$

В отечественной практике индекс чаще всего определяется по высоте расположения светильников или иных излучателей, верхняя же часть помещения заменяется расположенным на том же уровне условным потолком (подробнее см. далее § 3-4 и 3-6).

Последнее время в США вместо индекса помещения широко используется иная пространственная характеристика «Room cavity Ratio» (сокращенно *RCR*). Для квадратных помещений со стороной *A* и при расчетной высоте *h*

$$RCR = \frac{10h}{A}.$$

В общем случае он может быть вычислен по формуле

$$RCR = \frac{5h(A+B)}{AB}, \quad (3-11)$$

из которой может быть получено соотношение, связывающее *RCR* с индексом помещения,

$$RCR = \frac{5}{i}. \quad (3-12)$$

Возвратимся к индексу помещения в обычном для нас понимании этого показателя.

В зарубежной литературе числовые значения *i* часто заменяют буквенными символами согласно следующей переводной таблице:

индекс	0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5
символ	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A

Полная шкала индексов, применяемая в нашей практике, включает следующие 17 значений: 0,5—0,6—0,7—0,8—0,9—1,0—1,1—1,25—1,5—1,75—2,0—2,25—2,5—3,0—3,5—4,0—5,0.

Хотя непосредственное вычисление индекса по формуле (3-10) не вызывает затруднений, но массовый характер этой операции привел к появлению ряда таблиц и номограмм, позволяющих найти *i* без вычислений.

В проектных организациях нашей страны широкое применение для определения индекса получила «таблица Дубинкина» [29]. Она основана на двух положениях.

а. В расчетной практике применяют только дискретные, «круглые» значения индексов. Соответственно в каждом случае необходимо знать не точное значение индекса, а ближайшее табличное значение.

б. Согласно (3-10) индекс зависит от площади, высоты и соотношения сторон помещения. Последняя зависимость выражена нерезко и может быть учтена упрощенно. Обозначив $A/B = \alpha$, можно привести формулу (3-10) к виду

$$i = \frac{\sqrt{S}}{h} \frac{\sqrt{\alpha}}{1+\alpha} \quad (3-13)$$

и убедиться (см. также далее § 4-5), что при изменении α в довольно широких пределах индекс изменяется незначительно.

Таблица Дубинкина (см. табл. 3-2) учитывает отношение α тремя ступенями, что позволяет оценивать это отношение глазомерно. В трех строках, соответствующих различным α , содержатся значения расчетной высоты h , в вертикальных столбцах — значения площади S . Расположенная справа шкала индексов сдвинута на полинтервала по отношению к шкалам площадей. Значения площадей в таблице рассчитаны таким образом, чтобы при каждом данном h и среднем значении α они по формуле (3-13) точно соответствовали среднему между двумя табличными значениями индекса.

Таблица 3-2

Определение индекса помещения по И. С. Дубинкину (фрагмент)

Форма помещения		Расчетная высота h , м							i
α	1—1,5	1,8	2,0	2,2	...	6,0	6,5		
	1,5—2,5	1,7	1,9	2,1	...	5,7	6,2		
	2,5—3,5	1,6	1,8	1,9	...	5,3	5,7		
Площадь помещения S , м ²	4	5	6	...	45	52	0,5		
	5,6	6,9	8,3	...	62	73	0,6		
	7,5	9,2	11,1	...	83	97	0,7		
	9,5	11,8	14,3	...	106	125	0,8		
	11,9	14,8	17,8	...	132	156	0,9		
	14,6	17,6	22	...	162	191	1,0		
	18	23	27	...	203	240	1,1		
	25	31	37	...	280	330	1,25		
	35	43	52	...	390	460	1,5		
	47	57	69	...	515	610	1,75		
	60	73	89	...	660	780	2,0		
	75	92	111	...	830	980	2,25		
	101	124	150	...	1120	1320	2,5		
	139	172	208	...	1560	1840	3,0		
	185	230	275	...	2070	2450	3,5		
	270	330	400	...	3000	3580	4,0		
390	480	580	...	4400	5100	5,0			

Пусть, например, требуется определить значение i для следующих условий: $A = 13 \text{ м}$, $B = 10 \text{ м}$, $S = 130 \text{ м}^2$, $h = 2,2 \text{ м}$. Поскольку α не более 1,5, находим значение $h = 2,2$ в верхней строчке и, опускаясь вниз, ищем два значения площади, между которыми заключено заданное, т. е. в данном случае «111» и «150». Интервал между этими значениями справа упирается в значение индекса 2,5. Точный расчет по формуле (3-10) дает значение 2,57.

3-3. Определение первичных потоков

Задача определения первичного потока, т. е. светового потока, непосредственно падающего от излучателя на ту или иную поверхность, носит, в принципе, интегральный характер. Выводы расчетных формул, да и самые эти формулы, подчас весьма громоздки и в большинстве случаев мы ограничиваемся указанием пути решения задачи и приведением окончательных результатов в практически удобной форме. Еще недавно некоторые задачи оказывались вообще математически неразрешимыми и лишь с появлением ЭВМ стало возможным на основе исходных выражений и не выполняя интегрирования в общем виде, получать необходимые для расчетов графики или таблицы.

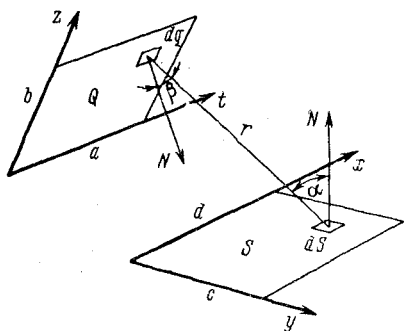


Рис. 3-3. Световой поток от поверхности на поверхность

(рис. 3-3), из которых один, например верхний, диффузно излучает и имеет яркость B . Элементарная площадка $dq = dt dz$ в направлении к площадке dS имеет силу света $dI = B dq \cos \beta$ и создает на этой площадке освещенность

$$dE = \frac{B \cos \beta \cos \alpha}{r^2} dz dt.$$

В результате на площадку $dS = dx dy$ падает световой поток

$$dF = dE dS = \frac{B \cos \beta \cos \alpha}{r^2} dz dt dx dy,$$

полный же поток, падающий от поверхности Q на поверхность S , может быть определен так:

$$F = B \int_{x=0}^{x=d} \int_{y=0}^{y=c} \int_{z=0}^{z=b} \int_{t=0}^{t=a} \frac{\cos \beta \cos \alpha}{r^2} dz dt dx dy. \quad (3-14)$$

Делением этого потока на полный поток, излучаемый поверхностью Q , т. е. на $B\pi Q$, может быть определен коэффициент использования потока поверхности Q относительно поверхности S .

Если поверхности, так сказать, поменять местами и считать S излучающей, а Q воспринимающей поток, то в выражении (3-14)

ничего не изменится, откуда следует принцип взаимности световых потоков, впервые сформулированный Муном: для диффузно излучающих поверхностей любой формы и при любом относительном расположении поток, падающий с излучающей поверхности на освещаемую, не зависит от того, которая из поверхностей излучает, если яркость B остается неизменной.

Будем обозначать потоки двумя индексами, из которых первый соответствует излучающей, второй — освещаемой поверхности. Математическая формулировка принципа Муна будет иметь вид:

$$F_{QS} = F_{SQ},$$

но полные потоки поверхностей соответственно равны

$$F_Q = B\pi Q \text{ и } F_S = B\pi S.$$

Отсюда находим коэффициенты использования

$$\eta_{QS} = \frac{F_{QS}}{B\pi Q}; \quad \eta_{SQ} = \frac{F_{SQ}}{B\pi S}$$

и убеждаемся, что

$$\frac{\eta_{QS}}{\eta_{SQ}} = \frac{S}{Q}. \quad (3-15)$$

Это последнее соотношение играет большую роль при решении ряда задач.

При некоторых расчетах используется также теорема, доказанная Ямаути и относящаяся к расположению светящихся элементов, показанному на рис. 3-4 (определяющими признаками является попарная общность указанных на рисунке размеров; угол между поверхностями может быть любым). Составив интегральные выражения для потока с одной поверхности на другую, можно видеть, что часть из них окажется тождественными и убедиться, что

$$F_{14} = F_{41} F_{23} = F_{32}. \quad (3-16)$$

Приведенное выше выражение (3-14) поддается интегрированию для частных случаев, из которых основными являются показанные на рис. 3-5. Полученные выражения чрезвычайно громоздки, но дают возможность вычислить коэффициенты использования потока одной из поверхностей относительно другой. На рис. 3-6 и 3-7 приведены рассчитанные Е. Н. Яковлевым кривые коэффициентов использования, значения которых даются для параллельных прямоугольников в функции индекса помещения, для перпендикулярных — в функции двух отношений сторон.

Для первого случая можно также применять эмпирическую формулу, дающую незначительную погрешность

$$\eta = \sqrt{1 + \frac{1}{i^2}} - \frac{1}{i}. \quad (3-17)$$

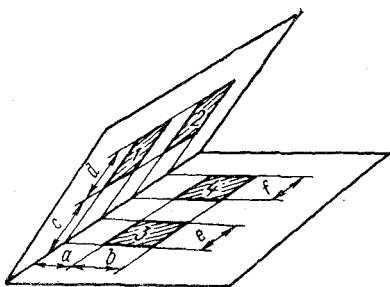


Рис. 3-4. К теореме Ямаути

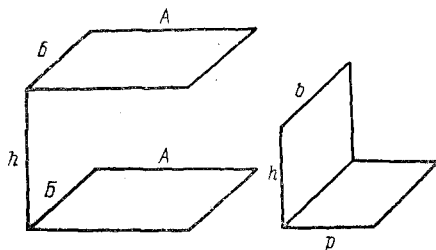


Рис. 3-5. Случай, для которых приводятся кривые коэффициентов использования

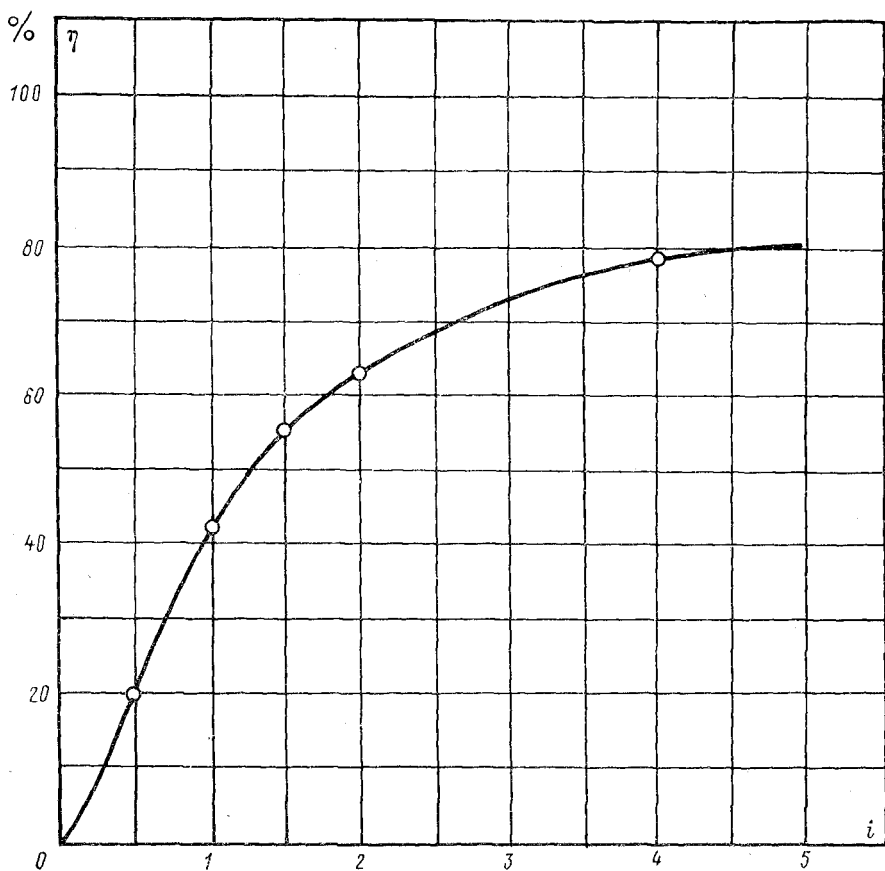


Рис. 3-6. Коэффициент использования светового потока прямоугольника относительно параллельной ему плоскости

В теоретической фотометрии рассматривают и более сложные задачи определения коэффициента использования, на которых мы здесь не останавливаемся. Уместно отметить, что описываемые ниже таблицы Джонса—Нейхарта в варианте для $L/h = 0,4$ могут быть применены для определения коэффициентов использования светового потока поверхностей, излучающих по любому закону.

Сформулированные выше теоремы Муна и Ямаути дают, в частности, возможность определения коэффициентов использования и

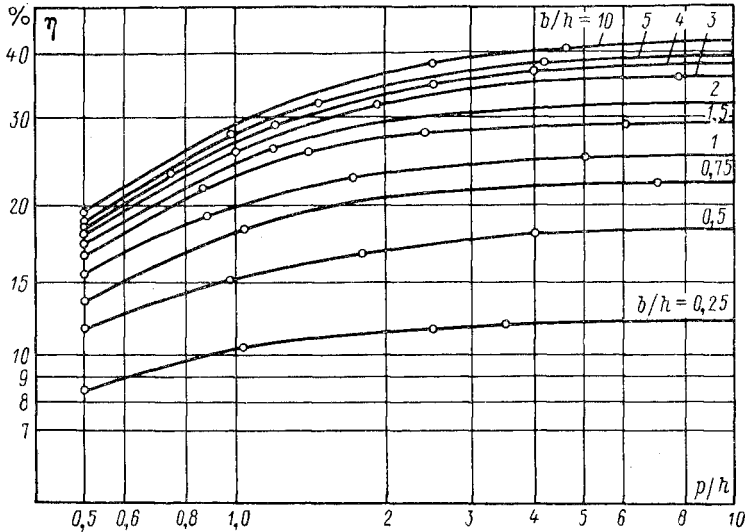


Рис. 3-7. Коэффициент использования светового потока прямоугольника относительно перпендикулярной ему плоскости

при взаимном расположении поверхностей, не соответствующем рис. 3-5.

Приводим схемы расчета для характерных случаев; индексы у F , как и выше, будут отмечать: первый — излучающую, второй — воспринимающую поверхность; индексы, сгруппированные в скобках, относятся к суммарной площади соответствующих прямоугольников.

Требуется определить поток, падающий на поверхность 6 от поверхности 1 (рис. 3-8). Дополним излучающую и освещаемую поверхности условными элементами $2, 3, 4, 5$, как показано на рисунке. График на рис. 3-6 позволяет найти коэффициент использования поверхности (123) относительно поверхности (456) , а через него и поток $F_{(123)(456)}$. Этот поток можно представить себе состоящим из следующих частей

$$F_{(123)(456)} = F_{14} + F_{15} + F_{16} + F_{24} + F_{25} + F_{26} + F_{34} + F_{35} + F_{36}.$$

Нам надо отсюда исключить все «лишние» потоки, т. е. все, кроме F_{16} . Для этого составим выражения некоторых потоков, поддающихся определению,

$$F_{(23)(56)} = F_{25} + F_{26} + F_{35} + F_{36};$$

$$F_{(12)(45)} = F_{14} + F_{15} + F_{24} + F_{25}.$$

После вычитания этих потоков из $F_{(123)(456)}$ останется $F_{16} + F_{34} - F_{25}$. Но F_{25} поддается определению и должен быть добавлен взамен дважды вычтенного, а $F_{16} = F_{34}$ по теореме Ямаути. Окончательно получаем

$$F_{16} = \frac{F_{(123)(456)} - F_{(23)(56)} - F_{(12)(45)} + F_{(25)}}{2}.$$

Аналогично для случая, представленного на рис. 3-9,

$$F_{14} = F_{(12)(34)} - F_{(12)(3)} - F_{2(34)} + F_{(23)}.$$

Узкие диффузные полосы. Задача определения первичного потока, падающего на поверхности от диффузных линейных излучателей, т. е. от светящих полос, ширина которых пренебрежимо мала по

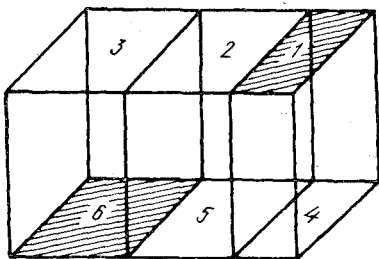


Рис. 3-8. Определение потока, падающего от прямоугольника 1 на прямоугольник 6

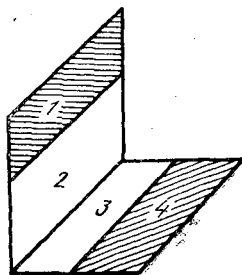


Рис. 3-9. Определение потока, падающего от прямоугольника 1 на прямоугольник 4

сравнению с расстоянием до освещаемой поверхности, решается путем интегрирования уравнений, составленных аналогично (3-14). На рис. 3-10, 3-11 и 3-12 приведены графики коэффициентов первичного использования светового потока таких излучателей для трех характерных случаев их расположения по отношению к освещаемой плоскости, рассчитанные Е. Н. Яковлевым.

Линейные излучатели, фотометрическое тело которых имеет две плоскости симметрии и их элементы. С появлением люминесцентных и, вообще, трубчатых ламп задача определения первичных потоков от таких излучателей приобрела особое значение. В случае, когда продольная и поперечная кривая силы света мало различаются, можно, как указано в § 3-1, пользоваться усредненной кривой и определять поток приемами, указанными ниже для круглосимметричных излучателей. Так обстоит дело, например, при светильниках прямого света с диффузными отражателями и в некоторых других случаях. Значительная разница между продольной и поперечной кривыми может иметь место при светильниках с зеркальными отражателями и при весьма распространенных светильниках со стеклянными рассеивателями в форме удлиненной «ванны». В последнем случае, а также у открытой трубчатой лампы, продольная кривая носит косинусный, а поперечная — равномерный характер.

Актуальность определения первичных потоков от излучателей подобного рода вызвала появление ряда работ, посвященных этому вопросу, различно, но в общем с одинаковыми результатами, решающих задачу. В дальнейшем мы в основном используем работу Ейнхорна, выводы которого наиболее удобны для практического применения.

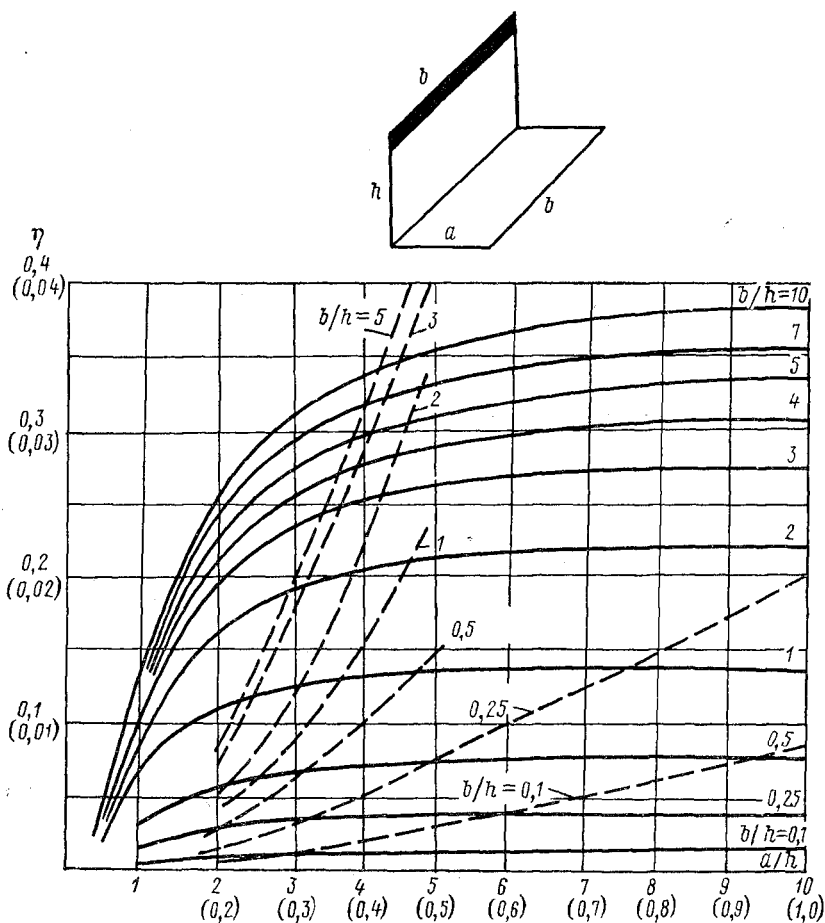


Рис. 3-10. Коэффициент использования светового потока диффузной полосы (цифры в скобках относятся к штриховым кривым)

Соответственно наклоненными продольными плоскостями («книжными листами») разобьем пространство вокруг линейного излучателя на двугранные телесные углы, с линейными углами при вершине 10° . В зависимости от положения таких двугранных зон и отнесенного к высоте расстояния излучателя до границы освещаемой поверхности (рис. 3-13) зоны могут оказаться полностью или частично в пределах освещаемой поверхности или же разместиться

вне ее. Соответственно отношение полезного потока зоны к ее полному потоку, рассчитанное пока для поверхности бесконечной длины A , которое мы назовем коэффициентом поперечного использования η_B , будет меняться от 0 до 1. Значение η_B для каждой зоны

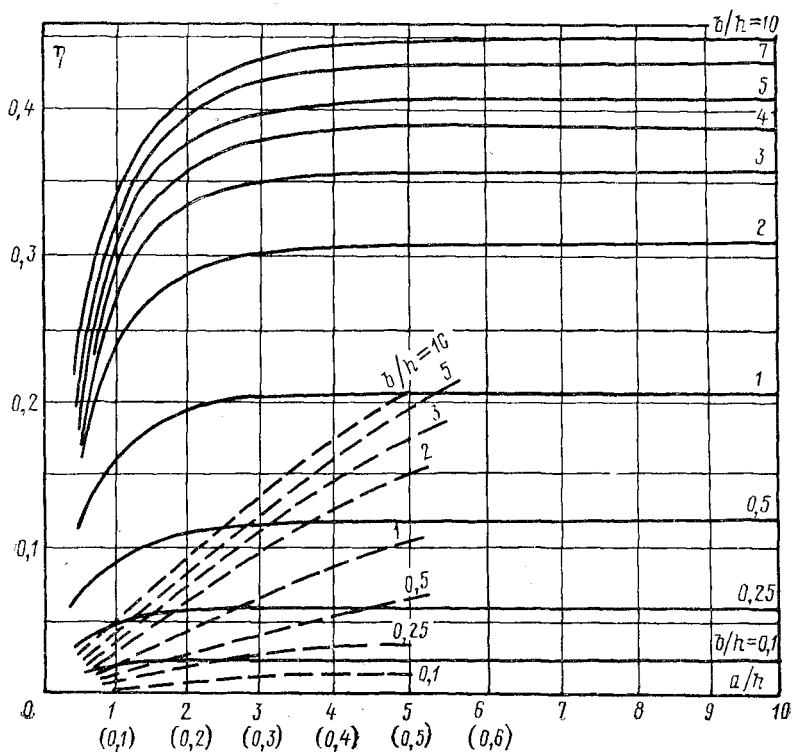
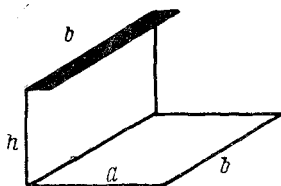


Рис. 3-11. Коэффициенты использования светового потока диффузной полосы (цифры в скобках относятся к штриховым кривым)

легко рассчитать как отношение линейного угла, в пределах которого поток падает на поверхность, к полному углу зоны 10° (можно, но менее точно рассчитать его, определив полную ширину пересечения зоны с горизонтальной плоскостью и ту ее часть, которая находится в пределах заданной поверхности, а затем принять за η_B соотношение этих размеров).

Если речь идет об одном линейном излучателе, то ясно, что в каждую сторону от главной продольной плоскости существует лишь единственная зона, для которой η_B больше нуля, но меньше 1. При нескольких параллельных линейных излучателях положение

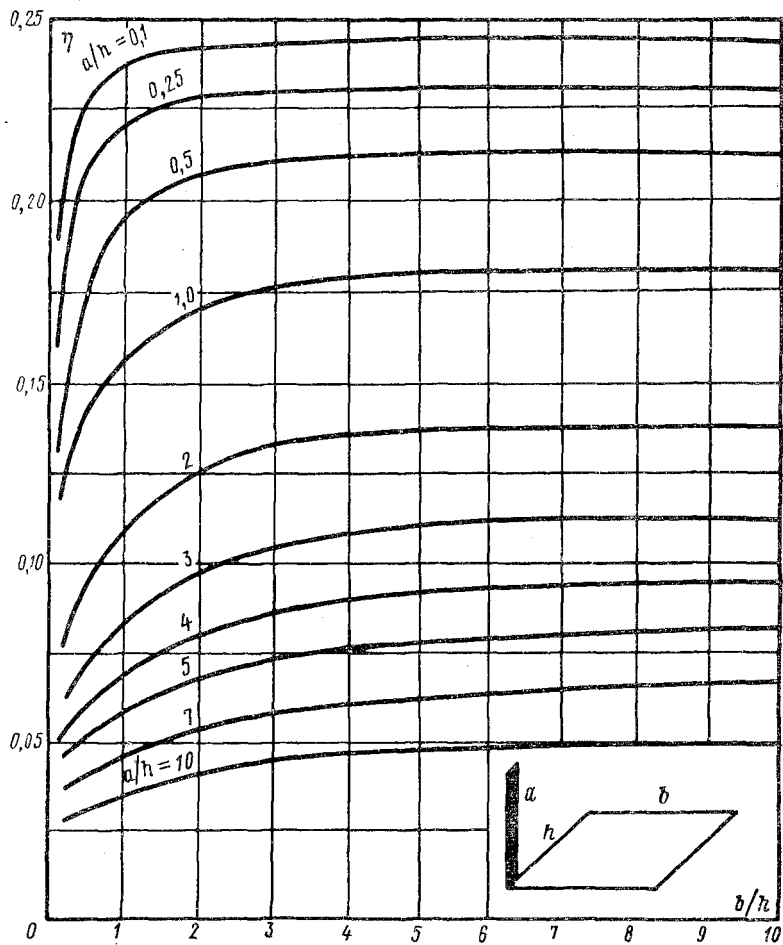


Рис. 3-12. Коэффициенты использования светового потока диффузной полосы

усложняется и среднее для данной зоны значение η_B , помимо отношения B/h , становится зависящим от числа линий или от отношения расстояния между ними к высоте. Зависимость $\eta_B = f\left(\frac{B}{h}\right)$ в принципе носит характер монотонного возрастания, но в моменты, когда с возрастанием B появляется новая линия, для некоторых зон η_B скачкообразно уменьшается. Если отношение расстояния между линиями к высоте уменьшается, т. е. при данном B , число линий

возрастает, то скачки на кривых η_B сглаживаются и в пределе, когда линии сливаются в световой потолок, исчезают.

Анализ показывает, что с точки зрения окончательного результата почти во всех случаях можно пользоваться значениями η_B ,

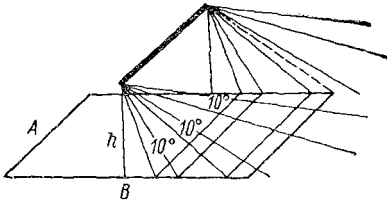


Рис. 3-13. Характерные положения двугранных зон

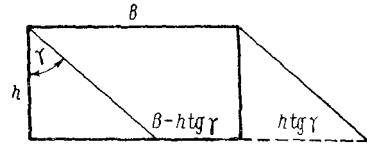


Рис. 3-14. К определению коэффициента поперечного использования

рассчитанными для этого последнего случая. Как видно из рис. 3-14, приближенно можно считать

$$\eta_B = 1 - \frac{h}{B} \operatorname{tg} \gamma_{\text{ср}}. \quad (3-17)$$

Рассчитанные таким образом значения η_B представлены кривыми на рис. 3-15. Автор построения рекомендует пользоваться

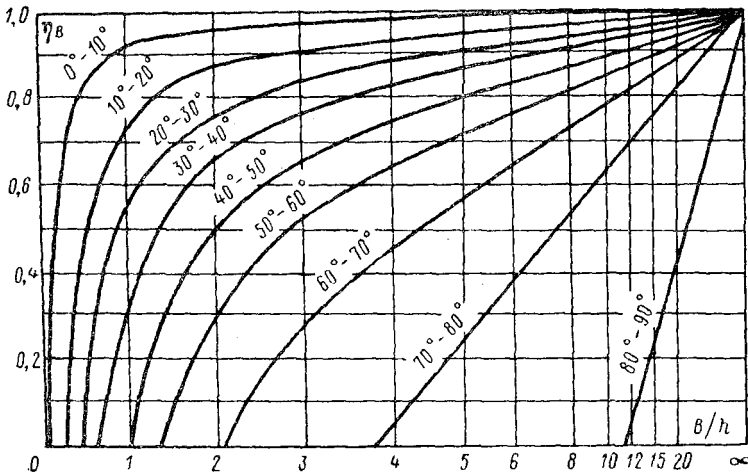


Рис. 3-15. Кривые коэффициента η_B

кривыми для зон $0^\circ-10^\circ$ и $10^\circ-20^\circ$ только при очень малом относительном расстоянии между линиями, в остальных же случаях, независимо от B/h , для обеих зон принимать $\eta_B = 1$.

В помещениях конечной длины A (мы здесь условно называем длиной размер помещения вдоль линейных излучателей) часть потока двугранный зоны не попадает на поверхность, в замкнутом помещении падая на стены, и приходится учитывать коэффициент

продольного использования η_A . Его определение облегчается обычной плавностью кривых силы света и подобием их в различно наклоненных продольных плоскостях. Чаще всего можно считать, что эти кривые аппроксимируются выражением (2-19) при значении m в пределах от 1 до 2.

Приводим вывод весьма изящной формулы для случая $m = 1$; начинать оказывается удобным с вычисления не полезного, а, наоборот, потеряннного потока. Обратимся к рис. 3-16.

Согласно (2-17) освещенность элементарной площадки на стене

$$E = \frac{I'_\gamma \sin^2 \gamma}{2r} = \frac{I'_\gamma A^2}{2r(A^2 + r^2)}.$$

Поверхность этой площадки

$$dS = r \Delta\gamma dr,$$

а падающий на нее поток

$$dF = E dS = \frac{I'_\gamma A^2 \Delta\gamma dr}{2(A^2 + r^2)}.$$

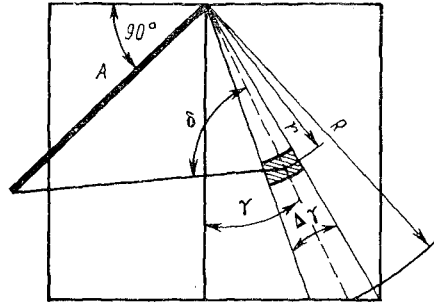


Рис. 3-16. К определению коэффициента η_A

Весь поток, потерянный на двух¹ торцевых стенах

$$F = I'_\gamma \Delta\gamma A^2 \int_0^R \frac{dr}{A^2 + r^2} = I'_\gamma A \Delta\gamma \operatorname{arctg} \frac{R}{A}.$$

или, выражая $\Delta\gamma = 10^\circ$ в радианной мере,

$$F = I'_\gamma A \frac{2\pi}{36} \operatorname{arctg} \frac{R}{A}.$$

При $m = 1$ полный поток в двугранном угле с линейным углом при вершине 10° может рассматриваться как $1/36$ часть потока круглосимметричного излучателя с синусным светораспределением (т. е. имеющего фотометрическое тело в виде тороида), равного, как известно, $I_{\gamma,0} \pi^2$, т. е. составит $(I'_\gamma A \pi^2 / 36)$. Отсюда

$$\eta_A = 1 - \frac{I'_\gamma A \frac{2\pi}{36} \operatorname{arctg} \frac{R}{A}}{I'_\gamma A \frac{\pi^2}{36}} = 1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{R}{A} = \frac{8^\circ}{90^\circ}. \quad (3-18)$$

Для случая $m = 2$ аналогично может быть получено следующее выражение

$$\eta_A = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{A^2 + R^2} - R}{A} + \frac{A}{\sqrt{A^2 + R^2}} \right) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \rho^2} - \rho + \frac{1}{\sqrt{1 + \rho^2}} \right), \quad (3-19)$$

где $\rho = R/A$.

¹ Расчет ведется для зоны, расположенной по одну сторону от вертикали.

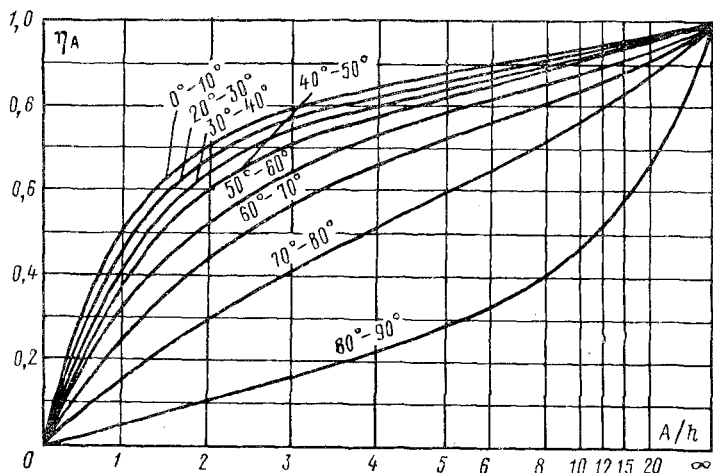


Рис. 3-17. Кривые коэффициента η_A для случая $m = 1$ (не нанесена кривая для зоны $10^\circ-20^\circ$)

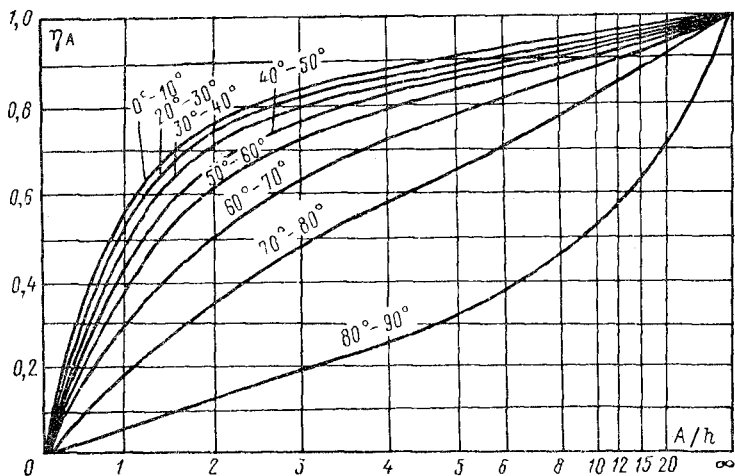


Рис. 3-18. Кривые коэффициента η_A для случая $m = 2$ (не нанесена кривая для зоны $10^\circ-20^\circ$)

Расчитанные по этим формулам кривые η_A представлены на рис. 3-17 и 3-18.

Окончательный коэффициент использования потока любой двугранной зоны

$$\eta_V = \eta_A \cdot \eta_B. \quad (3-20)$$

Учитывая, что, как было показано в § 3-1, полный поток излучателя с двумя плоскостями симметрии может быть определен по формуле (3-9), полный коэффициент первичного использования

$$\eta = \frac{\sum I_V \eta_V}{\sum_5 I_V}. \quad (3-21)$$

Все вышеизложенное с равным основанием может быть использовано для определения потока верхней полусферы, прямые же потоки на вертикальные поверхности стен могут быть найдены как разности между потоком излучателя и потоком, падающим на горизонтальную поверхность.

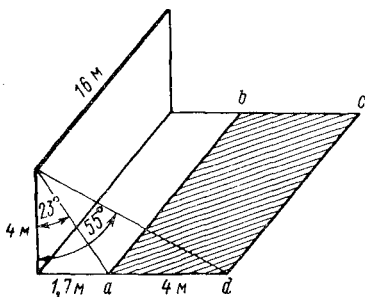


Рис. 3-19. К примеру б

Пример. Светильник имеет в продольной плоскости косинусное светораспределение; значения силы света в поперечной плоскости известны и приведены ниже, в табличке расчета (см. табл. 3-3). Требуется определить:

а) коэффициент первичного использования относительно поверхности пола, в помещении с размерами $A = 16$ м, $B = 8$ м, при установке нескольких продольных рядов светильников на высоте 4 м;

б) то же, относительно плоскости $abcd$ (рис. 3-19) при установке одного ряда светильников.

В первом случае $A/h = 4$, $B/h = 2$, соответственно чему по графикам определяем η_A и η_B для отдельных зон. Расчетные данные заносим в табл. 3-3, итоги которой позволяют определить коэффициент использования, равный $235,5/649 = 0,36$.

Таблица 3-3

Зона, °	I_V	η_A	η_B	η_V	$I_V \eta_V$
0—10	64	0,85	1,0	0,85	54,5
10—20	65	0,84	1,0	0,84	54,5
20—30	69	0,82	0,76	0,62	43
30—40	72	0,80	0,65	0,52	37,5
40—50	75	0,78	0,50	0,39	29
50—60	78	0,73	0,30	0,22	17
60—70	78	0,66	0	0	0
70—80	76	0,51	0	0	0
80—90	72	0,23	0	0	0
Вся полусфера	649				235,5

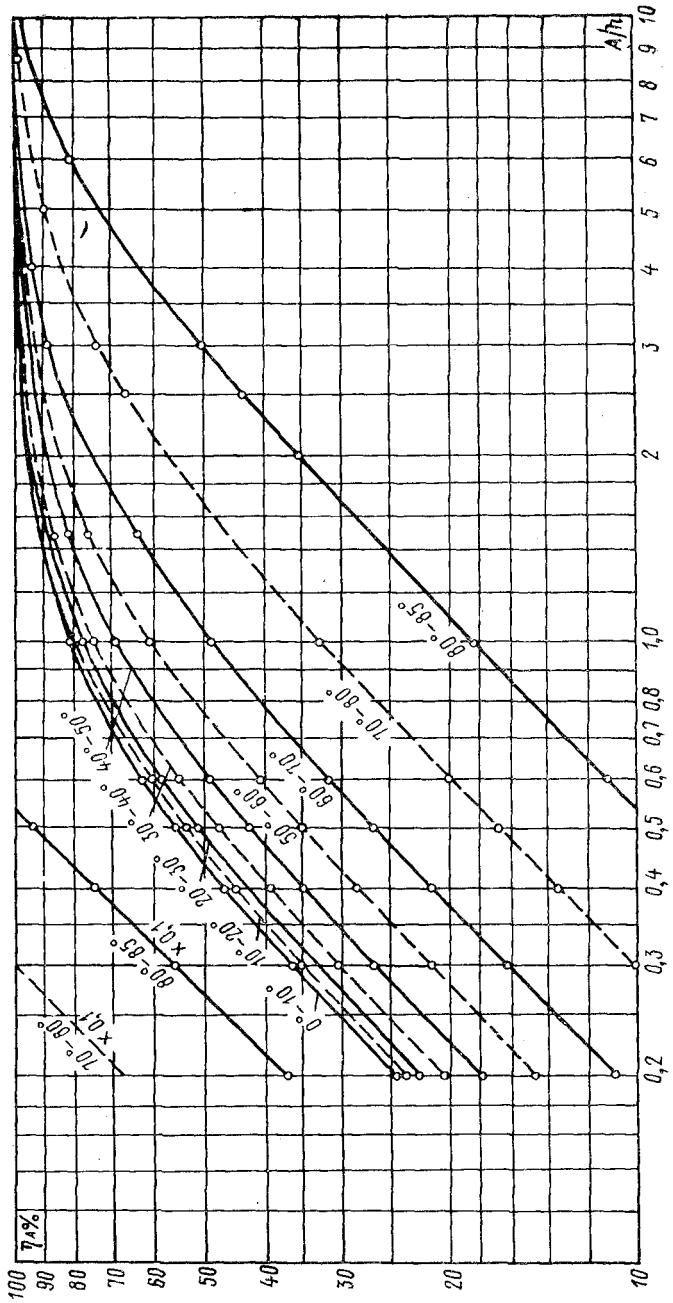


Рис. 3-21. Коэффициенты η двугранных полузон при $m = 1$ (одиночный излучатель)

Для решения примера б учтем, что коэффициенты η_d останутся неизменными, коэффициентами же η_D здесь пользоваться нельзя. Определив по значениям тангенсов углы γ , видим, что на плоскость $abcd$ падает 0,7 потока зоны $20^\circ-30^\circ$, полностью потоки зон $30^\circ-40^\circ$ и $40^\circ-50^\circ$ и половина потока зоны $50^\circ-60^\circ$. Полный поток, как в первом примере, определяется суммой сил света (649), полезный же поток суммой $0,7 \cdot 0,82 \cdot 69 + 0,8 \cdot 72 + 0,78 \cdot 75 + 0,5 \cdot 0,73 \cdot 78 = 184,2$, которую надо разделить на 2, так как используются зоны лишь по одну сторону от главной продольной плоскости. Окончательно коэффициент использования составит $92,1/649 = 0,14$.

Если световой поток излучателя известен, то умножением его на полученные значения коэффициента использования может быть определена величина первичного потока.

В случаях, когда длина линейного излучателя не совпадает с размером A , для определения первичного потока можно прибегнуть к приему, аналогичному указанному

для светящихся прямоугольников. На рис. 3-20 показаны два примера. Сохраняя ранее принятый нами способ индексации потоков, можем найти:

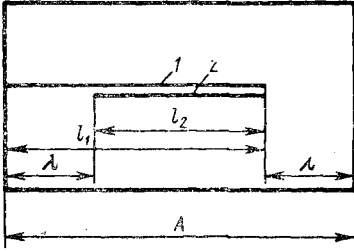


Рис. 3-20. Излучатели, длина которых не совпадает с длиной помещения

$$\text{для линии 1 } F_{l_1 A} = \frac{F_{l_1 l_1} + F_{AA} - F_{\lambda \lambda}}{2};$$

$$\text{для линии 2 } F_{l_2 A} = F_{(l_2 \lambda)(l_2 \lambda)} - F_{\lambda \lambda}.$$

Рассмотренные выше линейные излучатели могут быть как сплошными, так и прерывистыми. С точки зрения определения первичных потоков структура излучателей почти не играет роли, если, конечно, она однородна по всей длине. Так, уже для трех отдельных светильников, равномерно распределенных вдоль линии довольно большой длины, коэффициент использования почти совпадает с рассчитанным для сплошной линии.

Для возможности определения первичного потока от одиночных светильников на рис. 3-21 приводятся рассчитанные нами кривые η_d для случая $m = 1$. В отличие от других кривых здесь учтен размер A по одну сторону от светильника, в направлении его оси, и значения η_d отнесены к половине потока двугранной зоны по одну сторону от главной продольной плоскости.

Круглосимметричные точечные излучатели. До настоящего времени сохраняет значение один из старейших способов определения первичного потока на горизонтальную поверхность от круглосимметричных точечных излучателей, предложенный Коу.

Пусть излучатель S установлен на высоте h над краем неограниченно длинной полосы шириной p (рис. 3-22, правая половина). Круговые зоны $0^\circ-10^\circ$, $10^\circ-20^\circ$ и т. д., в которых обычно определяется световой поток, образуют в пересечении с горизонтальной поверхностью кольца, в частности, отмеченные на рисунке цифрами 1-4. В пределах данной полосы уменьшается половина кольца 1 и коэффициент использования потока этой зоны по отношению к полюсе равен 0,5. Кольцо 2 попадает в полосу лишь своей заштрихованной частью и коэффициент использования соответствующей

ему зоны равен 0,5, умноженному на отношение заштрихованной площади полукольца к полной и т. д. Площади всех колец и их частей нетрудно вычислить по формулам геометрии.

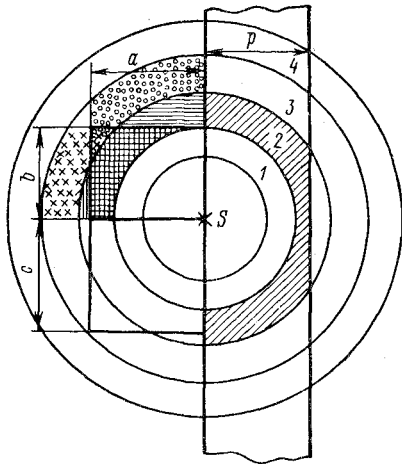


Рис. 3-22. К способу Кою

На рис. 3-23 показана зависимость зональных коэффициентов использования от относительной ширины полосы p/h . После того как с увеличением p/h для какой-либо зоны коэффициент η достигнет значения 0,5, он сохраняет это значение при дальнейшем возрастании p/h .

Дополнительные соображения позволяют применить кривые Кою для определения первичного коэффициента использования в замкнутых помещениях. На рис. 3-22 слева показаны два из четырех квадрантов такого помещения. Определим, например, поток зоны 2, используемый в квадранте ab .

Пусть полный поток данной зоны есть f . На полосу неограниченной длины и шириной a падает поток $(f\eta_a)/2$ (горизонтальная штриховка), на такую же полосу шириной b — поток $(f\eta_b)/2$ (вертикальная штриховка).

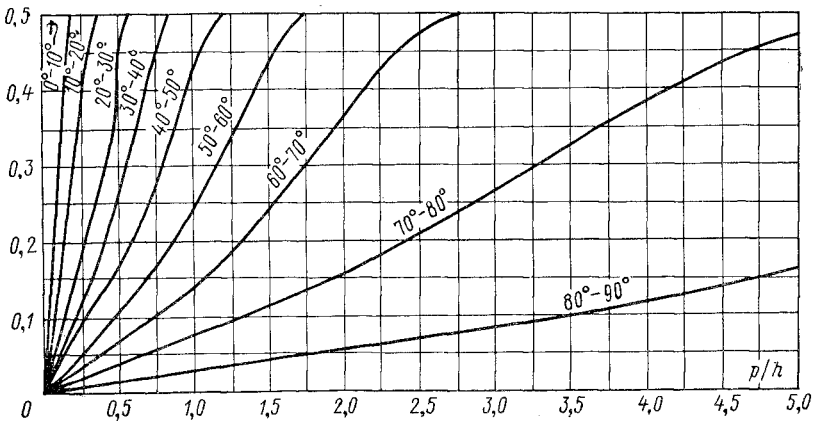


Рис. 3-23. Коэффициенты первичного использования круговых зон

Из рисунка ясно, что

$$\frac{f}{2}(\eta_a + \eta_b) = \frac{f}{4} + f_{ab}, \quad (3-22)$$

где f_{ab} — полезный поток квадранта (двойная штриховка). Отсюда искомый поток квадранта составляет

$$f_{ab} = \frac{f}{2}(\eta_a + \eta_b - 0,5). \quad (3-23)$$

В некоторых случаях сумма в скобках оказывается отрицательной; это указывает на то, что полезный поток данной зоны для данного квадранта равен нулю, например, кольцо 4 для квадранта *ab*.

В отношении метода Кою, которым мы продолжаем пользоваться для определения первичного потока от одиночных излучателей, необходимо сделать следующие замечания.

а. Некоторая неточность метода связана с тем, что поток принимается равномерно распределенным по площади каждого кольца — обстоятельство, заведомо не имеющее места в действительности, но с которым можно примириться. Точность кривых можно было бы повысить до любой степени, заменяя десятиградусные зоны более мелкими.

б. В методе есть и еще одна погрешность (если мы не ошибаемся — ранее не замеченная), ясная из рассмотрения зоны 3 в пределах квадранта *ab*. Для этой зоны (а в других случаях — для той единственной зоны, внутри которой размещается угол квадранта) выражение (3-22) неточно и в его правую часть должна была бы быть добавлена со знаком минус площадь, свободная на рисунке от значков. На окончательную величину первичного потока эта погрешность влияет незначительно.

в. Чтобы определить полезный поток всей зоны, т. е. с учетом четырех квадрантов, представляется удобным просуммировать выражения вида (3-23) для всех квадрантов, получив формулу

$$F_{\text{зоны}} = (\eta_{ab} + \eta_{ac} + \eta_{cd} + \eta_{bd} - 1) f. \quad (3-24)$$

Однако, если хотя бы для одного из квадрантов зональный поток равен нулю, то выражение для него войдет при суммировании не как нуль, а как отрицательная величина, исказив результат¹.

Для устранения возможных ошибок предпочтительно определять полезный поток для каждого квадранта отдельно.

Приводим пример расчета полезного потока от светильника силою света 100 св по всем направлениям, установленного на высоте 3 м и координируемого размерами $a = 3$ м, $b = 6$ м, $c = 9$ м, $d = 12$ м (см. табл. 3-4).

Таблица 3-4

Пример расчета по способу Кою

Зона, °	ω , ср	F , лм	η_a	η_b	η_c	η_d	Первичный поток			
							<i>ab</i>	<i>ac</i>	<i>bd</i>	<i>cd</i>
0—10	0,095	9,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,4	2,4	2,4	2,4
10—20	0,283	28,3	0,5	0,5	0,5	0,5	7,1	7,1	7,1	7,1
20—30	0,463	46,3	0,5	0,5	0,5	0,5	11,6	11,6	11,6	11,6
30—40	0,628	62,8	0,5	0,5	0,5	0,5	15,7	15,7	15,7	15,7
40—50	0,774	77,4	0,43	0,5	0,5	0,5	16,6	16,6	19,3	19,3
50—60	0,897	89,7	0,24	0,5	0,5	0,5	10,8	10,8	22,4	22,4
60—70	0,992	99,2	0,13	0,37	0,5	0,5	0	6,4	18,4	24,8
70—80	1,058	105,8	0,07	0,15	0,26	0,38	0	0	1,5	6,9
80—90	1,091	109,1	0,03	0,06	0,08	0,12	0	0	0	0
Итого		628,1					64,2	70,6	98,4	110,2

Суммарный для всех четырех квадрантов поток составляет 343,4 лм, коэффициент же использования равен $343,4/628,1 = 0,55$.

¹ Описывая метод Кою в своих предшествующих работах, автор не обратил внимания читателей на это обстоятельство.

Из описания метода Кою и приведенного примера ясно, что если бы мы стали таким путем определять первичный поток от всей совокупности светильников, установленных в том или ином помещении, то потребовался бы громадный объем вычислительной работы.

Анализ показывает, что коэффициент первичного использования светового потока совокупности светильников, равномерно распределенных по помещению, зависит от следующих факторов: а) форма кривой силы света светильника; б) индекс помещения; в) отношение расстояния между светильниками к расчетной высоте ($\lambda = L/h$).

Последняя зависимость выражена менее резко, чем остальные.

Одно из первых аналитических решений задачи определения первичных потоков предложено И. С. Дубинкиным, составленная которым таблица содержит телесные углы первичного использования зональных потоков.

В отличие от Дубинкина, Джонс и Нейдхарт дают в своих таблицах коэффициенты первичного использования зональных потоков, рассчитанные для значений $\lambda = 0,4—1—1,5$. Коэффициентами для $\lambda = 0,4$ можно пользоваться и при меньших λ , включая сплошные световые потолки. Коэффициенты первичного использования по отношению к потолку даются независимо от λ . Коэффициенты Джонса—Нейдхарта приведены в табл. 3-5.

Таблица 3-5

Зональные множители Джонса и Нейдхарта

Пло- скость	L/h	Зона, °	Индекс помещения										
			0,6	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	
расчетная	0,4	0—10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		10—20	0,72	0,79	0,81	0,85	0,88	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,96
		20—30	0,57	0,67	0,73	0,79	0,83	0,87	0,89	0,91	0,93	0,94	0,94
		30—40	0,34	0,50	0,56	0,64	0,69	0,77	0,82	0,85	0,88	0,88	0,91
		40—50	0,16	0,36	0,49	0,57	0,64	0,72	0,78	0,81	0,86	0,88	0,88
		50—60	0,03	0,12	0,28	0,39	0,48	0,60	0,67	0,72	0,78	0,83	0,83
		60—70	0	0	0,05	0,21	0,31	0,43	0,52	0,59	0,69	0,77	0,77
		70—80	0	0	0	0	0	0,11	0,22	0,32	0,47	0,60	0,60
80—90	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0,14	0,14		
расчетная	1,0	0—10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		10—20	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		20—30	0,86	0,90	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
		30—40	0,21	0,40	0,52	0,61	0,68	0,76	0,81	0,84	0,88	0,90	0,90
		40—50	0,14	0,32	0,43	0,53	0,60	0,70	0,75	0,79	0,84	0,87	0,87
		50—60	0	0,13	0,27	0,39	0,48	0,60	0,67	0,72	0,80	0,83	0,83
		60—70	0	0	0,02	0,13	0,24	0,40	0,51	0,58	0,68	0,74	0,74
		70—80	0	0	0	0	0,01	0,09	0,20	0,31	0,48	0,55	0,55
80—90	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,05	0,10	0,10		
расчетная	1,5	0—10	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		10—20	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		20—30	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		30—40	0,32	0,86	0,88	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97
		40—50	0	0,26	0,33	0,45	0,54	0,65	0,72	0,77	0,83	0,85	0,85
		50—60	0	0,22	0,29	0,35	0,42	0,53	0,63	0,69	0,77	0,80	0,80
		60—70	0	0,02	0,09	0,17	0,24	0,37	0,48	0,56	0,67	0,71	0,71
		70—80	0	0	0	0	0	0,06	0,15	0,25	0,41	0,51	0,51
80—90	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,04	0,04		
потолок	—	90—100	0	0	0	0	0	0,04	0,14	0,22	0,33	0,40	
		100—110	0	0	0,10	0,22	0,32	0,47	0,60	0,67	0,76	0,81	
		110—120	0,20	0,34	0,43	0,52	0,59	0,69	0,77	0,82	0,89	0,93	
		120—130	0,37	0,50	0,60	0,67	0,72	0,78	0,83	0,88	0,91	0,94	
		130—140	0,56	0,66	0,72	0,78	0,81	0,86	0,88	0,91	0,94	0,95	
		140—150	0,63	0,71	0,77	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,96	0,97	
		150—180	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	

Достаточная точность таблиц Джонса—Нейдхарта неоднократно подтверждена.

Приводим пример расчета коэффициента использования потока нижней полусферы для светильника силой света по всем направлениям 100 св для случая $\lambda = 1,5$ и $i = 0,8$ (табл. 3-6). Значения зональных потоков заимствуем из предыдущего примера.

Таблица 3-6
Определение коэффициента использования

Зона, °	Зональный поток, лм	Коэффициент по табл. 3-5	Полезный поток, лм
0—10	9,5	1,0	9,5
10—20	28,3	1,0	28,3
20—30	46,3	1,0	46,3
30—40	62,8	0,86	54
40—50	77,4	0,26	20,1
50—60	89,7	0,22	19,7
60—70	99,2	0,02	2,0
70—80	105,8	0	—
80—90	109,1	0	—
	628,1		179,9

Коэффициент первичного использования $179,9/628,1 = 0,29$.

Если используется таблица для определения первичных потоков, падающих на потолок, то первичный поток на стены определяется как разность между полным потоком светильников и суммой потоков, падающих на расчетную плоскость и на потолок. В нашей практике (о чем подробнее см. ниже) часто на уровне светильников воображается условный потолок, падающий на который первичный поток принимается равным потоку излучателей в верхней полусфере. В этом случае соответствующие коэффициенты Джонса—Нейдхарта не используются, а первичный поток на стены определяется как разность между потоком излучателей в нижней полусфере и первичным потоком на расчетную плоскость.

Световой поток в телесном угле произвольной конфигурации. Представляет интерес и встречается в практике задача определения светового потока от точечного (или могущего быть принятым за точечный) излучателя с любым, но, конечно, известным светораспределением, падающего на плоскость произвольной формы и произвольно же расположенную. Из нескольких известных способов решения этой задачи остановимся на способе, предложенном автором.

Вообразим излучатель помещенным в центр сферы. На поверхности последней можно нанести сетку меридианов, соответствующих определенным углам β и параллелей, соответствующих углам α . Равным площадям на поверхности сферы будут соответствовать равные же, опирающиеся на них, телесные углы.

Сфера не может быть изображена на плоскости без искажений и при выборе способа картографической проекции решается, какой геометрический признак должен остаться неискаженным. Имея в виду удобное определение телесных углов, выберем в качестве такого признака пропорциональность площадей телесным углам и изобразим полусферу на плоскости по законам равновеликой азимутальной проекции. Меридианы изобразятся радиусами-векторами, параллели же останутся концентрическими окружностями, но расположенными по измененному закону.

Пусть график, который мы строим, имеет радиус R . Вся его площадь (если учитывать четыре квадранта) соответствует телесному углу полусферы, т. е. 2π , а площадь dS элементарного кольца радиуса r — телесному углу $d\omega$.

Тогда

$$\frac{dS}{\pi R^2} = \frac{d\omega}{2\pi},$$

а так как

$$d\omega = 2\pi \sin \alpha \, d\alpha \text{ и } dS = 2\pi r \, dr,$$

то

$$r \, dr = \frac{R^2}{2} \sin \alpha \, d\alpha \text{ и } r_\alpha = R \sqrt{1 - \cos \alpha}. \quad (3-25)$$

Это дает возможность провести на графике дуги, соответствующие любой шкале α . Для облегчения подсчета площади, определяющей телесный угол, график целесообразно разбить на мелкие элементы. На рис. 3-24 таких элементов 785, а так как одноквadrантный график соответствует телесному углу $2\pi/4 \approx 1,57$, то каждый элемент отвечает $\Delta\omega = 0,002$ стерадиана. Число элементов между каждыми двумя дугами, соответствующими значениям α , кратным 10° , определяется делением зонального телесного угла (табл. 3-1) на $0,002$ и для удобства построения округляется до значения, кратного трем или четырем. Если теперь определить и нанести на график границы искомого телесного угла, то его величина может быть определена путем подсчета элементов или же планиметрированием. Определяя поток, надо разделить площадь графика, соответствующую данному телесному углу, на такие части, в пределах каждой из которых сила света может быть принята неизменной и весь поток найти по сумме потоков для этих частей.

Известную трудность представляет необходимое для определения границ телесного угла нанесение на график точек и линий расчетной поверхности. Будем, как и во второй главе, координировать точки в системе $\xi = x/h$ и $\eta = y/h$, располагая оси координат соответственно плоскостям симметрии светильника (при отсутствии таких плоскостей направление осей выбирается произвольно).

Направление на точку из полюса определится углом $\beta = \operatorname{arctg} \frac{\xi}{\eta}$. При переносе на график равных телесных углов β не меняет значения, расстояние же точки от полюса определится углом α , который для расчетной плоскости может быть найден по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\xi^2 + \eta^2}.$$

Основываясь на сказанном и чтобы упростить операции, выполняемые при расчетах, предлагается график равных телесных углов рассматривать совместно с построенным в том же масштабе графиком, на котором нанесена сетка углов β и кривые, соответствующие ряду круглых значений ξ и η (рис. 3-25). Один из графиков должен быть выполнен на прозрачном материале, так как при работе графики должны совмещаться.

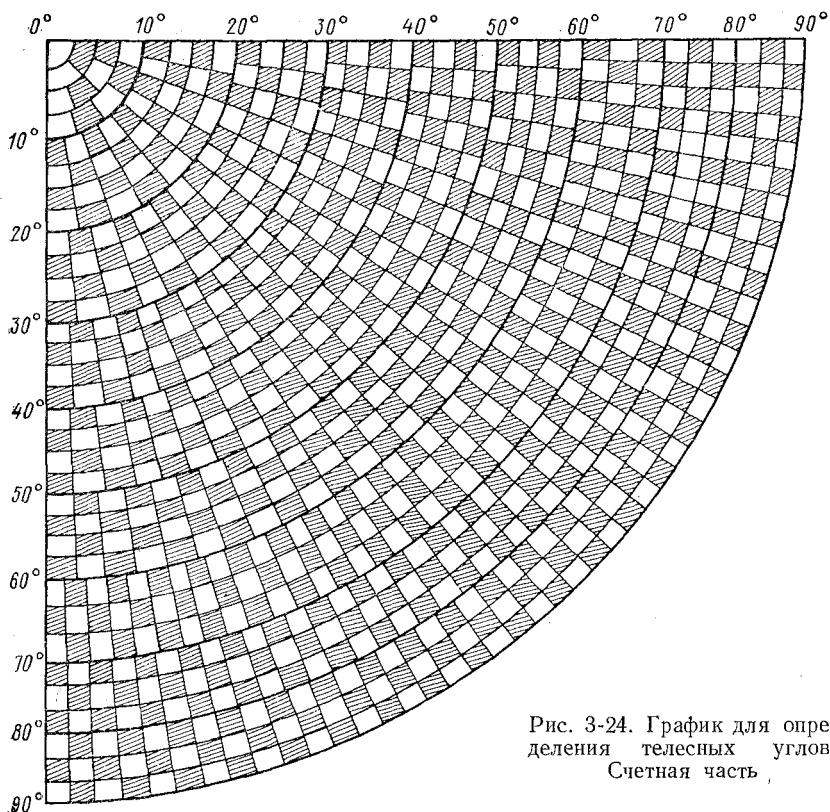


Рис. 3-24. График для определения телесных углов. Счетная часть

Приводим схемы решения характерных задач с использованием графиков.
 а. Определить световой поток, падающий от светильника с заданным, но произвольным светораспределением на неограниченно длинную полосу шириной p , вдоль края которой, на высоте h , установлены светильники.

Отношение p/h примем за ξ , в результате чего полоса изобразится на графике фигурой, заштрихованной на рис. 3-26. Совместив этот график с графиком равных телесных углов и имея на совмещенном графике сетку углов α и β , наносим по характеристикам светильника кривые изосвечей. Принимая, что между двумя такими соседними кривыми сила света неизменна и равна среднему значению для обеих кривых, подсчитываем число элементов графика равных телесных углов, заключенных между двумя изосвечами. Умножая это число на силу света и на 0,002, получаем поток. Операция повторяется для всех промежутков между изосвечами и полученные результаты суммируются.

б. Определить световой поток, падающий от источника с заданным кругло-симметричным светораспределением на вертикальный прямоугольник, зная все

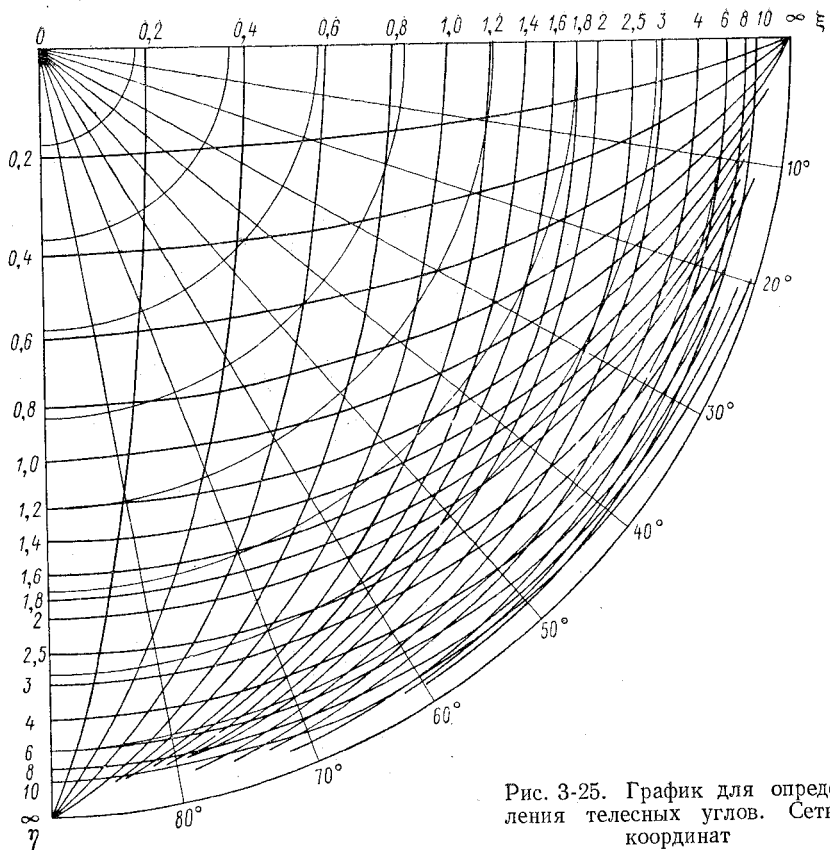
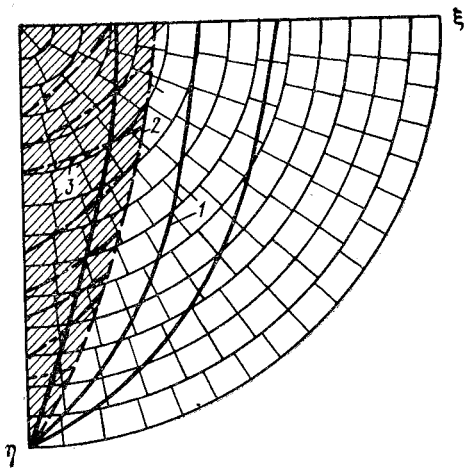


Рис. 3-25. График для определения телесных углов. Сетка координат

Рис. 3-26. Определение светового потока, падающего на полосу

1 — линии равных значений ξ , 2 — граница полосы, 3 — изосвечи. Сетка равных телесных углов показана схематично



размеры, определяющие величину прямоугольника и его расположение по отношению к излучателю (рис. 3-27).

Учтем, что прямые линии изображаются на графике равных телесных углов кривыми четвертого порядка. Чтобы провести их достаточно точно, следует определить координаты не только вершины прямоугольника, но и указанных на рисунке

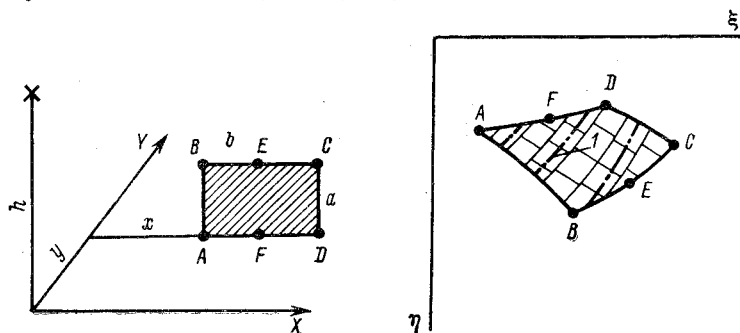


Рис. 3-27. Определение светового потока, падающего на прямоугольник $ABCD$

1 — изосвечи. Сетка равных телесных углов показана схематично

промежуточных точек. Определяя ξ и η , делим соответствующие размеры на высоту. Относительные координаты шести выбранных точек не будут попарно совпадать и точки не совпадут на графике телесных углов, так как для точек верхнего и нижнего рядов учитываются разные значения высоты. После нанесения точек на график получим фигуру, характер которой показан на рис. 3-27. Нанесем на график изосвечи — в данном случае концентрические круги, после чего ведем расчет, как в случае а.

3-4. Эффект свода

Представим себе, что излучатель, в частности, направляющий часть светового потока в верхнюю полусферу, подвешен в помещении определенных размеров и освещает горизонтальную расчетную поверхность. Вообразим, далее, что при сохранении неизменными всех прочих размеров, начинает увеличиваться высота помещения, т. е. возрастает размер, обозначаемый нами h_c (рис. 3-28).

Это не может не сказаться на распределении по поверхностям помещения светового потока и на освещенности расчетной плоскости. Вся часть помещения, расположенную выше горизонтальной плоскости AB , мы вправе рассматривать как самостоятельную полость, образуемую, образно говоря, «световой мешок», попадая в который, световой поток до перехода в нижнюю зону частично претерпевает многократные отражения. В процессе этих отражений часть потока поглощается и через плоскость AB вниз проходит меньший поток, чем поток излучателя в верхней полусфере, умноженный на фактический коэффициент отражения поверхностей верхней зоны. С точки

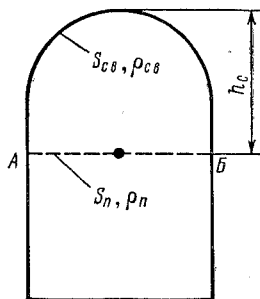


Рис. 3-28. К эффекту свода

зрения расчета в ряде случаев удобно заменить верхнюю полость помещения плоскостью AB , считая последнюю условным потолком, имеющим условный же, уменьшенный за счет потерь при многократных отражениях коэффициент отражения.

Интересна и другая сторона вопроса: если подсчитать световой поток, падающий на поверхности помещения, лежащие выше AB , то он во всех случаях будет больше потока излучателя в верхней полусфере, будучи увеличенным за счет тех же многократных отражений. Вообще всегда сумма световых потоков, падающих на поверхности помещения, превышает световой поток излучателей. В этом, конечно, нет нарушения закона сохранения энергии: энергетическим актом является не падение, а поглощение светового потока, и сумма потоков, поглощенных поверхностями помещения, всегда равна потоку излучателей.

Пусть условный потолок AB имеет площадь S_{π} и ему должен быть приписан коэффициент отражения ρ_{π} . Суммарную площадь поверхностей, лежащих выше AB : верхней части продольных и торцевых стен, истинного потолка, или свода, обозначим через $S_{св}$, а их коэффициент отражения $\rho_{св}$ (если коэффициенты отражения отдельных участков различны, то находится средневзвешенное значение). Примем, что яркость B равномерно распределена по поверхности $S_{св}$ и что последняя является диффузной. В этом случае для нахождения потока поверхности служит выражение $F = BS_{\pi}$. Будучи примененным к поверхности свода $S_{св}$, это соотношение дает поток, излучаемый этой поверхностью $BS_{св}\pi$, будучи же примененным к поверхности условного потолка AB (которая не может иметь иной яркости, чем B) определяет поток, проходящий через AB вниз $BS_{\pi}\pi$ (что следует также из принципа Муна, см. стр. 71). Сопоставляя эти выражения, видим, что из отражаемого поверхностями верхней полости потока через AB проходит доля $S_{\pi}/S_{св}$. Это дает возможность, приняв, что первичный излучатель направляет на «свод» поток F , составить следующую цепочку преобразований этого потока:

Падает на верхнюю полость	Отражается от нее	Проходит вниз через AB	Остается в полости
F	$F\rho_{св}$	$F\rho_{св} \frac{S_{\pi}}{S_{св}}$	$F\rho_{св} \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)$
$F\rho_{св} \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)$	$F\rho_{св}^2 \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)$	$F\rho_{св}^2 \frac{S_{\pi}}{S_{св}} \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)$	$F\rho_{св}^2 \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)^2$
$F\rho_{св}^2 \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)^2$	$F\rho_{св}^3 \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)^2$	$F\rho_{св}^3 \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)^2$	$F\rho_{св}^3 \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)^3$

Выражения во всех столбцах оказываются членами бесконечно убывающих геометрических прогрессий.

Суммируя потоки, проходящие через AB , и находя отношение суммы к первичному потоку F , получаем коэффициент отражения, который должен быть приписан условному потолку AB ,

$$\rho_{\pi} = \frac{\rho_{св} \frac{S_{\pi}}{S_{св}}}{1 - \rho_{св} \left(1 - \frac{S_{\pi}}{S_{св}}\right)} = \frac{1}{\frac{S_{св}}{S_{\pi}} \left(\frac{1}{\rho_{св}} - 1\right) + 1}. \quad (3-26)$$

Суммируя потоки, падающие на поверхность верхней зоны, и деля сумму на первичный поток, находим коэффициент γ , показывающий, во сколько раз увеличивается поток многократными отражениями

$$\gamma = \frac{1}{1 - \rho_{св} \left(1 - \frac{S_{п}}{S_{св}}\right)}. \quad (3-27)$$

Для упрощения определения $\rho_{п}$ приводится график (рис. 3-29).

Часть помещения, расположенную выше AB , можно условно рассматривать как самостоятельное помещение, характеризуемое своим индексом i . Поскольку индекс, определяемый по (3-10), есть отношение площади пола или потолка к половине площади стен, нетрудно связать его с фигурирующим в (3-26), (3-27) отношением $S_{п}/S_{св}$:

$$\frac{S_{п}}{S_{св}} = \frac{i}{i + 2}.$$

Тогда выражению (3-26) может быть придан вид:

$$\rho_{п} = \frac{i\rho_{св}}{1 + 2(1 - \rho_{св})}. \quad (3-28)$$

Эффект свода так или иначе учитывается во всех случаях, когда излучатели расположены ниже потолка; строго говоря (хотя этим нередко пренебрегают), он играет роль даже в случаях, когда в верхнюю полусферу никаких первичных потоков не излучается.

На учете эффекта свода основан широко применяемый в США с 1964 года «зонально-полостной» метод расчета, при котором помещение разделяется на три «полости»: от пола до расчетной поверхности, от последней до излучателей и от них до потолка (надо, однако, сказать, что для первой из полостей пересчет коэффициентов отражения существенного значения не имеет). Более того, авторы метода находят возможным в таких, например, случаях, как задача определения освещенности на половине площади помещения при выключенных светильниках другой половины, вообразить по плоскости, разделяющей эту половину, условную стену, приписав ей коэффициент отражения, определенный по (3-26).

3-5. Распределение светового потока по поверхностям помещения и учет многократных отражений

Материалы, приведенные в § 3-3, позволяют для большинства встречающихся в практике случаев определить первичные потоки, падающие от излучателей на поверхности.

В условиях освещения замкнутых помещений первичный поток распределяется между тремя группами поверхностей: потолком, стенами и расчетной поверхностью, которым мы присвоим индексы, соответственно, «п», «с» и «р». Двойные индексы, вида nm , будем применять для потока, падающего от поверхности n на поверхность m или соответствующего коэффициента использования. Наконец значок «'» будем применять в случаях, когда надо подчеркнуть, что речь идет о первичных потоках или первичных коэффициентах использования (F' , η').

В общем случае, если поток излучателей есть F , то

$$F = F'_n + F'_c + F'_p. \quad (3-29)$$

Деля все члены этого равенства на F , получим

$$\eta'_n + \eta'_c + \eta'_p = 1. \quad (3-30)$$

Индекс помещения, неизменно участвующий в расчетах, при потолочных светильниках определяется по высоте потолка над расчетной поверхностью, падающий же на потолок первичный поток F'_n может быть принят равным потоку излучателей в верхней полусфере. При подвесных светильниках индекс определяется по расчетной высоте h , потоки же F'_p и F'_n могут быть найдены по таблицам Джонса—Нейдхарта, а F'_c определен как разность по формуле (3-29). Однако по принятой у нас методике МЭИ чаще всего поверхности помещения, расположенные выше излучателей, заменяются условным потолком на уровне последних (см. § 3-4), что в отношении определения i и F'_n сводит этот случай к предыдущему.

Определение потоков, установившихся на поверхностях с учетом многократных отражений, требует, прежде всего, знания «коэффициентов связи» между поверхностями помещения, т. е. коэффициентов первичного использования потока, излучаемого одной поверхностью относительно другой. Эти коэффициенты необходимы и в случаях, когда первичными излучателями являются большие поверхности на потолках или стенах.

Задача определения «коэффициентов связи» в принципе не отличается от рассмотренной в § 3-3, но в данных условиях имеет некоторую специфику.

Поскольку поверхности помещения принимаются диффузными, коэффициент первичного использования потока потолка относительно расчетной поверхности $\eta'_{п.р}$ может быть определен по графику рис. 3-6 или рассчитан по таблицам Джонса—Нейдхарта¹ при $\lambda = 0,4$ (результаты хорошо совпадают).

Остальные коэффициенты определяют на основе следующих соображений:

$$\eta'_{р.п} = \eta'_{п.р} \quad (3-31)$$

в силу симметрии; очевидно, что

$$\eta'_{п.с} = 1 - \eta'_{пр}; \quad (3-32)$$

$$\eta'_{р.с} = \eta'_{п.с} \quad (3-33)$$

в силу симметрии; согласно принципу Муна

$$\frac{\eta'_{с.п}}{\eta'_{п.с}} = \frac{AB}{2h(A+B)} = \frac{i}{2},$$

¹ Таблицы Джонса—Нейдхарта пригодны и для недиффузных поверхностей, но все дальнейшее изложение относится только к диффузным поверхностям.

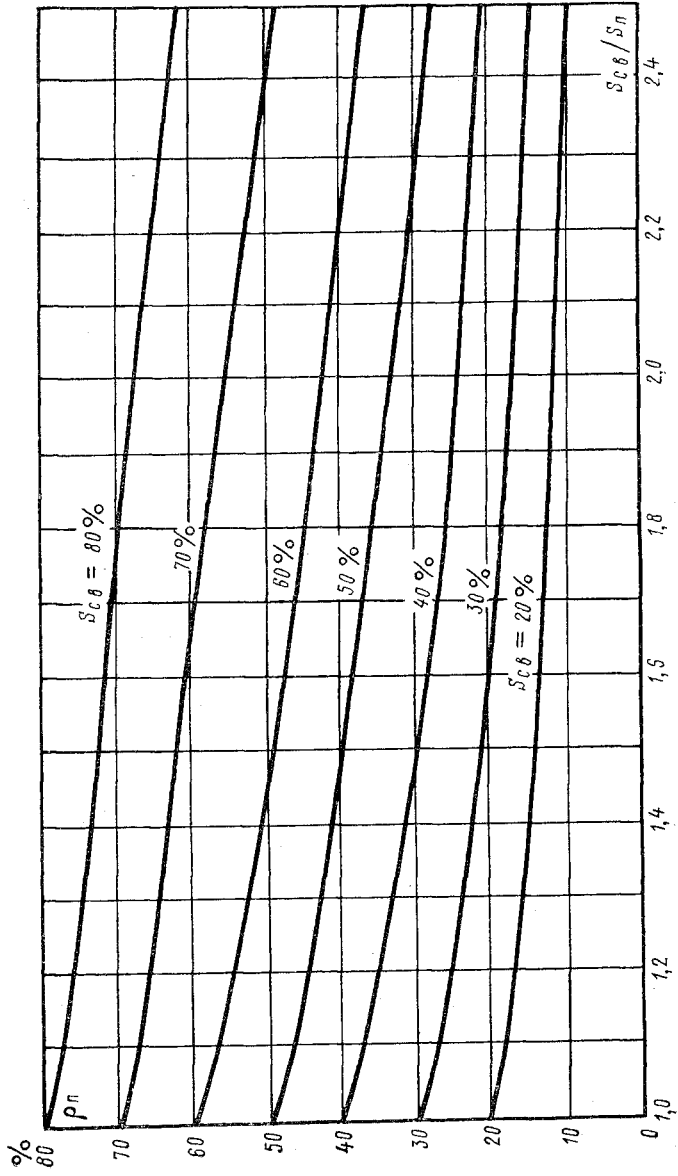


Рис. 3-29. График для определения P_n

откуда с учетом (3-32)

$$\eta'_{с. п} = (1 - \eta'_{п. п}) \frac{i}{2}; \quad (3-34)$$

$$\eta'_{с. п} = \eta'_{с. п} \quad (3-35)$$

в силу симметрии; наконец,

$$\eta'_{с. с} = 1 - 2\eta'_{с. п} = 1 - i(1 - \eta'_{п. п}). \quad (3-36)$$

Таким образом, все коэффициенты оказываются определенными через $\eta'_{п. п}$ и i . Еще раз напомним, что i определяется в данном случае по высоте над расчетной поверхностью физического или условного потолка.

Перейдем, собственно, к учету многократных отражений, схема которых не отличается в принципе от рассмотренной в § 3-4. В результате этих отражений установившийся поток на каждой из поверхностей определяется первичным потоком на эту поверхность, увеличенным за счет его повторных отражений и определенной долей первичных потоков, падающих на другие поверхности. Математически это выражается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} F_p &= F'_p k_{p. p} + F'_c k_{с. p} + F'_n k_{п. п}; \\ F_c &= F'_p k_{p. с} + F'_c k_{с. с} + F'_n k_{п. с}; \\ F_n &= F'_p k_{p. n} + F'_c k_{с. n} + F'_n k_{п. n}. \end{aligned} \right\} \quad (3-37)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \eta_p &= \eta'_p k_{p. p} + \eta'_c k_{с. p} + \eta'_n k_{п. п}; \\ \eta_c &= \eta'_p k_{p. с} + \eta'_c k_{с. с} + \eta'_n k_{п. с}; \\ \eta_n &= \eta'_p k_{p. n} + \eta'_c k_{с. n} + \eta'_n k_{п. n}. \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

Здесь коэффициенты вида k_{nm} представляют собой коэффициенты использования потока, падающего на поверхность n , относительно поверхности m с учетом многократных отражений. Так, $k_{п. п}$ есть коэффициент использования потока, падающего на потолок, относительно расчетной плоскости. Коэффициенты с двумя одинаковыми индексами всегда больше единицы: первичный поток, падающий на данную поверхность, усиливается в результате многократных отражений.

Методы определения k_{nm} основаны на допущениях, что поверхности отражают диффузно и что первичные потоки распределены по ним равномерно. Одним из первых коэффициенты k_{nm} вычислил И. С. Дубинкин, но он не учитывал отражения света полом. В данное время применяются коэффициенты, вычисленные под руководством М. М. Епанешникова в МЭИ.

Рассматривая эффект свода, мы из методических соображений проследили весь ход многократных отражений и нашли суммы

Коэффициенты для определения светового потока, установившегося на расчетной плоскости

индекс i	70						50						30						
	50		30		10		50		30		10		50		30		10		
	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	
$\rho_{\text{П}} \%$	0,26	0,24	0,20	0,19	0,16	0,18	0,17	0,14	0,14	0,11	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$\rho_{\text{П}} \%$	0,30	0,28	0,24	0,27	0,23	0,21	0,22	0,16	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$\rho_{\text{П}} \%$	0,38	0,36	0,31	0,30	0,26	0,26	0,26	0,24	0,21	0,18	0,15	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$\rho_{\text{П}} \%$	0,43	0,41	0,37	0,35	0,28	0,28	0,28	0,25	0,24	0,20	0,18	0,16	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\rho_{\text{П}} \%$	0,43	0,41	0,38	0,38	0,31	0,30	0,30	0,27	0,27	0,24	0,22	0,21	0,18	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
$\rho_{\text{П}} \%$	0,50	0,46	0,42	0,40	0,36	0,34	0,32	0,29	0,29	0,26	0,24	0,23	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$\rho_{\text{П}} \%$	0,50	0,50	0,47	0,44	0,40	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30	0,28	0,27	0,24	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
$\rho_{\text{П}} \%$	0,62	0,54	0,51	0,50	0,46	0,40	0,38	0,37	0,35	0,32	0,30	0,29	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$\rho_{\text{П}} \%$	0,62	0,56	0,52	0,52	0,48	0,42	0,39	0,38	0,37	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$\rho_{\text{П}} \%$	0,64	0,60	0,57	0,54	0,50	0,44	0,40	0,38	0,37	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$\rho_{\text{П}} \%$	0,68	0,60	0,59	0,57	0,54	0,48	0,44	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$\rho_{\text{П}} \%$	0,70	0,62	0,60	0,57	0,54	0,48	0,44	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
$\rho_{\text{П}} \%$	0,72	0,64	0,62	0,61	0,58	0,48	0,45	0,44	0,42	0,41	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26	0,24	0,24
$\rho_{\text{П}} \%$	0,76	0,66	0,62	0,64	0,62	0,50	0,46	0,48	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26
	0,19	0,18	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,09	0,09	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	0,24	0,22	0,18	0,18	0,15	0,14	0,14	0,12	0,12	0,09	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	0,26	0,26	0,22	0,21	0,18	0,17	0,16	0,14	0,14	0,12	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	0,31	0,29	0,26	0,28	0,21	0,21	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	0,34	0,32	0,29	0,28	0,23	0,21	0,20	0,18	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	0,35	0,35	0,32	0,30	0,26	0,23	0,22	0,20	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,40	0,38	0,34	0,36	0,28	0,26	0,26	0,24	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
	0,43	0,41	0,38	0,36	0,32	0,28	0,26	0,24	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
	0,48	0,44	0,40	0,40	0,36	0,31	0,29	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	0,55	0,50	0,46	0,46	0,43	0,38	0,35	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	0,55	0,52	0,50	0,49	0,45	0,38	0,35	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	0,60	0,52	0,48	0,49	0,46	0,40	0,38	0,36	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	0,64	0,58	0,54	0,54	0,51	0,44	0,40	0,38	0,36	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	0,64	0,57	0,53	0,54	0,50	0,44	0,40	0,38	0,36	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	0,67	0,60	0,57	0,54	0,51	0,44	0,40	0,38	0,36	0,34	0,31	0,29	0,27	0,26	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	0,69	0,61	0,58	0,58	0,56	0,46	0,42	0,42	0,40	0,39	0,37	0,35	0,33	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
	0,73	0,64	0,62	0,62	0,60	0,48	0,44	0,45	0,42	0,41	0,40	0,39	0,37	0,35	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34

Коэффициенты для определения светового потока, устанавливаемого на расчетной плоскости

Индекс i	70						50						30						
	50		30		10		50		30		10		50		30		10		
	$\rho_{\text{г}}$ %	$\rho_{\text{с}}$ %	$\rho_{\text{р}}$ %	$\rho_{\text{г}}$ %	$\rho_{\text{с}}$ %	$\rho_{\text{р}}$ %	$\rho_{\text{г}}$ %	$\rho_{\text{с}}$ %	$\rho_{\text{р}}$ %	$\rho_{\text{г}}$ %	$\rho_{\text{с}}$ %	$\rho_{\text{р}}$ %	$\rho_{\text{г}}$ %	$\rho_{\text{с}}$ %	$\rho_{\text{р}}$ %	$\rho_{\text{г}}$ %	$\rho_{\text{с}}$ %	$\rho_{\text{р}}$ %	
0,5	0,19	0,19	0,09	0,09	0,02	0,02	0,18	0,17	0,08	0,08	0,08	0,17	0,18	0,08	0,08	0,08	0,17	0,18	0,08
0,6	0,21	0,21	0,10	0,10	0,03	0,03	0,20	0,18	0,10	0,10	0,10	0,20	0,18	0,10	0,10	0,10	0,20	0,18	0,10
0,7	0,23	0,23	0,15	0,11	0,04	0,04	0,21	0,20	0,10	0,10	0,10	0,21	0,20	0,10	0,10	0,10	0,21	0,20	0,10
0,8	0,25	0,24	0,12	0,12	0,04	0,04	0,22	0,21	0,12	0,12	0,12	0,22	0,21	0,12	0,12	0,12	0,22	0,21	0,12
0,9	0,26	0,26	0,14	0,13	0,04	0,04	0,24	0,24	0,13	0,13	0,13	0,24	0,24	0,13	0,13	0,13	0,24	0,24	0,13
1,0	0,28	0,28	0,14	0,14	0,04	0,04	0,25	0,24	0,14	0,14	0,14	0,25	0,24	0,14	0,14	0,14	0,25	0,24	0,14
1,1	0,30	0,30	0,15	0,14	0,04	0,04	0,26	0,26	0,14	0,14	0,14	0,26	0,26	0,14	0,14	0,14	0,26	0,26	0,14
1,25	0,32	0,29	0,16	0,16	0,04	0,04	0,28	0,28	0,16	0,16	0,16	0,28	0,28	0,16	0,16	0,16	0,28	0,28	0,16
1,5	0,34	0,31	0,18	0,17	0,05	0,05	0,30	0,30	0,17	0,17	0,17	0,30	0,30	0,17	0,17	0,17	0,30	0,30	0,17
1,75	0,36	0,33	0,18	0,18	0,06	0,06	0,32	0,32	0,18	0,18	0,18	0,32	0,32	0,18	0,18	0,18	0,32	0,32	0,18
2,0	0,38	0,34	0,20	0,19	0,06	0,06	0,33	0,33	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	0,20
2,25	0,40	0,36	0,22	0,20	0,06	0,06	0,34	0,34	0,22	0,22	0,22	0,34	0,34	0,22	0,22	0,22	0,34	0,34	0,22
2,5	0,42	0,38	0,24	0,21	0,06	0,06	0,35	0,35	0,24	0,24	0,24	0,35	0,35	0,24	0,24	0,24	0,35	0,35	0,24
3,0	0,44	0,39	0,24	0,22	0,07	0,07	0,38	0,38	0,24	0,22	0,22	0,38	0,38	0,24	0,22	0,22	0,38	0,38	0,24
3,5	0,44	0,40	0,25	0,23	0,08	0,08	0,40	0,40	0,25	0,23	0,23	0,40	0,40	0,25	0,23	0,23	0,40	0,40	0,25
4,0	0,45	0,40	0,25	0,23	0,08	0,08	0,40	0,40	0,25	0,23	0,23	0,40	0,40	0,25	0,23	0,23	0,40	0,40	0,25
5,0	0,46	0,41	0,26	0,24	0,08	0,08	0,40	0,40	0,26	0,24	0,24	0,40	0,40	0,26	0,24	0,24	0,40	0,40	0,26
0,5	1,06	1,02	1,04	1,04	1,00	1,00	1,06	1,02	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,03
0,6	1,08	1,02	1,04	1,04	1,00	1,00	1,06	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,02	1,04
0,7	1,08	1,02	1,05	1,02	1,01	1,01	1,06	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,02	1,04
0,8	1,10	1,02	1,06	1,02	1,01	1,01	1,07	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,02	1,02	1,04
0,9	1,10	1,03	1,06	1,02	1,02	1,02	1,08	1,02	1,06	1,06	1,06	1,02	1,02	1,06	1,06	1,06	1,02	1,02	1,06
1,0	1,10	1,03	1,07	1,02	1,02	1,02	1,08	1,02	1,06	1,06	1,06	1,02	1,02	1,06	1,06	1,06	1,02	1,02	1,06
1,1	1,12	1,04	1,08	1,02	1,02	1,02	1,09	1,02	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03	1,06	1,06	1,06	1,02	1,02	1,06
1,25	1,12	1,04	1,09	1,02	1,02	1,02	1,10	1,02	1,06	1,06	1,06	1,03	1,03	1,06	1,06	1,06	1,02	1,02	1,06
1,5	1,14	1,04	1,10	1,04	1,03	1,03	1,10	1,04	1,08	1,08	1,08	1,04	1,04	1,08	1,08	1,08	1,02	1,02	1,06
1,75	1,14	1,04	1,12	1,04	1,03	1,03	1,11	1,04	1,09	1,09	1,09	1,04	1,04	1,09	1,09	1,09	1,02	1,02	1,06
2,0	1,16	1,04	1,12	1,04	1,04	1,04	1,11	1,04	1,09	1,09	1,09	1,04	1,04	1,09	1,09	1,09	1,02	1,02	1,06
2,25	1,16	1,05	1,13	1,04	1,04	1,04	1,12	1,04	1,10	1,10	1,10	1,04	1,04	1,10	1,10	1,10	1,02	1,02	1,06
2,5	1,17	1,05	1,14	1,05	1,04	1,04	1,12	1,04	1,10	1,10	1,10	1,04	1,04	1,10	1,10	1,10	1,02	1,02	1,06
3,0	1,18	1,06	1,16	1,05	1,04	1,04	1,13	1,04	1,11	1,11	1,11	1,04	1,04	1,11	1,11	1,11	1,02	1,02	1,06
3,5	1,19	1,06	1,16	1,05	1,04	1,04	1,13	1,04	1,11	1,11	1,11	1,04	1,04	1,11	1,11	1,11	1,02	1,02	1,06
4,0	1,20	1,06	1,18	1,06	1,05	1,05	1,14	1,04	1,12	1,12	1,12	1,04	1,04	1,12	1,12	1,12	1,02	1,02	1,06
5,0	1,21	1,06	1,19	1,06	1,06	1,06	1,14	1,04	1,13	1,13	1,13	1,04	1,04	1,13	1,13	1,13	1,02	1,02	1,06

коэффициенты $K_{\text{с.р}}$ коэффициенты $K_{\text{р.р}}$

геометрических прогрессий, хотя, например, В. В. Мешков решает эту задачу проще. Проследить ход многократных отражений между тремя поверхностями — задача невероятно кропотливая, поэтому как Дубинкин, так и Епанешников, подошли к вопросу иначе и исходили из баланса установившихся потоков.

М. М. Епанешниковым составлена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} F_n &= F'_n + \rho_c F_c \eta_{c, n} + \rho_p F_p \eta_{p, n}; \\ F_c &= \gamma (\rho_n F_n \eta_{n, c} + F'_c + \rho_p F_p \eta_{p, c}); \\ F_p &= \rho_n F_n \eta_{n, p} + \rho_c F_c \eta_{c, p} + F'_p. \end{aligned} \right\} \quad (3-39)$$

Таблица 3-9

Коэффициенты для определения светового потока, установившегося на потолке

$\rho_n, \%$	70				50				30			
	50		30		50		30		50		30	
$\rho_c, \%$												
$\rho_p, \%$	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10
индекс i	коэффициенты $k_{n, p}$											
0,5	1,11	1,10	1,06	1,05	1,08	1,07	1,04	1,03	1,05	1,04	1,01	
0,6	1,12	1,10	1,07	1,05	1,09	1,07	1,04	1,04	1,05	1,04	1,02	
0,8	1,14	1,10	1,08	1,06	1,10	1,07	1,06	1,04	1,06	1,04	1,02	
1,0	1,15	1,10	1,10	1,06	1,10	1,08	1,06	1,04	1,06	1,04	1,02	
1,5	1,18	1,10	1,12	1,06	1,12	1,07	1,08	1,04	1,07	1,04	1,02	
2,0	1,20	1,10	1,14	1,07	1,13	1,07	1,10	1,05	1,08	1,04	1,03	
3,0	1,21	1,10	1,18	1,07	1,14	1,06	1,12	1,05	1,08	1,04	1,03	
5,0	1,23	1,08	1,20	1,08	1,16	1,06	1,14	1,05	1,08	1,04	1,03	
	коэффициенты $k_{c, n}$											
0,5	0,18	0,16	0,08	0,08	0,17	0,16	0,08	0,08	0,16	0,16	0,08	
0,6	0,20	0,18	0,09	0,08	0,18	0,17	0,09	0,08	0,18	0,16	0,08	
0,8	0,23	0,20	0,11	0,10	0,21	0,19	0,10	0,10	0,20	0,18	0,10	
1,0	0,26	0,22	0,12	0,11	0,24	0,21	0,12	0,11	0,22	0,20	0,10	
1,5	0,29	0,24	0,15	0,13	0,28	0,24	0,14	0,12	0,26	0,23	0,12	
2,0	0,32	0,26	0,17	0,14	0,30	0,25	0,16	0,14	0,28	0,24	0,14	
3,0	0,34	0,27	0,19	0,15	0,32	0,26	0,18	0,15	0,30	0,26	0,14	
5,0	0,37	0,28	0,21	0,16	0,35	0,28	0,20	0,16	0,32	0,27	0,15	
	коэффициенты $k_{p, n}$											
0,5	0,11	0,03	0,08	0,02	0,10	0,04	0,08	0,02	0,10	0,04	0,02	
0,6	0,13	0,04	0,10	0,04	0,12	0,04	0,10	0,03	0,12	0,04	0,03	
0,8	0,16	0,05	0,14	0,04	0,16	0,05	0,13	0,04	0,15	0,05	0,04	
1,0	0,18	0,06	0,16	0,05	0,18	0,06	0,16	0,05	0,17	0,06	0,05	
1,5	0,23	0,07	0,20	0,06	0,22	0,07	0,20	0,06	0,21	0,06	0,06	
2,0	0,26	0,08	0,23	0,07	0,24	0,08	0,22	0,07	0,23	0,08	0,07	
3,0	0,30	0,08	0,27	0,08	0,28	0,08	0,26	0,08	0,26	0,08	0,08	
5,0	0,32	0,10	0,30	0,09	0,30	0,09	0,29	0,09	0,29	0,09	0,08	

По структуре выделяется второе из них, относящееся к стенам: они образуют вогнутую поверхность, внутри которой имеют место многократные отражения, учитываемые коэффициентом γ по уравнению аналогичному (3-27), тогда как потолок и пол связаны многократными отражениями только с другими поверхностями.

Все величины, входящие в уравнения (3-39), известны или могут быть определены. Решив их и сгруппировав члены с одинаковыми первичными потоками, получим при последних коэффициенты, являющиеся выражениями для коэффициентов k_{nm} .

Заемствованные из работ МЭИ таблицы коэффициентов k_{nm} приводятся в табл. (3-7)—(3-10). Об использовании их в различных схемах расчета см. главу четвертую. Различие между коэффициентами $k_{п.р}$ и $k'_{п.р}$ разъясняется далее в § 3-6.

Таблица 3-10

Коэффициенты для определения светового потока, установившегося на стенах

$\rho_n, \%$	70				50				30		
	50		30		50		30		50		30
$\rho_c, \%$	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	10
$\rho_p, \%$	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	10
индекс l	коэффициенты $k_{п.с}$										
0,5	0,98	0,91	0,78	0,74	0,68	0,63	0,55	0,52	0,40	0,37	0,30
0,6	0,88	0,81	0,72	0,68	0,62	0,58	0,52	0,47	0,36	0,33	0,28
0,8	0,76	0,68	0,64	0,58	0,54	0,48	0,46	0,41	0,31	0,28	0,24
1,0	0,68	0,60	0,58	0,52	0,48	0,42	0,41	0,36	0,28	0,24	0,22
1,5	0,54	0,45	0,48	0,40	0,37	0,32	0,32	0,28	0,21	0,18	0,16
2,0	0,44	0,36	0,40	0,33	0,30	0,25	0,27	0,23	0,17	0,14	0,13
3,0	0,32	0,25	0,30	0,24	0,22	0,18	0,20	0,16	0,12	0,10	0,09
5,0	0,21	0,16	0,20	0,15	0,14	0,11	0,13	0,10	0,08	0,06	0,06
	коэффициенты $k_{с.с}$										
0,5	1,63	1,58	1,30	1,28	1,58	1,54	1,28	1,26	1,54	1,50	1,25
0,6	1,57	1,52	1,28	1,26	1,54	1,50	1,27	1,24	1,50	1,45	1,23
0,8	1,50	1,45	1,26	1,23	1,46	1,41	1,23	1,21	1,42	1,38	1,20
1,0	1,44	1,39	1,23	1,20	1,40	1,36	1,21	1,18	1,36	1,32	1,17
1,5	1,35	1,29	1,18	1,16	1,30	1,26	1,16	1,14	1,26	1,23	1,12
2,0	1,28	1,22	1,15	1,12	1,24	1,20	1,13	1,11	1,21	1,18	1,10
3,0	1,20	1,16	1,11	1,09	1,17	1,14	1,10	1,08	1,14	1,12	1,06
5,0	1,14	1,11	1,08	1,06	1,12	1,10	1,06	1,05	1,10	1,08	1,04
	коэффициенты $k_{р.с}$										
0,5	0,45	0,14	0,36	0,11	0,42	0,13	0,34	0,11	0,40	0,12	0,10
0,6	0,42	0,14	0,34	0,11	0,39	0,12	0,32	0,10	0,36	0,11	0,10
0,8	0,38	0,12	0,31	0,10	0,34	0,11	0,28	0,10	0,31	0,10	0,08
1,0	0,34	0,10	0,29	0,09	0,30	0,10	0,26	0,08	0,28	0,09	0,08
1,5	0,28	0,08	0,24	0,08	0,24	0,08	0,22	0,07	0,21	0,06	0,06
2,0	0,23	0,07	0,20	0,06	0,20	0,06	0,18	0,06	0,17	0,06	0,05
3,0	0,17	0,05	0,16	0,04	0,14	0,04	0,14	0,04	0,12	0,04	0,04
5,0	0,12	0,04	0,10	0,03	0,10	0,03	0,09	0,02	0,08	0,02	0,02

3-6. Коэффициенты использования

Ранее рассмотренные в данной главе задачи: определение потока излучателей и первичного потока, учет эффекта свода и многократных отражений и т. д. лишь в некоторых случаях имеют самостоятельное значение, чаще же служат основанием для расчета коэффициентов использования η , т. е. отношения светового потока, падающего на расчетную поверхность, к полному потоку излучателей. Чаще всего, но не обязательно, этот коэффициент рассчитывается и указывается для горизонтальных поверхностей, равновеликих полу помещения.

Полезно иметь в виду, что коэффициент использования может рассматриваться как произведение двух коэффициентов: к. п. д. самого осветительного устройства η_c и коэффициента использования потока, выходящего из этого устройства по отношению к расчетной поверхности. Последний коэффициент — η_n — может быть также назван коэффициентом полезного действия помещения.

Таким образом,

$$\eta = \eta_c \eta_n \quad (3-40)$$

Число предложений, посвященных определению η , весьма велико, но далеко не все они получили широкое применение. Одной из первых работ в этой области явились классические исследования Гаррисона и Андерсона, по имени которых часто назывался сам метод расчета. Устаревшая к настоящему времени работа этих авторов заслуживает упоминания хотя бы потому, что она использовалась в продолжение более 30 лет и явилась отправной точкой для дальнейших исследований.

В отличие от большинства других работ данные Гаррисона и Андерсона основаны не на математических расчетах, а на измерениях в экспериментальном помещении. В результате своих опытов авторы нашли возможным любой конкретный светильник рассматривать как совокупность трех фиктивных светильников: прямого света, горизонтального света и отраженного света (рис. 3-30).

За силу света горизонтального светильника в направлении 90° принимается сила света данного светильника в том же направлении, светораспределение же его принимается синусным, т. е. подчиняющимся уравнению $I_\alpha = I_{90} \sin \alpha$. Сила света двух других светильников определяется как разность между силой света данного светильника в том и ином направлении и силой света в том же направлении горизонтального светильника. Поток каждого из этих светильников находится как разность между потоком данного светильника в той или иной полусфере и потоком в той же полусфере горизонтального светильника, равным, как известно, $\pi^2 I_{90} / 2$ (в частных случаях как сила света, так и поток могут принимать отрицательные значения). Форма кривой силы света отраженного светильника не учитывается, для светильника же прямого света вводится добавочный признак, по которому его светораспределение признается узким, средним или широким. Всего, таким образом, рассматривается 5 различных кривых силы света, для каждой из которых экспериментально определены значения коэффициентов использования.

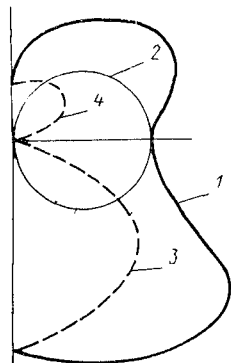


Рис. 3-30. Кривые силы света данного светильника (1) и фиктивных светильников: горизонтального (2), прямого света (3) и отраженного света (4)

Полезный в данных условиях поток конкретного светильника находится как сумма полезных потоков трех фиктивных светильников.

По первоначальному варианту метода для помещения размерами $A \times B$ находились два индекса: для квадратного помещения со стороной A и для такого же помещения со стороной B и результирующий коэффициент использования вычислялся по формуле

$$\eta = \eta_B + \frac{1}{3} (\eta_A - \eta_B); \quad (3-41)$$

после принятия для индекса формулы Маргулиса—Сапожникова она стала использоваться и в сочетании с таблицами Гаррисона и Андерсона.

В последующие годы появилось большое число других методов расчета коэффициентов использования и МЭИ было поручено критически их рассмотреть и дать рекомендации для отечественной практики. Эта работа была закончена в 1960 г. и опубликована в серии статей.

Метод Гаррисона и Андерсона в основе не был скомпрометирован, но признан устаревшим в силу следующих недостатков.

1. Современное разнообразие кривых силы света светильников невозможно без существенной погрешности уложить в три типовые случая для светильников прямого света;

2. Метод не учитывает отражения света полом помещения, а при коэффициенте отражения последнего около 0,3 коэффициент использования увеличивается на величину до 20%;

3. Метод не учитывает влияния на коэффициент использования относительного расстояния между светильниками (λ), при варьировании же последнего η изменяется на 10—15%;

4. Метод не дает возможности определения потоков, падающих на стены и полки помещения.

В качестве способа определения первичных потоков МЭИ были рекомендованы таблицы Джонса—Нейдхарта, коэффициенты же вида k_{nm} , учитывающие многократные отражения, были МЭИ рассчитаны заново, с учетом коэффициента отражения пола (ρ_p).

Наиболее существенным в методе МЭИ является, как уже было отмечено, предложение заменять часть помещения, расположенную выше излучателей, условным потолком, т. е. плоскостью AB (рис. 3-28), расположенной на уровне излучателей. Это позволяет принимать за первичный поток на потолок весь поток излучателей в верхней полусфере, но обязывает определять ρ_{Π} для плоскости AB с учетом эффекта свода. От этой операции можно отказаться, если придать вероятное постоянное значение отношению h_c/h , где h_c — расстояние излучателя от потолка и h — высота его над расчетной поверхностью. Тогда для каждого индекса и для каждого значения коэффициента отражения фактического потолка можно заранее сделать необходимые пересчеты и, указывая в таблицах для удобства пользующихся обычные, фактические значения коэффициента отражения потолка, рассчитывать величину коэффициента использования с учетом эффекта свода. Именно таков смысл коэффициентов $k'_{п.р}$, которые рассчитаны для $h_c/h = 0,25$.

С учетом изложенного расчет коэффициентов использования по методу МЭИ для каждого данного индекса и сочетания ρ_n , ρ_c и ρ_p производится в следующем порядке:

1. Умножением сил света на зональные телесные углы находятся зональные потоки.

2. Умножением зональных потоков на коэффициенты Джонса—Нейхарта и суммированием произведений определяется первичный поток, падающий на расчетную поверхность.

Здесь надо сказать, что поскольку для каждого светильника составляется одна таблица η , могущие иметь место в конкретных случаях вариации $\lambda = L/h$ учесть невозможно, и приходится исходить из характерных для данного светильника значений. Можно рекомендовать для концентрированного светораспределения исходить из $\lambda = 0,4$, для глубокого и косинусного принимать $\lambda = 1$ и для равномерного $\lambda = 1,5$. Эти отношения ниже рекомендуемых в теории и учитывают, что ряд причин вызывает на практике уменьшение λ .

3. Первичный поток, падающий на стены, определяется как разность между потоком светильника в нижней полусфере и первичным потоком, падающим на расчетную плоскость F_p' , а первичный поток на потолок (реальный или условный) принимается равным потоку светильника в верхней полусфере.

4. По верхней строке формулы (3-37) определяется установившийся поток на расчетной плоскости, и если, как обычно бывает, кривая силы света дана для лампы 1000 лм, делением F_p на 1000 определяется η . При потолочных светильниках третий член формулы (3-37) содержит коэффициент $k_{п.р}$, при подвесных же светильниках вместо него подставляется $k'_{п.р}$. Таблицы, рассчитанные по $k_{п.р}$, являются универсальными в том отношении, что ими можно пользоваться при любых значениях h_c/h , но требуют каждый раз определения ρ_n с учетом эффекта свода.

После определения η для 5—6 значений индекса i , строится вспомогательный график $\eta = f(i)$, по которому прочитываются значения η для всех табличных индексов. Этот прием не только сокращает объем вычислений, но и позволяет проверить их правильность: точки должны ложиться на плавную кривую.

В нашей практике для ρ_n принята шкала 70—50—30%, для ρ_c 50—30—10%, для ρ_p — 30 и 10%. В целях сокращения объема таблиц для каждого светильника значения η приводятся лишь для наиболее вероятных сочетаний ρ_n , ρ_c и ρ_p . В последнее время мы стали приводить в таблицах значения η также для «черных» помещений ($\rho_n = \rho_c = \rho_p = 0$), необходимые для расчета отраженной составляющей освещенности при точечном методе расчета.

Образец таблицы коэффициентов использования приводится в табл. 3-11.

В зарубежной практике форма таблиц почти не отличается от принятой у нас, но шкала ρ_n часто пополняется значением 80%, значение же ρ_p преимущественно принимается равным 20%.

Коэффициенты использования светового потока для некоторых светильников

Тип светильника	Лц				Гс				ГсР				ШОД				ОДР			
	70	50	50	0	70	50	30	0	70	50	30	0	70	50	50	0	70	50	30	0
$\rho_{п}, \%$	70	50	50	0	70	50	30	0	70	50	30	0	70	50	50	0	70	50	30	0
$\rho_{с}, \%$	50	50	50	0	50	50	30	0	50	50	30	0	50	50	50	0	50	50	30	0
$\rho_{р}, \%$	30	10	10	0	30	10	10	0	30	10	10	0	30	10	10	0	30	10	10	0

Коэффициенты использования η в процентах

i	23	29	34	31	38	47	34	31	30	52	50	46	42	42	23	22	16	14	10	28	24	19
0,5	23	29	34	31	38	47	34	31	30	52	50	46	42	42	23	22	16	14	10	28	24	19
0,6	30	36	41	38	44	52	42	38	37	59	56	52	49	49	29	28	21	18	12	32	27	23
0,7	41	38	35	44	51	59	47	44	43	64	60	56	54	53	33	32	24	21	14	35	30	26
0,8	44	41	37	44	52	63	51	48	47	68	63	59	57	56	37	35	27	24	16	40	35	29
0,9	44	41	37	44	52	63	51	48	47	68	63	59	57	56	37	35	27	24	16	40	35	29
1,0	47	44	40	40	46	66	63	55	53	72	67	64	61	60	40	38	30	27	18	43	36	32
1,1	53	49	44	40	46	66	63	55	53	72	67	64	61	60	40	38	30	27	18	43	36	32
1,25	57	52	47	43	40	68	63	57	55	77	71	68	63	62	46	43	34	31	20	48	41	36
1,5	60	54	50	46	43	72	67	64	62	80	74	70	68	67	54	50	40	37	24	55	47	43
1,75	63	56	52	48	44	74	73	69	65	82	75	72	70	68	57	53	45	42	25	59	52	45
2,0	65	58	53	49	45	76	74	71	69	86	78	75	72	71	63	57	47	44	28	64	58	49
2,25	67	60	55	51	47	78	76	73	71	88	79	76	74	72	65	59	48	45	29	66	60	53
2,5	70	62	57	53	49	81	78	75	73	90	80	77	75	73	68	61	52	48	30	69	62	55
3,0	72	64	58	54	50	83	79	77	75	91	81	78	76	74	71	63	50	45	31	71	63	55
3,5	74	66	60	56	52	84	80	78	76	93	82	79	77	75	73	65	54	48	32	72	64	57
4,0	74	66	60	56	52	84	80	78	76	93	82	79	77	75	73	65	54	48	32	72	64	57
5,0	77	68	62	58	54	85	82	79	77	94	82	80	78	76	76	67	56	53	34	75	65	58

Для наибольшего упрощения расчета коэффициентов использования нами составлены табл. 3-12—3-14, построенные по аналогии с таблицами, применяемыми в США в системе зонально-полостного метода. Для каждой десятиградусной круговой зоны эти таблицы содержат коэффициенты, умножение на которые силы света в направлении середины зоны дает непосредственно полезный поток данной зоны с учетом многократных отражений. Эти коэффициенты рассчитаны по очевидной формуле

$$\omega [\eta'_p k_{p.p} + (1 - \eta'_p) k_{c.p}], \quad (3-42)$$

где ω — телесный угол зоны (табл. 3-1); η'_p — коэффициент первичного использования по Джонсу—Нейдхарту; $(1 - \eta'_p)$ — коэффициент первичного использования по отношению к стенам; $k_{p.p}$, $k_{c.p}$ — коэффициенты вида k_{nm} по МЭИ.

Для светильников прямого света сумма указанных произведений для всех зон нижней полусферы дает полный полезный поток, а отношение его к потоку лампы, т. е. обычно к 1000 лм — коэффициент использования. При наличии излучения в верхней полусфере к сумме произведений должно быть добавлено произведение потока верхней полусферы на коэффициент $k_{п.р}$ для потолочных или $k'_{п.р}$ для подвесных светильников. Таблицы составлены для тех же значений λ , что и таблицы Джонса — Нейдхарта и для нескольких «опорных» точек на шкале индексов, достаточных для построения кривой $\eta = f(i)$.

Пример определения η с помощью табл. 3-12—3-14 приведен в табл. 3-15. В качестве задания приняты указанные в этой таблице силы света одного из типовых потолочных светильников.

Неуклонно расширяющийся сортамент светильников ведет к соответствующему увеличению числа необходимых для расчета освещения таблиц коэффициентов использования. Более того, составление и публикация таких таблиц неизбежно отстает во времени от появления и внедрения новых светильников. В этих условиях возникает вопрос о возможности составления каких-либо «унифицированных» таблиц η , не привязанных к определенному типу светильника. Предварительно отметим противоречивость встречающегося в литературе подхода к оценке необходимой точности определения η . Иногда для расчета предлагаются таблицы η , вообще не учитывающие формы кривой силы света в нижней полусфере. С другой стороны, авторы, делающие в своих работах оправданные, но смелые допущения, тут же прибегают к скрупулезной интерполяции для достижения точности, превышающей принципиальную точность метода.

Нами рассмотрена возможность составления унифицированных таблиц коэффициентов использования для светильников, кривые силы света которых в нижней полусфере относятся по ГОСТ 13828—68 к типам Г (глубокая), Д (косинусная) и М (равномерная). Дело в том, что для кривых каждого типа ГОСТ допускает определенные пределы варьирования, характеризуемые предельными значениями коэффициента формы k_{ϕ} , при которых тип кривой не меняет назва-

Зональные множители для расчета

$\rho_n, \%$	70						70					
$\rho_c, \%$	50						50					
$\rho_p, \%$	30						10					
i	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	
Зоны	Зональные множи											
$0^\circ-10^\circ$	10,3	10,4	10,7	11	11	11,5	9,7	9,7	10	10	10	
$10^\circ-20^\circ$	24	26	28	30	32	33	22	24	26	28	29	
$20^\circ-30^\circ$	33	38	44	48	50	54	31	35	40	44	46	
$30^\circ-40^\circ$	32	42	55	61	67	72	30	40	48	55	60	
$40^\circ-50^\circ$	27	43	60	72	80	86	26	40	55	65	71	
$50^\circ-60^\circ$	21	32	56	76	87	97	21	30	52	68	77	
$60^\circ-70^\circ$	21	25	48	70	86	103	21	24	44	63	77	
$70^\circ-80^\circ$	22	26	33	49	70	96	22	25	31	44	63	
$80^\circ-90^\circ$	23	27	34	42	46	62	23	26	32	37	41	
$90^\circ-180^\circ$	$k_{п.р}$	0,30	0,38	0,49	0,60	0,68	0,75	0,28	0,36	0,46	0,54	0,60
	$k'_{п.р}$	0,24	0,31	0,43	0,55	0,64	0,73	0,22	0,29	0,41	0,50	0,57
$\rho_n, \%$	50						50					
$\rho_c, \%$	50						30					
$\rho_p, \%$	10						10					
i	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	
Зоны	Зональные множи											
$0^\circ-10^\circ$	10	10	10	10	10	10	9,6	9,6	10	10	10	
$10^\circ-20^\circ$	22	24	26	27	28	28	21	23	25	27	28	
$20^\circ-30^\circ$	30	35	40	43	45	46	28	33	39	43	44	
$30^\circ-40^\circ$	29	38	47	54	59	61	25	35	44	52	57	
$40^\circ-50^\circ$	24	39	54	64	70	74	19	34	50	61	67	
$50^\circ-60^\circ$	18	28	50	66	75	83	11	20	43	61	71	
$60^\circ-70^\circ$	18	21	41	61	74	88	9	11	32	53	68	
$70^\circ-80^\circ$	19	22	26	40	60	80	9,5	11,6	15	28	48	
$80^\circ-90^\circ$	20	23	27	33	36	50	10	12	15	18	19	
$90^\circ-180^\circ$	$k_{п.р}$	0,20	0,24	0,32	0,38	0,42	0,46	0,16	0,21	0,28	0,35	0,40
	$k'_{п.р}$	0,14	0,18	0,26	0,33	0,39	0,44	0,11	0,16	0,24	0,31	0,36

коэффициентов использования при $L/h = 0,4$

	70							50					
	30							50					
	10							30					
5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	

тели $\times 10^2$

10	9,6	9,7	9,7	10	10	10	10	10	10,4	10,6	11	11
29	21	24	25	27	28	28	23	25	27	29	30	31
47	29	33	39	43	45	47	32	36	42	46	49	52
63	26	36	44	53	58	62	31	40	50	58	64	68
76	19	34	50	62	69	74	26	41	57	69	76	82
85	11,4	20	44	63	73	82	20	29	53	72	82	91
90	10	12	33	55	70	86	20	22	44	66	81	97
84	10,6	12,7	16	30	50	77	21	23	29	44	65	90
54	11	13	16	21	23	38	22	24	29	36	39	55

0,66	0,23	0,30	0,40	0,50	0,57	0,64	0,21	0,26	0,33	0,40	0,45	0,50
0,64	0,18	0,25	0,36	0,46	0,54	0,62	0,14	0,19	0,27	0,36	0,42	0,48

	30							0					
	10							0					
	10							0					
5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	

тели $\times 10^2$

10	9,6	9,6	9,6	9,6	9,7	9,7	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
28	21	23	24	26	27	28	20	22	24	27	27	27
46	27	31	37	42	43	45	26	31	36	40	42	44
60	22	32	41	49	55	59	21	31	40	48	54	57
72	14	29	46	57	65	71	12,3	28	44	55	63	68
80	4,3	13	37	55	67	77	2,7	11	35	54	64	74
84	2	3,0	23	46	62	79	0	0	21	43	58	76
75	2,1	3,2	3,2	15	38	67	0	0	0	11,6	34	63
35	2,2	3,3	3,3	4,4	5,4	21	0	0	0	0	0	15

0,44	0,08	0,11	0,15	0,19	0,22	0,25	0	0	0	0	0	0
0,42	0,05	0,07	0,12	0,16	0,20	0,24	0	0	0	0	0	0

Зональные множители для расчета

$\rho_n, \%$	70						70				
$\rho_c, \%$	50						50				
$\rho_p, \%$	30						10				
i	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3

Зоны	Зональные мно										
0°—10°	10,3	10,4	10,7	11	11	11,5	9,7	9,7	10	10	10
10°—20°	30	30	32	33	33	34	29	29	29	29	30
20°—30°	44	46	47	52	53	55	42	43	46	47	48
30°—40°	24	37	51	61	66	71	24	35	47	55	59
40°—50°	26	40	57	71	79	85	25	38	53	64	70
50°—60°	19	32	51	75	87	97	19	31	52	68	78
60°—70°	21	25	41	68	85	100	21	24	38	62	76
70°—80°	22	26	33	47	69	92	22	25	31	43	62
80°—90°	23	27	34	41	47	59	23	26	32	37	42

90°—180°	$k_{п.р}$	0,30	0,38	0,49	0,60	0,68	0,75	0,28	0,36	0,46	0,54	0,60
	$k'_{п.р}$	0,24	0,31	0,43	0,55	0,64	0,73	0,22	0,29	0,41	0,50	0,57

$\rho_n, \%$	50						50				
$\rho_c, \%$	50						30				
$\rho_p, \%$	10						10				
i	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3

Зоны	Зональные мно										
0°—10°	9,7	9,7	10	10	10	10	9,6	9,6	9,7	10	10
10°—20°	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
20°—30°	42	43	45	46	47	48	41	42	44	46	46
30°—40°	22	33	45	54	58	61	17	29	42	52	56
40°—50°	23	36	51	63	69	74	17	31	47	60	66
50°—60°	16	28	50	66	76	83	8	20	43	61	71
60°—70°	18	21	35	59	74	86	9	11	25	51	67
70°—80°	19	22	26	39	58	77	10	11,6	15	26	18
80°—90°	20	23	27	33	37	39	10	12	15	18	22

90°—180°	$k_{п.р}$	0,20	0,24	0,32	0,38	0,42	0,46	0,16	0,21	0,28	0,35	0,40
	$k'_{п.р}$	0,14	0,18	0,26	0,33	0,39	0,44	0,11	0,16	0,24	0,31	0,36

коэффициентов использования при $L/h = 1$

	70						50					
	30						50					
	10						30					
5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5

жители $\times 10^2$

10	9,6	9,7	9,7	10	10	10	10	10	10,4	10,6	10,7	11
30	28	29	29	29	30	30	30	30	31	31	32	33
49	41	43	45	48	48	48	43	46	48	50	51	52
63	18	30	43	53	57	61	23	35	48	58	63	67
75	18	32	47	60	68	73	25	38	54	68	75	81
85	9	21	44	63	73	82	18	30	53	71	82	91
88	10	12	26	52	69	83	20	22	37	64	80	94
81	10,6	13	16	28	50	72	21	23	28	42	63	85
52	11	13	16	21	22	34	22	24	29	36	50	52

0,66	0,23	0,30	0,40	0,50	0,57	0,64	0,21	0,26	0,33	0,40	0,45	0,50
0,64	0,18	0,25	0,36	0,46	0,54	0,62	0,14	0,19	0,27	0,36	0,42	0,48
	30						0					
	10						0					
	10						0					
5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5

жители $\times 10^2$

10	9,5	9,5	9,6	9,6	9,7	9,7	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
29	28	28	29	29	29	29	28	28	28	28	28	28
48	40	42	44	45	46	47	40	42	43	44	45	45
60	14	26	39	49	54	58	13	25	38	48	52	56
72	12	26	42	55	63	69	11	25	41	54	61	67
80	1,8	14	37	56	67	77	0	11,7	35	54	64	74
81	2	3	16	42	61	76	0	0	13	40	58	74
70	2,1	3,2	3,2	13	37	62	0	0	0	9,5	32	58
31	2,2	3,3	3,3	4,4	6,4	17	0	0	0	0	1,1	1,1

0,44	0,08	0,11	0,15	0,19	0,22	0,25	0	0	0	0	0	0
0,42	0,05	0,07	0,12	0,16	0,20	0,24	0	0	0	0	0	0

Зональные множители для расчета

$\rho_{п}, \%$	70						70				
$\rho_{с}, \%$	50						50				
$\rho_{р}, \%$	30						10				
i	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3

Зоны	Зональные мно										
0°—10°	10,3	10,4	11,7	11	11	12	9,7	9,7	10	10	10
10°—20°	30	30	32	32	33	34	29	29	29	29	30
20°—30°	50	50	52	53	55	56	47	47	48	48	49
30°—40°	31	61	66	71	72	74	29	57	60	63	64
40°—50°	16	37	52	68	78	84	16	34	48	61	69
50°—60°	19	39	53	72	85	96	19	37	49	65	76
60°—70°	20	27	44	66	84	98	21	25	41	59	75
70°—80°	22	26	33	45	64	89	22	25	31	40	58
80°—90°	23	27	34	41	46	54	23	26	32	37	42

90°—180°	$k_{п.р}$	0,30	0,38	0,49	0,60	0,68	0,75	0,28	0,36	0,46	0,54	0,60
	$k'_{п.р}$	0,24	0,31	0,43	0,55	0,64	0,73	0,22	0,29	0,41	0,50	0,57

$\rho_{п}, \%$	50						50				
$\rho_{с}, \%$	50						30				
$\rho_{р}, \%$	10						10				
i	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3

Зоны	Зональные мно										
0°—10°	9,7	9,7	10	10	10	10	9,6	9,6	9,7	10	10
10°—20°	29	29	29	29	29	29	28	28	29	29	29
20°—30°	47	47	48	48	48	48	47	47	47	47	48
30°—40°	28	57	60	62	63	64	24	55	59	61	63
40°—50°	14	33	48	60	68	73	7	27	42	56	66
50°—60°	16	35	49	63	73	81	8	28	40	57	70
60°—70°	18	22	38	57	72	84	9	12,7	29	48	66
70°—80°	19	22	26	36	54	75	9,5	11,6	15	23	44
80°—90°	20	23	27	33	36	43	10	12	15	18	21

90°—180°	$k_{п.р}$	0,20	0,24	0,32	0,38	0,42	0,46	0,16	0,21	0,28	0,35	0,40
	$k'_{п.р}$	0,14	0,18	0,26	0,33	0,39	0,44	0,11	0,16	0,24	0,31	0,36

коэффициентов использования при $h/h = 1,5$

	70						50					
	30						50					
	10						30					
5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5

жители $\times 10^2$

10	9,6	9,7	9,7	10	10	10	10	10	10,4	10,6	11	11
30	29	29	29	29	30	30	30	30	30	30	30	33
49	47	47	47	48	49	49	49	50	51	51	52	53
65	25	56	59	62	65	65	30	60	64	66	69	71
74	8	27	42	58	66	72	15,5	34	49	65	74	80
83	9	29	41	59	71	80	18	36	50	68	80	90
86	10	13,6	30	50	68	81	20	24	41	61	79	92
79	11	12,7	16	25	44	64	20	23	28	39	58	83
43	11	13	16	21	23	29	22	24	29	36	39	47
0,66	0,23	0,30	0,40	0,50	0,57	0,64	0,21	0,26	0,33	0,40	0,45	0,50
0,64	0,18	0,25	0,36	0,46	0,54	0,62	0,14	0,19	0,27	0,36	0,42	0,48
	30						0					
	10						0					
	10						0					
5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5

жители $\times 10^2$

10	9,5	9,5	9,6	9,6	9,7	9,7	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
29	28	28	29	29	29	29	28	28	28	28	28	28
48	46	46	47	47	47	47	46	46	46	46	46	46
65	21	54	58	60	62	62	20	54	57	59	60	61
71	15,5	22	36	52	62	68	0	20	35	50	59	66
78	18	22	33	52	64	74	0	20	31	49	62	72
79	2	5	20	40	59	73	0	2	17	37	56	71
67	2,1	3,2	3,2	10	31	58	0	0	0	6,3	27	54
26	2,2	3,3	3,3	4,4	55	10,7	0	0	0	0	0	4,4
0,44	0,08	0,11	0,15	0,19	0,22	0,25	0	0	0	0	0	0
0,42	0,05	0,07	0,12	0,16	0,20	0,24	0	0	0	0	0	0

ния. На рис. 3-31 представлены рассчитанные нами вариации кривых Г, Д и М в сопоставлении с точными кривыми по ГОСТ. Во всех случаях сила света в направлении 5° принята за 100 условных единиц. Как для основных трех кривых, так и для их предельных вариаций, нами рассчитаны значения коэффициентов использования для различных индексов помещения и различной отражательной способности поверхностей последнего. Отклонения η от значений для точных кривых по ГОСТ для предельных вариаций довольно велики. Они уменьшаются с увеличением индекса помещения и повышением коэффициентов отражения поверхностей.

Таблица 3-15

Пример расчета коэффициента использования
(Исходные данные: светораспределение, как указано в таблице,
 $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 10\%$, $i = 1,25$, $\lambda = 1,5$)

Зона, °	Сила света в направлении середины зоны, <i>св</i>	Зональный коэффициент	Полезный по- ток зоны; <i>лм</i>
0—10	87	0,10	8,7
10—20	89	0,29	25,8
20—30	83	0,48	39,8
30—40	80	0,60	48
40—50	72	0,48	34,6
50—60	64	0,49	31,4
60—70	57	0,41	23,4
70—80	52	0,31	16,1
80—90	48	0,32	15,4
Верхняя полусфера	поток 160 <i>лм</i>	0,46	73,8
Итого . . .			317,0

Коэффициент использования $317 : 100 = 32\%$

Если значение η для точной типовой кривой во всех случаях принять за 100%, то наибольшие отклонения составляют:

в помещении $\rho_n = \rho_p = \rho_c = 0$ при $i = 0,8$ для кривой Г (+8; -31)%; для кривой Д (+25; -24)%; для кривой М (+9; -13)%;

в помещений $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 10\%$ и при $i = 4,0$ отклонения существенно меньше и составляют для кривой Г (0; -7)%, для кривой Д (+3; -8)% и для кривой М (0; -4)%.

Было признано возможным составить и ввести в практику «унифицированные» таблицы для трех типовых кривых (по ряду соображений остальные кривые не рассматривались), учитывая, что в наиболее ответственных, больших помещениях их погрешность невелика, главным же образом имея в виду, что если рассчитывающему вообще не дать никаких достоверных таблиц, то пользуясь случайными данными или оценивая η «на глаз», он может допустить грубейшую

ошибку. «Унифицированные» таблицы рассчитаны для точных типовых кривых, но для кривых Г и Д значение коэффициента использования уменьшено на 5%, учитывая большую вероятность отклонений η в меньшую сторону. Таблицы содержат, собственно говоря, еще не коэффициент использования, а величину, названную в формуле (3-40) коэффициентом полезного действия помещения. Для получения коэффициента использования эта величина должна быть умножена на индивидуальную характеристику данного светильника — его к. п. д. Все сказанное относится пока к светильникам, не имеющим излучения в верхней полусфере. Если часть потока

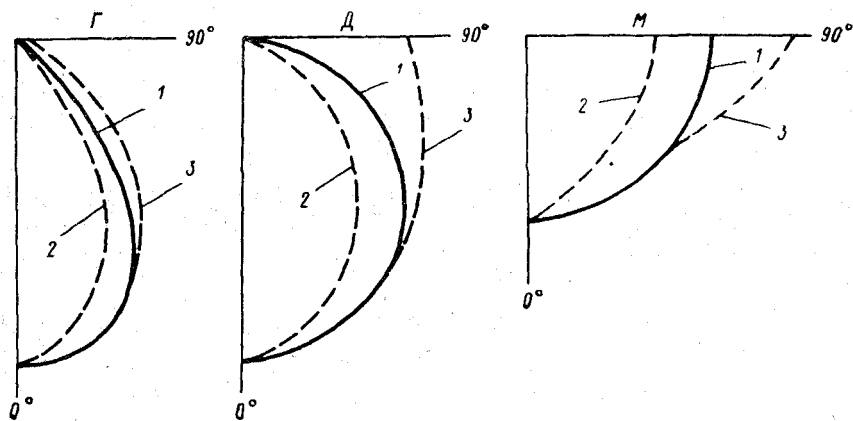


Рис. 3-31. Вариации типовых кривых по ГОСТ 13828—68

1 — типовая кривая, 2 — наибольшая концентрация, 3 — наименьшая концентрация

излучается в верхнюю полусферу, то дополнительная составляющая коэффициента использования (в процентах) определяется умножением доли потока лампы, излучаемой светильником в верхнюю полусферу (также в процентах) на обычные коэффициенты $k_{п.р}$ или $k'_{п.р}$.

Как ранее было показано, при излучателях, имеющих две плоскости симметрии и при большом различии между кривыми силы света в этих плоскостях, коэффициент первичного использования может быть найден как произведение $\eta_A \eta_B$ коэффициентов «продольного» и «поперечного» использования. Поток на стены и в этом случае определяется по разности между всем потоком нижней полусферы и первичным потоком на расчетную поверхность, поток на потолок принимается равным потоку излучателя в верхней полусфере. По этим данным определение коэффициента использования не встречает затруднений.

Однако значения η_A и η_B являются функциями не индекса помещения, а соотношений A/h и B/h . Их легко определить для помещений заданных конкретных размеров, но не для обобщенного помещения, характеризуемого только индексом i . Правда, как легко убедиться, задание отношений A/h и B/h определяет величину индекса, но обрат-

ное утверждение неверно и помещение с данным индексом может иметь различные отношения сторон к высоте. В результате, чем больше разница между продольной и поперечной кривыми, тем больше сказывается не только форма помещения, но и то, ориентированы ли линейные излучатели вдоль или поперек помещений. Вопрос в полном объеме не исследован, но по предварительным данным влияние последнего обстоятельства на величину η может быть решающим. В качестве предварительной рекомендации мы можем предложить при составлении в подобных случаях таблиц $\eta = f(i)$ исходить из квадратного помещения, для которого, как нетрудно убедиться, $A/h = B/h = 2i$. Более точными были бы, конечно, пока не составлявшиеся у нас таблицы зависимости η от A/h и B/h , но тогда пришлось бы иметь отдельную таблицу не только для каждого светильника, но и для каждого сочетания $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{с}}$ и $\rho_{\text{р}}$.

Полагаем, что в большинстве случаев будут достаточны таблицы, составленные для условно квадратного помещения, и что при желании иметь повышенную точность коэффициент η должен рассчитываться индивидуально или же расчет должен вестись по точечному методу.

В § 3-4 было уже упомянуто о получившем применение в США «зонально-полостном методе». Метод этот разработан детально и интересно, особенно в части, касающейся техники его использования (частично рассматриваемой нами в четвертой главе). Что касается принципиальной стороны определения коэффициентов использования и получаемой величины последних, то существенных отличий от предложений МЭИ мы не усматриваем, кроме, может быть, замены индекса помещения обратно пропорциональной ему величиной RCR .

3-7. Освещенность, светимость и яркость поверхностей помещения

Значение величины коэффициента использования позволяет по известному потоку излучателей определить освещенность (а если требуется, также светимость и яркость) расчетной поверхности или же, напротив, найти поток излучателей, необходимый для получения заданной освещенности. Методика решения подобных задач подробно рассматривается в главе четвертой.

В некоторых, относительно более редких, случаях, требуется рассчитать освещенность, светимость или яркость других поверхностей помещения, т. е. стен или потолка.

В принципе для каждого излучателя, в частности для каждого светильника, могут быть рассчитаны и представлены в виде таблиц значения коэффициентов использования светового потока относительно стен и потолков. Так как определение освещенности расчетной поверхности производится практически во всех случаях, то несколько более удобно иметь коэффициенты, связывающие характеристики стен и потолка с характеристиками расчетной поверхности. Так, Штольценбергом предложены таблицы коэффициентов, умножение на которые освещенности пола дает яркость стен или потолка. Форма таблиц вполне подобна таблицам коэффициентов

использования, и, так же как последние, таблицы предназначаются для светильника определенного типа.

Более универсальными являются таблицы трансферных функций О'Брайена, в сокращенном виде приводимые в табл. 3-16, с заменой аргумента подлинника (R_{CR}) на употребительный у нас индекс i . В таблице обозначено: $R'_{п}$ — первичная светимость поверхности, соответствующей индексу «п», «с» или «р», R_{mn} — доля установившейся светимости поверхности m , создаваемая первичной светимостью поверхности n , по отношению к последней. Таким образом, например, $R_{с.п}/R'_{с}$ есть коэффициент, на который надо умножить первичную светимость стен, чтобы получить долю установившейся светимости потолка, порожденную $R'_{с}$.

Относительная редкость задачи определения яркости стен и потолка обусловила то, что в отечественной практике какие-либо таблицы, основанные на индивидуальных характеристиках излучателей, не получили применения, и когда возникает необходимость

Таблица 3-16

Трансферные функции по О'Брайену (для $\rho_p = 0,2$)

$\rho_{п. \%}$	70						70					
	50						30					
$\rho_{с. \%}$	$R'_{п.п}/R'_{п}$	$R'_{с.п}/R'_{с}$	$R'_{п.н}/R'_{п}$	$R'_{с.н}/R'_{с}$	$R'_{п.с}/R'_{п}$	$R'_{с.с}/R'_{с}$	$R'_{п.п}/R'_{п}$	$R'_{с.п}/R'_{с}$	$R'_{п.н}/R'_{п}$	$R'_{с.н}/R'_{с}$	$R'_{п.с}/R'_{п}$	$R'_{с.с}/R'_{с}$
i												
0,5	0,07	0,29	1,10	0,94	0,17	1,6	0,055	0,24	1,05	0,76	0,08	1,29
0,6	0,08	0,28	1,11	0,86	0,18	1,56	0,067	0,23	1,06	0,70	0,09	1,27
0,8	0,10	0,25	1,12	0,74	0,21	1,48	0,087	0,21	1,07	0,62	0,11	1,24
1,0	0,12	0,22	1,13	0,64	0,23	1,42	0,10	0,19	1,08	0,55	0,12	1,22
1,5	0,15	0,17	0,14	0,48	0,26	1,32	0,13	0,15	1,09	0,43	0,14	1,17
2,0	0,16	0,14	1,14	0,39	0,28	1,26	0,15	0,13	1,11	0,36	0,15	1,14
3,0	0,18	0,11	1,15	0,28	0,30	1,19	0,17	0,10	1,12	0,26	0,17	1,10
5,0	0,20	0,07	1,15	0,18	0,31	1,13	0,19	0,065	1,13	0,16	0,18	1,07

$\rho_{п. \%}$	50						50					
	50						30					
$\rho_{с. \%}$	$R'_{п.п}/R'_{п}$	$R'_{с.п}/R'_{с}$	$R'_{п.н}/R'_{п}$	$R'_{с.н}/R'_{с}$	$R'_{п.с}/R'_{п}$	$R'_{с.с}/R'_{с}$	$R'_{п.п}/R'_{п}$	$R'_{с.п}/R'_{с}$	$R'_{п.н}/R'_{п}$	$R'_{с.н}/R'_{с}$	$R'_{п.с}/R'_{п}$	$R'_{с.с}/R'_{с}$
i												
0,5	0,07	0,28	1,07	0,66	0,16	1,56	0,055	0,23	1,04	0,53	0,08	1,28
0,6	0,08	0,26	1,08	0,60	0,18	1,51	0,065	0,21	1,04	0,49	0,09	1,25
0,8	0,10	0,22	1,08	0,52	0,20	1,44	0,09	0,19	1,05	0,44	0,10	1,22
1,0	0,12	0,20	1,09	0,44	0,22	1,38	0,10	0,17	1,05	0,38	0,12	1,20
1,5	0,14	0,15	1,09	0,34	0,25	1,29	0,13	0,14	1,07	0,30	0,14	1,16
2,0	0,16	0,12	1,10	0,26	0,27	1,23	0,15	0,11	1,07	0,24	0,15	1,13
3,0	0,18	0,09	1,10	0,20	0,28	1,17	0,17	0,08	1,08	0,18	0,16	1,09
5,0	0,19	0,06	1,11	0,12	0,30	1,11	0,19	0,06	1,09	0,12	0,17	1,06

в подобных расчетах, они выполняются на основе методики МЭИ, с использованием уравнений (3-37) и табл. 3-9 и 3-10.

Первичный поток, падающий на расчетную поверхность, определяется одним из рассмотренных способов, если же речь идет о светильнике, для которого имеются таблицы коэффициентов использования, то по значению η для «черного» помещения. Первичный поток, падающий на стены, определяется по разнице потока излучателей в нижней полусфере, и F'_p , первичный поток на потолок, как обычно, приравнивается к потоку излучателей в верхней полусфере.

Результаты расчета по методике МЭИ и по «трансферным функциям» достаточно хорошо совпадают. Более того, могут быть составлены простые формулы, связывающие коэффициенты R_{mn}/R'_m с коэффициентами k_{nm} , различные для разных сочетаний индексов n и m .

Пример. Помещение имеет размеры $A = 18$ м, $B = 12$ м, $H = 3,6$ м. Коэффициенты отражения поверхностей: $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 20\%$.

На потолке установлены светильники суммарным потоком 80 000 лм (к. п. д. светильников учтен), из которых в верхнюю полусферу излучается 25%. Рассчитанный по таблицам Джонса—Нейхарта коэффициент первичного использования относительно пола составляет 30%. Требуется определить среднюю светимость стен.

Из приведенных данных непосредственно следует $F'_n = 20\,000$ лм, $F'_p = 24\,000$ лм, $F'_c = 36\,000$ лм. Индекс помещения

$$i = \frac{18 \cdot 12}{3,6(18 + 12)} = 2,0.$$

По табл. 3-10, интерполируя между значениями ρ_n , равными 10% и 30%, находим $k_{n,c} = 0,40$, $k_{p,c} = 0,15$, $k_{c,c} = 1,25$, откуда установившийся поток на стенах

$$F_c = 24\,000 \cdot 0,15 + 36\,000 \cdot 1,25 + 20\,000 \cdot 0,4 = 56\,600 \text{ лм.}$$

Отсюда

$$R_c = F_c \rho_c / [2H(A + B)] = 28\,300 / 216 = 131 \text{ лм/м}^2.$$

Решим ту же задачу с помощью таблицы трансферных функций, пренебрегая ввиду ее незначительности долей светимости стен, создаваемой первичной светимостью пола (соответствующие коэффициенты у О'Брайена даны, но в табл. 3-16 нами не включены).

Первичная светимость стен $R'_c = 36\,000 \cdot 0,5 / 216 = 83 \text{ лм/м}^2$; первичная светимость потолка $R'_n = 20\,000 \cdot 0,7 / 216 = 64 \text{ лм/м}^2$. Выписав из табл. 3-16 значения трансферных функций, находим

$$R_c = 83 \cdot 1,26 + 64 \cdot 0,28 = 123 \text{ лм/м}^2.$$

Совпадение можно считать хорошим, особенно с учетом нашего пренебрежения величиной R'_p .

В отечественной практике чаще пользуются понятием яркости, чем светимости; напоминаем, что для диффузных поверхностей $B = R/\pi$.

Хотя настоящая глава посвящена принципам расчета средних характеристик поверхностей, обращаем внимание на то, что из трех групп поверхностей помещения (расчетная поверхность, стены, потолок) наиболее неравномерную светимость имеют обычно стены. Так, при некоторых уточненных расчетах для длинного помещения, с отношением высоты к ширине 1,4, светимость стен вблизи потолка

оказалась в 2,5 раза выше, чем вблизи пола. Обычно стены освещены равномернее, вообще же надо сказать, что если освещенность рабочих поверхностей жестко нормирована, то характеристики освещения стен и потолков чаще всего нас интересуют для приближенной, качественной оценки условий адаптации, дискомфорта и т. д. С этой точки зрения средние величины можно считать достаточно характерными.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

МЕТОДИКА СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

4-1. Общая характеристика и область применения различных методов расчета

В главах второй и третьей мы рассмотрели задачи, лежащие в основе техники светотехнических расчетов, т. е. определение освещенности в точке и средней освещенности поверхности.

Решение этих задач сводится в конечном счете к установлению характера функциональной зависимости

$$E = f(I) \text{ или } E_{\text{ср}} = f(F), \quad (4-1)$$

где I и F — соответственно сила света и поток излучателя.

Все многообразие применяемых способов расчета освещения сводится к двум группам, к двум принципиально отличным методам, из которых основанный на первом виде уравнения (4-1) именуется методом силы света, или, чаще, точечным методом, а основанный на втором виде — методом светового потока, или, чаще, методом коэффициента использования. Те или иные упрощенные приемы расчета, такие, как таблицы удельной мощности, основаны на одном из двух указанных методов и самостоятельными методами не являются.

В принципе оба основных метода равноправны, области их применения в значительной степени пересекаются, но вместе с тем между ними есть и существенные различия.

Расчетом по точечному методу, несколько усложнив его, можно найти среднюю освещенность поверхности, но в основном он предназначен для нахождения освещенности в определенных точках и, следовательно, наиболее приспособлен для обеспечения минимальной освещенности, регламентируемой нашими нормами для большей части объектов освещения. Этот же метод в принципе позволяет найти не только освещенность точки от прямого света излучателей, но и дополнительную освещенность, создаваемую отраженным светом, однако в потребительных модификациях точечного метода эта дополнительная освещенность учитывается лишь грубо приближенно.)

(Напротив, метод коэффициента использования предназначен для определения средней освещенности и при расчете по этому методу минимальная освещенность оценивается лишь приближенно и без выявления точек, в которых она имеет место. В принципе средняя освещенность может быть рассчитана на как угодно расположенной поверхности, но наиболее употребительные формы этого метода предназначены для расчета только горизонтальной освещенности.)

В теории точечного метода меньше, пожалуй, допущений, чем в теории метода коэффициента использования, но, с другой стороны, самая сила света излучателей в определенных направлениях подвержена очень большим случайным отклонениям, в силу чего едва ли точечный метод может быть признан более точным, чем метод коэффициента использования.

Наконец, что касается простоты, то и здесь оба метода можно считать равноценными.

Итак, исключая особо рассматриваемые далее специальные случаи, применению точечного метода благоприятствуют:

- а) возможность отказаться от точного учета освещенности, создаваемой отраженным светом;
- б) естественно получаемая или специально осуществляемая неравномерность распределения освещенности;
- в) необходимость определения освещенности негоризонтальных поверхностей.

Обратные обстоятельства благоприятствуют применению метода коэффициента использования.

Творческий характер светотехнических расчетов не позволяет жестко регламентировать применение того или иного метода, но в большинстве практических случаев выбор метода расчета можно основывать на следующих рекомендациях.

(Применение метода коэффициента использования целесообразно во всех случаях, когда расчет ведется на среднюю освещенность, для расчета общего равномерного освещения вспомогательно-бытовых и административно-конторских помещений, для расчета общего равномерного освещения производственных помещений светильниками, не относящимися к классу прямого света.)

(Применение точечного метода целесообразно для расчета установок с повышенной неравномерностью освещенности (локализованное освещение светильниками прямого света, наружное освещение, рассчитываемое на минимальную освещенность, местное освещение, аварийное освещение), а также для расчета освещения негоризонтальных поверхностей, выполненного светильниками прямого света.)

Общее равномерное освещение производственных помещений, выполненное светильниками прямого света может быть с равным успехом рассчитано любым методом. Все же в наиболее ответственных случаях мы отдаем предпочтение точечному методу, считая его более «зрячим» в том отношении, что он позволяет проанализировать распределение освещенности по площади помещения. Особое значение имеет расчет по точечному методу при светильниках концентри-

рованного светораспределения. В этом случае даже незначительное изменение расположения светильников может повести к резким провалам освещенности на отдельных участках, выявить которые можно только расчетом по точечному методу.

Есть, наконец, случаи, в которых ни один из методов расчета, отдельно взятый, не дает точных результатов, а именно расчет локализованного освещения или освещения негоризонтальных поверхностей в условиях помещений, освещаемых светильниками, не относящимися к классу прямого света. В этих случаях, более подробно рассмотренных в дальнейшем, приходится прямую составляющую освещенности учитывать по точечному методу, а дополнительную отраженную составляющую — по методу коэффициента использования.

4-2. Основные формы точечного метода

Расчет освещения по точечному методу в его наиболее распространенных формах достаточно прост и не требует больших затрат времени. Вместе с тем технику расчета по точечному методу в какой-то мере можно сравнить с интегрированием, в том отношении, что как и в последнем, не все приемы точечного метода могут быть жестко регламентированы и от рассчитывающего, помимо всего прочего, требуется интуиция и, можно сказать, «светотехническое чутье».

В наиболее общем случае, при точечных излучателях с любым известным светораспределением задача решается следующим образом.

В точке A освещаемой поверхности, принадлежащей любым образом ориентированной плоскости, требуется обеспечить освещенность E при коэффициенте запаса k . Для этой цели установлено n светильников, поток ламп F_i в каждом из них может быть как одинаковым, так и различным (хотя последнее затрудняет эксплуатацию и нежелательно). Расстояние d_i от проекции каждого светильника на проведенную через A горизонтальную плоскость может быть определено или измерено. При известных значениях высоты h_i и расстояния с помощью соответствующих графиков может быть для точки A , первоначально рассматриваемой как принадлежащая горизонтальной плоскости, определена либо условная освещенность e_i , либо относительная освещенность ε_i . Переход к освещенности той плоскости, в которой фактически лежит точка A , осуществляется введением коэффициента ψ_i , пересчет на фактический поток ламп в светильнике — коэффициентом $F_i/1000$; при работе с кривыми относительной освещенности пересчет на фактическое значение высоты производится делением на h_i^2 .

Таким образом, каждый отдельный светильник создает в точке освещенность

$$\frac{\psi_i e_i F_i}{1000} \text{ или } \frac{\psi_i \varepsilon_i F_i}{1000 h_i^2}.$$

Нет необходимости определять составляющие освещенности от всех n светильников, в числе которых могут быть и создающие в данной точке исчезающе малую освещенность; достаточно определить освещенность от m светильников, условно называемых ближайшими, причем эта освещенность равна

$$\sum_{i=1}^{i=m} \frac{\psi_i e_i F_i}{1000} \text{ или } \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\psi_i \varepsilon_i F_i}{1000 h_i^2}.$$

При достаточном числе удаленных светильников, не учтенных в этих суммах, совместно они могут создать пусть небольшую, но все же заметную освещенность. В условиях замкнутых помещений, даже при светильниках прямого света (а тем более при светильниках остальных классов), освещенность увеличивается за счет многократных отражений от поверхностей помещения. Общий результат действия удаленных светильников и многократных отражений учтем умножением найденных сумм на коэффициент дополнительной освещенности $\mu > 1$. Так как результирующая освещенность должна быть равна расчетной освещенности E_k , то получаем равенства:

$$E_k = \mu \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\psi_i e_i F_i}{1000} = \mu \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\psi_i \varepsilon_i F_i}{1000 h_i^2}. \quad (4-2)$$

Таковы наиболее общие формулы точечного метода. Если какие-либо из величин ψ , F , h одинаковы для всего множества светильников, то они выносятся за знак суммы. Если, кроме того, $\psi = 1$, что имеет место в наиболее частом случае освещения горизонтальных поверхностей, то формулы еще более упрощаются и принимают вид:

при определении мощности лампы, необходимой для создания заданной освещенности,

$$F = \frac{1000 E_k}{\mu \sum e} = \frac{1000 E_k h^2}{\mu \sum \varepsilon}; \quad (4-3)$$

при определении освещенности, создаваемой лампами известного потока,

$$E = \frac{F \mu \sum e}{1000 k} = \frac{F \mu \sum \varepsilon}{1000 k h^2}. \quad (4-4)$$

Вопрос о коэффициенте μ подробно рассмотрен далее в § 4-4¹. С приемами определения e или ε мы уже подробно познакомились в главе второй. Остальные вопросы методики расчета рассматриваются ниже.

Общее равномерное освещение. В принципе все вопросы, связанные с выбором размещения светильников в плане и разрезе помещения, должны быть, как правило, решены до расчета, задачей которого

¹ В приводимых далее примерах те или иные значения μ приняты ориентировочно, без подробной аргументации.

является, таким образом, определение потока и мощности ламп. Поскольку должна быть обеспечена установленная нормами минимальная освещенность, значение $\sum e$ или $\sum \epsilon$, на основании которого рассчитывается F , необходимо определить для «наихудшей» контрольной точки, т. е. той точки, где эта сумма имеет наименьшее значение.

Вопрос выбора такой точки не всегда прост и, в принципе, мог бы быть основан на детальном изучении распределения освещенности по помещению, в зависимости от многочисленных факторов. Однако из того, что уже известно о распределении освещенности, а также из того, что излагается ниже, мы приходим к выводу, что затраты на подобное исследование едва ли бы себя окупили.

Решая вопрос выбора контрольной точки, надо, прежде всего, избегать излишнего педантизма: из факта нормирования наименьшей освещенности не следует делать вывод, что должна быть найдена точка абсолютного минимума в математическом смысле этого понятия. Трудно провести разумную границу, но едва ли можно осудить установку, в которой освещенность, не меньшая заданной, обеспечивается на 90% площади, а на остальных 10% лишь несколько меньше нормы. Пожалуй, скорее подлежит осуждению такое решение, когда во имя соблюдения нормы в немногих точках абсолютного минимума завышается мощность ламп по всему помещению.

Именно такого рода соображениями руководствовались представители Тяжпромэлектропроекта и Московского института охраны труда, когда еще в 30-х годах совместно решили, что в помещениях с многорядным расположением светильников не должна, как правило, проверяться освещенность части площади, лежащей между крайними рядами светильников и стенами, и что в качестве основной контрольной точки должен выбираться центр углового поля. Эта концепция требует, конечно, пояснений и уточнений.

Исключение из рассмотрения (но, конечно, не во всех случаях) площади между крайними рядами светильников и стенами оправдано тем, что эта площадь относительно невелика, что при наличии в пределах этой площади основных рабочих мест она может быть уменьшена или даже доведена до нуля приближением крайних рядов светильников к стенам или установкой их на кронштейнах и, наконец, тем, что в непосредственной близости стен отражаемый ими свет играет повышенную, но трудно учитываемую роль.

Подробнее следует остановиться на второй стороне упомянутого решения. Поле мы называем квадрат, прямоугольник или треугольник, образованный проекциями на расчетную поверхность четырех или трех соседних светильников. Рассмотрим сначала изолированное поле при отсутствии каких-либо светильников, кроме установленных в вершинах этого поля. Распределение освещенности по площади поля зависит от типа светильника и отношения $\lambda = L/h$ и при уменьшении λ скоро становится почти равномерным. Контрольными точками квадратного поля и поля в форме равностороннего треугольника будем считать вершину поля A , середину одной из сторон B и точку центра тяжести площади поля C . Расчеты показывают, что в большинстве случаев при малых λ минимум освещенности находится в точке A , при больших λ — в точке C , при промежуточных значениях λ — иногда в точке B . Пока минимум не перешел в точку C поле освеще-

щено настолько равномерно, что практически безразлично, какую точку выбрать в качестве контрольной, а следовательно, и в этом случае можно ориентироваться на точку *C*.

Известная осторожность нужна при полях прямоугольной формы и при полях в виде равнобедренного треугольника с углом при вершине более 60°: минимум, и довольно резко выраженный, в обоих случаях часто оказывается на середине длинной стороны поля.

В помещениях с многорядным расположением светильников возникает проблема «периферийной неравномерности»: взаимно соответствующие точки различно расположенных полей оказываются различно освещенными, причем освещенность уменьшается в направлении от центра к периферии помещения. Причиной этого является различная роль удаленных светильников, т. е. светильников в вершинах других полей, а так как эта роль возрастает с уменьшением λ , то периферийная неравномерность сказывается тем сильнее, чем меньше λ . Это наиболее ясно из рассмотрения предельного случая, когда при $\lambda = 0$ светильники сливаются в сплошной светящийся потолок (рис. 4-1). Тогда, если в центральной точке *A* каждый из квадрантов I—IV создает равную освещенность *E*, то полная освещенность этой точки составит $4E$, в угловой же точке *B* квадрант I создаст освещенность *E*, остальные же квадранты, если помещение достаточно велико, создают пренебрежимо малую освещенность. В итоге $E_A/E_B = 4$ (поверхности помещения рассматриваются как неотражающие).

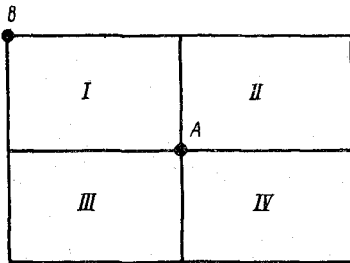


Рис. 4-1. Периферийная неравномерность освещения (предельный случай)

Вместе с тем и в этом предельном случае основное спадание освещенности происходит в непосредственной близости стен, причем, если последние отражают свет, то различие между E_A и E_B уменьшается с увеличением светимости стен. Сказанное количественно иллюстрируется следующими данными:

Расстояние от угла помещения по направлению к центру в долях высоты	Отношение E_B/E_A при светимости стен в %, % от светимости потолка	
	0	20
0	0,25	0,40
0,5	0,54	0,63
1,0	0,75	0,78
1,5	0,85	0,88

С увеличением λ разница между освещенностью центральных и периферийных полей уменьшается. Это иллюстрируется следующими значениями отношения освещенности углового поля к освещен-

ности центрального поля ($E_y/E_{ц}$), рассчитанными для большого помещения и являющимися средними для нескольких характерных светильников:

λ	Отношение $E_y/E_{ц}$ для помещения	
	$\rho_{п} = \rho_{с} = 0$	$\rho_{п} = 70\%;$ $\rho_{с} = 50\%$
0,8	0,76	0,82
1,2	0,86	0,90
1,6	0,88	0,94

Разница между E_y и $E_{ц}$ уменьшается также с уменьшением размеров, точнее, индекса помещения.

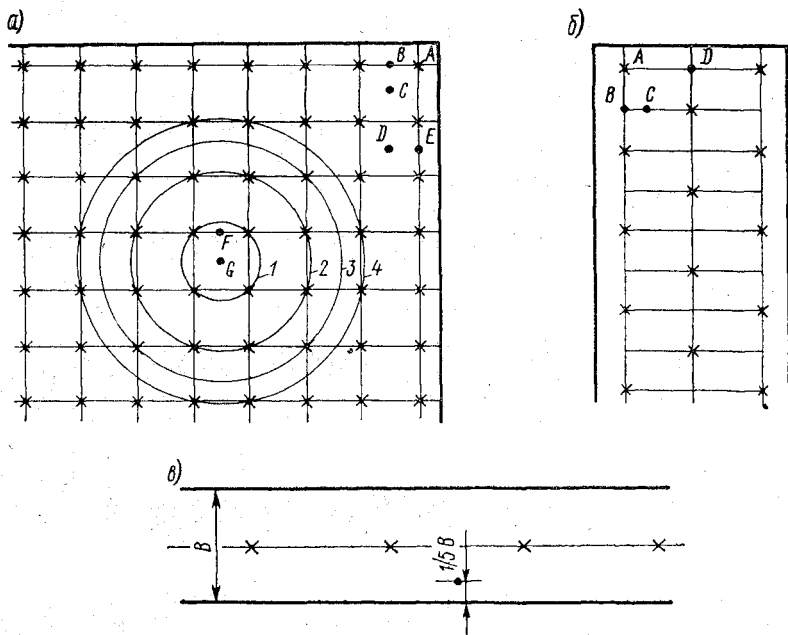


Рис. 4-2. Контрольные точки и учитываемые в них светильники

Для помещения, часть площади которого изображена на рис. 4-2, а, основными контрольными точками являются С и В, но если λ мало, а помещение достаточно велико, то разница между освещенностями точек, соответственно, С и G, В и F может оказаться очень большой. Тогда следует рассмотреть возможность увеличения освещенности периферийной части помещения, например, путём сближения светильников крайних рядов. Если этого сделать нельзя, то как компромисс можно пойти на выбор мощности ламп по величине $\sum e$ для точек D или E. В схеме рис. 4-2, б следует исходить из значений $\sum e$ для точек С или В. Точку D едва ли можно считать характерной, но если и в ее районе необходимо обеспечить

полную норму освещенности, то над этой точкой или против нее на стене на кронштейне может быть установлен дополнительный светильник.

При однорядном расположении светильников (рис. 4-2, в) чаще всего можно рекомендовать выбор контрольной точки, показанной на рисунке. Размер $B/5$ не является вполне произвольным: при выборе такого размера положение точки соответствует тому, которое имело бы место при двух рядах светильников, каждый из которых удален от стены на $1/3$ расстояния между рядами.

Как уже было сказано, в контрольной точке учитывается освещенность только от тех светильников, которые условно признаются «ближайшими». Уточнить, какие именно светильники являются ближайшими, в общем виде невозможно. До некоторой степени граница между «ближайшими» и «удаленными» светильниками подсказывается пределами шкал графиков изолюкс, но если говорить, например, о центре квадратного поля, то при больших высотах все светильники, кроме четырех расположенных в вершинах данного поля, уже могут оказаться на расстоянии, превышающем пределы шкалы d на графике, иной же раз даже и от этих четырех светильников освещенность может быть найдена только с помощью расширения пределов шкал графика:

Рассмотрим точку G на рис. 4-2, а, где для наглядности соединены окружностями светильники, равно удаленные от точки. Круг 1 охватывает 4 светильника, учитываемых, конечно, всегда, круг 2 — 8, круг 3 — 4 и круг 4 — 8. Удельный вес в суммарной освещенности равноудаленных светильников зависит от их светораспределения и от величины λ . Чем шире кривая силы света и чем меньше λ , тем роль удаленных светильников больше. Из табл. 4-1 видно, что при типовой кривой М и малых λ учета требуют не только светильники четвертой окружности, но и более удаленные, тогда как при типовой кривой Г уже при $\lambda = 1,4$ достаточно учесть лишь четыре ближайших светильника. Пренебрежение этим обстоятельством может по-

Таблица 4-1

Относительная роль различно удаленных светильников
в освещенности центральной точки поля

Типовая кривая силы света по ГОСТ 13828-68	λ	Освещенность в относительных единицах от светильников (рис. 4-2, а)			
		4-х первого круга	8-ми второго круга	4-х третьего круга	Всех прочих
М	0,8	100	73	19	78
	1,4	100	39	9	27
	2,0	100	38	6	7
Д	0,8	100	49	11	33
	1,4	100	23	4	8
	2,0	100	15	3	2
Г	0,8	100	14	1	1
	1,4	100	2	0	0
	2,0	100	0	0	0

вести к серьезным ошибкам. Так, некоторые проектировщики, сопоставляя экономичность зеркальных ламп глубокого светораспределения и светильников косинусного светораспределения приходили к выводу о преимуществе первых лишь потому, что в обоих случаях учитывали одинаковое число светильников, пренебрегая во втором случае значительной ролью более удаленных светильников.

Пожалуй, единственное общее правило может быть сформулировано так: «удаленными» следует считать светильники, начиная с такого расстояния d , при котором создаваемая ими освещенность пренебрежимо мала (скажем, не более 5%) по сравнению с освещенностью от ближайших светильников.

Не следует забывать и о затенениях. Если в отношении тех или иных светильников известно, что они затеняются оборудованием или рабочим при его нормальном положении у рабочего места, то освещенность от них учитываться, конечно, не должна.

Необходимое для определения условной или относительной освещенности расстояние d , за исключением случаев, когда требуется повышенная точность расчета, определяется обмером по масштабному плану с точностью 0,1—0,2 м.

После определения $\sum e$ или $\sum \epsilon$ по формуле (4-3) находится потребный поток лампы и выбирается стандартная лампа, поток которой должен отличаться от расчетного, как правило, не более чем на —10% или +20%. При невозможности выбора с такой точностью рассматривается вопрос о корректировке числа и расположения светильников. Если значение F существенно превышает технически возможный максимум, то в производственных помещениях часто применяется установка в каждой вершине поля блока из двух или большего числа светильников. Особенно часто приходится прибегать к такому решению при лампах ДРЛ. Так, например, если расчетное значение потока 70 000 лм, то совместно устанавливают две лампы по 700 вт, что, кроме того, всегда желательно, а иногда и необходимо по условиям ограничения пульсации освещенности.

Пример. В качестве примера рассчитаем общее освещение помещения, часть плана которого показана на рис. 4-3.

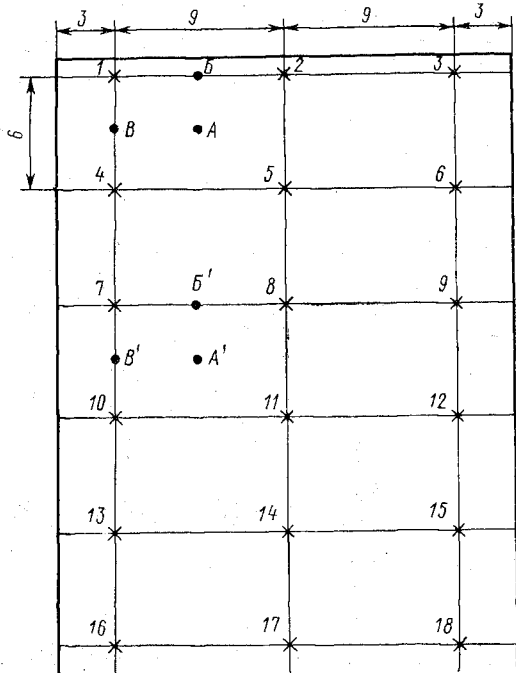


Рис. 4-3. К примеру расчета

Помещение имеет фермы с шагом 6 м. При установке светильников только на фермах ближайšie к торцевой стене светильники окажутся на расстоянии 6 м от нее. Если прилегающую к торцевой стене часть площади можно рассматривать как проход, то это допустимо, в противном случае, как то показано на рисунке, крайние светильники устанавливают на стене с помощью кронштейнов.

Решение примера даем в трех вариантах, для светильников типов Гс, Гэ, ГсР¹, причем при первых двух светильниках задано $E = 150$ лк, $k = 1,5$; при светильнике ГсР $E = 300$ лк, $k = 1,8$. Сводка расчетных данных приведена в табл. 4-2, которая может быть рекомендована как типовая форма записей при подобных расчетах (кроме номеров светильников, в практических расчетах не указываемых). Таблица поучительна в том отношении, что из нее видна и роль удаленных светильников, и разница в освещенности различных полей, и тот интересный факт, что при различных светильниках минимум освещенности может оказаться в различных точках. Суммы освещенностей в таблице указаны с округлением. В скобки взяты данные для светильников, которые могли бы не учитываться при реальных расчетах.

Не повторяя ранее приведенных соображений, выберем в качестве точек, по освещенности которых выбирается мощность лампы, точку А при светильниках Гс и ГсР и точку В при светильнике Гэ. Значение μ примем равным 1,1.

Все величины, входящие в (4-3), теперь известны и можно определить потребный световой поток лампы в каждом варианте.

Светильник Гс

$$F = \frac{1000 \cdot 150 \cdot 1,5}{1,1 \cdot 1,13} = 15750 \text{ лм.}$$

Выбираем лампу накаливания 1000 вт, 220 в, 18 200 лм.
Светильник Гэ

$$F = \frac{1000 \cdot 150 \cdot 1,5}{1,1 \cdot 1,85} = 24\ 200 \text{ лм.}$$

Если расположение светильников должно быть сохранено, то следует установить в каждой вершине поля по два светильника с лампами накаливания 750 вт, 220 в, 13 100 лм.

Светильник ГсР

$$F = \frac{1000 \cdot 300 \cdot 1,8}{1,1 \cdot 1,13} = 43\ 500 \text{ лм.}$$

Выбираем лампу ДРЛ, 1000 вт, 55 000 лм.

Почти во всех случаях выбор стандартной лампы связан с тем или иным отклонением от расчетного потока. Остановимся на приеме, который позволяет избежать такого отклонения, но который пригоден только в случаях, когда осуществимо любое расстояние между светильниками (например, при выработке типовых вариантов освещения протяженных объектов: коридоров, фасадов, щитов и т. д.).

Пример. Пусть светильники расположены в один ряд (рис. 4-2, в), причем задано $B = 4$ м, $h = 3$ м, $E = 20$ лк, $k = 1,3$, $\mu = 1,2$, тип светильника — «Универсаль».

Перепишем формулу (4-2) относительно $\sum e$:

$$\sum e = \frac{1000Ek}{\mu F} = \frac{21600}{F}.$$

¹ Здесь и во всех последующих примерах использованы данные таблиц и графики «Справочника для проектирования электрического освещения» автора, в издании 1968 г.

Таблица 4-2

Сводка результатов к примеру расчета по точечному методу

Точка	Номера светильников	d	n	Гс		ГсР		Гэ	
				e	ne	e	ne	e	ne
А	1, 2, 4, 5	5,5	4	3,0	12,0	2,7	10,8	1,8	7,2
	7, 8	10	2	0,4	0,8	0,25	0,5	0,65	1,3
	3, 6	14	2	(0,08)	(0,16)	—	—	0,22	0,44
Σe					13		11,3		8,9
Б	1, 2	4,5	2	4,0	8,0	4,1	8,2	2,3	4,6
	4, 5	7,5	2	1,25	2,5	1,0	2,0	1,15	2,3
	7, 8	13	2	(0,1)	(0,2)	(0,06)	(0,12)	0,3	0,6
Σe					10,7		10,3		7,5
В	1, 4	3	2	6,2	12,4	7,0	14	3,0	6,0
	7	9	1	0,65	0,65	0,4	0,4	0,8	0,8
	2, 5	9,5	2	0,5	1,0	0,3	0,6	0,7	1,4
	8	13	1	(0,1)	(0,1)	(0,06)	(0,12)	0,3	0,3
Σe					14,1		15,1		8,5
А ¹	7, 8, 10, 11	5,5	4	3,0	12	2,7	10,8	1,8	7,2
	4, 5, 13, 14	10	4	0,4	1,6	0,25	1,0	0,65	2,6
	9, 12	14	2	(0,08)	(0,16)	—	—	0,22	0,44
Σe					13,8		11,8		10,2
Б ¹	7, 8	4,5	2	4,0	8,0	4,1	8,2	2,3	4,6
	4, 5, 10, 11	7,5	4	1,25	5,0	1,0	4,0	1,15	4,6
	1, 2, 13, 14	13	4	(0,1)	(0,4)	(0,06)	(0,24)	0,3	1,2
Σe					13,4		12,4		10,4
В ¹	7, 10	3	2	6,2	12,4	7,0	14	3,0	6,0
	4, 13	9	2	0,65	1,3	0,4	0,8	0,8	1,6
	8, 11	9,5	2	0,5	1,0	0,3	0,6	0,7	1,4
	5, 14	13	2	(0,1)	(0,2)	(0,06)	(0,12)	0,3	0,6
Σe					14,9		15,5		9,6

Задаемся рядом произвольных, но вероятных значений L , и для каждого из них определяем $\sum e$, находя в данном случае d по теореме Пифагора. При малых L учтем 4 светильника, при больших — 2 ближайšie. Подсчет значений $\sum e$ приведен в верхней части табл. 4-3.

Таблица 4-3

К расчету освещения одним рядом светильников

а. Значения $\sum e$ при различных L

$L, м$	3	4	5	6	8	10
$d, м$	1,92; 4,6	2,34; 6,1	2,78; 7,6	3,24; 9,1	4,18	5,15
$2e, лк$	25; 5,2	20; 2,4	16; 1,2	12; 0,6	6,6	4,0
$\sum e, лк$	30,2	22,4	17,2	12,6	6,6	4,0

б. Сводка результатов

$P, вт$	$F, лм$	$\sum e, лк$	$L, м$	$\frac{P}{L}, вт/м$
75	840	25,7	3,5	21,4
100	1240	17,4	5,0	20
150	1900	11,4	6,4	23,5
200	2700	8,0	7,6	26,4

Найденные значения $\sum e$ используем для построения вспомогательного графика $\sum e = f(L)$. Задаемся несколькими мощностями стандартных ламп, и, зная их номинальные потоки, рассчитаем, какие значения должно иметь $\sum e$ при этих потоках.* По построенному вспомогательному графику определяем соответствующие значения L . Сводка результатов расчета дана в нижней части табл. 4-3.

Важным энергетическим показателем является мощность ламп, отнесенная к единице площади или длины. С этой точки зрения вариант с лампой 100 *вт* оказывается наиболее выгодным, хотя с учетом всех экономических показателей, вероятно, оптимальной оказалась бы лампа 150 *вт* или даже 200 *вт*.

В ряде случаев расчеты, подобные приведенному, требуют повышенной точности и их желательно выполнять с помощью кривых относительной освещенности, а не пространственных изолукс.

При светильниках, которые могут быть приняты за точечные излучатели, но имеют некруглосимметричное светораспределение, методика расчета лишь незначительно отличается от описанной. Выбор

контрольной точки и числа учитываемых в ней светильников производится так же, как в рассмотренном случае, но в основу расчета кладется относительная освещенность, определяемая чаще всего по графикам условных изолукс. Как было рассмотрено в главе второй, для каждого светильника, освещающего контрольную точку, вместо одной координаты d определяют две координаты x и y , находят $\xi = x/h$ и $\eta = y/h$, по графику изолукс прочитывают значение ϵ , находят $\sum \epsilon$, и потребный поток лампы вычисляют по формуле (4-3) в ее втором виде.

При расчете освещения от сплошных или с разрывами рядов светильников с люминесцентными лампами возникают некоторые специфические вопросы. Заданным до расчета здесь является число и расположение не светильников, а рядов светильников, в итоге же расчета определяется число и размещение светильников в ряду, т. е. производится, как мы говорим, компоновка ряда.

Периферийная неравномерность, рассмотренная нами для точечных излучателей, принимает здесь в основном форму продольной неравномерности, неравномерность же в поперечном направлении сказывается в меньшей степени, только при большом числе рядов и малом λ .

Представим себе очень длинную светящую линию и две точки, расположенные вдоль ее проекции на горизонтальную плоскость, одна — против конца линии, другая — против ее середины. Для обеих точек $r' = 0$. Для крайней точки при $L' > 4$ находится некоторое значение ϵ , для средней же точки, если линия достаточно длинна, каждая половина линии также характеризуется $L' > 4$ и создает освещенность ϵ , следовательно, суммарная освещенность средней точки будет 2ϵ . Таким образом, предельная степень продольной неравномерности равна двум.

При линиях ограниченной длины, для случая косинусного светораспределения в продольной плоскости, нами рассчитаны следующие соотношения:

Отношение длины линии к расчетной высоте	Отношение наимень- шей освещенности точек под линией к наибольшей	Отрезок x
0,5	0,9	—
1,0	0,75	0,15h
2,0	0,6	0,35h
3,0	0,55	0,5h
4,0	0,53	0,5h

Для компенсации продольной неравномерности рекомендуются следующие способы:

а) продление светящей линии за пределы освещаемой площади на отрезок x , значения которого даны в приведенной выше табличке;

б) удвоение плотности светового потока у каждого из концов линии на протяжении такой же длины x путем учащенной установки светильников или их сдваивания;

в) устройство по концам основных линий замыкающих поперечных линий, если продольных линий две или больше.

При реализации любого из этих решений с продольной неравномерностью можно не считаться и выбирать контрольную точку посередине между соседними линиями, против центра каждой из них.

Первый способ компенсации применяется (и, можно сказать, обязателен) при освещении той или иной поверхности, занимающей часть длины помещения, например стола для раскроя тканей, но он неосуществим, если рабочая зона простирается до самых торцевых стен. В этом случае приходится выбирать между двумя другими способами. Часто, однако, оказывается, что площадь вблизи торцевых стен не используется для основной работы, и в таких случаях мы нередко отказываемся от компенсации продольной неравномерности, но, в качестве компромисса, выбираем контрольную точку не против центра линии, а на расстоянии от торцевой стены, примерно равном расчетной высоте.

Относительная освещенность определяется по графикам линейных изолюкс, а при их отсутствии — умножением силы света в данном направлении поперечной плоскости на значение $f(p', L')$. Суммированием значений ε от отдельных рядов (или, вернее, «полурядов») находится $\sum \varepsilon$.

Ранее была приведена формула (2-15) для перехода от относительной освещенности к фактической. Заменяя в ней ε на $\sum \varepsilon$ и учитывая коэффициент запаса и коэффициент μ , получаем для определения плотности светового потока ламп в каждом ряду светильников формулу

$$F' = \frac{1000Ekh}{\mu \sum \varepsilon} \quad (4-5)$$

Для компоновки ряда светильников с необходимым значением F' умножаем это значение на полную длину ряда L и находим поток ламп всего ряда. Разделив этот последний поток на поток ламп в выбранном светильнике, определяем число светильников в ряду N . При длине каждого светильника l полная длина всех светильников ряда Nl ; эта длина должна быть сопоставлена с длиной ряда L , причем возможны следующие случаи:

- а) $Nl = L$. Светильники располагаются в виде сплошного ряда;
- б) $Nl < L$. Возможно размещение светильников с небольшими, легко рассчитываемыми разрывами, но если последние оказываются очень малыми, то и в этом случае целесообразен сплошной ряд, хотя бы для этого потребовалось 1—2 «лишних» светильника;
- в) $Nl > L$, иногда — незначительно, иногда — в несколько раз. Если при сплошном ряде значение F' получается меньше 90% расчетного, то необходимо либо перейти к лампам большей единичной мощности, у которых поток с единицы длины лампы больше, либо, сблизив между собой ряды, увеличить их число, или же в каждом ряду разместить светильники в несколько «ниток», т. е. образовать ряд из двух или трех совмещенных линий светильников.

Возможен и другой практический прием компоновки ряда по найденному значению F' . Если поток ламп в светильнике F , длина све-

тильника l , а разрыв между смежными светильниками λ , то из очевидного соотношения $F' = F/(l + \lambda)$ получаем

$$l + \lambda = \frac{F}{F'} \quad (4-6)$$

Если расчет по этой формуле приводит к $\lambda < 0$, то изменяется F путем перехода к другой лампе или путем сдваивания или страива-

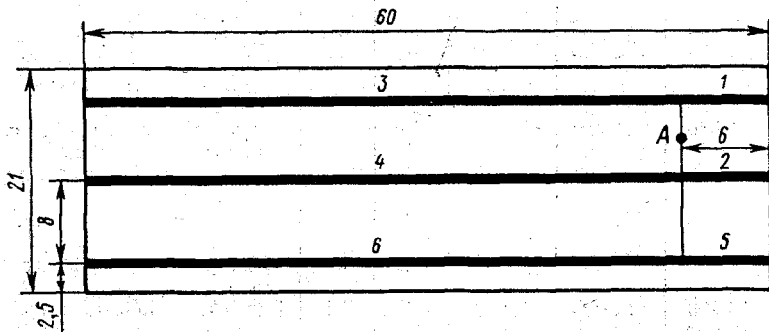


Рис. 4-4. К примеру расчета

ния светильников; может быть также изменена потребная плотность светового потока ламп F' путем увеличения числа рядов.

Пример. Выполним расчет общего равномерного освещения помещения люминесцентными лампами в светильниках ЛДР при расчетной высоте 6 м и расположении светильников, показанном на рис. 4-4. Примем значения $k = 1,5$ и $\mu = 1,1$. Контрольную точку A выберем на расстоянии h от торцевой стены, между рядами. В табл. 4-4 приведен подсчет относительной освещенности от шести полурядов, освещающих эту точку.

Подставляя известные и найденные значения в формулу (4-5), получим

$$F = \frac{1000Ekh}{\mu \sum e} = \frac{1000E \cdot 1,5 \cdot 6}{1,1 \cdot 400} = 20,4E.$$

Заключительный этап расчета, чтобы показать характерные случаи компоновки рядов, выполним для нескольких значений E (табл. 4-5). Поскольку во всех случаях $\lambda < 0,5h$, то принятие линий за условно непрерывные допустимо. При всех освещенностях предпочтительны лампы 80 вт, кроме, может быть, освещенности 100 лк.

В ряде отраслей промышленности приходится иметь дело с рядами люминесцентных светильников только очень большой длины, так что во всех случаях расчета можно считать $L' = \infty$. В этом случае ε оказывается функцией одного переменного ρ' и вместо линей-

Таблица 4-4

Подсчет относительной освещенности в контрольной точке

№ полуряда	ρ	ρ'	L	L'	ε
1	4	0,67	6	1,0	80
2	4	0,67	6	1,0	80
3	4	0,67	54	>4,0	110
4	4	0,67	54	>4,0	110
5	12	2,0	6	1,0	7
6	12	2,0	54	>4,0	12
					$\sum \varepsilon = 400$

Варианты компоновки рядов светильников
при различных освещенностях

$E, \text{лк}$	$F', \text{лм/м}$	$F'L, \text{лм}$	$P, \text{см}$	N	$Nl, \text{м}$	Возможная компоновка ряда
100	2 040	122 000	2×40	25	31	Одна нитка светильников $\lambda = 1,15 \text{ м}$
100	2 040	122 000	2×80	14	22	То же, $\lambda = 2,7 \text{ м}$
150	3 060	183 000	2×40	37	46	То же, $\lambda = 0,4 \text{ м}$; можно ряд выполнить сплошным
150	3 060	183 000	2×80	21	32	То же, $\lambda = 1,33 \text{ м}$
200	4 080	244 000	2×40	49	61	Сплошной ряд из 48 светильников
200	4 080	244 000	2×80	28	43	Одна нитка светильников; $\lambda = 0,6 \text{ м}$
300	6 120	366 000	2×40	74	92	Спаренные светильники; $\lambda = 0,38 \text{ м}$
300	6 120	366 000	2×80	42	65	Сплошной ряд из 39 светильников
500	10 200	610 000	2×40	123	153	Вариант явно нецелесообразен
500	10 200	610 000	2×80	71	109	Сплошной ряд спаренных светильников, всего 78 шт.

ных изолукс можно пользоваться более удобными кривыми $\varepsilon = h(p')$. Применяются подобные кривые, построенные как для горизонтальной плоскости, так и для иначе ориентированных поверхностей, расположенных характерно для данного производства.

Если кривые привязываются к определенным цехам, то оказывается возможным учесть при их построении реальные условия затенения рабочих поверхностей. Кривые $\varepsilon = f(p)$ могут быть построены как путем расчета, так и на основании непосредственных измерений.

Общее локализованное освещение. Расчет локализованного освещения выполняется по весьма разнообразным схемам, но в общем отличается тем, что в качестве контрольной выбирается точка с наименьшей освещенностью в пределах конкретной расчетной поверхности, а не всей площади помещения.

Ниже описывается методика расчета для нескольких характерных случаев, представленных на рис. 4-5.

а. Наиболее общая принципиальная схема: заданная освещенность должна быть обеспечена в пределах фиксированной поверхности. Контрольная точка может совпадать с точкой абсолютного минимума. Компенсация продольной неравномерности осуществляется сближением точечных источников у концов рабочей зоны или продлением рядов или светящих линий за пределы этой зоны.

б. В помещении имеется два ряда рабочих мест. Остальная площадь является проходной, причем используется и при выключенном освещении рабочих мест. В связи с этим освещение, создаваемое центральным рядом светильников, рассматривается независимо от остального освещения, по «своей» контрольной точке. Напротив, при расчете освещения рабочих столов следует из нормы освещенности

вычесть освещенность, создаваемую центральным рядом светильников. Почти во всех случаях в результате расчета окажется, что в центральном и боковых рядах будут различные по типу и мощности светильники.

в. Светильники расположены у рабочих столов (или насосов, или другого оборудования) и ориентированы с учетом необходимого направления света. Контрольная точка выбирается на рабочем месте. Соседние светильники могут учитываться или не учитываться в зависимости от расстояния до них.

г. Тот или иной участок площади помещения выделяется повышенными требованиями к освещению (например, участок разметки). Для повышения освещенности устанавливается дополнительный светильник или группа светильников. Их мощность рассчитывается так, чтобы они создавали разницу между нормой освещенности для данного участка и для остальной площади цеха.

д. У конвейера расположено два ряда рабочих мест (например, столики швей-мотористок). Ряд светильников размещен над осью конвейера. Контрольная точка — на рабочем столике. Иногда ее место строго фиксировано. Так, при работе на швейных машинах это игла машины.

е. Книгохранилище, архив и т. п. Оборудуются два, почти не зависящих друг от друга, элемента осветительной установки: освещение боковых проходов и освещение стеллажей. Каждый элемент рассчитывается самостоятельно. Если освещение стеллажей рассчитывается комбинированным методом (см. далее § 4-4), то уместно учесть составляющую яркости потолка, создаваемую светильниками боковых проходов.

ж. Освещаются проходы между оборудованием. В каждом проходе учитывается один ряд светильников, так как два другие затенены. Создаваемая ими отраженная составляющая освещенности может быть учтена при комбинированном методе расчета.

Аварийное освещение и местное освещение. Расчет как аварийного, так и местного освещения почти не отличается от расчета локализованного освещения.

Аварийное освещение часто выполняется с целью обеспечить возможность временного продолжения работы на определенных рабочих

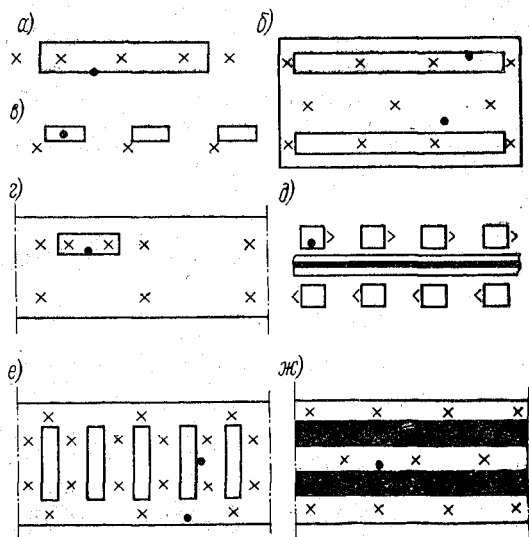


Рис. 4-5. Примеры локализованного освещения

местах и в этом случае является типичным локализованным освещением. В других случаях аварийное освещение выполняется по линиям проходов и контрольные точки выбирают в пределах площади последних. Не имеет смысла углублять вопрос: по оси или по краю прохода следует выбирать эти точки. Чаще всего в практике аварийное эвакуационное освещение обеспечивает значительно больший минимум освещенности, чем нормированные для него 0,3—0,5 лк, если же оно проектируется «в обрез», то расстояния между светильниками оказываются настолько большими, что ширина расчетной полосы не играет заметной роли. Приводим пример расчета аварийного освещения.

Пример. Требуется определить, на каком расстоянии друг от друга должны быть установлены светильники «Универсаль» с лампами 200 *вт*, чтобы при расчетной высоте 4 м обеспечить в проходе освещенность не менее 0,5 лк при $k = 1,5$. Примем $\mu = 1$. Светильники, очевидно, разместятся в один ряд, и контрольная точка должна быть выбрана посередине между светильниками.

Из (4-3) получаем

$$\sum e = 2e = \frac{1000Ek}{F} = 0,28; e = 0,14 \text{ лк.}$$

По кривым пространственных изолюкс можно найти, что при $h = 4$ м условная освещенность имеет такое значение при $d = 13$ м, следовательно, расстояние между светильниками не должно превышать 26 м.

Стационарное местное освещение является, можно сказать, предельным случаем локализованного. Расположение светильника здесь, как правило, задано требованиями к направлению света и конструктивными условиями, и задачей расчета является выбор мощности лампы по условной освещенности наилучшей точки в пределах фактической рабочей зоны, или, пожалуй даже чаще, проверка достаточности освещенности этой точки при всех выбранных параметрах установки. Принципиальной особенностью расчета местного освещения является необходимость пользоваться экспериментально полученными, а не рассчитанными изолюксами. К сожалению, такие кривые у рассчитывающего чаще всего отсутствуют, расчет же по обычным кривым дает ошибку, масштаб которой трудно оценить.

При установке светильников местного света на шарнирных кронштейнах даже незначительное изменение положения светильника может изменить освещенность в несколько раз. Все, что здесь можно рекомендовать, это, основываясь на экспериментальных кривых, оценить возможность получения нормированной освещенности при данной мощности лампы и при вероятных по ходу работы положениях светильника. При этом освещенность должна быть соблюдена, конечно, не в единственной точке на продолжении оси светильника, а в пределах поверхности круговой или иной формы, размер которой определяется характером работы.

Специфические вопросы, связанные с расчетом освещенности на наклонных и вертикальных поверхностях, а также от наклонных светильников, с достаточной полнотой рассмотрены в главе второй и мы не видим необходимости к ним возвращаться.

Естественно, что мы не имеем возможности описать здесь все, подчас мелкие, но полезные предложения, упрощающие технику расчета по точечному методу. В числе подобных предложений упомянем, в частности, очень удобную номограмму Б. А. Красненкова,

позволяющую по найденному значению $\sum e$ выбрать с установленным допуском мощность лампы, обеспечивающую нормированную освещенность.

4.3. (Основные формы метода коэффициента использования)

Пусть в помещении площадью S , m^2 установлено N светильников, световой поток ламп в каждом из которых F , $лм$. При коэффициенте использования η полезный поток $NF\eta$, распределяясь по площади помещения, создаст на расчетной поверхности среднюю освещенность $NF\eta/S$. Если ставится задача обеспечить определенную минимальную освещенность E с коэффициентом запаса k , то надо учесть, что средняя освещенность всегда превышает минимальную. Отношение $z = E_{ср}/E_{мин}$ назовем коэффициентом минимальной освещенности. Таким образом, расчетное значение средней освещенности составит Ekz и, приравнявая его к частному от деления полезного потока на площадь, получаем основную расчетную формулу метода коэффициента использования;

$$F = \frac{EkSz}{N\eta}. \quad (4-7)$$

Подробнее о коэффициенте z см. далее (§ 4-4). (Входящий в формулу (4-7) коэффициент использования определяется по таблицам для соответствующего светильника в функции индекса помещения и коэффициентов отражения поверхностей, а при отсутствии готовых таблиц рассчитывается методами, изложенными в главе третьей.)

Для упрощения определения индекса помещения может быть использована таблица Дубинкина.

Чтобы при определении площади S избежать обмера и перемножения сторон помещения, рекомендуется номограмма, представленная на рис. 4-6. На номограмме нанесено семейство равнобоких гипербол, отвечающих уравнению $S = AB$. Поэтому, совместив полюс номограммы с одним из углов контура помещения на плане (масштабы номограммы и плана должны совпадать), а ее оси — со сторонами помещения, по гиперболе, проходящей через диагонально расположенный угол, определяем площадь.

Определенные трудности представляет оценка значений ρ_n , ρ_c и ρ_p . В ответственных случаях их можно определить для существующих помещений осмотром или измерением на месте, для проектируемых — по эскизам или указаниям художника. В остальных случаях эти коэффициенты приходится оценивать предположительно. Так, для побеленных потолков в чистых административных помещениях принимается $\rho_n = 70\%$, для стен, учитывая наличие обычно более темной нижней панели — 50% , для производственных помещений с гладкими или кессонированными потолками наиболее обычны значения $\rho_n = 50\%$ и $\rho_c = 30\%$ и лишь для наиболее чистых цехов принимается $\rho_n = 70\%$ и $\rho_c = 50\%$. Напротив, в горячих цехах с ферментными покрытиями часто приходится считать $\rho_n = \rho_c = 0$. Коэффициент отражения расчетной поверхности или пола принимается чаще всего 10% и лишь при наличии определенных сведений о том, что полы будут светлыми, — 30% .

Некогда рекомендовалось определять по формуле (4-7) произведение FN и подбором находить «подходящее», фактически же случайное, сочетание этих величин. Так действовать не следует. При точечных излучателях N намечается до расчета и может быть лишь уточнено в процессе последнего, при расположенных в линию люминесцентных светильниках до расчета намечается число рядов, расчетом

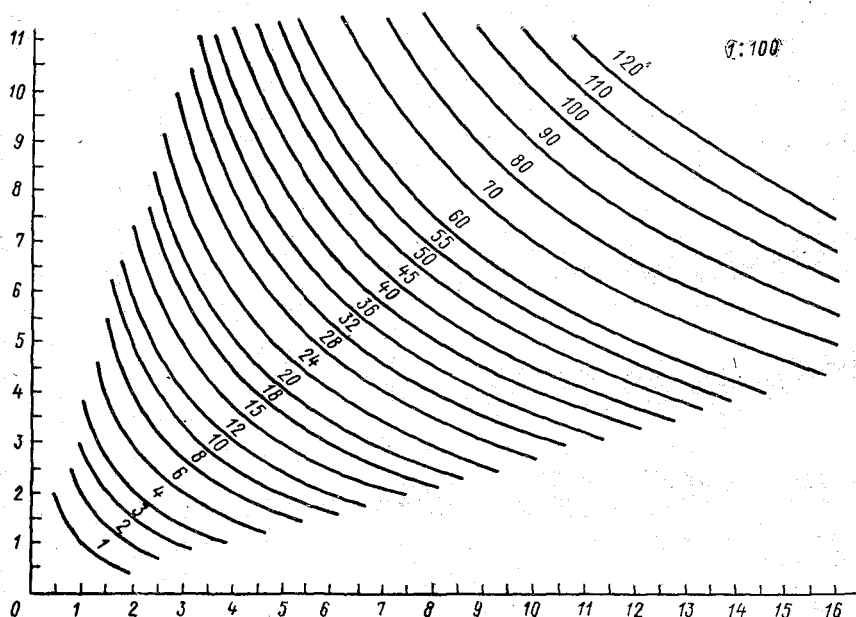


Рис. 4-6. Номограмма для определения площади помещения

же определяется необходимый поток ламп каждого ряда, на основании чего производится компоновка последнего. В этом случае формуле (4-7) удобно придать вид:

$$F_p = \frac{EkSz}{n\eta}, \quad (4-8)$$

где F_p — поток ламп каждого ряда и n — число рядов.

Не исключены случаи, когда равенство (4-7) решается относительно N и используется для определения последнего. Это необходимо тогда, когда мощность лампы однозначно задана типом выбранного светильника или когда заранее известно, что потребуется лампа наибольшей возможной мощности.

(При наиболее частой схеме расчета после определения потребного потока лампы по формуле (4-7) выбирается ближайшая стандартная лампа, поток которой не должен отличаться от рассчитанного более чем на -10% или $+20\%$. При невозможности выбрать лампу с таким допуском производится, как и при расчете по точечному методу, корректировка числа светильников.)

В практике не решен однозначно вопрос об учете затенений. В помещениях с крупногабаритным оборудованием, создающим постоянные затенения, следует, вообще, вести расчет не по методу коэффициента использования, а по точечному или комбинированному методу. Что касается затенений, создаваемых самими людьми, то от их учета явно можно отказаться в помещениях, где не производится определенной зрительной работы (проходы, фойе и т. д.). Мы считаем возможным не учитывать затенений людьми также при расчете общего освещения в системе комбинированного и в случаях, когда положение работающего у оборудования не фиксировано.

В остальных случаях нельзя забывать, что нормы устанавливают фактическую освещенность рабочего места, а не какое-то условное значение, которое можно обнаружить при отсутствии людей в помещении. Установить какой-либо общий «коэффициент затенения» невозможно. В частности, для работ типа конторских и проектных наши измерения показали, что затенение зоны работы корпусом работающего снижает освещенность примерно на 20%.

Рассмотрим простейшие типовые примеры.

Пример. Помещение имеет размеры $A = 18$ м, $B = 6$ м. Полная высота $H = 4,3$ м, уровень рабочей поверхности $h_p = 0,8$ м, расстояние светильников от потолка $h_c = 0,7$ м, следовательно, расчетная высота $h = 2,8$ м. Заданы значения $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 10\%$. Расчет выполним в двух вариантах: при лампах накаливания, когда устанавливается 8 светильников «Шар» и необходимо обеспечить $E = 75$ лк при $k = 1,3$; и при люминесцентных лампах типа ЛБ, которые устанавливаются в двух рядах светильников ШОД и должны создавать $E = 300$ лк при $k = 1,5$.

В обоих случаях одинаков индекс помещения

$$i = \frac{18 \cdot 6}{2,8(18 + 6)} = 1,6 \approx 1,5.$$

Для светильника «Шар» находим по таблицам справочника (см. сноску к стр. 126) $\eta = 0,36$. Примем $z = 1,15$. Тогда

$$F = \frac{75 \cdot 1,3 \cdot 108 \cdot 1,15}{8 \cdot 0,36} = 4200 \text{ лм.}$$

Ближайшая стандартная лампа 300 вт имеет поток, почти не отличающийся от расчетного.

При светильниках ШОД находим в таблицах $\eta = 0,50$ и, считая $z = 1,1$, получаем

$$F_p = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 108 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,50} = 53500 \text{ лм.}$$

Так как поток двух ламп ЛБ-40 составляет 4960 лм, то в каждом ряду необходимо иметь около 11 светильников (53 500/4960). Светильники вмещаются в ряд, так как их суммарная длина менее 18 м.

Полезное, хотя и незначительное, упрощение вычислений при расчете люминесцентного освещения может быть достигнуто следующим преобразованием формулы (4-7):

$$N = M \frac{S}{\eta}, \text{ где } M = \frac{Ekz}{F}. \quad (4-9)$$

Множитель M имеет ограниченное число возможных значений и может быть представлен компактными таблицами.

Остановимся на некоторых усложненных схемах расчета по методу коэффициента использования, основанных на эффекте свода.

Встречаются иногда помещения непрямоугольной формы, например, такие, как показанное на рис. 4-7, а. Из (3-10) следует, что

индекс помещения численно равен отношению площади пола помещения к половине площади стен между уровнем расчетной поверхности и светильниками. Обобщая такое толкование индекса, можно рассчитать его значения для любых помещений. Так, для круглого помещения радиусом r и высотой h индекс $i = r/h$; для помещения, план которого дан на рис. 4-7, а, также нетрудно найти отношение площади пола к произведению полупериметра на высоту и т. д. Однако из последнего примера видна и приближенность решения: при $b \rightarrow 0$ помещение переходит в обычный прямоугольник, верхний же «отросток», имея бесконечно малую площадь, неосновательно уменьшает индекс, увеличивая периметр на $2a$.

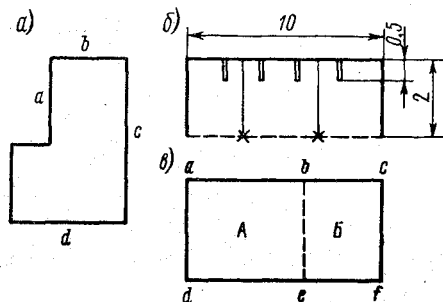


Рис. 4-7. Некоторые усложненные случаи расчета

Как указывалось, основная методика определения коэффициентов использования относится к потолочным светильникам или к случаю, когда подвесные светильники расположены так, что $h_c/h \approx 0,25$. При больших значениях h_c необходимо определять ρ_n с учетом эффекта свода. Последний следует учитывать также при перекрытиях усложненной конфигурации. Поясним методику таких расчетов на примере, в котором сочетаются оба эти обстоятельства.

Поясним методику таких расчетов на примере, в котором сочетаются оба эти обстоятельства.

Пример. На рис. 4-7, б показан фрагмент разреза помещения размерами $10 \times 10, \text{ м}^2$, вдоль потолка которого идут деревянные балки, настолько тонкие, что их толщиной можно пренебречь. Коэффициенты отражения заданы: потолка — 0,7, балок — 0,2, верхней части стен — 0,5.

Основная задача — найти коэффициент отражения, который надо приписать условному потолку на уровне светильников.

Находим сперва средневзвешенный коэффициент отражения всех поверхностей, расположенных выше уровня светильников:

$$\rho_{\text{св}} = \frac{100 \times 0,7 + 40 \times 0,2 + 80 \times 0,5}{100 + 40 + 80} = 0,53,$$

на основании чего по формуле (3-26) рассчитываем

$$\rho_n = \frac{0,53 \cdot 100/220}{1 - 0,53 (1 - 100/220)} = 0,34.$$

После этого коэффициент использования определяется, как обычно для подвесных светильников. В подобных случаях, при желании иметь повышенную точность, допускается при нахождении по таблицам коэффициентов k_{nm} интерполирование между значениями для ближайших ρ , а в крайнем случае даже экстраполирование.

Отметим, что подобная задача решается в два приема: сперва рассматривается полость, заключенная между соседними балками, затем все пространство выше светильников. Сопоставление показывает, что выполнение расчета в один прием, как это произведено выше, дает мало отличающиеся результаты.

Иногда может потребоваться определить освещенность части площади помещения при выключенном освещении остальной части,

например участка A при отсутствии освещения на участке B (рис. 4-7, в). Отсечем участок B воображаемой плоскостью be и будем считать, что отсеченная часть помещения образует своеобразный «свод», потолком которого является стена cf , стенами — стены bc и ef и соответствующие участки площади пола и потолка помещения, а выходным отверстием — плоскость be . Условный коэффициент отражения этой плоскости можем найти, определив средневзвешенный коэффициент отражения поверхностей «свода» и пересчитав его по формуле (3-26). После этого участок A рассматриваем как помещение, ограниченное стенами ab , be , ad , de со средневзвешенным между ними коэффициентом отражения.

Чаще, пожалуй, может встретиться случай, когда на разных участках помещения, скажем тех же A и B , должна быть создана разная освещенность. В этом случае сперва освещение помещения в целом рассчитывается на наименьшее из заданных значений освещенности; после этого участок, требующий повышенной освещенности, рассчитывается на разность между значениями освещенности так, как будто в другом участке освещение выключено, и определяется поток источников, дополнительно необходимых для этого участка.

Хотя описанные и многие другие им подобные приемы расчета представляют определенный интерес, они вносят в результат лишь незначительные, не всегда оправданные, уточнения и в свою очередь основаны на приближениях и допущениях.

4-4. Коэффициенты μ и z и комбинированный метод расчета

Хотя, казалось бы, коэффициенты μ и z весьма различны по своей природе, в действительности они имеют много общего и по своей роли в светотехническом расчете, и по влияющим на них факторам. В известной степени они связаны друг с другом и непосредственно.

При обычных схемах расчета освещения и μ , и z есть корректирующие коэффициенты, немногим большие единицы. Поскольку это так, можно довольствоваться их приближенными значениями, не затрачивая усилий на уточнение вопроса: будет ли в данном случае истинное значение μ или z , например, 1,21 или 1,24. Вычисление точных значений коэффициентов — разрешимая, но чрезвычайно кропотливая задача, для характерных случаев исследованная. В. В. Мешковым и нами. Эти коэффициенты зависят буквально от всех параметров осветительной установки и таблицы их уточненных значений были бы более громоздки, чем таблицы коэффициентов использования. Необходимости в составлении таких таблиц мы не видим.

Коэффициент $z = E_{\text{ср}}/E_{\text{мин}}$ применяется только при расчете общего равномерного освещения на минимальную освещенность. При расчете на среднюю освещенность он не вводится. Локализованное освещение по методу коэффициента использования не рассчитывается и понятие z в этом случае не имеет смысла.

Из факторов, влияющих на величину z при данном типе светильника, особую роль играет $\lambda = L/h$. Мы уже говорили о том, что

освещенность может быть неравномерно распределена как в пределах одного поля, так и между различными полями. Первый вид неравномерности, «внутрипольная неравномерность», достаточно однозначно связан с λ : при малых λ освещение площади поля вполне или почти вполне равномерно, с увеличением λ образуется и становится все более резко выраженным минимум освещенности, находящийся чаще всего в центре поля. Это обуславливает резкое увеличение z при возрастании λ сверх определенного предела. Что касается «периферийной неравномерности», то она возрастает при уменьшении λ , причем в помещениях неограниченно большой площади при $\lambda \rightarrow 0$ коэффициент $z \rightarrow 4$. В результате при определенных для каждого случая λ кривая $z = f(\lambda)$ имеет достаточно четко выраженный минимум, который, кстати, может быть одним из критериев для выбора оптимального расположения светильников.

Мы считаем, что при расчете должны, как правило, учитываться значения z , определенные исходя из внутрипольной неравномерности при рекомендуемых значениях λ . Это оправдывается тем, что по экономическим соображениям следует избегать заниженных λ , когда особенно сказывается периферийная неравномерность. В частности, в производственных помещениях, если расчетная мощность ламп превышает технически возможный максимум, предпочтительно не уменьшение размеров поля, а установка в каждой из его вершин блока из нескольких светильников. Далее, в небольших помещениях периферийная неравномерность вообще мало сказывается, в больших же помещениях и при малых λ едва ли можно рекомендовать увеличивать значения z , создавая тем на большей части площади сверхнормативную освещенность, а предпочтительно принятие мер для повышения освещенности периферийных участков площади.

До сих пор мы в наших работах рекомендовали при освещении лампами накаливания и лампами типа ДРЛ и при обычных значениях λ принимать значение z порядка 1,15, а при освещении рядами люминесцентных светильников — 1,1. По-видимому, эти значения скорее занижены, чем завышены.

Еще раз подчеркиваем, что z быстро возрастает с увеличением λ . Если в установке осуществляется заведомо повышенная неравномерность освещения (например, часто при освещении проходных помещений), то расчет, основанный на обычных значениях z , даст совершенно неверные результаты. В подобных случаях следует прибегать к точечному или комбинированному методам.

Влияние на z остальных факторов значительно меньше, чем влияние λ . В частности, z уменьшается с увеличением коэффициентов отражения поверхностей помещения.

В связи с рассмотрением вопроса о коэффициенте z автор считает необходимым высказать мнение, что нормирование при общем равномерном освещении минимальной, а не средней освещенности является устаревшей традицией, восходящей к 1928 году, когда создавались первые нормы гигиенического минимума. Понятно, что если, например, длительное чтение мы считаем вредным для зрения при освещенности ниже 50 лк, то эта освещенность устанавливается как минимальная во времени и на плоскости. Но мы уже ставим задачу перехода в перспективе к оптимальной освещенности и если для какого-либо случая она будет определена, например,

в 1500 лк, то лишено всякого смысла требовать, чтобы во всех точках плоскости освещенность была «не ниже» 1500 лк. Уже сегодня наши нормы значительно превышают гигиенический минимум; с точки зрения как производительности труда в помещении, так и светового комфорта, превалирующее значение уже имеет средняя, а не минимальная освещенность (конечно, при регламентированной неравномерности), слова же нормативных документов «не менее» следовало бы понимать как относящиеся к уровню освещенности для помещения в целом. Само собой разумеется, что затронутый вопрос является дискуссионным и не решается мнением отдельных лиц.

Коэффициент дополнительной освещенности μ , впервые введенный Р. А. Сапожниковым, учитывает освещенность, создаваемую удаленными светильниками, не учтенными при определении $\sum e$ или Σe , а также светом, отраженным поверхностями помещения, и по сути дела может рассматриваться как произведение двух составляющих: μ_y и μ_o .

Значение μ_y , не говоря уже об его зависимости от формы кривой силы света светильников и от λ , всецело в руках рассчитывающего. Как видно уже из табл. 4-1, нельзя в общем виде дать указания об учете при нахождении $\sum e$ только «ближайших», «вторых» или «третьих» светильников, а тем самым нельзя фиксировать и значения μ_y . При достаточно тщательном определении $\sum e$, на что только и надо ориентироваться, значение μ_y , как правило, не превышает 1,05, часто же может быть принято равным 1,0. Надо к тому же учесть, что чем дальше светильники от контрольной точки, тем больше вероятность затенения их теми или иными предметами.

Величина μ_o зависит в наибольшей степени от светораспределения излучателей и коэффициентов отражения поверхностей помещения. При светильниках прямого света и относительно хорошо отражающих стенах для точек вблизи этих стен значения μ_o существенно повышаются, обеспечивая естественную компенсацию периферийной неравномерности.

Законы распределения отраженной составляющей освещенности изучены очень мало и трудно поддаются анализу. Часто исходят из того, что эта составляющая распределена равномерно, хотя ясно, что при неограниченном увеличении λ , а также во многих случаях локализованного освещения дело обстоит иначе.

К определению μ_o можно подойти следующим образом. Обозначим через F полный поток ламп в помещении, через S — площадь последнего и пусть η_p — коэффициент использования светового потока ламп при всех данных условиях, η_a — коэффициент использования при тех же условиях, но для помещения с неотражающими поверхностями, r_n — отношение прямой освещенности данной точки к среднему значению прямой освещенности и r_o — такое же отношение для отраженной составляющей освещенности.

Тогда прямая освещенность в любой точке

$$E_n = \frac{F \eta_p r_n}{S},$$

а отраженная составляющая

$$E_o = \frac{F (\eta_p - \eta_a) r_o}{S}.$$

Отсюда

$$\mu_o = \frac{E_n + E_o}{E_n} = 1 + \frac{r_o}{r_n} \left(\frac{\eta_p}{\eta_n} - 1 \right). \quad (4-10)$$

В частных случаях для общего равномерного освещения (конечно, никогда в действительности не являющегося строго равномерным) могут быть получены следующие результаты.

а. Расчет ведется по наихудшей точке. Отраженная составляющая распределена равномерно, т. е. $r_o = 1$.

В этом случае можно считать $1/r_n \approx z$, хотя фактически z несколько меньше, чем $1/r_n$, так как отраженная составляющая повышает равномерность освещения. С учетом сделанного допущения

$$\mu_o = 1 + z \left(\frac{\eta_p}{\eta_n} - 1 \right). \quad (4-11)$$

б. Определяется освещенность точек максимума. Как и ранее, $r_o = 1$.

Если допустить, что $E_{\max}/E_{\text{ср}} = E_{\text{ср}}/E_{\min} = z$, то $r_n \approx z$, и

$$\mu_o = 1 + \frac{1}{z} \left(\frac{\eta_p}{\eta_n} - 1 \right). \quad (4-12)$$

в. Определяется освещенность любой точки. Прямая и отраженная составляющая освещенности распределены с одинаковой неравномерностью. В этом случае $r_n = r_o$ и

$$\mu_o = \frac{\eta_p}{\eta_n}. \quad (4-13)$$

Поскольку мы пока рассматриваем общее равномерное освещение, рассчитываемое по точечному методу (а значит, выполняемое светильниками без сколько-нибудь значительного излучения в верхнюю полусферу), то значения z и η_p/η_n сравнительно невелики и вместо формулы (4-11) можно пользоваться формулой (4-13).

В табл. 4-6 приведены отношения η_p/η_n для характерных случаев. Для таких светильников, как «Универсаль» или «Глубокоизлучатель», они лежат в пределах от 1,0 до 1,3, повышаясь лишь при очень малых индексах и высоких ρ_n и ρ_c .

Значения η_p/η_n для характерных случаев

Таблица 4-6

Тип светильника	«Универсаль»		Гс		ПУ без отражателя		«Люцетта»		«Плафон»	
	ρ_n , %	ρ_c , %	30	70	30	70	30	70	30	70
	30	70	30	70	30	70	50	70	50	70
	10	50	10	50	10	50	30	50	30	50
i	η_p/η_n									
0,6	1,09	1,52	1,03	1,27	1,25	2,75	1,46	1,93	1,63	2,25
1,0	1,06	1,32	1,03	1,19	1,33	2,33	1,38	1,69	1,40	1,81
2,0	1,04	1,22	1,01	1,12	1,38	2,17	1,41	1,65	1,39	1,73
3,0	1,03	1,18	1,02	1,11	1,36	2,16	1,36	1,59	1,37	1,63
5,0	1,03	1,18	1,02	1,10	1,33	2,00	1,35	1,58	1,36	1,57

В итоге всего мы рекомендуем для рассматриваемых случаев принимать общее значение μ в пределах от 1,0 до 1,3. Этот интервал может показаться существенно снижающим точность расчета, но если рассчитывающий будет каждый раз конкретизировать значение μ в этом интервале с учетом специфики задания, то трудно ожидать ошибки больше 5%. Так, в горячих цехах металлургической промышленности, освещаемых светильниками глубокого или концентрированного светораспределения, наиболее реальное значение $\mu = 1,0$, в цехах типа механических при тщательном определении $\sum e$ можно считать $\mu = 1,1 \div 1,15$ и только при заведомо хорошо отражающих потолках и стенах можно повышать μ до 1,2—1,25.

В отношении локализованного освещения светильниками, не излучающими в верхней полусфере, не приводя дополнительных рассуждений, отметим, что незначительность величины μ позволяет выбирать ее на тех же основаниях, которые указаны выше.

Наличие у светильников даже небольшого излучения в верхней полусфере вызывает, как видно из табл. 4-6, резкое увеличение η_p/η_q . В этом случае для расчета общего равномерного освещения при обычных значениях λ прибегать к точечному методу не следует, в остальных же случаях использовать комбинированный метод, т. е. определять отраженную составляющую расчетом по методу коэффициента использования или на основе индивидуально определенного значения μ . Приводим характерные, но приближенные схемы расчета.

1. Светильники располагаются в один ряд на равных расстояниях друг от друга, или по вершинам равновеликих полей, т. е. по существу устраивается общее равномерное освещение, но принимаются существенно увеличенные значения λ , делающие величину z неопределимой. Как уже отмечено, подобные случаи встречаются, например, при освещении проходов, если же будет осуществляться переход к экономически оптимальному расположению светильников, то они могут стать обычными при относительно низких освещенностях.

С некоторым приближением можно принять, что в этих случаях отраженная составляющая освещенности распределена равномерно. Формула (4-11) не может быть использована для определения μ , так как η_p/η_q относительно велико, а z имеет увеличенное, но неизвестное значение. Очевидно, отраженная составляющая должна быть рассчитана по методу коэффициента использования в его обычном виде; полная освещенность наихудшей точки определится по формуле

$$E = \frac{F}{k} \left(\frac{\sum e}{1000} + \frac{\eta_p - \eta_q}{S'} \right), \quad (4-14)$$

где F — поток лампы в каждом светильнике, а S' — площадь помещения, приходящаяся на один светильник. Для определения η_p и η_q необходимо найти i и учесть значения ρ_n , ρ_c и ρ_p . Уравнение (4-14) может быть решено относительно F и использовано для выбора мощности лампы.

Так как в действительности трудно в рассматриваемых случаях ожидать полной равномерности отраженной составляющей, то при расчете по описанной схеме величина последней в наихудших точках несколько переоценивается, т. е. потребная величина F незначительно занижается.

По вполне аналогичной схеме может быть рассчитано локализованное освещение в случаях, когда можно ожидать близкое к равномерному распределение отраженной составляющей освещенности. Подобные случаи в практике встречаются, например, при наличии в помещении нескольких рядов рабочих столов или рабочих мест у конвейеров. Этот случай, однако, специфичен в том отношении, что точки, в которых обеспечивается освещенность, по отношению ко всей площади помещения скорее являются точками максимума, чем минимума (хотя для данной рабочей поверхности и должны быть наихудшими). Соответственно этому при расчете по формуле (4-14) отраженная составляющая несколько недооценивается.

2. Наиболее, пожалуй, типичны случаи такого устройства локализованного освещения, когда тот или иной участок помещения резко выделяется по уровню освещенности, если же таких участков имеется несколько, то расстояние между ними исключает выравнивание по всей площади отраженной освещенности от светильников, предназначенных для этих участков.

Как вариант, в этом случае можно исходить из предположения, что прямая и отраженная составляющая освещенности распределены по площади одинаково. Принятие этого допущения позволяет сильно упростить расчет и, ведя его по точечному методу, определять μ , хотя и в индивидуальном порядке, но по простой формуле (4-13). Так как заведомо известно, что отраженная составляющая распределена с большей равномерностью, чем прямая, то при сделанном допущении ее значение будет недооцениваться в точках наименьшей освещенности и переоцениваться в точках максимума. Последнее особенно неприятно в данном случае, когда ставится именно задача обеспечить освещенность там, где нужны ее повышенные значения.

Возможно и другое решение задачи, а именно определение μ по формуле (4-10), но в этом случае оценка возможной величины r_o/r_n всецело предоставляется интуиции рассчитывающего.

3. Насколько мы знаем, до сих пор не обращалось внимания на специфические трудности расчета освещения от настенных светильников. При светильниках, типичных для производственных помещений, расчет может вестись по схеме, рассмотренной далее в § 4-6, здесь же мы остановимся на случае, когда вдоль стен производственного помещения равномерно размещены светильники прямого, преимущественно прямого или рассеянного света, причем оси их вертикальны. Расчет по обычным таблицам коэффициентов использования здесь связан с погрешностью, которую пока трудно оценить, так как в основе этих таблиц лежат значения первичных потоков, рассчитанные для совершенно иного принципа размещения светильников. По точечному методу легко может быть рассчитана прямая составляющая освещенности, но специфика размещения светильни-

ков делает здесь особо значимой отраженную составляющую, даже при светильниках прямого света.

Впредь до более полного исследования вопроса для определения отраженной составляющей предлагается следующая схема.

На уровне установки светильников воображается условный потолок, коэффициент отражения которого определяется с учетом эффекта свода. Принимается, что 50% потока светильника в нижней полусфере первично падает на стены, а весь поток верхней полусферы — на условный потолок. Индекс определяется по высоте условного потолка над расчетной поверхностью. После этого отраженный поток, установившийся на расчетной поверхности, определяется по формуле

$$F_p = F'_{с.к.р} + F'_{п.к.р}, \quad (4-15)$$

где значение и способы определения всех коэффициентов рассмотрены ранее. Составляющая прямого света не включена, так как ее часть, создаваемая первичным потоком, учитывается по точечному методу, превышением же коэффициента $k_{р.р}$ над единицей можно пренебречь.

4. Особо выделяется случай, когда требуется учесть отраженную составляющую при освещении негоризонтальных поверхностей, или когда из-за затенений в прямом освещении расчетной поверхности участвуют не все светильники, создающие светность стен и потолка.

В подобных случаях прямая составляющая освещенности рассчитывается обычным путем, затем определяется светность поверхностей помещения и создаваемая ими освещенность расчетной поверхности находится по графикам Ратнера.

Методику расчета для этого случая поясняем примером, в условии которого сочетается и негоризонтальное расположение поверхности, и участие в ее прямом освещении лишь части светильников.

Пример. В помещении длиной 20 м, вертикальный разрез которого показан на рис. 4-8, установлен щит или стенд, в точке А которого, в вертикальной плоскости, требуется создать освещенность 150 лк при $k = 1,5$. Помещение освещается двумя рядами светильников ШОД, которые доходят до торцевых стен. Стенд до этих стен не доходит, что позволяет не считаться с продольной неравномерностью. Коэффициенты отражения составляют: потолка — 70%, стен — 50% и пола — 10%. Примем, первоначально, $F' = 1000$ лм/м.

Прямую освещенность рассчитываем от одного ряда светильников. Проведя через точку А горизонтальную плоскость, имеем: $p' = 1,5/1,75 = 0,86$, $L' = 10/1,75 = 5,7$ и по графику линейных изолюкс для светильника ШОД находим $\varepsilon = 47$ лк, $2\varepsilon = 94$ лк. Из формулы (4-5) следует

$$E = \frac{F' \sum \varepsilon}{1000kh} = \frac{1000 \cdot 94}{1000 \cdot 1,5 \cdot 1,75} = 36 \text{ лк.}$$

Переход к освещенности вертикальной поверхности осуществляем умножением на коэффициент $\psi = p/h = 0,86$, и получаем прямую освещенность 31 лк.

Находим индекс помещения по высоте светильников над полом

$$i = \frac{120}{3,25(20 + 6)} = 1,42 \approx 1,5.$$

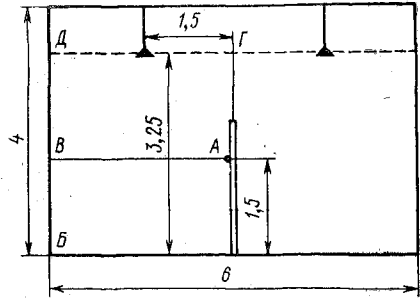


Рис. 4-8. К примеру расчета

При таком значении i по таблицам находим $\eta_c = 0,24$. Так как светильник по данным каталога излучает в нижнюю полусферу 0,4 и в верхнюю 0,45 потока лампы, то получаем $F'_c = 0,4 - 0,24 = 0,16$ и $F'_n = 0,45$.

Заменяем верхнюю часть помещения условным потолком Д—Г. При $S_{\text{п}} = 120$ и $S_{\text{св}} = 120 + 0,75 \cdot 52 = 159$ по формуле (3-26) находим для плоскости Д—Г $\rho_{\text{п}} = 0,64$. По табл. 3-9 и 3-10, интерполируя между данными для $\rho_{\text{п}} = 70\%$ и $\rho_{\text{п}} = 50\%$, находим: $k_{\text{с.с}} = 1,30$, $k_{\text{п.с}} = 0,44$, $k_{\text{с.п}} = 0,23$, $k_{\text{п.п}} = 1,09$. Отражением пола пренебрегаем. При принятом значении F' и $L = 20$ м полный поток ламп составляет 40 000 лм. Определяем установившиеся потоки на стенах и потолке и светности этих поверхностей:

$$F_{\text{п}} = 40\,000 \cdot 0,45 \cdot 1,09 + 40\,000 \cdot 0,16 \cdot 0,23 = 21\,000 \text{ лм};$$

$$R_{\text{п}} = \frac{21000}{120} \cdot 0,64 = 112 \text{ лм/м}^2;$$

$$F_{\text{с}} = 40\,000 \cdot 0,16 \cdot 1,3 + 40\,000 \cdot 0,45 \cdot 0,44 = 16\,200 \text{ лм};$$

$$R_{\text{с}} = \frac{16200}{3,25 \cdot 52} \cdot 0,5 = 48 \text{ лм/м}^2.$$

По графикам Ратнера (рис. 2-32, 2-33) определяем коэффициенты освещенности для точки А от полос В—В, В—Д, Д—Г, каждая из которых состоит из двух половин длиной по 10 м: $2q_{\text{ВВ}} = 0,22$, $2q_{\text{ВД}} = 0,24$, $2q_{\text{ДГ}} = 0,25$.

Создаваемая этими поверхностями в точке А освещенность, с учетом коэффициента запаса,

$$E_o = \frac{112 \cdot 0,25 + 48(0,24 + 0,22)}{1,5} = 33 \text{ лк.}$$

Полная освещенность точки А при $F' = 1000$ лм/м будет $31 + 33 = 64$ лк. Пропорциональным пересчетом находим необходимое значение

$$F' = 1000 \frac{150}{64} = 2340 \text{ лм/м.}$$

Общий поток ламп в каждом ряду будет: $20 \cdot 2340 = 46\,800$ лм, для создания которого необходимо установить $46\,800/4960 = 10$ светильников с лампами 2×40 вт.

4-5. Таблицы удельной мощности и некоторые другие упрощенные приемы расчета

Под удельной мощностью w понимается отношение установленной мощности источников света, вт, к освещаемой площади, м².

Энергетическая роль этого показателя очевидна, однако его относительная устойчивость для определенных случаев давно уже повела к его использованию также для грубой оценки правильности выполненного расчета, а затем и к определению без расчета числа и мощности светильников.

Неквалифицированное использование ориентировочных значений w для этой последней цели может повести к грубым ошибкам, и давно уже делались попытки регламентировать обоснованные значения w . Расчет освещения по удельной мощности получил, однако, широкое и «легальное» применение только после того, как автором было подробно изучено влияние на величину w отдельных факторов и опубликованы подробные таблицы удельной мощности.

(Таблицы эти предназначены только для расчета общего равномерного освещения помещений в случаях, когда не требуется учета затенений и только при соответствии параметров установки тем, для которых составлены таблицы, ω . Нарушение этого правила может повести к грубейшим ошибкам.) Известны случаи, когда по удельной мощности пытались рассчитывать освещение гардеробов со шкафчиками или галерей транспортеров, получая абсурдные результаты, так как в обоих случаях освещение должно рассматриваться как локализованное. При попытке рассчитать по удельной мощности освещение высокого помещения, освещаемого светильниками, нормально не используемыми при таких высотах, и при наличии сильных затенений, была допущена ошибка в три раза.

(Вместе с тем при использовании таблиц ω в пределах их прямого назначения ошибка не превышает $\pm 15\%$ (по сравнению с обычным расчетом по коэффициенту использования), и многочисленные проверки и сопоставления почти не выявили случаев, когда расчет по удельной мощности повел бы к выбору иной мощности ламп, чем более точные способы расчета. Напротив, проверка по таблицам удельной мощности не раз помогала выявить ошибки, допущенные при подробном расчете.)

Мы считаем, что и впредь расчет по удельной мощности должен применяться широко, но в разумных пределах, подчеркивая вместе с тем, что в распоряжении рассчитывающего должен оставаться весь арсенал более подробных и точных способов расчета.

Вопрос зависимости удельной мощности от различных параметров имеет значение не только с точки зрения методики составления таблиц ω , но представляет и самодовлеющий интерес (В числе причин, влияющих на удельную мощность, назовем следующие: светотехнические характеристики светильника и пригодность его для ламп той или иной мощности; освещенность, коэффициент запаса и коэффициент z ; площадь помещения, его форма и расчетная высота h ; коэффициенты отражения поверхностей помещения; световая отдача лампы.)

Если все эти факторы определены, то может быть рассчитано «теоретическое» значение удельной мощности, точно соответствующее заданию. Удельная мощность, получаемая в конкретных случаях, обычно отличается от теоретической из-за необходимости иметь в помещении целое число ламп стандартной мощности.

Возможность составления таблиц удельной мощности основана на пренебрежении влиянием части факторов и на укрупненном, ступенчатом учете некоторых других; содержащиеся в них значения ω не равны точно теоретическим, но достаточно близки к ним.

(Рассмотрим зависимость удельной мощности от различных причин и целесообразные формы учета этих причин применительно к установкам с лампами накаливания и лампами ДРЛ, т. е. с источниками света, световая отдача которых монотонно возрастает с увеличением их единичной мощности.)

1. Характеристики светильников. Характеристики светильников влияют на величину удельной мощности не только очень сильно, но

и, можно сказать, разносторонне.) Уже и унификация значений коэффициента использования для светильников с общей типовой кривой силы света встречает определенные трудности и требует отдельного учета k , p , d и соотношения потоков, направляемых в верхнюю и нижнюю полусферы, с точки же зрения удельной мощности имеет значение не только коэффициент использования, но и предельные мощности ламп, с которыми может быть использован данный светильник, а также характеризующее его наивыгоднейшее отношение расстояния между светильниками к высоте подвеса.) Отсюда ясно, что таблицы удельной мощности необходимо составлять отдельно для каждого типа светильника, и лишь при случайном совпадении характеристик возникает возможность иметь общую таблицу для двух или нескольких типов.)

2. Освещенность, коэффициент запаса и коэффициент z . На первый взгляд может показаться, что удельная мощность w должна быть пропорциональна освещенности E , но при рассматриваемых источниках света дело обстоит сложнее. Расстояние между светильниками, а следовательно, и их число, определяется, в основном, правилами наивыгоднейшего расположения, конструкцией перекрытия и т. д., увеличение же освещенности достигается прежде всего увеличением единичной мощности ламп.) При этом их световая отдача возрастает и в результате w увеличивается медленнее, чем E . Так, в характерном случае увеличение E в 10 раз требует увеличения w всего в 6 раз. Когда при возрастании освещенности единичная мощность ламп достигнет технического предела, дальнейший рост E станет возможным только за счет увеличения числа светильников и между w и E установится прямая пропорциональность. Строго говоря (хотя обычно мы этим пренебрегаем), в этих случаях рост w должен был бы даже опережать рост E , так как при сближении светильников возрастает периферийная неравномерность и повышается z (см. § 4-4).

Сложный характер зависимости удельной мощности от освещенности и ограниченное число ступеней последней в нормах предопределяет приведение в таблицах значений удельной мощности если не для всех значений освещенности, содержащихся в нормах, то по крайней мере для тех из них, при которых наиболее вероятно использование светильника данного типа (так, например, одноламповые плафоны мощностью до 60—75 *вт* применяются, как правило, для получения освещенности не более 30 *лк*).

Что касается коэффициентов, на которые освещенность умножается при расчете, то коэффициент запаса k меняется в ограниченных пределах, и для каждого светильника в таблице может быть учтено его наиболее характерное значение с пропорциональным пересчетом в остальных случаях; коэффициент z известен вообще очень приблизительно и в таблицах учитывается его вероятное значение, порядка 1,15.

3. Форма помещения. Этот фактор относится к числу наименее существенных и уже И. С. Дубинкин при составлении таблицы для определения индекса помещения признал возможным его приближенный учет.

Формуле для определения индекса помещения может быть придан следующий вид:

$$i = \frac{\sqrt{S}}{h} \frac{\sqrt{A/B}}{1 + A/B}, \quad (4-16)$$

где A и B — стороны помещения, S его площадь и h — расчетная высота.

Влияние отношения A/B на второй множитель в формуле (4-16) и на удельную мощность иллюстрируется данными табл. 4-7 (для «среднего» светильника).

Основываясь на этом, при составлении таблиц удельной мощности отношение A/B не учитывается, индекс же определяется по усредненной формуле

$$i = 0,48 \frac{\sqrt{S}}{h}. \quad (4-17)$$

Таблица 4-7

Зависимость удельной мощности от A/B

A/B	$\frac{\sqrt{A/B}}{1 + A/B}$	Удельная мощность в процентах, при значении S	
		16 м ²	100 м ²
1	0,5	100	100
1,5	0,49	103	101
2	0,47	107	101,5
2,5	0,45	111	102,5

Составленные таким образом таблицы можно считать пригодными при A/B не более 2,5. При удлиненных помещениях рекомендуется находить по таблицам удельную мощность для условной площади $2B^2$ и распространять полученное значение на всю площадь помещения.

4. Расчетная высота. Зависимость удельной мощности от высоты носит довольно сложный и принципиально интересный характер. Определяющее значение имеет тот факт, что коэффициент использования светового потока быстро возрастает в области малых индексов помещения, затем его рост замедляется и даже почти приостанавливается.

Вообразим помещение некоторой неизменной площади, в котором первоначально светильники подвешены на ничтожно малой высоте. При увеличении высоты, пока индекс сохраняет высокие значения, коэффициент использования почти не будет изменяться, после же некоторого значения высоты он станет все более резко уменьшаться. При неизменности прочих факторов это вызовет соответствующий рост ω . Количественно это может быть показано на следующем частном случае:

Расчетная высота, м	1,5	2,5	3,5	5,0
Удельная мощность в процентах для помещений площадью:				
25 м ²	100	124	163	310
144 м ²	100	108	116	133

Резкое искажение в характер зависимости удельной мощности от высоты вносит изменение световой отдачи ламп. С увеличением высоты расстояние между светильниками, в принципе, должно

увеличиваться, число их — уменьшаться, а единичная мощность и световая отдача — возрастать. Если несколько отвлечься от реальных условий и считать осуществимой сколь угодно малые значения расчетной высоты и единичной мощности ламп, то можно убедиться, что на начальных этапах увеличения высоты удельная мощность всегда убывает.

Это убывание в дальнейшем сменяется возрастанием, когда коэффициент использования начнет быстро уменьшаться или когда единичная мощность ламп достигнет технического предела и перестанет возрастать. Во всяком случае зависимость световой отдачи ламп от их мощности значительно сглаживает изменение удельной мощности с высотой и позволяет принимать значение ω неизменным в пределах определенного диапазона высот.

В таблицах удельной мощности приняты следующие ступени высот: 1,5—2; 2—3; 3—4; 4—6; 6—8; 8—12 м. В пределах каждого интервала расчетное значение ω определяется для его середины.

5. Площадь помещения.) С увеличением площади возрастает индекс помещения, увеличивается коэффициент использования и резко снижается удельная мощность. Соответственно уже рассмотренному характеру зависимости η от i изменение ω происходит быстро в области малых площадей и очень медленно — в области больших. Это позволяет подчеркнуть, что вопреки довольно распространенному мнению расчет по удельной мощности наиболее точен для помещений большой площади.

Поскольку речь идет о задании значений ω в табличной форме, то возникает необходимость, как и в отношении высоты, установить неизменные значения ω в пределах определенных диапазонов площадей. Границы этих диапазонов определены нами на основе анализа большого числа кривых $\omega = f(S)$ таким образом, чтобы при переходе от одной ступени S к следующей значение ω изменялось, примерно, на 20%. Эти границы, в зависимости от высоты помещения, указаны в табл. 4-8.

Таблица 4-8

Ступени высоты и площади, принятые при составлении таблиц удельной мощности

Высота, м	Площадь, м ² (указаны границы ступеней)
1,5—2,0	10—15—25—50—150—300—∞
2,0—3,0	10—15—25—50—150—300—∞
3,0—4,0	10—15—20—30—50—120—300—∞
4,0—6,0	10—17—25—35—50—80—150—400—∞
6,0—8,0	25—35—50—65—90—135—250—500—∞
8,0—12	50—70—100—130—200—300—600—1500—∞

6. Коэффициенты отражения поверхностей помещений. Влияние этих коэффициентов весьма различно в зависимости от светораспределения светильника и величины индекса помещения. Так, для светильника глубокого светораспределения (Гс) при переходе от коэф-

коэффициентов отражения (в порядке: потолок—стены—расчетная плоскость) 50%—30%—10% к 70%—50%—10% коэффициент использования возрастает на 4% при индексе, равном 5, и на 12% при индексе 0,5. Для светильника рассеянного света (Шар) изменения η равны, соответственно, 20% и 90%.

Очевидно, таблицы удельной мощности должны, как правило, составляться для определенных сочетаний $\rho_n - \rho_c - \rho_p$, характерных для помещений, в которых используется светильник данного типа. Лишь для светильников прямого света можно допустить составление таблиц для средних значений коэффициентов отражения (50%—30%—10%) с корректировкой удельной мощности на $\pm 10\%$ при отклонении этих коэффициентов.

7. Световая отдача ламп. Эту важнейшую величину нельзя отнести к числу независимых переменных: каждому сочетанию исходных данных и оптимальному для данных условий размещению светильников соответствует определенный световой поток лампы и, следовательно, ее мощность и световая отдача. При конкретных расчетах выбор стандартной лампы связан с отклонением от расчетного потока, что вызывает случайные вариации ω . При составлении таблиц этого можно избежать, выбирая мощность ламп по расчетному потоку с помощью кривой зависимости потока лампы от ее мощности, построенной по данным стандартов, но условно считая существующими лампы всех промежуточных мощностей. Именно такой выбор мощности позволяет считать, что таблицы содержат теоретические значения ω .

Как скоро, с увеличением освещенности или высоты, мощность ламп достигает технического предела для данного типа светильника, в дальнейшем учитывается световая отдача наибольшей возможной лампы.

На практике для каждого светильника существует и нижний предел мощности лампы, определяемый рядом соображений. Если расчет дает мощность, меньшую этого нижнего предела, то применение светильника при данной высоте и освещенности следует считать нецелесообразным и значений ω в подобных случаях лучше не приводить.

На основе всего изложенного рекомендуется таблицы удельной мощности составлять в следующем порядке (рекомендации несколько уточнены по сравнению с приводившимися нами ранее).

Выбирают «паспортные данные» таблицы: тип светильника, коэффициенты запаса и z , коэффициенты отражения поверхностей помещения, значения освещенности, для которых должен быть произведен расчет, характерные для данного светильника диапазоны высот, расчетное значение $\lambda = L/h$. Дальнейшие операции описываются применительно к образцу расчета, приведенному в табл. 4-9.

Задаемся значениями индекса помещения, указанными в таблице, и выписываем для них значения коэффициента использования для данных условий. Заносим в таблицу значения площади помещения S , соответствующей данному индексу и высоте h , учитывая, что из (4-17) следует

$$S = 4,35i^2h^2. \quad (4-18)$$

Находим число светильников N . Так как расчетная площадь поля $L^2 = \lambda^2h^2$, то приближенно $N = S/(\lambda^2h^2)$. Надо, однако, учесть, что крайние ряды светильников

**Фрагмент расчетов для составления таблицы
удельной мощности**

(исходные данные: светильник «Универсаль» с затенителем,
 $\rho_{\text{п}} = 50\%$, $\rho_{\text{с}} = 30\%$, $\rho_{\text{р}} = 10\%$, $\lambda = 1,5$, $k = 1,3$, $z = 1,15$.
 Диапазон высоты 3—4 м, (среднее 3,5 м)

Общие данные					30 лк		
i	η	S	N	$S/N\eta$	F	P	ω
0,5	0,15	13,4	1	89	4000	280	21
0,7	0,28	26,3	округлено до 2	47	2120	165	12,6
0,9	0,33	43,3	2,42	54	2440	185	10,4
1,1	0,36	65	3,4	53	2400	182	9,5
1,5	0,40	120	5,76	52	2350	179	8,6
2,0	0,44	213	9,6	50,5	2300	177	8,0
3,0	0,49	480	20	49	2200	170	7,1
4,0	0,52	860	35	47,5	2140	167	6,8

приближены к стенам и отстоят от них на расстояние $a \approx L/3$. Исходя из этого, для определения N можно получить формулу

$$N = \left(\frac{\sqrt{S}}{L} + 0,3 \right)^2 = \left(2,1 \frac{i}{\lambda} + 0,3 \right)^2. \quad (4-19)$$

Если при определении по этой формуле N получается меньшим единицы, то принимается $N = 1$, значения между 1 и 2 округляются до двух; большие значения N не округляются, т. е. могут учитываться и дробными. После N в таблицу помещена вспомогательная дробь $S/N\eta$. Все пока рассмотренные графы не связаны с величиной освещенности и проставленные в них значения используются при всех освещенностях. Дальнейшие расчеты ведутся для каждой освещенности отдельно.

Потребный поток лампы, как то следует из основной формулы метода коэффициента использования 4-7, определяется умножением расчетной освещенности $E_k z$ на дробь $S/N\eta$. Чтобы по этому потоку найти точную мощность лампы, строится, как уже указывалось, кривая, дающая номинальные потоки стандартных ламп в зависимости от их мощности. Зная число и мощность светильников, легко определяем удельную мощность ω . Если потребный поток лампы превышает технически возможный предел, то, обозначая через C световую отдачу лампы (в данном случае — максимально возможной мощности), можем преобразовать расчетную формулу метода коэффициента использования следующим образом:

$$F = \frac{E_k S z}{N \eta} = CP; \quad \omega = \frac{PN}{S} = \frac{E_k z}{C \eta}. \quad (4-20)$$

По этой последней формуле и вычисляется в данном случае ω , однако убедиться в том, что должна быть учтена наибольшая лампа, можно, только рассчитав величину F .

По найденным значениям ω и S строится кривая $\omega = f(S)$ (для S необходима логарифмическая шкала) и находятся значения ω для середин интервалов площади, которые и включаются в окончательную таблицу.

Фрагмент законченной таблицы для светильника «Люцетта» приведен в табл. 4-10. Используем эту таблицу для примерного расчета.

Дано помещение размерами 24×6 , м². Коэффициенты отражения поверхностей 70%—50%—10%. Расчетная высота 3,2 м. Для получения освещенности 30 лк при $k = 1,3$ намечено установить 14 светильников. Площадь помещения 144 м² но, как было указано, в столь удлиненных помещениях правильнее определять

Фрагмент таблицы удельной мощности ω
 для светильника с лампами накаливания
 («Люцетта», при $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 10\%$)

h, м	S, м ²	Освещенность, лк					
		5	10	20	30	50	75
2—3	10—15	2,8	4,8	8,3	11	17	24
	15—25	2,2	3,9	6,8	9,2	14	20
	25—50	1,9	3,3	5,7	7,8	12	17,3
	50—150	1,6	2,8	4,8	6,5	10,3	14,7
	150—300	1,4	2,5	4,3	5,6	9,2	12,9
	>300	1,3	2,3	3,9	5,2	8,2	12,3
3—4	10—15	3,3	5,6	9,6	13,7	21	31
	15—20	2,8	5,0	8,4	12	17,7	27
	20—30	2,4	4,3	7,3	10,3	15,3	23
	30—50	2,0	3,5	5,8	8,3	12,8	19
	50—120	1,7	2,8	4,8	6,9	10,2	15,5
	120—300	1,4	2,5	4,1	5,9	8,6	13
	>300	1,3	2,2	3,7	5,3	7,8	12

удельную мощность по площади $2B^2$, распространяя ее затем на всю площадь. В данном случае $2B^2 = 72 \text{ м}^2$ и по табл. 4-10 $\omega = 6,9 \text{ вт/м}^2$. Расчетная мощность одной лампы должна быть $6,9 \cdot 144/14 = 71 \text{ вт}$. Выбираем лампу 75 вт.

Расчет по удельной мощности люминесцентного освещения имеет три существенные особенности:

а) световая отдача ламп не возрастает монотонно с увеличением единичной мощности;

б) лампы одной и той же мощности имеют различные световые потоки в зависимости от спектрального типа;

в) выбор единичной мощности ламп лишь косвенно и неоднозначно связан с величиной освещенности и расчетной высотой.

Это вынуждает составлять таблицы удельной мощности отдельно не только для каждого типа светильника, но и для каждого типоразмера ламп (или же для нескольких типоразмеров ламп с близкой по величине светоотдачей, усредняя последнюю). В результате значение удельной мощности оказывается прямо пропорциональным освещенности и хотя до сих пор мы оформляли таблицы удельной мощности для расчета люминесцентного освещения так же, как и таблицы для других источников света, в дальнейшем мы предполагаем давать значения ω только для освещенности 100 лк, считая пропорциональный пересчет на другие освещенности достаточно легким. Вместе с тем такое упрощение таблиц увеличит их «емкость» и позволит полнее учесть некоторые другие факторы.

Следствием отмеченных особенностей является также тот факт, что при люминесцентном освещении уменьшение коэффициента использования при увеличении расчетной высоты не компенсируется

повышением световой отдачи ламп и, следовательно, зависимость удельной мощности от высоты выражена более резко. В дальнейшем возможно рассмотреть вопрос о принятии в таблицах удельной мощности для люминесцентных светильников более узких ступеней высоты, чем в остальных случаях.

Так как световая отдача ламп входит в число паспортных данных таблиц удельной мощности, то составление последних значительно упрощается: в табл. 4-9 можно заполнять лишь три первые графы, после чего ω находить непосредственно по формуле (4-20) и строить график $\omega = f(S)$.

Отметим практически важную возможность использования формулы, вытекающей из (4-20), для «прикидочных» расчетов, отнюдь не заменяющих выполнение в дальнейшем обычного расчета, но дающих возможность оценить, во что примерно выльется данный вариант освещения. Так, нередко возникает необходимость выяснить, поместится ли потребное число «ниток» люминесцентных ламп в карнизе заданного размера, может ли быть обеспечена равномерная яркость светового потолка при данной освещенности и высоте технической полости и т. д.

Будем основываться на том, что нам задана расчетная освещенность E_k (о коэффициенте z в данном случае можно не беспокоиться), что нам известна световая отдача ламп C , которые намечены к применению, и что мы можем на основании опыта или с помощью справочников хотя бы очень грубо оценить величину к. п. д. осветительного устройства η_c и коэффициент использования светового потока этого устройства $\eta_{п.}$. Тогда ожидаемую величину удельной мощности можно оценить по очевидной формуле

$$\omega = \frac{E_k}{C \eta_c \eta_{п.}} \quad (4-21)$$

Предлагались и применялись различные упрощенные приемы расчета, основанные на методе коэффициента использования, иногда имеющие общий характер, иногда предназначенные для решения частных задач. Характерными для решения частных задач (и в некоторых случаях, безусловно, полезными) являются графики Гурова и Прохорова для определения числа люминесцентных светильников данного типа и мощности.

Случаи, когда большая группа помещений освещается однотипными люминесцентными светильниками, неприятны, но в известной мере неизбежны, а если, кроме того, в этих помещениях расчетные значения высоты и освещенности одинаковы или могут иметь ограниченное число сочетаний, то для непосредственного определения числа потребных светильников могут быть предложены очень простые графики (рис. 4-9).

Графики строят на основе расчета по методу коэффициента использования (но не по удельной мощности, чтобы не накапливались ошибки), причем, так как форма помещения не учитывается, индекс нужно определять по формуле (4-17). Кривые дают необходимое число светильников в функции площади помещения; каждая кривая «при-

вязана» к следующим данным: тип светильника, тип и мощность лампы, расчетная высота, освещенность и коэффициент запаса, коэффициенты отражения поверхностей помещения. Ограниченное число возможных сочетаний этих данных предопределяет целесообразность использования графиков Гурова—Прохорова, которые в этом случае и удобнее, и точнее, чем таблицы удельной мощности

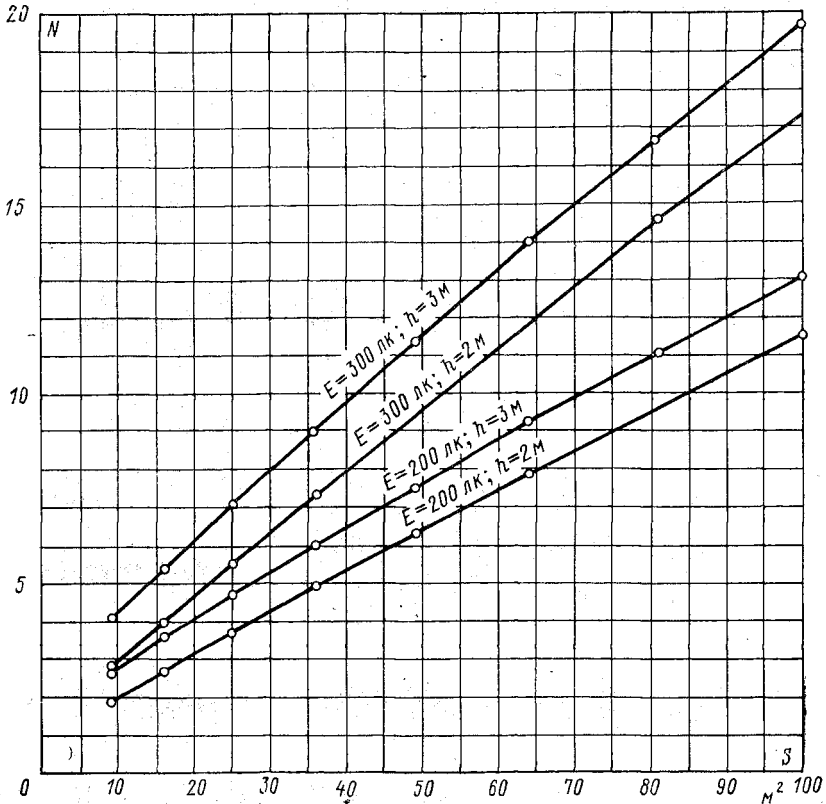


Рис. 4-9. График для определения числа светильников ШОД-2×40 в помещениях. Лампы ЛБ, $k = 1,5$, $\rho_{\text{л}} = 70\%$, $\rho_{\text{с}} = 50\%$, $\rho_{\text{р}} = 10\%$

Интересным дальнейшим шагом в том же направлении можно считать график, описанный Джонсом.

Ранее был уже описан гиперболический график для определения площади помещения путем непосредственного наложения на план последнего (рис. 4-6). Сохраняя принцип построения такого графика и продолжая усредненно учитывать влияние формы помещения, мы можем у каждой гиперболы указать не площадь помещения, а потребное число светильников, исходя из заданных осветительных условий, коэффициентов отражения поверхностей, расчетной высоты, характеристики светильника, типа и мощности лампы. Пример подобного графика показан на рис. 4-10, где он дан в совмещении с планом помещения $4 \times 5 \text{ м}^2$, причем видно, что в этом помещении должно быть установлено 5 светильников.

Дальше идти, что называется, некуда — и притом без нежелательной утраты точности!

Очень важно, однако, подчеркнуть следующее. Всякое упрощение (мы не рассматриваем здесь то, что можно назвать примитивизацией) расчетных графиков и таблиц связано с их более узкой «специализацией» и, соответственно, с увеличением суммарного объема расчетно-вспомогательных материалов. Уже и таблицы удельной мощности в их совокупности занимают намного больший объем, чем

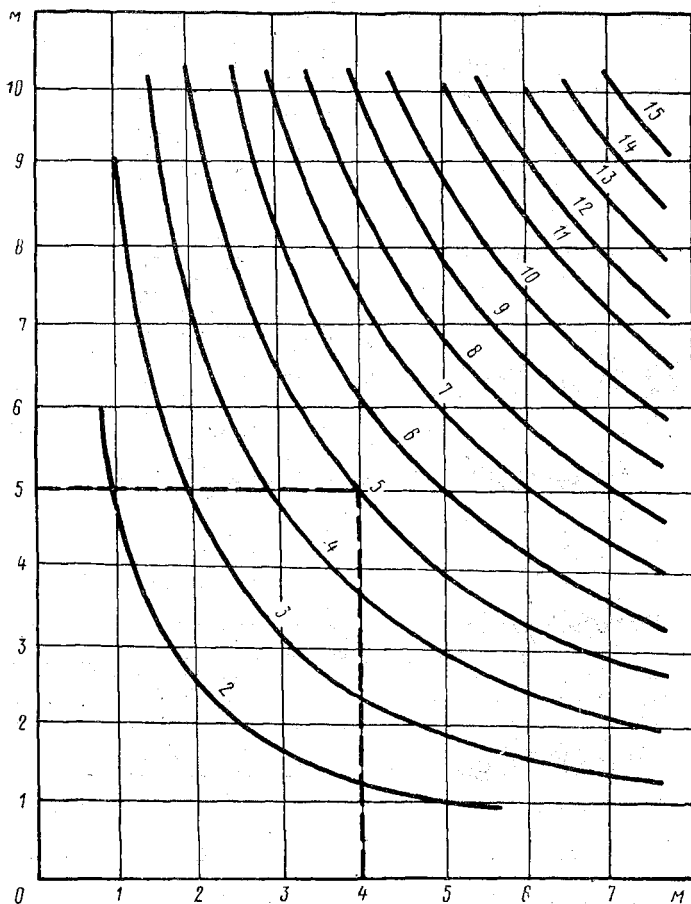


Рис. 4-10. График для определения числа светильников путем наложения на план

таблицы коэффициентов использования. Графики Гурова—Прохорова, будь они построены для всех, по возможности, реальных сочетаний параметров, заняли бы совершенно неконструктивный объем. Наконец гиперболические графики в сопоставлении с графиками Гурова—Прохорова имеют дополнительный привязочный параметр: масштаб, и если даже считать, что употребительны лишь три масштаба планов (1 : 50, 1 : 100, 1 : 200), то это уже утроение числа потребных графиков.

Вот одна из причин, почему разработчикам приемов расчета и составителям справочных материалов приходится учитывать относительную распространенность тех или иных случаев и критически отбирать то наиболее необходимое, что может быть вмещено в заданный объем.

Рассматривая в данной работе вопросы расчета освещения, а не его проектирования, мы можем лишь упомянуть о том, что во всех возможных случаях следует заменять индивидуальные расчеты использованием типовых решений, начиная от типовых мощностей ламп на площадках лестничных клеток и до типовых проектов в целом. Однако и сами типовые решения во всех случаях обосновываются расчетами, которые здесь являются наиболее ответственными и нередко сопровождаются технико-экономическими анализами.

4-6. Архитектурно-художественное освещение

Рассмотренные выше способы определения освещенности поверхностей в отдельных точках и в среднем по площади являются, в общем, достаточными для решения (хотя во многих случаях и приближенного) большого числа светотехнических задач, возникающих при расчете архитектурно-художественного освещения. Число возможных при этом расчетных схем неограниченно и ниже рассматриваются лишь характерные из них.

В установках подобного рода наряду с типовыми светильниками широко используются осветительные устройства индивидуального изготовления. Если их светотехнические характеристики неизвестны и не могут быть получены путем испытания опытных образцов, то можно, конечно, говорить не о расчете как таковом, а о приближенном определении потребной мощности. Очень часто указанные характеристики известны приближенно, и это обстоятельство, вместе с возможностью предъявлять для парадных помещений относительно пониженные требования к точному соблюдению норм освещенности, оправдывает, как мы считаем, и некоторую приближенность ряда схем расчета.

При составлении настоящего параграфа использованы, в частности, ведомственные материалы ГПИ Тяжпромэлектропроект и отчет МЭИ 1960 г. (авторы М. М. Епанешников и Г. И. Жданов).

Световые карнизы. Этот распространенный (особенно в прежнее время) способ освещения оправдывает себя только при соблюдении определенных технических требований к устройству световых карнизов. Кратко напоминаем главные из них, основанные, преимущественно, на наших исследованиях.

Не только светящие, но и конструктивные элементы всех расположенных в карнизе устройств не должны быть видны посетителям при всех возможных их положениях в помещении. Кромка карниза не должна экранировать излучатели от потолка. При соблюдении обоих этих условий карниз должен быть возможно мелким, т. е. если рассматривать его как свод, иметь отношение $S_n/S_{св}$ возможно ближе к единице.

Должна быть обеспечена достаточная равномерность яркости стены над карнизом вдоль последнего (плох тот карниз, в котором можно сосчитать число ламп!). Для этого расстояние a от стены до ламп должно быть возможно больше, расстоя-

Ние же между световыми центрами соседних ламп накаливания не должно превышать (1,5—1,7) *a*; как исключение, при лампах с прозрачной колбой, оси которых расположены вдоль карниза, расстояние может быть увеличено до 1,9 *a*. Люминесцентные лампы должны во всех случаях размещаться в виде сплошных линий. При одной «нитке» ламп *a* должно быть не менее 125—150 мм, при нескольких нитках *a* может быть уменьшено до 75 мм, но лампы соседних ниток должны быть взаимно смещены по длине.

Если требуется обеспечить достаточно равномерную визуальную яркость плоского потолка, то отношение ширины помещения *B* к расстоянию карниза от потолка *h_c* не должно превышать следующих значений:

карнизы, расположенные по одной продольной стене с обычными лампами накаливания или люминесцентными лампами	2,0
с зеркальными лампами накаливания	3,5
карнизы, расположенные по обеим продольным стенам с обычными лампами накаливания или люминесцентными лампами	5,0
с зеркальными лампами накаливания	7,5.

При сферических и цилиндрических сводах визуальная равномерность распределения яркости по своду обеспечивается почти во всех случаях.

Коэффициент использования установки карнизного освещения равен произведению к. п. д. самого карниза на коэффициент использования светового потока карниза, равный $k_{п.р}$, если рассчитывается освещенность пола или параллельной ему поверхности, и $k_{п.с}$, если определяется средняя освещенность стены.

К. п. д. карниза с обычными лампами накаливания или с люминесцентными лампами может быть рассчитан по формуле, вытекающей из формулы свода

$$\eta_k = 1 - \xi \frac{1 - \rho}{1 - \rho(1 - S_B/S_0)}, \quad (4-22)$$

где ξ — доля потока источников, падающая на отражающую поверхность карниза, равная отношению двугранного угла, в пределах которого поток падает на эту поверхность, к 360°; ρ — коэффициент отражения поверхности карниза; S_B/S_0 — отношение площади выходного отверстия карниза к площади его отражающей поверхности.

Расчеты МЭИ показали, что для карнизов с указанными источниками света при изменении их конструкции в вероятных пределах к. п. д. остается близким к 0,60, причем значение ρ с достаточной осторожностью принято равным всего 0,5, учитывая наличие в карнизе проводов и плохоотражающих конструктивных частей.

Значение $k_{п.р}$ определяется с учетом эффекта свода, но заменять этот коэффициент на $k'_{п.р}$ не следует, так как соотношение высот может в данном случае меняться в широких пределах.

Учитывая обычно высокую равномерность освещенности при карнизном освещении и преобладающую роль в парадных помещениях средней освещенности, мы считаем возможным при расчете карнизного освещения не учитывать коэффициент z .

Пример. Зал имеет размеры $A = 24$ м, $B = 12$ м, $H = 8$ м; на высоте 5 м по всем стенам оборудуется карниз. Коэффициенты отражения потолка и стен выше карниза — 70%, остальной поверхности стен — 50%; пола — 10%. Уровень расчетной поверхности 0,8 м.

Вариант 1. Требуется получить освещенность 75 лк при $k = 1,5$, применяя обычные лампы накаливания.

Площадь помещения (она же площадь потолка) 288 м^2 ; площадь стен над карнизом $2 \cdot 3 \cdot (24 + 12) = 216 \text{ м}^2$.

Коэффициент отражения условного потолка на уровне карниза

$$\rho_{\text{п}} = \frac{0,7 \frac{288}{288 + 216}}{1 - 0,7 \left(1 - \frac{288}{288 + 216} \right)} = 0,57.$$

Находим индекс помещения

$$i = \frac{288}{4,2 (24 + 12)} = 1,9.$$

По табл. 3-7, интерполируя между значениями $i = 1,75$ и $i = 2,0$ и $\rho_{\text{п}} = 0,5$ и $\rho_{\text{п}} = 0,7$ (интерполирование по индексу не обязательно), находим

$$k_{\text{п.р}} = 0,37 + (0,53 - 0,37) \frac{7}{20} = 0,42,$$

откуда

$$\eta = 0,6 \cdot 0,42 = 0,25.$$

Полный потребный поток ламп

$$F = \frac{75 \cdot 1,5 \cdot 288}{0,25} = 130\,000 \text{ лм.}$$

Учитывая, что периметр карниза равен 72 м , можем получить набор решений, указанный в табл. 4-11.

Таблица 4-11

Варианты размещения ламп в карнизе

Мощность лампы, <i>вт</i>	Световой поток, <i>лм</i>	Число ламп	Расстояние в осях, <i>мм</i>	Общая мощность, <i>вт</i>
40	370	352	205	14 080
60	620	210	343	12 600
75	840	155	465	11 625
100	1240	105	685	10 500

Более мощные лампы экономичнее и лучше в спектральном отношении, но возможность принятия того или иного решения в первую очередь диктуется заданным размером a , и если, например, $a = 200 \text{ мм}$, то, учитывая рекомендуемое расстояние между лампами не более $(1,5—1,7) a$, необходимо принять лампу 60 вт .

Вариант 2. Требуется получить освещенность 300 лк при $k = 1,8$, применяя люминесцентные лампы типа ЛБ.

До определения коэффициента использования включительно расчет совпадает с первым вариантом. Полный поток по второму варианту

$$F = \frac{300 \cdot 1,8 \cdot 288}{0,25} = 620\,000 \text{ лм.}$$

При лампах ЛБ-80 необходимо $620\,000 : 4320 = 143$ лампы. Если длина лампы с патронами 1540 мм , то полная длина всех ламп 220 м и в карнизе, имеющем периметр 72 м , лампы должны быть размещены в три сплошные «нитки».

При карнизах с зеркальными лампами к. п. д. карниза повышается до $0,8—0,9$, в остальном же расчет ничем не отличается от описанного.

Как уже отмечено, при расчете освещения стен коэффициент $k_{п.р}$ заменяется на $k_{п.с}$. Для расчета освещенности вертикальных поверхностей при карнизном освещении может быть предложена специальная методика, но, так как подобные задачи возникают не часто, можно рекомендовать, рассчитав предварительно светимость стен и потолка, пользоваться графиками Ратнера.

Различные устройства отраженного освещения. Методика расчета, описанная для карнизного освещения, почти полностью пригодна и для других установок отраженного освещения.

Зеркальные лампы для отраженного освещения часто устанавливают не в карнизах, а отдельными группами на стенах или же встраивают в существующие люстры, создающие недостаточную освещенность. В этих случаях расчет выполняется точно так же, как и для карнизов.

Получают известное распространение подвесные светильники отраженного света с галогенными лампами накаливания. Если для них нет готовых значений η , то они также находятся умножением к. п. д. светильника (порядка 0,85) на $k_{п.р}$.

Совершенно аналогично рассчитывается и освещение, создаваемое торшерами. Так как их высота часто значительно меньше высоты помещения, то эффект свода имеет здесь особое значение.

Парадоксальным может показаться проведение условного потолка на очень малой высоте, приводящей к большим значениям индекса. В связи с этим отметим, что из рассмотрения многократных отражений между потолком и полом при $h \rightarrow 0$ следует, что при неограниченном возрастании индекса пределом для $k_{п.р}$ является значение $\rho_{п}/(1 - \rho_{п}\rho_{р})$.

Световые потолки. Подобно световым карнизам, световые потолки производят хорошее впечатление лишь тогда, когда их яркость визуально равномерна и расположенных над ними излучателей нельзя сосчитать. Это обеспечивается соответствующим выбором материала потолка и расстояния между излучателями.

Для потолков рекомендуется молочное стекло (главным образом органическое), синтетические пленочные материалы или экранирующие решетки из хорошо отражающих, а, еще лучше, также и просвечивающих материалов. Кстати, критерием экономичности материалов для решеток является сумма коэффициентов отражения и пропускания их материала, т. е. значение $\rho + \tau$. Рекомендуется защитный угол решеток около 45° .

Матированные стекла для выполнения световых потолков, как правило, непригодны. В виде исключения можно допустить только армированное стекло, а также другие марки прессованного или литого стекла при условии грубой механической матировки обеих поверхностей. В зарубежной практике распространены световые потолки из призматических стекол.

По данным наших исследований для достижения равномерной яркости потолка должны быть соблюдены следующие отношения расстояния между излучателями или их рядами к высоте над остеклением потолка:

зеркальная лампа глубокого светораспределения	0,7—0,9
точечный косинусный излучатель	1,0—1,5
точечный равномерный излучатель	1,2—1,8
линейный косинусный излучатель	1,2—1,8
линейный равномерный излучатель	1,4—2,4

Первые из указанных чисел соответствуют полной равномерности яркости, вторые — приемлемой по субъективной оценке степени неравномерности.

При потолках из экранирующих решеток это отношение во всех случаях не должно превышать котангенса защитного угла решетки.

Необходимость соблюдать указанные соотношения в ряде случаев ограничивает самую возможность устройства сплошных световых потолков: при ограниченной высоте свободного пространства над потолком излучатели приходится располагать столь часто, что осуществимыми оказываются лишь очень высокие освещенности.

Коэффициент использования светового потока источников, установленных над световым потолком, в общем случае может быть найден как произведение следующих коэффициентов:

а) коэффициента полезного действия осветительных приборов, в которых установлены источники света, — η_0 ;

б) коэффициента использования потока осветительных приборов относительно поверхности светового потолка («к. п. д. технической полости») — η_r ;

в) коэффициента пропускания светового потолка, равного $\sigma\tau$, где τ — коэффициент пропускания материала потолка, σ — отношение светопропускаемой площади потолка к его конструктивной площади, включающей переплет и другие непросвечивающие части;

г) коэффициента использования потока, прошедшего через световой потолок относительно горизонтальной расчетной поверхности (η_p) или стен (η_c).

К определению последнего коэффициента можно подойти двумя путями. На рис. 4-11 даны кривые зависимости коэффициентов первичного использования η'_p от индекса помещения, построенные для различных показателей m , характеризующих светораспределение элементов потолка. Кривой для $m = 1$ следует пользоваться при потолках из рассеивающих стекол, для $m = 2$ — при решетках с защитным углом 30° и для $m = 4$ — при решетках с защитным углом 45° . Коэффициент первичного использования относительно стен $\eta'_c = 1 - \eta'_p$. Из (3-38) следует:

$$\eta_p = \eta'_p k_{p.p} + (1 - \eta'_p) k_{c.p}; \quad (4-23)$$

$$\eta_c = (1 - \eta'_p) k_{c.c} + \eta'_p k_{p.c}. \quad (4-24)$$

Такой же численно результат может быть получен на основе следующих соображений.

Коэффициент $k_{p.p}$ (или, соответственно, $k_{p.c}$), будучи коэффициентом использования потока, падающего на потолок относительно расчетной поверхности, может рассматриваться как произведение коэффициента отражения потолка на коэффициент использования отраженного потока. Так как рассматривается использование не падающего, а излучаемого потока, первый из указанных выше множителей должен быть исключен и можно считать

$$\eta_p = \frac{k_{p.p}}{\rho_{\Pi}} \text{ и } \eta_c = \frac{k_{p.c}}{\rho_{\Pi}}. \quad (4-25)$$

Оба способа, повторяем, равноценны, но так как коэффициенты k_{nm} даются только для диффузных поверхностей, при потолках из экранирующих решеток неизбежен первый способ.

Окончательно

$$\eta = \eta_0 \eta_T \sigma \eta_p \text{ или } \eta = \eta_0 \eta_T \sigma \eta_c. \quad (4-26)$$

Первые четыре множителя этих формул определяются конструкцией светового потолка.

Произведение $\eta_0 \eta_T$ является обычным коэффициентом использования излучателей, установленных над световым потолком, относительно последнего. При нетиповых светильниках его нетрудно рассчитать, при типовых — найти по таблицам, определив предвари-

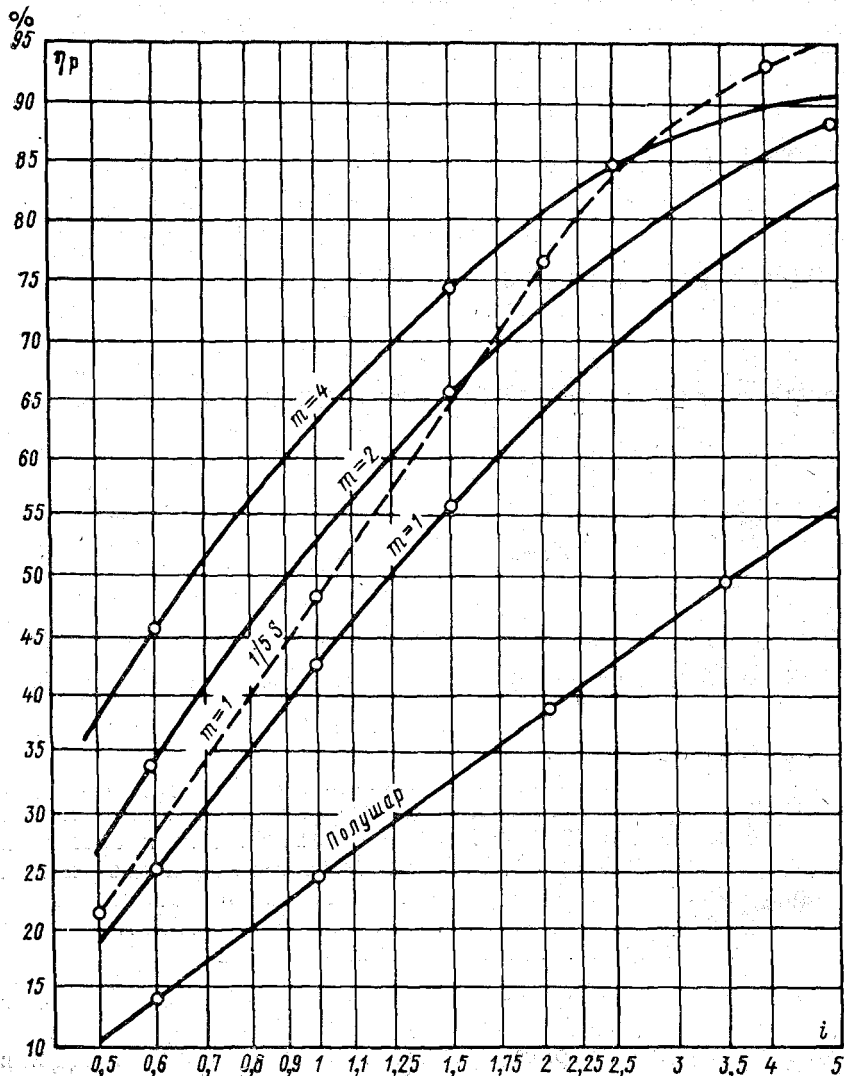


Рис. 4-11. Коэффициенты первичного использования для различных случаев

тельно индекс для технической полости. Если этот индекс существенно превышает 5, то при светильниках прямого света можно принимать $\eta_o \eta_T$ приблизительно равным к. п. д. светильника. При лампах, открыто установленных в светлоокрашенной технической полости, высота которой во много раз меньше длины или ширины, исходя из коэффициента отражения поверхностей полости не менее 0,6, можно считать $\eta_o \eta_T \approx 0,8$.

Коэффициент σ может быть рассчитан по конструктивным чертежам потолка. Если между отдельными секциями остекления или решеток отсутствуют непрозрачные, огнестойкие промежутки, то его значение близко к 0,9.

Коэффициент τ определяется свойствами материала или же защитным углом решетки. При отсутствии иных данных можно принимать следующие ориентировочные значения τ :

молочное светотехническое оргстекло и двусторонне матированное армированное стекло	0,63
экранирующая решетка с защитным углом 30°	0,6
то же, но с защитным углом 45°	0,45

Иногда (как например, в здании СЭВ) архитекторы придают решеткам сложные, узорчатые очертания. Предугадать величину τ таких решеток невозможно и достоверные данные могут быть получены только путем испытания макета.

При определении по таблицам значения $k_{п.р}$ коэффициент отражения светового потолка со стороны помещения можно обычно принимать равным 0,3, хотя в действительности он несколько меньше.

Пример. В помещении размерами 30×16 , m^2 на высоте 5 м устраивается световой потолок, не доходящий до стен на 1 м, т. е. размерами 28×14 , m^2 , из материала, для которого известно $\tau = 0,6$ и $\rho = 0,3$. Коэффициент $\sigma = 0,9$. Коэффициенты отражения поверхностей освещаемого помещения $\rho_c = 50\%$ и $\rho_p = 10\%$. Над потолком намечено установить лампы типа ЛБ в светильниках типа ОД, причем возможная высота последних над остеклением не превышает 1,5 м.

На полу должна быть создана освещенность 300 лк при $k = 1,5$.

Индекс технической полости

$$i = \frac{480}{1,5(30 + 16)} = 7,$$

в соответствии с чем примем $\eta_o \eta_T$ равным к. п. д. светильника, т. е. 0,72.

Для освещаемого помещения

$$i = \frac{480}{5,0(30 + 16)} = 2$$

и по графику рис. 4-11 для случая $m = 1$ находим $\eta_p' = 0,64$.

По табл. 3-8 находим $k_{п.р} = 1,02$; $k_{с.р} = 0,27$.

Отсюда окончательно

$$\eta = 0,72 \cdot 0,9 \cdot 0,6 [0,64 \cdot 1,02 + (1 - 0,64) \cdot 0,27] = 0,29.$$

Если бы мы приняли второй способ определения η_p , то, найдя в табл. 3-7 $k_{п.р} = 0,22$, получили бы $\eta_p = 0,22 : 0,3 = 0,74$, тогда как выражение в квадратных скобках, являющееся η_p , равно 0,75.

Потребный поток ламп составляет

$$F = \frac{E_k S}{\eta} = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 480}{0,29} = 745\,000 \text{ лм},$$

что соответствует $745\,000 : 4960 = 150$ светильникам 2×40 *вт* или $745\,000 : 8460 = 87$ светильникам 2×80 *вт*. В ряду длиной около 30 м помещается 24 светильника 2×40 *вт* или 19 светильников 2×80 *вт*, значит соответственно требуется 7 или 5 таких рядов. Считая, что крайние ряды удалены от кромки стекла к центру помещения на 0,5 м, получим расстояния между рядами, соответственно, 2,17 или 3,25 м. При высоте подвеса 1,5 м желательное по условиям обеспечения равномерности яркости потолка расстояние между рядами 1,8 м, допустимое — 2,7 м. Значит, в варианте 2×40 *вт* светильники могут быть подвешены даже несколько ниже, вариант же 2×80 *вт* может быть принят после корректировки: расположим светильники в те же 7 рядов, в каждом из которых должно быть $87 : 7 \approx 14$ светильником, а так как они не заполняют ряда, то между смежными светильниками оставим разрывы, которые, однако, не должны превышать $1/2$ высоты.

При освещении световыми потолками из диффузных материалов в случае необходимости определения освещенности отдельных точек обычными приемами вычисляется светимость поверхностей, дальнейший же расчет ведется по графикам Ратнера. Если рассчитывается освещенность горизонтальной поверхности, то суммарное значение q от четырех стен равно $1 - q_n$, где q_n — коэффициент освещенности для потолка.

При потолках из экранирующих решеток графики Ратнера неприменимы. А. Я. Коц предлагает разделять подобные потолки на полосы, которые можно принять за линейные излучатели, если их ширина не превышает, примерно, $1/5$ расчетной высоты. Приписав каждой полосе $F' = 1000$ *лм/м*, мы с учетом (3-5) получаем для осевой силы света выражение

$$I_0 = \frac{m+1}{2\pi} 1000 \eta_o \eta_r \sigma t = 795 \eta_o \eta_r \sigma t \text{ св/1000 лм.}$$

Под углом же γ в поперечной плоскости сила света

$$I_\gamma = I_0 \cos^4 \gamma = 795 \eta_o \eta_r \sigma t \cos^4 (\text{arctg } p').$$

С помощью таблицы или кривой $f(p', L')$ определяется ϵ и $\sum \epsilon$, обычным путем находится потребное F' , полный же поток ламп определяется умножением F' на длину и число полос.

В последнее время нами показана возможность построения сеток, вполне подобных графикам Гершуна (см. § 2-5) для определения освещенности от поверхностей любой формы, излучающих по закону $I_\alpha = I_0 \cos \alpha^m$.

Так как подобные задачи встречаются редко, ограничиваемся кратким изложением выводов и способа построения сеток.

Интегрирование выражения, определяющего освещенность от горизонтального бесконечно узкого кольца в точке проекции его центра на горизонтальную плоскость, приводит к выражению для освещенности от диска $E = R (1 - \cos^{m+1} \theta)$, где R — светимость диска и θ — угол, под которым виден из точки радиус диска.

Изобразим неоднократно уже использованную нами условную плоскость с осями координат $\xi = x/h$, $\eta = y/h$. На этой плоскости легко нанести контуры светящей поверхности, какой бы формы она ни была.

Для того, чтобы нанести на плоскости сетку равноосвещающих элементов, проведем на ней радиусы через равные углы и окружности, соответствующие равным приращениям функции $1 - \cos^{m+1} \theta$.

Если это последнее приращение принять равным 0,08, а радиусы провести через 9° , то цена каждого деления сетки будет $0,002R$.

Панели, ниши, купола и окна. При конструировании большинства подобных устройств, характерные схемы которых показаны на рис. 4-12, должны соблюдаться следующие основные требования:

а. Яркость видимых поверхностей должна восприниматься как равномерная, для чего отношения расстояния между излучателями

к их расстоянию до просвечивающей (а в схеме *б* — до отражающей) поверхности должны приниматься в соответствии с данными, приведенными выше для световых потолков.

б. Просвечивающие и отражающие материалы должны быть диффузными и иметь высокие коэффициенты отражения и пропускания.

в. Для уменьшения влияния эффекта свода конструкции должны быть, насколько возможно, плоскими.

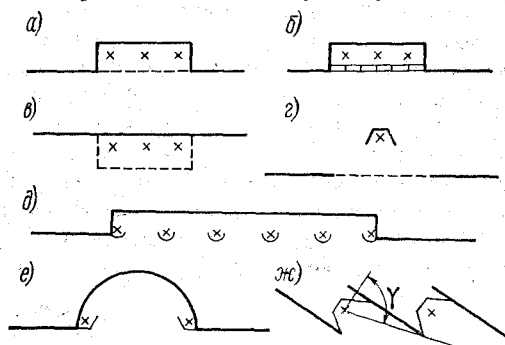


Рис. 4-12. Светотехнические схемы некоторых осветительных устройств (штриховыми линиями показаны рассеивающие стекла)

Как и в большинстве других расчетных схем, коэффициент использования светового потока ламп в установках с рассматриваемыми устройствами равен произведению к. п. д. самого устройства η_0 на коэффициент использования выходящего из него потока η_p .

Расчет рассматриваемых устройств в принципе не отличается от расчета осветительных приборов и может производиться способами, описанными в соответствующих руководствах. Однако если осветительные приборы массово изготавливаются в заводских условиях из материалов с точно регламентированными характеристиками, то данные устройства выполняются индивидуально и зачастую из случайных материалов. Это позволяет в ряде случаев считать оправданной приблизительную оценку к. п. д., хотя для ответственных установок настоятельно рекомендуется основывать светотехнический расчет на испытании пробного образца.

В отношении приближенной оценки к. п. д., основываясь на данных МЭИ, наших исследованиях и каталожных характеристиках аналогичных по схемам светильников могут быть указаны следующие средние значения:

потолочная или стенная утепленная панель, по схеме <i>а</i> , с диффузным стеклом	0,50
то же, по схеме <i>б</i> , с экранирующей решеткой $30 \times 30^\circ$	0,56
то же, но с решеткой $45 \times 45^\circ$	0,48
выступающая панель, по схеме <i>в</i>	0,55

Для схемы *г*, при которой один или несколько светильников свободно устанавливаются над остекленным участком потолка определение η_r по способу, указанному для световых потолков, дает грубую ошибку, так как «потoki рассеивания», не попадающие на остекление, в данном случае очень велики. Рекомендуется по точечному методу определить освещенность характерных точек верхней стороны остекления и, умножив среднюю освещенность на площадь стекла, получить падающий на него поток. Дальнейшие операции для определения η очевидны.

Очень эффективна схема *д*, в которой желоба, вмещающие трубчатые лампы, имитируют переплет остекления. По этой схеме могут оборудоваться и целые световые потолки (например, банкетный зал Кремлевского Дворца Съездов), и отдельные панели, и окна искусственного света на стенах. Эффектом свода в этой конструкции можно пренебречь, и если принять к. п. д. самого желоба 0,65, то к. п. д. окна в целом можно считать $0,65\rho\sigma$, где ρ — коэффициент отражения освещаемой лампами поверхности, а σ имеет тот же смысл, что и в схеме расчета световых потолков.

Купол по схеме *е* представляет собой локальный световой карниз. К. п. д. устройства в целом можно найти по формуле

$$\eta_0 = \eta_k \rho \sigma, \quad (4-27)$$

где η_k — к. п. д. встроенного в купол карниза; ρ — коэффициент отражения поверхности купола, определенный с учетом эффекта свода; σ — коэффициент, учитывающий экранирование выходного отверстия купола карнизом с лампами.

На схеме *ж* представлен фрагмент разреза по потолочному осветительному устройству, в практике называемому «жабрами»: светильник с трубчатой лампой (а иногда другие излучатели, например зеркальные лампы) размещен укрыто от посетителей в полости между двумя наклонными пластинами. Для случая, показанного на эскизе (устройство «жабр» может в деталях варьироваться), зная кривую силы света излучателя и угол γ , можно определить поток, падающий на пластины, умножить его на коэффициент отражения пластин и, сложив с потоком, свободно выходящим из полости, получить поток, излучаемый этим своеобразным световым потолком.

Методика расчета освещения от всех рассматриваемых устройств (кроме схемы *ж*, к которой мы не будем возвращаться) однотипна и определяется не столько особенностями их конструкции, сколько характером расположения в помещении.

Если они размещены более или менее равномерно по поверхности потолка, то η_r может быть определен по кривым рис. 4-11, при этом для схем *а*, *г*, *д*, *е* можно исходить из $m = 1$, для схемы *б* — из m , соответствующего защитному углу решетки.

Светораспределение устройств по схеме *в* зависит от соотношения размеров и в первом приближении может быть приравнено к светораспределению полушара, для которого, как известно,

$$I_\alpha = I_0 \frac{1 + \cos \alpha}{2}. \quad (4-28)$$

Значения η'_p для полушара также даны на рис. 4-11. Они отнесены к полному потоку полушара, из которого 25% излучается в верхнюю полусферу. Значение η'_c определяется для схемы θ как $0,75 - \eta'_p$, для остальных схем, как $1 - \eta'_p$. Для всех схем, кроме θ , $\eta'_n = 0$.

Данные рис. 4-11 рассчитаны по таблицам Джонса и Нейдхарта для случая $L/h = 0,4$. Значение L/h вообще незначительно влияет на η' , в рассматриваемых же расчетах этим влиянием тем более можно пренебречь. Мы приводим, однако, на рис. 4-11 дополнительный график для $m = 1$ и для одной или нескольких панелей, сосредоточенных вблизи центра помещения и занимающих 1/5 часть его площади (МЭИ).

Найдя произведение $\eta_o \eta'_p$ или $\eta_o \eta'_c$, окончательный коэффициент использования или установившийся поток легко найти по формулам (3-37), (3-38), после чего по известному потоку ламп может быть найдена освещенность или же может быть рассчитан поток ламп, необходимый для получения принятой освещенности.

Хотя для помещений, в которых устраивается архитектурно-художественное освещение, нормирована, как и других случаях, наименьшая освещенность, тем не менее при расчетах коэффициент z часто не вводится: значения его для различных случаев не вычислялись, вносимая же им поправка безусловно лежит за пределами точности расчета.

Как и при расчете освещения от световых потолков, коэффициент использования светового потока ламп, установленных в потолочных элементах при $m = 1$ относительно горизонтальной расчетной поверхности

$$\eta = \eta_o \frac{k_{п. п}}{\rho_{п}}$$

и относительно стен

$$\eta = \eta_o \frac{k_{п. с}}{\rho_{п}}.$$

Если светящие элементы достаточно равномерно распределены по поверхности стен, то подобно ранее сказанному при $m = 1$ можно считать коэффициент использования (с учетом многократных отражений) относительно горизонтальной расчетной поверхности равным $\eta_o k_{с. п} / \rho_{с. п}$, а относительно стен $\eta_o k_{с. с} / \rho_{с. с}$. Желая и в этом случае найти распределение первичных потоков, можем воспользоваться формулами (3-31) — (3-36), позволяющими найти шесть коэффициентов первичного использования, если известен один коэффициент. В качестве последнего, даже если светящие элементы размещены на стенах, удобно выбрать легко определяемый η'_p (в формулах третьей главы для лучшей ориентации в излучающих и освещаемых поверхностях коэффициенты первичного использования обозначены двойными индексами). Переход от первичных потоков к установившимся производится, как обычно, через коэффициенты k_{nm} .

Изображенные на рис. 4-12 устройства могут быть протяженными и принимать форму световых полос или балок, т. е. линейных из-

лучателей. За них может приниматься и ряд отдельных элементов, расположенных достаточно близко друг к другу. Коэффициенты первичного использования для балок или полос приведены на графиках Яковлева (рис. 3-10—3-12). Другие случаи определения первичного распределения потоков рассмотрены в § 3-3.

Обращаем внимание на то, что некоторые задачи могут быть решены с помощью своеобразного приема — условного повертывания помещения. Так, если, например, на одной из стен расположены светящиеся элементы (причем не обязательно диффузные), то можно принять эту стену за потолок, а противоположную — за пол, и, определив индекс «повернутого» таким образом помещения, легко найти как первичные, так и установившиеся потоки. Так как в этом случае из четырех стен повернутого помещения две являются стенами, одна — потолком и одна — полом действительного помещения, то при определении коэффициентов k_{nm} приходится исходить из средневзвешенного по площади коэффициента отражения стен.

Точечным методом при расчете установок с рассматриваемыми элементами приходится пользоваться, главным образом, в случаях, когда их размещение заставляет предполагать значительную неравномерность освещенности. Способы расчета освещенности от точечных, линейных и двумерных излучателей подробно рассмотрены в главе второй, и уместно только добавить, что отнюдь не от каждой панели, окна и т. п. необходимо вести расчет по графикам Ратнера: так, например, с расстояния 5 м за «точку» без недопустимой в данном случае погрешности может быть принята даже панель 2×2 м².

Почти во всех случаях помимо освещенности, создаваемой прямым светом, в контрольных точках должна быть определена также отраженная составляющая, которую можно найти либо по светимости стен и потолка с помощью графиков Ратнера, либо, считая ее равномерно распределенной, с помощью коэффициентов k_{nm} .

Пример. В помещении, показанном на рис. 4-13, освещение выполняется двенадцатью световыми окнами с люминесцентными лампами, схема устройства которых показана на разрезе и примерно соответствует случаю e на рис. 4-12. Коэффициенты отражения: потолка 70%, стен 30%, пола 10%, отражающей поверхности окна 70%. По рабочему чертежу окна определено $\sigma = 0,85$ и отношение площади отражающей поверхности к площади наибольшего продольного сечения 0,6. Требуется определить, сколько ламп ЛБ-80 надо установить в каждом окне для создания на полу $E = 100$ лк при $k = 1,5$.

Конструкция «карниза» в нижней части окна позволяет принять для него несколько увеличенный к. п. д., равный 0,7. Приведенный коэффициент отражения поверхности окна

$$\rho = \frac{0,7 \cdot 0,6}{1 - 0,7(1 - 0,6)} = 0,58,$$

откуда

$$\eta_0 = 0,7 \cdot 0,58 \cdot 0,85 = 0,34.$$

Индекс освещаемого помещения

$$i = \frac{120}{4(20 + 6)} = 1,1.$$

По табл. 3-8 $k_{с.р} = 0,14$, на основании чего примем $\eta_{п} = 0,14/0,30 = 0,47$ и получим окончательно $\eta = 0,34 \cdot 0,47 = 0,16$.

Суммарно необходимый поток ламп

$$F = \frac{100 \cdot 1,5 \cdot 120}{0,16} = 112000 \text{ лм},$$

число же ламп в каждом окне получаем делением этого потока на число окон и на номинальный поток лампы ЛБ-80:

$$N = \frac{112000}{12 \cdot 4320} = 2,15,$$

т. е. практически 2 лампы.

Данный путь решения задачи является простейшим, однако используем тот же пример, чтобы показать и сопоставить другие приемы расчета, могущие быть использованными в ряде случаев.

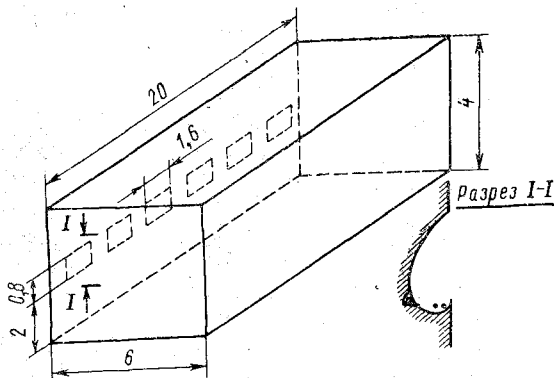


Рис. 4-13. К примеру расчета (окна на второй стене не показаны)

По графику рис. 4-11 коэффициент первичного использования потока потолка относительно пола $\eta_{р} = 0,47$. По формулам (3-34, 3-35, 3-36) находим, что коэффициент первичного использования потока стен относительно стен же равен 0,42, относительно же как пола, так и потолка 0,29.

По табл. 3-8 находим коэффициенты $k_{р.р} = 1,02$, $k_{с.р} = 0,14$, $k_{п.р} = 0,38$. Тогда по формуле (3-38) $\eta_{п} = 0,29 \cdot 1,02 + 0,42 \cdot 0,14 + 0,29 \cdot 0,38 = 0,47$, т. е. тот же результат, что и ранее.

В обоих вариантах мы заменили ряд окон, расположенных к тому же не на середине высоты помещения, равномерно и диффузно излучающей стеной. В принципе более точно первичное распределение потоков могло бы быть найдено, если заменить ряд окон сплошным линейным излучателем. В этом случае первичное использование могло бы быть найдено по коэффициентам η_A и η_B формулы (3-20) или по графикам Яковлева (рис. 3-10, 3-11, 3-12). Пользуясь этими графиками, первичный поток на пол и на потолок мы могли бы определить в один прием, первичные же потоки на каждую из стен — в два приема, разделив стену на части, для которых соблюдается показанное на рисунках взаимное расположение полосы и поверхности. Практически проще поток, падающий на все стены, найти по разности между излучаемым потоком и суммой потоков, падающих на пол и потолок. Не приводя промежуточных данных расчета по графикам Яковлева, укажем, что он приводит к значению $\eta_{п} = 0,46$, вообще же в подобных случаях возможны и значительно большие расхождения, поскольку графики и таблицы не являются вполне точными.

Хотя люстры как средство архитектурно-художественного освещения частично утратили свое значение, но они еще могут встре-

таться, хотя бы при реконструкции старых зданий. Мы не помним случая, когда светотехнические характеристики люстры были бы известны рассчитывающему и, к сожалению, в подавляющем большинстве случаев их приходится оценивать глазомерно, не забывая, в частности, учитывать неизбежное поглощение света конструктивными или архитектурными частями люстры.

4-7. Проекторное освещение

(Расчет проекторного освещения производится у нас почти исключительно по точечному методу,) так как прожекторы, что уже было отмечено в § 2-7, являются «капризными» осветительными приборами, в силу чего, в частности, неудобное для расчета по коэффициенту использования значение γ весьма проблематично и может быть очень большим, особенно при низких освещенностях.

Определение освещенности в любой точке при всех известных параметрах установки: типе прожектора, высоте h , угла наклона осей Θ , азимутах осей β и координатах мачты не встречает затруднений и легко производится способами, описанными в § 2-7, или иными. Чаще, однако, при расчете ставится обратная задача: определение параметров установки, обеспечивающих получение заданной расчетной освещенности E_k , для чего применяется метод компоновки изолюкс или метод веера прожекторов. Расчет, преимущественно, производится на горизонтальную освещенность (за исключением охранного освещения и освещения фасадов), так как именно ее обеспечение представляет наибольшие трудности.

При компоновке изолюкс в распоряжении рассчитывающего должен быть альбом изолюкс для данного прожектора и для различных характерных значений h и Θ . Для каждого сочетания этих данных в альбоме даются изолюксы для широкого диапазона освещенностей e (см. рис. 4-14). Для сокращения объема справочных материалов подобные альбомы иногда составляются для условной высоты 10 м. Пользование такими изолюксами при любой высоте h возможно в двух вариантах.

1. Те из изолюкс, которые необходимы для расчета, перестраиваются для данной высоты. При этом изолюкса освещенности e при высоте 10 м становится изолюксой освещенности $100e/h^2$ при высоте h . Соответственно изменяются координаты точек изолюксы: точка с координатами x, y получает на перестроенном графике координаты $xh/10, yh/10$, которые, конечно, должны быть изображены в масштабе плана освещаемой территории.

2. Перечерчиваются не изолюксы, а план территории, так, чтобы было можно непосредственно работать с изолюксами для высоты 10 м, не меняя их освещенностей. При этом все размеры плана (прочтенные в его масштабе) должны быть уменьшены в $h/10$ раз и изображены в масштабе графика изолюкс, расчет же освещения должен быть произведен на пересчитанную норму освещенности $E_k h^2/100$.

Компоновка изолюкс является центральной операцией расчета, в процессе которой уточняются высоты и координаты мачт, а также углы наклона и азимуты осей прожекторов.

Как общие правила отметим следующие:

1. Высота мачт должна быть не меньше определенной по условиям ограничения слепящего действия, т. е. $\sqrt{I_0/300}$, где I_0 — осевая сила света прожектора в свечах (в нормах СНиП 1971 г. это правило распространено на наклонно установленные светильники-прожекторы с трубчатыми лампами).

2. Расстояние между мачтами обычно лежит в пределах 4—7 их высот и, как правило, не должно превышать пятнадцатикратной высоты.

3. Расположение мачт выбирается так, чтобы прожекторы, по возможности, не попадали в поле зрения при преобладающем направлении осей зрения.

4. Желательно, чтобы каждый участок освещался с двух сторон. Это не значит, однако, что изолуксы горизонтальной освещенности противоположных мачт должны накладываться друг на друга, так как и за пределами этих изолукс сохраняется конечная освещенность, особенно вертикальная.

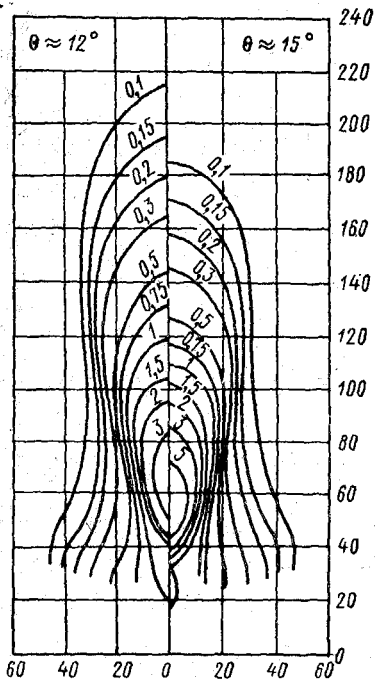


Рис. 4-14. Изолуксы горизонтальной освещенности. Прожектор ПЗС-45, 1000 *вт*, 220 *в*, $h = 20$ *м*

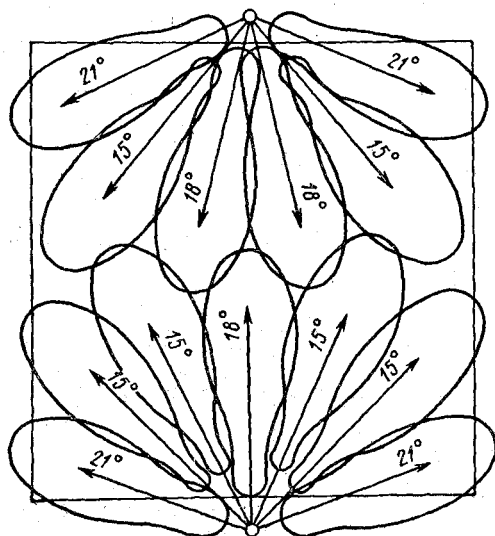


Рис. 4-15. Однослойная компоновка изолукс с двух мачт

5. Вблизи мачт часто образуется небольшое «мертвое пространство», хотя частично и подсвечиваемое светом, рассеиваемым воздухом. Если лампа полностью экранирована конструктивными частями прожектора, начиная от угла γ с осью, то протяженность мертвого пространства от основания мачты составляет $h \operatorname{ctg}(\theta + \gamma)$. Для прожекторов ПЗС $\gamma \approx 45^\circ$. Если мачта не может быть соответственно вынесена за границы освещаемой площади, то для освещения мертвого пространства на ней могут быть установлены добавочные светильники.

Собственно компоновка изолукс производится по следующим основным схемам.

1. Если освещаемая территория невелика, то расположение мачты и угол θ выбираются так, чтобы на плане вся эта территория размещалась внутри изолуксы освещенности $e = Ek$.

2. При значительных размерах территории компонуются изолуксы освещенности $e = Ek/2$, так, чтобы вся территория была

заполнена одним слоем таких изолюкс, по возможности без просветов и перекрывания (рис. 4-15). При этом в местах касания или пересечения изолюкс создается освещенность $2e = Ek$, по всей же площади внутри изолюкс суммарным действием смежных прожекторов создается большая освещенность. Однако на границах освещаемой площади суммирование освещенностей не происходит, и крайние половины изолюкс должны строиться для освещенности $e = Ek$.

3. При относительно высоких нормированных освещенностях может оказаться, что изолюксы освещенности $Ek/2$ вовсе не существуют или имеют очень малую площадь.

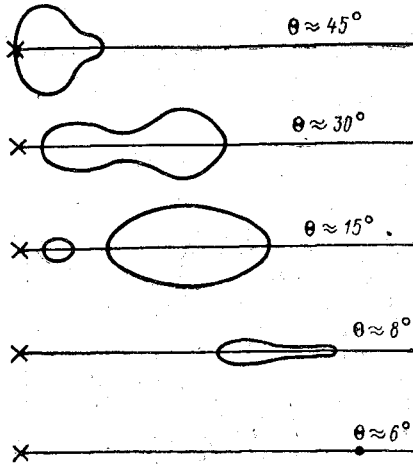


Рис. 4-16. Примерный характер изменения изолюкс в зависимости от угла θ

В этом случае изолюксы иногда компонуются в два слоя, след в след, или лучше со сдвигом на «полпериода». В первом случае принимается $e = Ek/4$, во втором, с учетом несовпадения минимумов освещенности в обеих слоях, $e = Ek/5$. Двухслойная компоновка применяется также в случаях, когда особое значение имеет освещение каждого участка с двух мачт, для перекрывания теней.

Практический прием компоновки изолюкс состоит в том, что набор изолюкс вырезается из кальки, так, чтобы каждая вырезка включала и основание мачты, и с помощью булавки накальвается

на план в предполагаемом месте расположения мачты. После этого путем поворота изолюкс находится наиболее удачная компоновка, для которой и фиксируются все углы.

Не следует, однако, думать, что компоновка изолюкс — дело только практики и своего рода искусства.

Проследим по рис. 4-16 характер изменения изолюксы при уменьшении угла наклона оси прожектора. Сперва изолюкса примыкает к основанию мачты, затем вытягивается в направлении луча и приобретает суженную часть, далее распадается на две части, из которых основная имеет форму, близкую к эллипсу, после этого площадь, ограниченная изолюксой, уменьшается, а сама она принимает своеобразную вытянутую форму. Наконец, в какой-то момент заданная освещенность сохраняется в единственной точке пересечения оси прожектора с землей.

В зависимости от обстоятельств, характер трансформирования изолюксы может несколько отличаться от описанного, но всегда, если только данная изолюкса существует вообще, можно фиксировать угол θ , при котором охватываемая ею площадь максимальна.

При освещении площади S числом прожекторов N полезным потоком каждого прожектора можно считать величину EkS/N .

Так как чаще всего $e = Ek/2$ и принимая, что S/N равно площади q , охватываемой изолуксой, получаем, что полезный поток прожектора равен $2eq$. Отбросив множитель 2, величину eq мы будем условно называть полезным потоком изолуксы. Чтобы, исследуя эту величину, исключить влияние высоты, мы будем вести расчеты для освещенности, приведенной к единичной высоте, т. е. для eh^2 .

Частным случаем графика изолукс являются изолуксы на условной плоскости. Если для каждой из этих изолукс мы найдем произведение освещенности ϵ на охватываемую площадь q , то увидим,

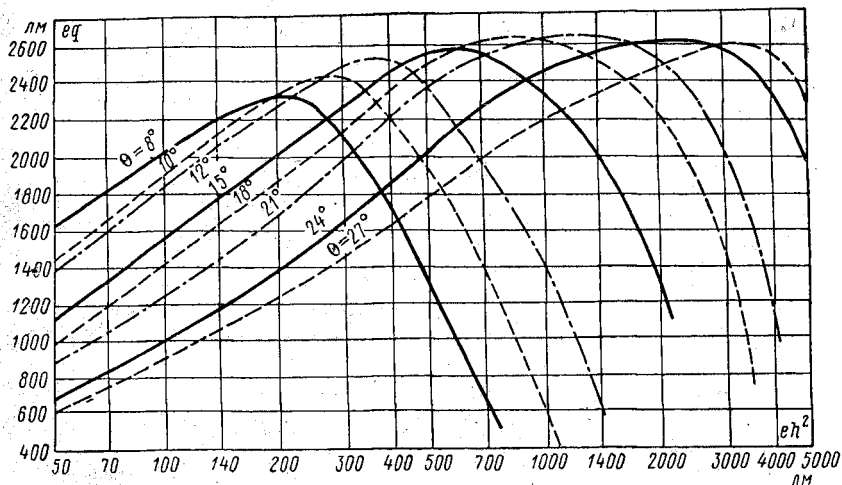


Рис. 4-17. Кривые полезного потока изолукс прожектора ПЗС-45, 1000 м, 220 в

что это произведение имеет явно выраженный максимум при определенной изолуксе, примерно определяющей границы «оптимального конуса» лучей прожектора. Для прожектора ПЗС-45 максимум eq около 3000 лм. В пересечении с землей этот конус не соответствует какой-либо определенной изолуксе, так как для различных его образующих коэффициент перехода от ϵ к e различен, но все же приблизительно определяет ту изолуксу, для которой, при данном Θ , произведение eq максимально, т. е. своего рода наилучшую изолуксу. Это подтверждается тем, что когда мы на основе непосредственных расчетов (которые могут быть выполнены для любой из высот) стали строить графики $eq = f(eh^2)$, то убедились, что при различных Θ их максимумы почти равновелики, несколько возрастают с увеличением Θ и лежат на уровне около 2600 лм для того же ПЗС-45 (рис. 4-17).

Подобные рассуждения и графики вносят известную определенность в процесс компоновки изолукс. Если предreshена однослойная компоновка и известно h , то можно непосредственно найти величину Θ , при которой площадь, охватываемая изолуксой, максимальна. Так, если $h = 25$ м и $Ek = 7,5$ лк, то при $e = 3,75$ лк полу-

чаем $eh^2 = 2340 \text{ лм}$, и наибольшее $eq = 2600 \text{ лм}$ наблюдается при $\Theta = 24^\circ$, причем $q = 2600 : 3,75 = 700 \text{ м}^2$ (все расчеты даются для того же прожектора). Если какими-либо обстоятельствами задано значение Θ , то аналогично можно найти оптимальную высоту h . Пусть в только что приведенном примере дано $\Theta = 15^\circ$, а высота неизвестна. Максимум eq в данном случае наблюдается при $eh^2 = 550 \text{ лм}$, откуда $h = 12 \text{ м}$.

Иначе решает задачу определения наивыгоднейшего угла Θ Р. А. Сапожников. Основываясь на некоторых предположениях, он приходит к следующим формулам для изолюкс горизонтальной освещенности

$$\Theta = \arcsin 0,01 \sqrt{m + n (eh^2)^3}; \quad (4-29)$$

для изолюкс вертикальной освещенности

$$\Theta = \arctg \sqrt{\frac{I_0}{eh^2}}. \quad (4-30)$$

В этих формулах m и n — параметры, зависящие от угла рассеяния прожектора, I_0 — осевая сила света последнего. Естественно, что графики автора, которые строятся на основе непосредственных расчетов, более точны, чем приведенные формулы, но различие оказывается значительным только в области малых углов Θ .

В принципе следует, конечно, компоновать изолюксы в условиях, когда ограниченная ими площадь максимальна, но это возможно далеко не всегда. Так, если обстоятельствами заданы и место мачты, и радиус действия прожекторов, то угол Θ определяется именно этими величинами. При компоновке изолюкс в один слой между концами смежных изолюкс остаются просветы, которые часто приходится заполнять изолюксами для меньших Θ .

Не вполне ясен следующий вопрос: при неограниченной свободе выбора всех элементов, казалось бы, должно существовать единственное, энергетически оптимальное решение, между тем как при различных способах компоновки различны e и, соответственно наивыгоднейшие Θ .

Задача освещения больших вертикальных поверхностей встречается относительно редко и в принципе решается компоновкой изолюкс, рассчитанных для этой поверхности. Значительно чаще ставится цель обеспечить освещенность любого элемента вертикальной поверхности, расположенного на уровне земли или несколько выше и, как правило, перпендикулярного проекции оси прожектора. Именно для этого случая строятся изолюксы вертикальной освещенности, которые, подчеркиваем, не дают картины распределения освещенности на какой-либо одной поверхности, а позволяют определить вертикальную освещенность (выражение, конечно, условное) в различных точках горизонтальной поверхности. Компоновка этих изолюкс производится так же, как изолюкс горизонтальной освещенности, но надо помнить, что освещенности противоположных сторон вертикальной плоскости суммироваться не могут.

Когда необходимо создание высоких освещенностей, может оказаться, что для этого необходима компоновка изолюкс даже не в два, а в большее число слоев. Исследуя эту задачу, М. С. Дудинов и автор практически одновременно и независимо друг от друга пришли к методу веера прожекторов.

Пусть на высоте h установлено несколько прожекторов, оси которых наклонены под равными углами Θ и в проекции разведены на равные же углы τ . Освещенность вдоль любой линии, направленной от мачты, при всех условиях будет распределяться неравномерно, распределение же освещенности вдоль дуг, положение которых определяется расстоянием x от основания мачты (а в пересчете на единичную высоту — значением $x' = x/h$), будет зависеть от угла τ : чем τ меньше, тем равномернее освещенность вдоль каждой дуги, и уже при $\tau \leq 20^\circ$ неравномерность становится почти неощутимой, а значение освещенности — обратно пропорциональным τ .

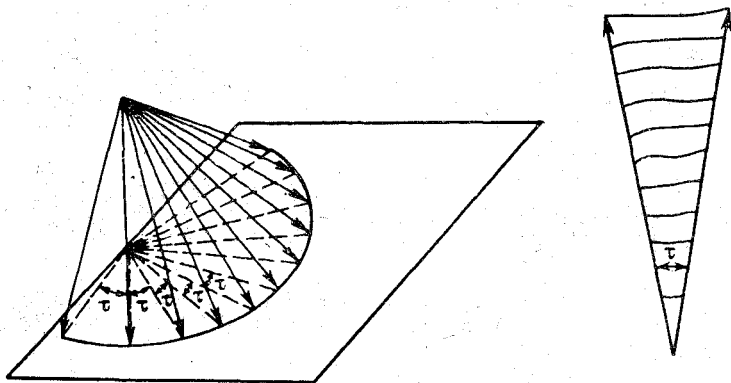


Рис. 4-18. Веер прожекторов и его изолуксы

Схема веера прожекторов и характер создаваемых им изолукс на участке между проекциями осей смежных прожекторов показаны на рис. 4-18. Подобный веер может рассматриваться как единый составной осветительный прибор, параметрами которого, помимо паспортных данных прожектора и лампы, являются h , τ и Θ . Освещенность, создаваемую этим прибором, целесообразно пересчитать на значения $h = 1$ м и $\tau = 1^\circ$ и оперировать приведенной освещенностью $\mathcal{E} = eh^2\tau$, графики которой строить в функции $x' = x/h$ для различных значений Θ (рис. 4-19).

Построение графика рекомендуется вести в следующем порядке: при любом значении h строится полная картина изолукс (т. е. в пределах от очень малых до наибольших значений e) последовательно для характерных значений Θ . Вместо того чтобы совмещать изолуксы от соседних прожекторов веера, на диаграмме проводят радиусы под углами $5^\circ-15^\circ-25^\circ-35^\circ-45^\circ-55^\circ$ с проекцией оси и дуги, соответствующие избранным значениям x' . Нетрудно видеть, что при любом x' , суммируя освещенности точек пересечения дуг и радиусов, мы получим результирующую освещенность от веера с углом $\tau = 10^\circ$:

$$\sum e = 2(e_5 + e_{15} + e_{25} + \dots), \quad (4-31)$$

после чего

$$\mathcal{E} = 10h^2 \sum e. \quad (4-32)$$

Если веер прожекторов окружает мачту, т. е. имеет угол охвата 360° , а мачты свободно размещаются на неограниченно большой поверхности, то сфера действия каждой мачты образует круг

и оптимальным будет расположение мачт по вершинам равностороннего треугольника, когда круги лучше всего заполняют плоскость. В других случаях угол охвата веера определяется особенностям задания, и опять-таки мачты размещают так, чтобы образованные веерами сектора наилучшим образом заполняли плоскость. Возможно, а иногда целесообразно, перекрытие площади веерами

лм·град

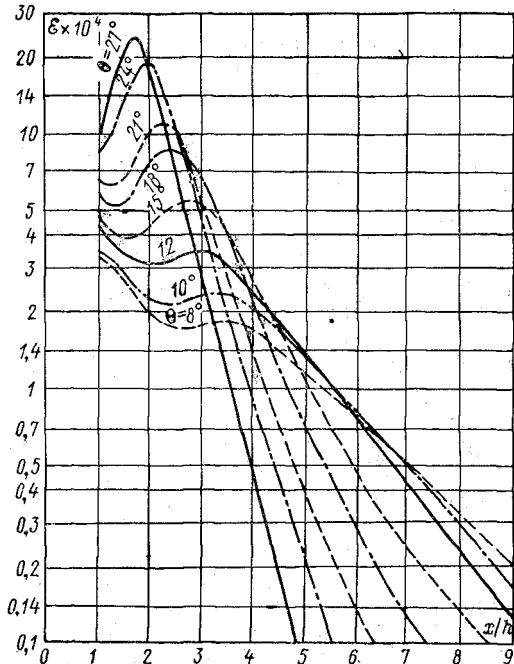


Рис. 4-19. Приведенная освещенность от веера прожекторов ПЗС-45, 1000 вт, 220 з

при $k = 1,5$. По графику рис. 4-19 находим, что наибольшее значение $\mathcal{E} = 14\,000$ лм·град будет достигнуто при $\Theta = 12^\circ$. На основании этого определяем

$$\tau = \frac{14000}{50 \cdot 1,5 \cdot 25^2} = 0,3^\circ$$

Не следует удивляться тому, что при круговом веере это соответствовало бы 1200 прожекторам на мачте: мы сознательно выбрали утрированно тяжелое задание.

Если бы мы попробовали решить задачу путем компоновки изолюкс даже в два слоя и приняли $e = Ek/5 = 15$ лк, то получили бы $eh^2 = 15 \cdot 625 = 9375$, что выходит за пределы шкалы графика рис. 4-17 и позволяет утверждать, что оптимальное значение Θ было бы значительно больше 27° . Однако при таких величинах Θ нельзя и думать о радиусе действия, близком к заданному.

противолежащих мачт. Учитывая спадание освещенности у краев веера, границей последнего следует считать проекции осей крайних прожекторов.

Далее необходимо выбрать контрольные точки, в общем на тех же основаниях, как при освещении светильниками (при единственном веере, как правило, это наиболее удаленная точка от мачты), определить x' , найти по графику значения \mathcal{E} от каждого веера и определить

$$\tau = \frac{\sum \mathcal{E}}{Ekh^2}. \quad (4-33)$$

Пусть, например, одним веером прожекторов ПЗС-45 при $h = 25$ м требуется в пределах сектора радиусом $x = 125$ м создать освещенность 50 лк

Однако и при расчете по методу веера можно наметить пути оптимизации решений. Обратимся к рис. 4-19, и используя приемы, принятые в теории наилучшего расположения светильников, будем считать при данном Θ оптимальным такое x' , при котором максимально произведение площади круга на освещенность точек окружности, т. е. $\mathcal{E}x'^2$. Выявив оптимальные значения x' для разных величин Θ , убеждаемся, что во всех случаях $x' \approx \operatorname{ctg} \Theta$, т. е. наилучшие значения x' соответствуют точкам пересечения осей прожекторов с землей и во всех случаях в эти точки направлена осевая сила света прожекторов. Это позволяет при нахождении максимума максимум рассматривать прожектор как прибор с равномерным светораспределением, для которого, как известно, наилучший угол падения лучей с поверхностью составляет примерно 35° .

Очевидно, что увеличение Θ может быть достигнуто только путем увеличения h . Вопрос осложняется тем, что при больших углах Θ освещенность в местах пересечения осей прожекторов с землей может оказаться выше, чем освещенность точек вблизи мачты, поэтому, оставаясь в пределах данных рис. 4-19, посмотрим, как окажется на решении рассмотренного примера принятие $\Theta = 27^\circ$ и $x' = 2,35$ (когда \mathcal{E} имеет то же значение, как при $x' = 1$). Чтобы сохранить $x = 125$ м, нам придется увеличить h до $125 : 2,35 = 53$ м, и при $\mathcal{E} = 100\,000$ лм·град находим

$$\tau = \frac{100\,000}{50 \cdot 1,5 \cdot 53^2} = 0,48^\circ,$$

т. е. число прожекторов уменьшается в 1,5 раза.

При всей простоте расчета по методу веера надо подчеркнуть, что не только оптимальное, но даже и просто правильное решение далеко не всегда очевидно и часто может быть найдено лишь путем рассмотрения ряда вариантов. В ряде случаев неравномерность распределения освещенности вдоль оси X и минимум вблизи мачты могут повести к установке на мачте двух или трех вееров прожекторов, характеризующихся различными значениями Θ и τ , освещению поверхности встречным веером с противоположной мачты и т. д. Вообще надо сказать, что если техника расчета прожекторного освещения достаточно хорошо разработана, то ряд деталей в области оптимального выбора элементов установки нуждается еще в дальнейшем исследовании.

В последнее время все большее применение получают прожекторы с лампами типа ДРЛ и с трубчатыми лампами: ксеноновыми и с галогенными лампами накаливания. При лампах ДРЛ расчет освещения никакой специфики не представляет. Кривые силы света прожекторов становятся плавнее и шире, дальность их действия уменьшается, но все сказанное в отношении компоновки и расчета освещенности от веера прожекторов остается в силе.

Прожекторы с трубчатыми лампами имеют резко выраженную разницу между кривыми силы света в вертикальной (поперечной) и горизонтальной (продольной) плоскости: в последней плоскости кривая хотя и не является косинусной, но все же приближается к ней по форме. Соответственно и изолуксы утрачивают сходство с эллипсами и резко вытягиваются в направлении оси Y . Достаточно сказать, что «кру-

говой обзор» достигается уже при установке на мачте четырех прожекторов, оси которых в плане образуют углы 90° .

Так как трубчатые лампы отличаются высокой мощностью, расчет освещения от прожекторов с этими лампами часто сводится к выбору такого положения мачты и угла Θ , чтобы вся освещаемая площадь оказалась внутри изолюксы E_k . При больших площадях, как обычно, компонуются изолюксы соседних мачт, при высоких же освещенностях не исключается создание нормированной освещенности совместным действием нескольких прожекторов одной мачты.

Как частный случай расчета прожекторного освещения отметим задачу вертикальной освещенности в плоскости перпендикулярной проекции осевого луча в пределах очень узкой полосы, т. е. в частности расчет охранного освещения. Высота установки принимается в этом случае минимально допустимой, можно считать, что свет падает на поверхность под прямым углом, и из формулы (2-1) следует выражение для определения предельного расстояния r , на котором еще обеспечивается заданная освещенность

$$r = \sqrt{\frac{I_0}{E_k}}. \quad (4-34)$$

Остановимся теперь на расчете средней освещенности от прожекторов, все же представляющем принципиальный, а в некоторых случаях и практический интерес.

В тридцатые годы такие расчеты были преобладающими и сводились к компоновке на планах эллипсов, соответствующих световому пучку прожекторов в пределах углов рассеяния¹. Зная последние, а также значения h и Θ , можно рассчитать полуоси этих эллипсов и их расстояния от мачты. Поток прожектора в пределах углов рассеяния дается в каталогах, и, равномерно заполнив эллипсами освещаемую территорию, можно определить ее среднюю освещенность. Однако при одном и том же световом потоке эллипсы для разных значений Θ имеют совершенно различную площадь и никаких значений минимальной освещенности при их компоновке не гарантируется, не говоря уже о том, что, как ясно из определения понятия «угол рассеяния», в центр каждого эллипса направлена в 10 раз большая сила света, чем в любую из периферийных точек.

Лучшее суждение об освещенности отдельных участков территории дают способы расчета, основанные на выделении в световом пучке прожектора элементов с равным световым потоком.

Один из таких способов предложен Рохом, преимущественно для прожекторов с трубчатыми лампами. Проведем через ось лампы лучок продольных плоскостей, часто называемых «книжными листами». Светораспределение в каждой плоскости известно или может быть найдено по закону подобия. Двугранный угол, образованный смежными плоскостями, разделяется на части, внутри каждой из которых излучается равный поток; границы участков с равными потоками изображаются на условной плоскости, перпендикулярной оси прожектора. Желая узнать среднюю освещенность любой поверхности с прямолинейными очертаниями, мы должны спроектировать вершины этой поверхности на условную плоскость, соединить полученные точки прямыми линиями и подсчитать число элементов с равным потоком внутри образовавшегося контура.

¹ Отмечаем, что углы рассеяния являются важными сопоставительными характеристиками прожекторов, но не должны рассматриваться как границы полезного конуса световых лучей.

Еще в 1940 г. нами был предложен, пожалуй, несколько более удобный способ нанесения на условную плоскость сетки элементов с равными потоками, пригодный при прожекторах с любыми источниками света.

Проведем на графике изолюкс на условной плоскости (рис. 2-51) радиусы через равные углы, например через 10° . Так как плоскость удалена от прожектора на 1 м, то указанные на ней значения ξ и η , являющиеся тангенсами углов, могут пониматься как размеры в метрах. Площадь сектора радиуса l с центральным углом 10°

$$S = \frac{\pi l^2}{36} = 0,087 l^2.$$

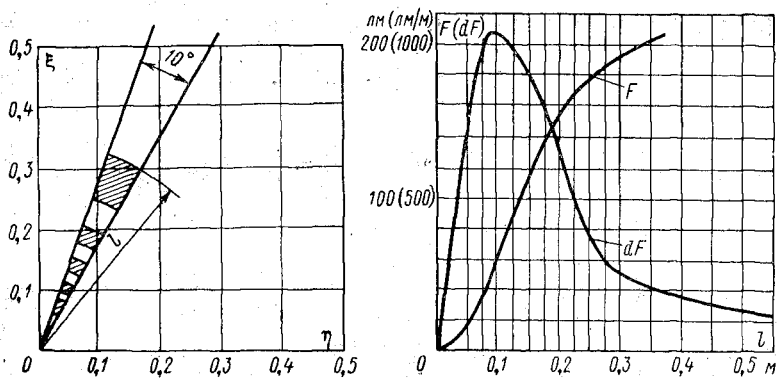


Рис. 4-20. Фрагмент построения диаграммы равных потоков 20 лм для прожектора ПЗС-45, 1000 *вт*, 220 *в*

Пусть при данном l и положении сектора относительная освещенность равна ε . Давая l элементарное приращение dl , получаем

$$dF = \varepsilon dS = 0,174 \varepsilon l dl.$$

Построим график функции $0,174 \varepsilon l = f(l)$ и разобьем его вертикалями на части, могущие быть принятыми за треугольники или трапеции (рис. 4-20). Площадь каждой части, прочитанная в соответствующем масштабе, даст поток прожектора в данном секторе и в данном интервале l . Последовательно суммируя потоки отдельных элементов, получим кривую нарастания потока $F = f(l)$, по которой легко определить значения l , соответствующие заданному приращению F , и, нанеся соответствующие дуги на сетку $\xi-\eta$, получить границы элементов, внутри которых излучается равный поток. На рис. 4-20 приведен фрагмент такого построения для $\Delta F = 20 \text{ лм}$. Число квадрантов графика зависит от наличия и числа у фотометрического тела прожектора плоскостей симметрии. При пользовании графиком, зная координаты x и y вершин освещаемой поверхности, следует по формулам (2-39, 2-40, 2-41) определить ξ и η , а дальше поступать так же, как при пользовании диаграммой Роха.

На среднюю освещенность (или, точнее, светимость) может рассчитываться, в частности, освещение фасадов. С. А. Клюевым предложен следующий упрощенный метод.

Пусть световая отдача лампы в прожекторе C , $лм/вт$, к. п. д. прожектора в пределах угла рассеяния η , коэффициент использования площади эллипсов рассеяния по отношению к поверхности фасада σ , коэффициент отражения поверхности фасада ρ , заданная светимость R и коэффициент запаса k . Очевидно, что при плотности нагрузки $1 \text{ вт}/м^2$ светность фасада составит

$$\frac{C\eta\sigma\rho}{k} \text{ лм}/м^2,$$

для получения же светности R необходима удельная мощность

$$\omega = \frac{Rk}{C\eta\sigma\rho}, \text{ вт}/м^2. \quad (4-35)$$

В частности, для прожектора ПЗС-45, 1000 $вт$, 220 $в$, считая $C = 18 \text{ лм}/вт$, $\eta = 0,3$, $\sigma = 0,9$ и $k = 1,5$, получаем

$$\omega = \frac{R}{3,2\rho}, \text{ вт}/м^2.$$

Автор метода указывает, что он пригоден при отношении высоты или ширины фасада к расстоянию до прожекторов не менее 1,5 и что, напротив, при прожекторах очень близких к фасаду, когда используется поток вне углов рассеяния, в формулу (4-35) следует вводить понижающий коэффициент 0,8. Координацию осей прожекторов С. А. Клюев рекомендует производить при наладке установки.

Надо добавить, что если фасад имеет башни, шпили и т. п. возвышающиеся части, то приведенным упрощенным расчетом нельзя довольствоваться и светимость этих частей необходимо определить расчетом по силе света.

Идя путем, аналогичным предложенному С. А. Клюевым для фасадов, но ориентировочно учитывая значения коэффициента z , М. С. Дадимов получил для предварительного определения удельной мощности обычных прожекторных установок формулу

$$\omega = mEk, \text{ вт}/м^2, \quad (4-36)$$

где Ek — расчетная освещенность горизонтальной поверхности, m — коэффициент, приближенно равный для прожекторов с лампами накаливания 0,22, с лампами типа ДРЛ — 0,13 и с лампами типа ДКСТ — 0,16—0,33.

Аналогичные коэффициенты получены нами, исходя из понятия «полезного потока изолюксы», т. е. на основе точечного метода.

Так, для ПЗС-45, исходя из компоновки изолюкс $e = Ek/2$ и считая максимальное $eq = 2600 \text{ лм}$, получаем

$$q = \frac{2600}{e} = \frac{5200}{Ek}.$$

Принимая коэффициент использования площади, охватываемой изолюксой равным 0,8, получаем

$$\omega = \frac{p}{sq} = \frac{1000Ek}{0,8 \cdot 5200} = 0,25Ek.$$

4-8. Освещение проездов, дорог и улиц светильниками

Расчет освещения дорог, проездов, а также городских улиц и площадей представляет ряд особенностей. В частности, в отношении освещения улиц и площадей надо сказать, что этому вопросу и у нас, и в других странах уделяется особое внимание в связи с быстрым развитием городского транспорта, и техника освещения этих объектов не только существенно развилась, но и в какой-то степени обособилась от осветительной техники вообще, причем некоторые решаемые здесь задачи весьма специфичны. Подробное рассмотрение этих задач выходит за рамки данной работы и мы ограничиваемся тем, что относится, собственно, к расчету освещенности и, отчасти, средней яркости дорожных покрытий.

Для рассматриваемых объектов в ряде случаев, как и для освещения помещений, нормирована минимальная освещенность, на особенностях расчета которой мы прежде всего и остановимся.

Для наружного освещения характерны значительно большие значения Llh , чем для освещения помещений. Это обусловлено тем, что в общей сумме годовых затрат на освещение относительно меньшую роль играет стоимость энергии и большую — расходы, связанные с опорами, светильниками и их обслуживанием.

Далее, если в помещениях необходимость иметь целое число светильников в ряду делает осуществимым лишь ряд дискретных значений L , то в условиях освещения длинных полос в принципе осуществимы любые значения L , хотя при «привязке» решений к конкретным случаям приходится считаться с перекрестками, углами и т. д.

Эти два момента и определяют основные особенности расчета освещения.

а. Расчет должен выполняться с повышенной точностью, в связи с чем рекомендуется пользоваться преимущественно кривыми относительной освещенности.

б. Следует, как правило, не определять мощность лампы P по заданному L , а, наоборот, задавшись величиной P , определить без округления соответствующее значение L .

в. Выбор решения должен быть основан на сопоставлении годовых затрат по нескольким вариантам.

Для наружного освещения очень часто применяют некруглосимметричные светильники. Расчет освещения от них наиболее целесообразно производить с помощью условных изолюкс. Широкое применение получили консольные светильники, устанавливаемые с наклоном в сторону освещаемой полосы. Если этот угол неизменен, то целесообразно учесть его уже при построении условных изолюкс, для чего кривые силы света светильника должны быть даны в системе

угловых координат, принятых с учетом наклона светильника, т. е. считая за 0° истинную вертикаль. В противном случае расчет выполняется точно так же, как при наклонных светильниках внутреннего освещения (см. § 2-6).

Предлагались и другие способы расчета освещения от наклонно установленных, некруглосимметричных светильников. Так, Штек рассматривает задачу расчета освещенности от светильников с люминесцентными лампами, проекция оси которых перпендикулярна освещаемой полосе и которые наклонены к горизонту на угол δ . Светораспределение во всех продольных плоскостях он предполагает подчиняющимся выражению (1-3), на основании чего составляет

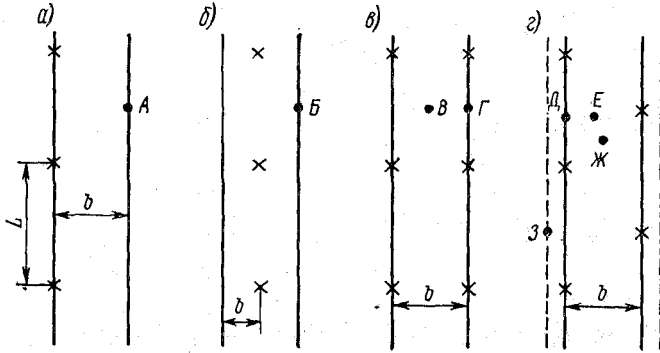


Рис. 4-21. Некоторые схемы размещения светильников на улицах и дорогах

довольно сложную формулу, выражающую зависимость освещенности от силы света, высоты h , двух линейных координат точки и угла δ . Функцией тех же переменных является угол в главной поперечной плоскости, определяющий направление силы света. Для практического использования предлагаются таблицы, каждая из которых составлена для определенных значений h и δ , и содержит, в функции двух линейных координат точки, значение освещенности при единичной силе света и значение угла в главной поперечной плоскости.

На рис. 4-21 показаны некоторые характерные схемы расположения светильников и точки возможного минимума освещенности. Для схем *a* и *б* они, как правило, бесспорны, для схем *в* и *г*, в зависимости от обстоятельств, минимум может оказаться в одной из указанных на рисунке точек. Если имеется тротуар, на котором должна быть обеспечена заданная освещенность (штриховая линия на схеме *з*), то появляется естественная контрольная точка *З*.

Для наиболее частого при освещении дорог и проездов на территориях промпредприятий расположения по схемам *a* и *б* может быть предложено дальнейшее упрощение расчета. При обычном расчете по кривым относительной освещенности или условным изолюксам мы должны, задавшись P и зная E , k , h , определить требуемую величину $\sum \epsilon$ и, допустив, что $\epsilon = \sum \epsilon/2$, найти по графику d/h или h/d

(при пользовании условными изолюксами $[d/h = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}]$, и определить $L = 2\sqrt{d^2 - b^2}$ ¹.

Взамен этого, если h постоянно (что часто имеет место при использовании типовых опор), можно, задаваясь последовательно различными значениями b , построить на графике с координатными осями L и b кривые равных значений $\sum e$ для точек A или B ².

Тогда, при заданных и выбранных значениях E , k , h , P находим

$$\sum e = \frac{1000Ek}{F}, \quad (4-37)$$

и при известном b по графику определяем непосредственно L .

В развитие этого, давно предложенного нами графика предлагается более универсальный график, не привязанный к определенному значению h , на котором кривые равных значений $\sum e$ нанесены в координатной сетке L/h ; b/h (рис. 4-22).

Для составления графика первоначально была построена кривая $e = f(d/h)$. Отношению b/h придавались значения $0-0,3-0,6-1-\sqrt{2}-\sqrt{3}-2\sqrt{6}$; для каждого значения b/h при значениях $L/h = (2-2,5-3-4-5-6)$ вычислялись значения d/h для двух ближайших и двух следующих светильников, строились вспомогательные кривые $\sum e = f(L/h)$ и точки, соответствующие выбранным значениям $\sum e$, переносились на сетку графика. Подобным же образом могут быть построены графики для светильников с некруглосимметричным светораспределением.

Пример. Задано $E = 1$ лк, $k = 1,3$, $h = 6,5$ м, $b = 5$ м. Требуется определить L при лампе 200 вт, 2700 лм.

Определяем

$$\sum e = \frac{1000Ek h^2}{F} \approx 20 \text{ лк}$$

и при $b/h = 0,77$ по графику рис. 4-22 находим $L/h = 3,73$; отсюда $L = 24$ м.

Действующие в СССР нормы уличного освещения регламентируют среднюю яркость дорожных покрытий в полосе движения в направлении наблюдателя, находящегося на оси движения транспорта, в связи с чем предварительно остановимся на вспомогательном вопросе определения средней освещенности полосы движения. Так как многократные отражения в данном случае не учитываются, то задача сводится к определению первичных потоков.

При круглосимметричных светильниках вполне пригоден и в данном случае метод Кою (см. § 3-3), однако применительно к уличному освещению Я. Б. Зильберлатом предложен другой, с нашей точки зрения, равноправный метод.

Пусть установленный на высоте h светильник (рис. 4-23) освещает полосу неограниченной длины и шириною b . Поток, излучаемый в зоне $\Delta\alpha$, определяется, как обычно, умножением I_α на телес-

¹ В § 4-2 дан другой вариант расчетной схемы, пригодный при малых L , когда недостаточен учет двух ближайших светильников.

² При малых L в $\sum e$ могут быть учтены и «вторые» светильники. Ранее мы приводили в графиках значения $\sum e/k$; в таком случае из формулы (4-37) k исключается.

ный угол зоны, равный $2\lambda (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$, полезной же является доля этого потока, определяемая отношением $2\gamma/360 = \gamma/180$, но так как

$$\gamma = \arcsin \frac{b}{h \operatorname{tg} \alpha},$$

то

$$\eta' = \frac{\arcsin \frac{b}{h \operatorname{tg} \alpha}}{180}. \quad (4-38)$$

Не представляет труда составить таблицу значений η' для различных зон в функции отношения b/h , причем в данном случае в области больших α целесообразно вести расчет по 5, а не по 10-градусным зонам. Суммирование первичных потоков в пределах α от 0° до 90° даст полный полезный поток. Если светильники расположены по оси полосы, то под b понимается половина ширины последней, а найденное значение η' удваивается.

Для некруглосимметричных светильников решение задачи усложняется. При светильниках с двумя плоскостями симметрии можно пользоваться методами, рассмотренными в § 3-3, в частности работой Эйнхорна, но в общем случае, а также, когда ставится задача определения средней яркости, необходимо определять потоки в круговых зонах. В этом случае рекомендуется либо пользоваться графиком равных телесных углов (рис. 3-24), нанеся на него кривые изосвечей для данного светильника, либо разделять заштрихованную на рис. 4-23 полезную часть круговой зоны на отдельные участки, в пределах каждого из которых можно считать силу света постоянной, соответствующей данному углу β .

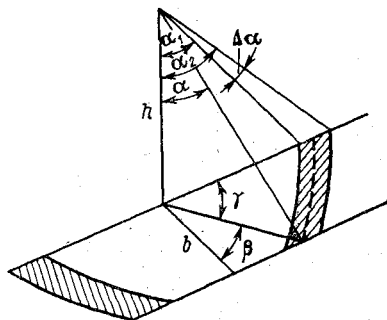


Рис. 4-23. Определение первичного потока по Я. Б. Зильберблату

Определение средней яркости основано на известной формуле

$$B = \frac{Er}{\pi}, \quad (4-39)$$

где r — коэффициент яркости поверхности в данном направлении. Расчет ведется для сухого асфальта. Угол наблюдения принимается постоянным, равным 89° . Каждому элементу поверхности, соответствующему его положению по отношению к светильнику, приписывается определенное, достаточно хорошо изученное значение r , причем при определении яркости, создаваемой светильниками, расположенными перед наблюдателем, существенно сказывается зеркальная составляющая отражения асфальта. По отношению к «задним» светильникам асфальт ведет себя как диффузная поверхность, т. е. имеет постоянное значение r .

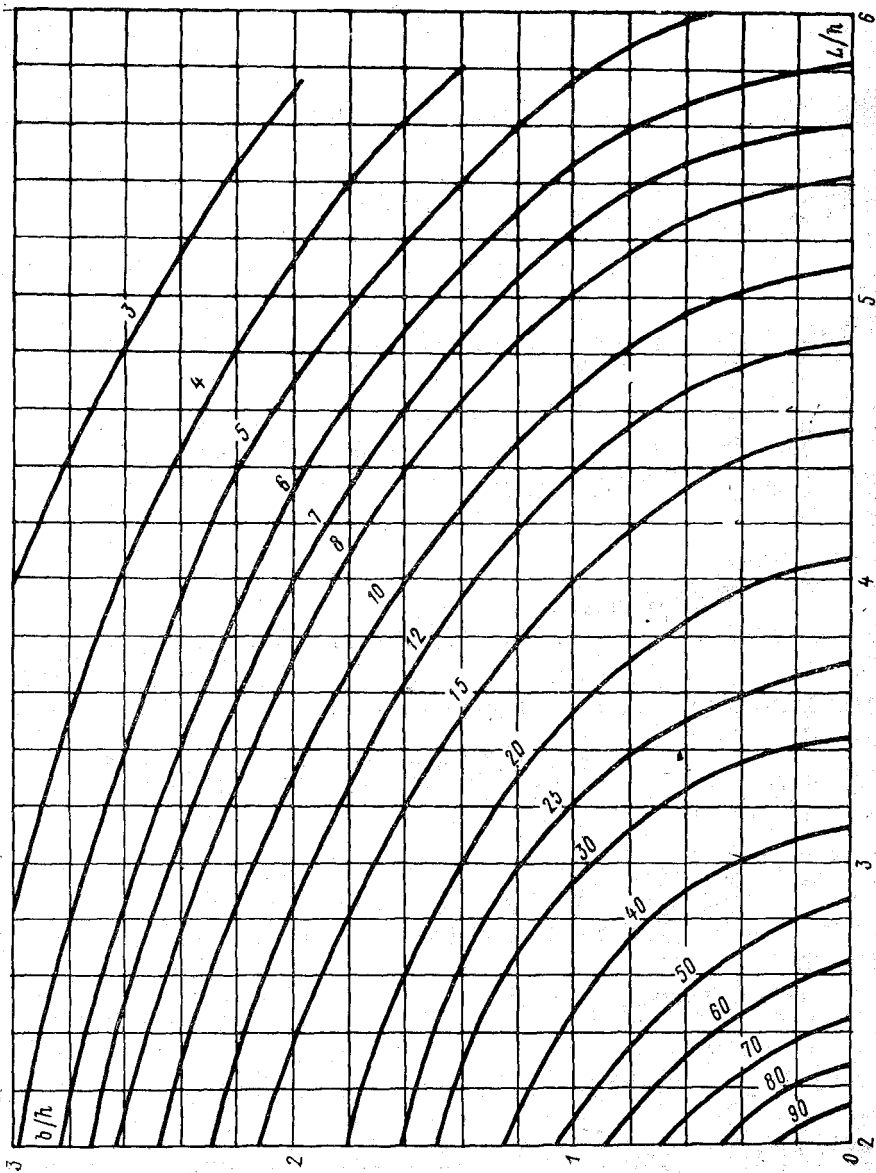


Рис. 4-22. График для расчета наружного освещения для светильника СПО:

$$\Sigma e = f \left(\frac{L}{h}, \frac{b}{h} \right)$$

Основное значение при расчете установок по средней яркости имеет коэффициент использования светильников по яркости η_B .

Определение этого коэффициента, данное в СН 278—64 весьма неубедительно; физический смысл этого коэффициента лучше всего усматривается из формулы, полученной путем преобразования формулы, приведенной в строительных нормах,

$$\eta_B = \frac{B\pi}{F'}, \quad (4-40)$$

где F' — поток ламп, отнесенный к 1 м^2 освещаемой поверхности, произведение же $B\pi$ можно рассматривать как своего рода условную светность покрытия, если бы последнее было диффузным.

Общая математическая схема определения η_B приведена в работе

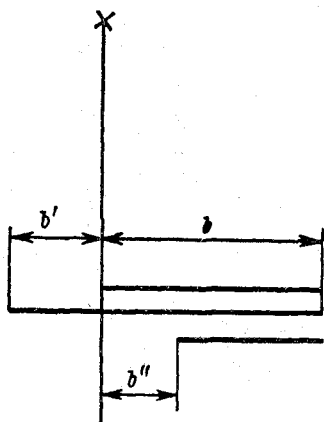


Рис. 4-24. Схемы определения η_B

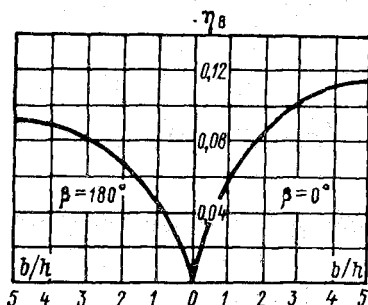


Рис. 4-25. Коэффициент использования по яркости светильника СЗПР-250В

М. А. Островского, но для практических расчетов приводимые им формулы использовать затруднительно.

Приводим схему определения η_B по Я. Б. Зильберблату.

Первоначально определяют описанным выше путем первичные световые потоки, падающие от светильника на полосу при данном значении b/h . Отношение суммы этих потоков к 1000 лм дает обычный коэффициент использования по освещенности η_E . Далее, каждый зональный полезный поток умножается на приводимое в таблицах значение r , соответствующее данным величинам α и b/h , и произведения складываются; делением суммы на 1000 лм получаем значение η_r , характеризующее участие в средней яркости «передних» светильников. Для всех «задних» светильников значение r для асфальта может быть принято равным $0,1$, а так как половина всех светильников является «задними» и половина — «передними», то окончательный коэффициент использования по яркости

$$\eta_B = \frac{\eta_r + 0,1\eta_E}{2}. \quad (4-41)$$

Значения η_B приведены в СН 278—64 и даются также в каталогах в виде кривых $\eta_B = f(b/h)$. Для несимметричных светильников даются две кривые: в сторону оси движения ($\beta = 0^\circ$) и в противоположную сторону ($\beta = 180^\circ$). Возможны различные схемы определения общего значения η_B (рис. 4-24).

При расположении светильников по краю полосы η_B определяется непосредственно в функции b/h . При осевом расположении значение η_B находится в функции отношения к h половины ширины полосы и удваивается. При двухрядной тросовой подвеске, а также при установке на консолях, выступающих в сторону полосы, положение каждого светильника определяется двумя размерами b и b' , соответственно чему находят и суммируют два значения η_B , причем, если светильники несимметричны, эти значения принимают для соответствующих величин β . Наконец, если светильники помещены вне полосы, отстоят от ее края на расстояние b'' , то η_B определяется по разности значений, определенных для этих расстояний.

Используем для примера график η_B светильника СЗПР-250Б, приведенный на рис. 4-25.

Полоса движения имеет ширину 30 м, светильники СЗПР-250Б установлены на высоте 9 м и размещены в два ряда, каждый из которых удален от края полосы в сторону ее оси на 3 м. Определить расстояние между светильниками, при установке в них ламп 250 вт, 10 000 лм, так, чтобы обеспечить среднюю яркость 0,7 нт при коэффициенте запаса 1,5.

При отношениях $b/h = 27/9 = 3$ и $b'/h = 3/9 = 0,33$ по кривым рис. 4-25 находим $\eta_B = 0,10 + 0,025 = 0,125$. Решая (4-40) относительно F' , получаем

$$F' = \frac{0,7 \cdot 1,5 \cdot 3,14}{0,125} = 26,4 \text{ лм/м}^2.$$

На каждый светильник должна приходиться площадь $10\,000/26,4 = 380 \text{ м}^2$, что при ширине полосы в 15 м, приходящейся на каждый ряд светильников, соответствует расстоянию между светильниками около 25 м.

ГЛАВА ПЯТАЯ

НОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСВЕЩЕНИЯ, РАСЧЕТ КОТОРЫХ СВЯЗАН С РАСЧЕТОМ ОСВЕЩЕННОСТИ

5-1. Коэффициент пульсации

В связи со все расширяющимся применением газоразрядных ламп большое значение приобрела задача ограничения пульсаций освещенности, возникающих при питании этих ламп переменным током промышленной частоты.

Характеристикой источников света с точки зрения пульсации их светового потока является коэффициент $K_{п.н}$, под которым понимается отношение амплитуды изменения мгновенных значений светового потока к удвоенному среднему значению последнего.

В табл. 5-1, составленной по экспериментальным и расчетным данным, приводятся значения $K_{п.и}$ для различных источников света и при различных схемах включения двух или трех источников.

Таблица 5-1

Значения $K_{п.и}$ для различных ламп
и различных способов их включения

Тип лампы	Значения $K_{п.и}$ в процентах			
	одна лампа	две лампы в схеме отстаю- щего и опере- жающего тока	две лампы разных фаз	три лампы разных фаз
ЛБ и ЛТБ	25	10,5	10	2,2
ЛХБ	35	15	15	3,1
ЛДЦ	40	17	17	3,5
ЛД	55	23	23	5
ДРЛ	65	—	31	5
ДКСТ	130	—	65	5

Анализ осциллограмм светового потока газоразрядных ламп показал, что мгновенные значения светового потока достаточно хорошо могут быть аппроксимированы выражением вида:

$$F_t = F_{\min} + F_a |\sin^n \omega t|, \quad (5-1)$$

где F_t — мгновенное и F_{\min} — минимальное за период значение светового потока, F_a — амплитуда его изменений, ω — угловая частота, t — время, n — эмпирический показатель, равный 1,0 для люминесцентных ламп, 1,7 — для ламп типа ДРЛ и 5,0 — для ламп типа ДКСТ. Подчеркиваем, что в формулу входит абсолютное значение синуса и даже при $n = 1$ кривая изменений потока отличается от синусоиды острыми углами у минимумов.

Пульсации потока создают пропорциональные им пульсации освещенности, величина которых оценивается коэффициентом пульсации

$$K_{п} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{\text{ср}}} = \frac{E_a}{2E_{\text{ср}}}, \quad (5-2)$$

где E_{\max} , E_{\min} и $E_{\text{ср}}$ — соответственно наибольшее, наименьшее и среднее значение освещенности за период, E_a — амплитуда изменения освещенности. Мгновенные значения E могут быть определены по формуле (5-1) с заменой F на E . Вычислив средние значения $|\sin^n \omega t|$, можем получить следующие формулы:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для люминесцентных ламп} \quad E_{\text{ср}} = E_{\min} + 0,64E_a; \\ \text{для ламп типа ДРЛ} \quad E_{\text{ср}} = E_{\min} + 0,53E_a; \\ \text{для ламп типа ДКСТ} \quad E_{\text{ср}} = E_{\min} + 0,34E_a. \end{array} \right\} \quad (5-3)$$

В общем случае суммарная освещенность создается лампами, присоединенными к трем фазам сети. Пульсации освещенности, соз-

даваемые лампами различных фаз, взаимно смещены во времени на $1/3$ периода, в связи с чем мгновенные значения освещенности от ламп различных фаз выражаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} E_A &= E_{\min} + E_a |\sin^n \omega t|; \\ E_B &= E_{\min} + E_a |\sin^n (\omega t + 120^\circ)|; \\ E_C &= E_{\min} + E_a |\sin^n (\omega t + 240^\circ)|. \end{aligned} \right\} \quad (5-4)$$

Чтобы не привязывать расчетов к определенной величине освещенности, выделяют фазу, присоединенные к которой лампы в наибольшей степени участвуют в суммарной освещенности (эта фаза условно принимается за фазу A), долевое же участие лампы остальных фаз учитывают соответствующими процентами.

Определить результирующие значения $K_{п.и}$ при различном долевом участии разных фаз можно аналитически на основе приведенных формул, но несколько проще задача решается графически, путем построения кривой изменения суммарной освещенности. Приводим схему этой операции для случая люминесцентных ламп. В этом случае удобно вести расчет для условного значения $K_{п.и} = 100\%$, тогда полученные данные будут пропорционально пересчитаны для любого спектрального типа люминесцентных ламп.

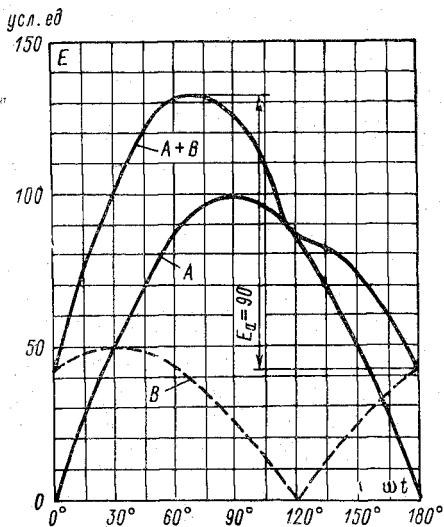


Рис. 5-1. Определение $K_{п.и}$ при долевом участии фазы B в 50% и фазы C в 0%

Отметим, однако, что, как это следует из формул (5-3), при люминесцентных лампах коэффициент пульсаций не может превышать 78%; так как уже при этом значении $E_{\min} = 0$.

Поскольку мы исходим из $K_{п.и} = 100\%$, то из (5-2) следует, что $E_a = 2E_{ср}$. Примем для фазы A $E_a = 100$ и построим кривую $|100 \sin \alpha| = f(\alpha)$ (рис. 5-1). Для фазы B примем $E_a = 50$, и построим на том же рисунке кривую $|50 \sin(\alpha + 120^\circ)| = f(\alpha)$. Просуммировав ординаты обеих кривых, получаем кривую изменения результирующей освещенности и определяем ее амплитуду. Поскольку $E_{ср} = 100/2 + 50/2$, то отношение амплитуды к $2E_{ср}$, т. е. в данном случае $90/150$ даст значение $K_{п.и}$.

При неизменной амплитуде фазы A , амплитуде фазы B может быть придан ряд избранных значений, после чего каждое из полученных сочетаний может быть дополнено рядом значений амплитуды фазы C . Путем аналогичных расчетов Ю. И. Свиридовым составлены табл. (5-2) — (5-3), позволяющие легко найти $K_{п.и}$ для всех

Таблица 5-2

Значения коэффициента пульсации в установках с люминесцентными лампами при условном значении $K_{п.н} = 100\%$; освещенности указаны в процентах по отношению к фазе, лампы которой создают наибольшую освещенность

Освещенность от ламп третьей фазы	Освещенность от ламп второй фазы									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
0	42,3	45,0	48,0	51,2	54,5	59,9	64,9	71,5	79,3	88,5
10	37,4	39,4	41,8	44,9	47,8	52,3	56,9	62,6	69,0	77,4
20	32,3	34,4	36,8	39,4	41,5	45,2	49,5	54,8	60,8	
30	27,8	30,0	32,3	34,8	36,9	40,2	44,2	48,9		
40	23,4	25,9	27,9	30,2	32,6	35,4	39,2			
50	19,8	22,2	24,2	26,3	28,5	31,4				
60	17,2	19,2	21,2	23,4	25,7					
70	14,8	16,6	18,4	20,9						
80	12,4	14,2	16,3							
90	10,4	12,3								
100	8,9									

Таблица 5-3

Значения коэффициента пульсаций в установках с лампами типа ДРЛ при значении $K_{п.н} = 65\%$; освещенности указаны в процентах по отношению к фазе, лампы которой создают наибольшую освещенность

Освещенность от ламп третьей фазы	Освещенность от ламп второй фазы									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
0	31,0	31,2	31,4	32,1	33,9	36,7	40,0	44,2	48,8	56,8
10	25,8	25,9	26,3	27,1	28,7	31,2	34,2	38,2	43,3	49,5
20	22,5	21,7	22,0	22,7	24,3	26,5	29,4	32,9	37,6	
30	17,5	17,6	17,9	18,9	20,4	22,6	25,5	28,8		
40	14,0	14,0	14,5	15,8	17,5	19,8	22,3			
50	10,8	10,8	11,5	12,9	14,7	17,0				
60	8,6	8,7	9,3	10,3	12,2					
70	6,6	6,7	7,3	8,4						
80	5,5	5,6	6,1							
90	4,9	4,9								
100	4,7									

случаев, когда известно соотношение освещенностей, создаваемых лампами различных фаз.

Пусть, например, применяются лампы ЛХБ, причем лампы фазы А создают в точке 240 лк, фазы В — 100 лк и фазы С — 50 лк. С округлением, освещенности ламп различных фаз относятся как 100 : 40 : 20, по табл. 5-2 находим значение $K_{п.н} = 49,5$ и, учитывая, что для ламп ЛХБ $K_{п.н} = 0,35$, получаем $K_{п.н} = 0,35 \cdot 0,495 = 0,17$.

Ю. И. Свиридов помимо таблиц предлагает для определения $K_{п.н}$ также и графики, но мы не видим никакой необходимости в определении $K_{п.н}$ с высокой точностью, что делает предпочтительным применение таблиц.

Коэффициент пульсаций должен, как правило, определяться в точке, лежащей под одним из светильников крайнего ряда, где его значение можно считать максимальным (точку под последним светильником ряда мы считаем нехарактерной). Расчет ведется любым из приемов точечного метода, но раздельно определяются освещенности от светильников, присоединенных к различным фазам сети. Если K_p превышает нормированные значения, то он может быть снижен увеличением числа фаз в линии, уменьшением расстояния между светильниками, присоединенными к различным фазам, или (особенно при лампах типа ДРЛ) установкой в одной точке светильников, присоединенных к двум или трем фазам.

Таблица 5-4

Условия, при которых соблюдаются нормированные значения коэффициента пульсации, отмечены знаком «+»

Расположение светильников и схемы включения ламп	Нормированные значения коэффициента пульсации			
	10%	15%	20%	30%
А. Лампы типа ДРЛ				
Совместная установка двух ламп разных фаз	—	—	—	+
Совместная установка трех ламп разных фаз	+	+	+	+
Б. Люминесцентные лампы				
<i>При любом расположении светильников:</i>				
а) число ламп в светильнике кратное трем, с равномерным распределением между фазами сети	+	+	+	+
б) число ламп в светильнике кратное двум, с включением половины ламп по схеме опережающего и половины—по схеме отстающего тока				
лампы ЛБ и ЛТБ	+	+	+	+
лампы ЛХБ	—	+	+	+
лампы ЛДЦ	—	—	+	+
лампы ЛД	—	—	—	+
в) любое число ламп в светильнике и любая схема включения				
лампы ЛБ и ЛТБ	—	—	—	+
прочие лампы	—	—	—	—
<i>При сплошных линиях светильников и $h \geq 2,0$ м:</i>				
а) трехфазные линии с поочередным включением светильников на разные фазы сети; любые лампы и схемы	+	+	+	+
б) то же, но двухфазные линии				
лампы ЛБ и ЛТБ	+	+	+	+
лампы ЛХБ	—	+	+	+
лампы ЛДЦ и ЛД	—	—	+	+
в) двухфазные линии с поочередным включением светильников на разные фазы сети; число ламп в светильнике кратное двум, с включением половины ламп по схеме опережающего и половины—по схеме отстающего тока; лампы всех типов	+	+	+	+

Чтобы избежать при проектировании индивидуальных расчетов, составляют таблицы, по которым непосредственно можно выбрать решение, удовлетворяющее требованиям в отношении $K_{\text{п}}$.

Случаи, в которых те или иные значения $K_{\text{п}}$ обеспечиваются независимо от отношения расстояния между светильниками к высоте, указаны в табл. 5-4, при составлении которой для сплошных линий светильников мы приближенно считали, что при двух- или трехфазных линиях в освещенности контрольной точки одинаково участвуют лампы соответственно двух или трех фаз. Это допущение отчасти компенсируется тем, что не учитывалось действие остальных линий светильников, уменьшающее величину $K_{\text{п}}$.

5-2. Цилиндрическая освещенность

Уже давно ведутся поиски таких характеристик освещения, которые более полно, чем освещенность, в частности освещенность горизонтальной поверхности, описывали условия освещения в целом.

Одной из возможных характеристик такого рода является цилиндрическая освещенность, которая, будучи предложена позже других, успела, однако, проникнуть в нормы СНиП 1971 г., правда, в качестве только рекомендаций. Расчет цилиндрической освещенности требует применения большого количества таблиц и графиков и излагается нами сокращенно, причем основное внимание уделяется принципиальной стороне вопроса. Мы считаем при этом, что опытный характер внедрения данного понятия и отсутствие еще полной уверенности в целесообразности пользования им, позволяя в большинстве случаев ограничиться весьма приближенной оценкой $E_{\text{ц}}$.

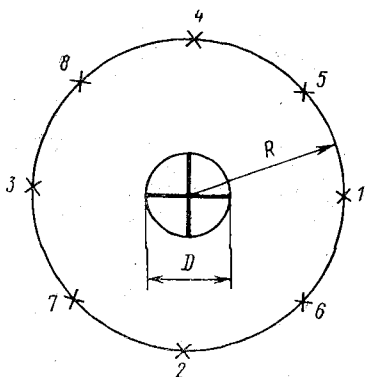


Рис. 5-2. К сопоставлению цилиндрической и вертикальной освещенностей

случаев ограничиться весьма приближенной оценкой $E_{\text{ц}}$.

Понятие средней цилиндрической освещенности (в дальнейшем слово «средняя» мы опускаем) основано на предположении, что для зрения, оценивающего степень насыщенности помещения светом, все азимуты равноценны, воздействие же излучения, источник которого находится на той или иной высоте, пропорционально косинусу угла, образованного падающим лучом с горизонтальной плоскостью. Это приводит к следующему определению цилиндрической освещенности

$$E_{\text{ц}} = \lim_{D, l \rightarrow 0} \left| \frac{F}{\pi D l} \right|, \quad (5-5)$$

где F — световой поток, падающий на боковую поверхность вертикального цилиндра диаметром D и высотой l .

В некоторых случаях цилиндрическая освещенность отождествляется с вертикальной освещенностью или со средней освещенностью четырех поверхностей вертикально расположенного «креста поверхностей», в силу чего уместно начать с сопоставления этих освещенностей для некоторых случаев.

На рис. 5-2 показан элементарный крест поверхностей длиной D и высотой l , описанный вокруг него цилиндр тех же размеров и восемь излучателей, расположенных на уровне креста и удаленных от него на расстояние R .

Пусть включен только излучатель l , создающий освещенность l/R^2 только на одной поверхности креста, т. е. в среднем из всех четырех поверхностей освещенность $l/(4R^2)$. На боковую поверхность цилиндра падает такой же поток, как на его осевую плоскость, т. е. lDl/R^2 , откуда $E_{\text{ц}} = l/(\pi R^2)$.

Аналогично можно найти вертикальную, среднюю вертикальную и цилиндрическую освещенность при включении нескольких излучателей. Когда при увеличении числа излучателей они сливаются в сплошное кольцо, освещенность любой из поверхностей креста можно найти интегрированием и получить выражение $2l'/R$, где l' — сила света кольца с единицы длины. Такова же будет освещен-

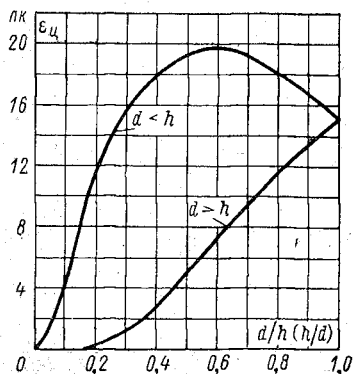


Рис. 5-3. Относительная цилиндрическая освещенность от светильников УСР с рассеивателями (построено по средней кривой $I_{\alpha} = 190 \cos \alpha$)

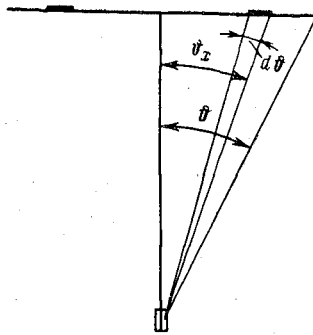


Рис. 5-4. Цилиндрическая освещенность от диска

ность любой элементарной площадки, касательной к образующей цилиндра, а значит, и цилиндрическая освещенность. Если излучателем является неограниченно большая диффузная горизонтальная поверхность или диффузная же полусфера, то и вертикальная освещенность каждой поверхности креста, и средняя вертикальная освещенность, и цилиндрическая освещенность будут, очевидно, равны $R/2 = \pi/2$.

В результате отношение цилиндрической освещенности к средней вертикальной освещенности «креста поверхностей» характеризуется следующими данными:

Работающие излучатели	1	1—4	5—8	1—8	кольцо	полусфера
$E_{\text{ц}}: E_{\text{в}}$	1,27	1,27	0,9	1,06	1,0	1,0

Итак, между цилиндрической, вертикальной и средней вертикальной освещенностью нет определенных соотношений и с увеличением «всесторонности» диффузности освещения все три величины сближаются и даже совпадают.

Как мы уже видели, при одиночном точечном излучателе имеют место соотношения

$$E_{\text{ц}} = \frac{E_{\text{в}}}{\pi} = \frac{E_{\text{г}} \operatorname{tg} \alpha}{\pi} \quad (5-6)$$

при условии, что вертикальная освещенность рассчитана в плоскости, перпендикулярной плоскости падения луча. Для практических расчетов, как один из вариантов, могут быть применены кривые отно-

сительной цилиндрической освещенности $\varepsilon_{ц}$, рассчитанной, как и обычно, для $h = 1$ м и $F = 1000$ лм. В этом случае

$$\varepsilon_{ц} = \frac{\varepsilon_{в}}{\pi} = \frac{\varepsilon_{г} \operatorname{tg} \alpha}{\pi}. \quad (5-7)$$

Пример такой кривой приведен на рис. 5-3.

Если бы расчеты приняли когда-либо массовый характер, то вполне возможно было бы применять пространственные изолюксы условной цилиндрической освещенности.

Определение $E_{ц}$ от излучающих поверхностей представляет затруднения в том отношении, что легко составленное выражение

для $dE_{ц}$ не поддается интегрированию. Однако с помощью ЭВМ МЭИ рассчитаны таблицы, позволяющие довольно легко определить $E_{ц}$ от излучателей прямоугольной формы.

Представляется, однако, более интересным предложенный М. М. Гуторовым графический способ расчета $E_{ц}$ от диффузных поверхностей, распространенный затем М. М. Епанешниковым на некоторые другие случаи. Остановимся на этом способе подробнее.

Пусть элементарный цилиндр (рис. 5-4) освещается коаксиальным ему диффузным диском, граница которого определена углом ϑ .

Согласно закону проекции

меры телесного угла, освещенность от элементарного кольца, видимого из цилиндра под углом $d\omega$,

$$dE_{ц} = \frac{B}{\pi} \sin \vartheta_x d\omega,$$

а так как

$$d\omega = 2\pi \sin \vartheta_x d\vartheta,$$

то

$$dE_{ц} = 2B \sin^2 \vartheta_x d\vartheta$$

и

$$E_{ц} = 2B \int_0^{\vartheta} \sin^2 \vartheta_x d\vartheta = B \left(\vartheta - \frac{\sin 2\vartheta}{2} \right). \quad (5-8)$$

значении $F' = 100 \text{ лм/м}^2$. Пример таких кривых приведен на рис. 5-7.

При необходимости выполнить аналогичное построение для других случаев вычисления могут выполняться в следующем порядке.

1. Общим заданием для построения графиков являются закон, определяющий светораспределение, условное значение $F' = 100 \text{ лм/м}^2$, величины ρ_n , ρ_c и ρ_p , а также h . Ввиду малого влияния h достаточно рассмотреть два крайних значения, например 3 и 12 м.

2. Задаемся последовательно пятью-шестью значениями индекса. Форму помещения принимаем квадратной (в этом случае $i = A/2h$). Дальнейшие операции выполняются для каждого значения i .

3. Пользуясь коэффициентами вида k_{nm} , определяем яркости стен и пола. Коэффициенты k_{nm} должны быть разделены на ρ_n , так как F' — поток, излучаемый потолком, а не падающий на него.

4. По сетке Гуторова или по его же таблицам определяем прямую составляющую $E_{ц}$ от условно-равномерного излучающего потолка.

5. Определяем составляющую $E_{ц}$ от верхней части стен по их яркости и с использованием формулы (5-10).

6. Определяем составляющую $E_{ц}$ от пола аналогично п. 4.

7. Определяем составляющую $E_{ц}$ от нижней части стен аналогично п. 5.

8. Суммированием всех найденных составляющих определяем полное значение $E_{ц}$ и строим соответствующий график.

При пользовании подобными графиками легко может быть найдено значение F' , необходимое для получения заданной величины $E_{ц}$, а именно

$$F' = 100 \frac{E_{ц} k}{E_{ц}}, \quad (5-16)$$

где $E_{ц}'$ — значение цилиндрической освещенности при $F' = 100 \text{ лм/м}^2$ и k — коэффициент запаса.

В тех случаях, когда освещение помещения рассчитывается на горизонтальную освещенность E_r и представляется необходимым проверить, какое значение $E_{ц}$ обеспечивается при заданной величине E_r , наиболее удобны графики, дающие зависимость отношения $E_{ц}/E_r$ при данном светораспределении и значениях ρ_c и ρ_p от индекса помещения (рис. 5-8). При построении таких графиков $E_{ц}$ находят, как описано выше, E_r рассчитывают в обычном порядке, но должны быть отмечены две особенности.

1. Значение h столь мало влияет на отношение $E_{ц}/E_r$, что графики могут быть построены для произвольного среднего значения h , например 5 м.

2. При определении $E_{ц}$, как было указано, учитывается индекс помещения, определенный по высоте светильников над полом, при расчете же E_r — по высоте их над расчетной поверхностью, поэтому значения $E_{ц}$ должны быть заимствованы из графиков для соответственно пересчитанных значений индекса.

Определим, в качестве примера, цилиндрическую освещенность в помещении размерами $A = 18$ м, $B = 12$ м, $H = 4$ м при установке в нем 50 светильников ШОД с лампами ЛБ 2×40 на высоте 3,2 м. Задано $\rho_{\text{н}} = 70\%$, $\rho_{\text{с}} = 50\%$, $\rho_{\text{р}} = 10\%$.

По светораспределению ШОД достаточно близок к случаю $m = 2$.

Индекс помещения $i = 18 \cdot 12 [3,2 (18 + 12)]^{-1} = 2,25$.

По кривым рис. 5-7 находим значение $E_{\text{ц}}' = 30$ лк. Поскольку ШОД излучает в нижнюю полусферу 45%, а в верхнюю 40% потока ламп, то $F' =$
 $= [50 \cdot 2 \cdot 2480 (0,45 + 0,40 \cdot 0,70)] (18 \cdot 12)^{-1} = 840$ лм/м², откуда $E_{\text{ц}} = 30 \frac{840}{100} =$
 $= 250$ лк, если не учитывать коэффициента запаса.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ГЛАВА ПЕРВАЯ. Общие вопросы светотехнических расчетов	
1-1. Задачи и принципы светотехнических расчетов	5
1-2. О точности светотехнических расчетов	8
1-3. Излучатели и их характеристики	10
ГЛАВА ВТОРАЯ. Освещенность точек поверхности	
2-1. Освещенность точек горизонтальной поверхности от точечных излучателей с круглосимметричным светораспределением	14
2-2. Рекомендуемые приемы определения горизонтальной освещенности	18
2-3. Освещенность точек горизонтальной поверхности от светильников с некруглосимметричным светораспределением	22
2-4. Освещенность точек горизонтальной поверхности от линейных излучателей	27
2-5. Освещенность от поверхностей	42
2-6. Освещенность негоризонтальных плоскостей и освещенность от наклонных излучателей	49
2-7. Освещенность от прожекторов	57
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. Средняя освещенность поверхности	
3-1. Характеристика задачи и определение светового потока излучателей	62
3-2. Индекс помещения	66
3-3. Определение первичных потоков	70
3-4. Эффект свода	91
3-5. Распределение светового потока по поверхностям помещения и учет многократных отражений	93
3-6. Коэффициенты использования	101
3-7. Освещенность, светимость и яркость поверхностей помещения	114
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. Методика светотехнических расчетов	
4-1. Общая характеристика и область применения различных методов расчета	117
4-2. Основные формы точечного метода	119
4-3. Основные формы метода коэффициента использования	135
4-4. Коэффициенты μ и z и комбинированный метод расчета	139
4-5. Таблицы удельной мощности и некоторые другие упрощенные приемы расчета	146
4-6. Архитектурно-художественное освещение	157
4-7. Прожекторное освещение	170
4-8. Освещение проездов, дорог и улиц светильниками	181
ГЛАВА ПЯТАЯ. Новые характеристики освещения, расчет которых связан с расчетом освещенности	
5-1. Коэффициент пульсации	187
5-2. Цилиндрическая освещенность	192