

P172510

**В. М. ДАНИЛОВ**

**РАСЧЕТ  
ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ  
ПОМЕЩЕНИЙ**

**СТРОИЗДАТ  
НАРКОМСТРОЯ  
1941**

КНИГА  
В СОХРАННОСТИ

А. М. ДАНИЛЮК

РАСЧЕТ  
ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ  
ПОМЕЩЕНИЙ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
ЛЕНИНГРАД 1941 МОСКВА

*В книге излагаются методы расчета естественной освещенности в любой точке внутри помещения, определения средней освещенности и нахождения размеров световых фонарей различных систем и светопроемов бокового света. Изложение теории сопровождается числовыми примерами, взятыми из практики. К книге приложены расчетные графики автора.*

*Книга предназначена в качестве пособия при проектировании для инженеров и архитекторов, а также для студентов строительных вузов.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Еще совсем недавно светотехника как область строительной физики была совершенно незнакома инженеру и архитектору. Только за последние 15—20 лет, благодаря ряду предложенных методов расчета и теоретических и экспериментальных работ, проектирование естественного освещения помещений нашло свое практическое применение. Это позволило впервые обязать проектировщиков рассчитывать естественное освещение помещений в соответствии с требованиями специально разработанных светотехнических норм. Однако препятствием к широкому применению светорасчетов служит то, что существующие методы хорошо решают лишь задачу проверки условий освещенности помещения, когда размеры светопроемов заданы. Между тем при проектировании едва ли не самой важной задачей является выбор типа световых фонарей и определение размеров светопроемов, при которых создается требуемая нормами освещенность. В настоящей книге, наряду с существующими методами расчета, впервые излагаются разработанные нами приближенные методы определения размеров световых фонарей различных систем. Кроме того, излагается метод непосредственного определения средних значений коэффициента естественной освещенности, определяющего достаточность освещенности помещения при верхнем и комбинированном свете.

Следует отметить, что при построении материала в состав книги включены преимущественно те сведения и методы расчета, которые могут найти применение в практической работе. Этим объясняется, что некоторые методы изложены кратко или только упоминаются с указанием литературных источников, в которых читатель найдет подробное их изложение. Помещенные в книге примеры в большинстве заимствованы из практики проектирования естественного освещения промышленных зданий.

В заключение приношу благодарность проф. А. А. Гершун за ряд ценных указаний, позволивших устранить некоторые дефекты изложения, и президиуму ЛенНИТО Строителей, по инициативе которого издается книга.

*Автор*

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

### . Величины светотехнические

- $F$  — световой поток (люмен, *лм*);
- $I$  — сила света (международная свеча, *св*);
- $H$  — яркость (стильб, *сб*);
- $E$  — освещенность (фот, *ф* и люкс, *лк*);
- $\rho$  — коэффициент отражения;
- $\tau$  — коэффициент пропускания;
- $\omega$  — телесный угол (стерадиан);
- $e$  — коэффициент естественной освещенности (к. е. о.);
- $\bar{e}$  — среднее значение к. е. о.;
- $f$  — площадь светового профиля.

### 2. Величины геометрические

- $A$  — расчетная ширина помещения (рабочей плоскости);
- $B$  — расчетная длина помещения (рабочей плоскости);
- $l$  — расстояние между осями фонарей;
- $h$  — высота от уровня рабочей плоскости до потолка;
- $h_1$  — высота от уровня рабочей плоскости до нижней грани светопроема;
- $h_2$  — высота от уровня рабочей плоскости до верхней грани светопроема;
- $d = (h_1 - h)$  — высота бортика светового фонаря;
- $h_0 = (h_1 + h_2)$  — высота светопроема (вертикальная проекция);
- $a_0$  — ширина светопроема фонаря (горизонтальная проекция);
- $b_0$  — длина светопроема фонаря или ширина окна;
- $C$  — продольная ось (центр) светопроема;
- $S$  — площадь остекления светопроема (фонаря);
- $S_0 = A \cdot B$  — площадь потолка;
- $n$  — число светопроемов (фонарей).

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей светотехнических расчетов является определение формы, размеров и расположения световых фонарей и окон, при которых в помещениях создаются условия освещения, достаточные для успешного проведения в них производственных процессов, учебных занятий и т. п.

Освещение помещений естественным светом всегда составляло одну из главных забот зодчего всех времен и стилей. Но пока дело касалось обычных общественных и жилых зданий вопросы освещения помещений при помощи окон решались на основе личного опыта и наблюдений условий освещения в уже построенных зданиях. На основе векового опыта создавались определенные правила устройства окон в виде цифровых соотношений между размерами световых проемов и размерами помещения. При этом едва ли не самую трудную задачу представляло установление достаточности освещенности того или иного помещения. Так, в своем знаменитом трактате об архитектуре, в разделе о размерах дверей и окон, Андреа Палладио пишет: <sup>1</sup> „При выведении окон необходимо иметь в виду, чтобы они пропускали света не более и не менее того, что требуется, и чтобы они были и не слишком часты и не слишком редки. При этом необходимо считаться с размерами комнаты, получающей через них свет, ибо очевидно для всех, что для полного освещения большой комнаты необходимо гораздо больше света, чем для малой; если окна сделать меньше и расставить их реже, чем требует помещение, то там будет темно; если же их сделать слишком большими, то в комнатах почти невозможно будет жить, так как в них свободно будут проникать жар и холод воздуха, вследствие чего в комнатах, в зависимости от времени года, будет либо чрезмерно жарко, либо чрезмерно холодно, если только это не будет смягчаться благодаря более благоприятному положению комнаты по отношению к солнцу“. Далее Палладио приводит рекомендуемые им размеры окон в зависимости от размеров помещения и этажа, в котором они располагаются.

В другом, не менее знаменитом трактате об архитектуре того же времени „Десять книг о зодчестве“ Леон-Баттиста Альберти <sup>2</sup> пишет: „Окна должны быть в помещении как для доступа света, так и для обновления воздуха. Они должны быть соразмерены с нуждами места и толщиной стены так, чтобы не пропускать света ни больше, ни меньше чем нужно, и не быть более частыми или более редкими, чем это тре-

---

<sup>1</sup> Андреа Палладио, Четыре книги об архитектуре, изд. Всесоюзной Академии архитектуры, 1936, стр. 65—66.

<sup>2</sup> Леон-Баттиста Альберти, Десять книг о зодчестве, изд. Всесоюзной Академии архитектуры, 1935, стр. 35—36.

буется. Во всяком случае, откуда бы ты ни хотел уловить свет, должно быть место, откуда тебе свободно видно небо. Все отверстия, которые сделаны ради света, никоим образом нельзя помещать внизу. Ведь мызираем на свет лицом, а не ногами; иначе получится, что тот или другой человек заслонит свет, и остальное пространство становится темнее. Этого неудобства не бывает, когда свет падает сверху“.

Приведенные определения, весьма характерные для своего времени, не дают никакого представления о требующейся степени освещенности помещения, без знания которой не представляется возможным определение размеров окон. Однако весьма знаменательно, что Леон-Баттиста Альберти прямо указывает на то, что освещение помещения создается участком небосвода, видимым через светопроем, т. е. как раз на тот принцип, который положен в основу всех существующих методов расчета естественного освещения помещений. Приводимые этими авторами цифровые соотношения размеров окон и помещений носят слишком частный характер, так как отражают весьма благоприятные климатические условия Италии.

Цифровые соотношения размеров окон, основанные на вековом опыте, надолго внедрились в практику и служили единственным способом определения размеров окон и критерием достаточности их размеров.

В связи с широким развитием строительства фабрично-заводских зданий возникла необходимость освещения естественным светом помещений больших размеров, при которых боковой свет либо вообще оказывается недостаточным, либо создает распределение светового потока с характерным резким падением освещенности в глубине помещения, не удовлетворяющим требованиям производства. Так возникли новые приемы освещения помещений при помощи световых фонарей разнообразных типов, позволяющие уже полностью решать задачи освещения больших внутренних пространств. Вместе с тем исследованиями с полной определенностью установлено, что повышение освещенности рабочих мест влечет за собой повышение производительности труда, снижение числа несчастных случаев и вообще улучшение санитарно-гигиенических условий труда. Повышенные требования освещенности рабочих мест влекут за собой увеличение площади остекления, достигающей порою значительной величины (до 40—60% от площади пола). Однако увеличение площади остекления влечет за собой повышение эксплуатационных расходов (отопление, ремонт, очистка и т. п.). Кроме того, при больших площадях остекления появляется опасность перегрева помещений в летнее время, что особенно относится к южным местностям.

Между тем приемы и правила определения размеров окон бокового света, дающие в обычных условиях более или менее удовлетворительные результаты, оказываются при решении задач верхнего света почти полностью непригодными. Обоснованное и надежное решение задач освещения помещений естественным светом возможно только при помощи светотехнических расчетов, основанных на законах фотометрии.

Светотехнические расчеты естественного освещения помещений ставят своей задачей:

- 1) определение освещенностей, которые создаются световыми фонарями или окнами различных систем и типов на уровне рабочей плоскости, и

2) определение тех средств, при помощи которых в помещении создаются требуемые условия освещенности в зависимости от характера и назначения помещения.

Для решения этих задач прежде всего необходимо знание основ фотометрии, на законах которой основаны все существующие методы расчета, и природы естественного освещения. Эти вопросы кратко изложены в первых двух главах книги.

В главах III и IV изложены современные методы определения как освещенности в отдельной точке внутри помещения, так и средних освещенностей, характеризующих собою условия освещения рабочей плоскости при верхнем и комбинированном свете.

В главе V изложены методы расчета световых фонарей и окон, позволяющие непосредственно определять размеры светопроемов.

Наконец, глава VI посвящена краткому изложению нормативных данных и приемам расчета естественного освещения помещений.

## Глава I

# ОСНОВНЫЕ СВОТОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## § 1. Световая энергия и световой поток

Прежде всего необходимо познакомиться с понятиями о световой энергии и световом потоке, являющимися основными величинами в фотометрии.

Представим себе тело, накаленное до некоторой очень высокой температуры. Такое тело излучает в окружающее пространство более или

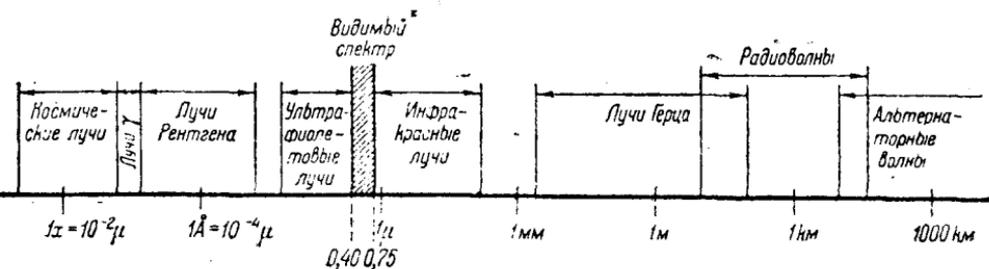


Рис. 1. Спектр лучистой энергии.

менее мощный поток лучистой энергии, который с физической точки зрения рассматривается состоящим из различного вида излучений, отличающихся только длиной волн колебаний. Длины волн этих колебаний в общем спектре лучистой энергии колеблются в чрезвычайно широких пределах, а именно, от тысячных долей миллимикрона<sup>1</sup> до сотен километров. Схематическая картина всего спектра лучистой энергии с названием отдельных видов излучений приведена на рис. 1. Однако

<sup>1</sup> Для измерения малых длин волн общеприняты следующие единицы длины: микрон  $\mu = 10^{-3} \text{ мм}$ ; миллимикрон  $\text{ш}\mu = 10^{-6} \text{ мм}$ ; ангстрем  $\text{Å} = 10^{-7} \text{ мм}$ .

только незначительная часть лучистой энергии, лежащая в пределах длины волн колебаний от  $\lambda \approx 0,40 \mu$  до  $\lambda \approx 0,75 \mu$ , действуя на глаз человека, вызывает ощущение света. Эта часть спектра называется областью видимых излучений, а соответствующая ей часть лучистой энергии — световой энергией. Следует подчеркнуть, что световая энергия определяется именно вызываемым ею зрительным ощущением. В пределах этой видимой части спектра лучистой энергии излучения различной длины колебаний вызывают и различные световые ощущения от фиолетового ( $\lambda \approx 0,40 \mu$ ) до красного ( $\lambda \approx 0,75 \mu$ ) цветов. Каждому излучению с определенной длиной волны соответствует своя определенная цветность. Такие излучения определенной длины волны принято называть монохроматическими или одноцветными излучениями. Между указанными границами видимого спектра, т. е. в пределах от  $\lambda \approx 0,40 \mu$  до  $\lambda \approx 0,75 \mu$ , располагается неопределенно большое число излучений, цветность которых постепенно переходит от фиолетовой группы к синей, затем от синей к зеленой, далее к желтой, оранжевой и, наконец, к красной группе излучений. Все прочие виды излучений, невидимые для глаза, занимают свои места справа и слева от спектра видимых излучений (рис. 1). Зависимость цвета от длины волны колебаний приведена в табл. 1.

Таблица 1

Цветные участки спектра видимых излучений

Наименование цвета	Длина волны в микронах ( $\mu$ )	Наименование цвета	Длина волны в микронах ( $\mu$ )
Фиолетовый . . . . .	0,39—0,43	Желто-зеленый . . . . .	0,53—0,56
Синий . . . . .	0,43—0,47	Желтый . . . . .	0,56—0,59
Сине-зеленый . . . . .	0,47—0,50	Оранжевый . . . . .	0,59—0,62
Зеленый . . . . .	0,50—0,53	Красный . . . . .	0,62—0,76

Несмотря на то, что видимая часть спектра располагается в незначительном промежутке длин волн, всего в пределах от  $\lambda = 0,39 \mu$  до  $\lambda = 0,76 \mu$ , получаемое зрительное ощущение света при попадании световой энергии на сетчатку глаза зависит не только от мощности излучения, но также и от длины волн колебаний. Как показали исследования, при одинаковой интенсивности различных монохроматических излучений наибольшее зрительное восприятие создают желто-зеленые лучи с длиной волны  $\lambda = 0,555 \mu$ . При увеличении или уменьшении длины волны по сравнению с  $\lambda = 0,555 \mu$  зрительное восприятие резко уменьшается, падая к границам видимой части спектра до весьма малых величин. Поэтому значение крайних частей видимого спектра излучений для целей освещения незначительно. Если принять чувствительность глаза к лучам с длиной волны  $\lambda = 0,555 \mu$  за единицу, то зависимость зрительного восприятия от длины волны колебаний представится кривой, изображенной на рис. 2 и носящей название кривой относительной видимости излучения.

Интенсивность излучения лучистой энергии может определяться количеством энергии, посылаемой накалившимся телом в единицу времени. Эта величина, называемая мощностью лучистой энергии, измеряется в эргах в секунду или в джоулях в секунду (в ваттах). Однако, как мы видели выше, одни и те же количества энергии разных цветов (т. е. излучений с разной длиной волны колебаний) производят на глаз человека совершенно различные зрительные ощущения. Следовательно, указанные единицы измерения мощности лучистой энергии непосредственно не могут служить характеристикой мощности световой энергии.

Мощность световой энергии, оцениваемая по производимому ею зрительному ощущению, может быть определена следующим образом. Если мы умножим мощность каждого монохроматического излучения на величину его относительной видимости и затем просуммируем получаемые таким образом произведения в пределах видимой части спектра, то, очевидно, получим мощность лучистой энергии, оцениваемую уже по производимому ею на нормальный глаз человека световому ощущению. Такая визуальная величина лучистого потока называется световым потоком и является характеристикой именно световой энергии. Из этого следует, что световой поток определяется как величина не только физическая, но и физиологическая, поскольку измерение ее основывается на суждениях глаза человека.

Единицей светового потока в СССР является люмен (лм), точное значение которого определяется по эталонным электрическим лампам накаливания, выверенным в соответствии с международным соглашением и хранимым Всесоюзным институтом метеорологии и стандартизации (б. Главной палатой мер и весов). Таким образом единица светового потока — люмен — принята совершенно условно.

Полученные из ряда исследований для монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda = 0,555 \mu$  (для которой величина относительной видимости равна единице) данные показывают, что между условной единицей светового потока (люмен) и энергетической (ватт) имеется следующее наиболее вероятное соотношение: 1 люмен = 0,00161 ватт.

## § 2. Сила света

В общем случае световой поток, излучаемый некоторым источником света, распределяется в пространстве неравномерно. Вследствие этого одна только величина светового потока не может полностью охарактеризовать этот источник света. Для полной характеристики излучения

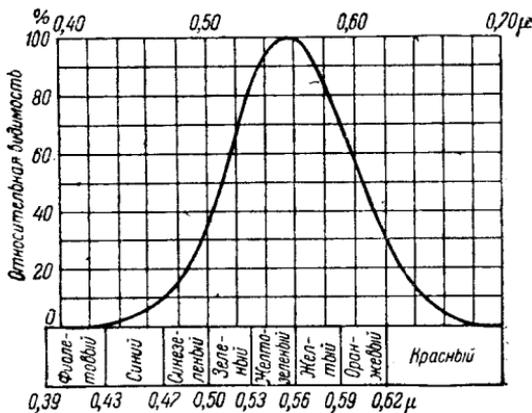


Рис. 2. Зависимость относительной видимости нормального глаза от длины волны излучений.

необходимо знать распределение плотности светового потока в пространстве, т. е. пространственную плотность светового потока по различным направлениям, которую принято называть силой света источника. Эта последняя величина может быть найдена следующим образом.

Представим себе некоторый точечный источник света, т. е. такой, который обладает весьма малыми размерами по сравнению с расстоянием до освещаемой поверхности. Проведем из центра источника света сферу, на внутреннюю поверхность которой, очевидно, и будет падать весь световой поток, излучаемый этим источником света. Вырежем на поверхности шара небольшую площадку  $ds$ , в пределах которой световой поток можно считать распределенным равномерно. Если мы из центра сферы через контур площадки  $ds$  проведем коническую поверхность,

то действующий на нее световой поток окажется заключенным внутри этого пространственного или телесного угла. Величина светового потока, приходящаяся на единицу телесного угла, характеризует собою плотность светового потока или силу света по данному направлению. Если обозначить через  $d\omega$  — телесный угол, охватывающий площадку  $ds$ , и через  $dF$  — световой поток, заключенный в этом телесном углу и распределенный в нем равномерно, то сила света  $I$  по данному направлению будет равна:

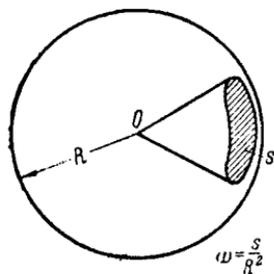


Рис. 3. Схема телесного угла.

$$I = \frac{dF}{d\omega} . \quad (1)$$

Входящая в это выражение величина телесного угла (рис. 3) определяется отношением площади участка поверхности шара  $ds$ , вырезаемого образующими телесного угла, к квадрату радиуса шара (вершина телесного угла при этом должна совпадать с центром шара), т. е.

$$d\omega = \frac{ds}{R^2} . \quad (2)$$

Единицей телесного угла является стерadian, получающийся тогда, когда телесный угол вырезает на поверхности шара единичного радиуса ( $R = 1,0 \text{ м}$ ) участок площадью, равной единице ( $s = 1,0 \text{ м}^2$ ).

Единицей силы света является международная свеча ( $св$ ), которая равна силе света точечного источника, равномерно излучающего внутри телесного угла в один стерadian световой поток в один люмен.

### § 3. Освещенность

Выше мы видели, что сила света, излучаемая точечным источником света, представляет собою пространственную плотность светового потока, т. е. величину светового потока, приходящуюся на единицу пространственного или телесного угла. В светотехнике весьма большое применение имеет другая величина, определяющая собою поверхностную плотность светового потока, т. е. величину светового потока, приходящуюся на единицу площади освещаемой поверхности. Если световой

поток распределяется по поверхности неравномерно, то величина поверхностной плотности, очевидно, будет равна отношению элементарного светового потока  $dF$  к площади элементарной площадки  $ds$ , т. е.

$$E = \frac{dF}{ds}. \quad (3)$$

Величина этой поверхностной плотности светового потока, падающего на освещаемую поверхность, называется освещенностью.

Если световой поток излучается точечным источником света, то освещенность может быть выражена через силу света следующим образом. Предположим, что на элементарную площадку  $ds$  от точечного источника света под углом  $\vartheta$  к нормали к площадке падает световой луч  $OM$  (рис. 4). Сила света источника по направлению  $OM$  равна  $I$  свечей. В таком случае величина светового потока, падающего на освещаемую площадку, будет равна  $dF = I \cdot d\omega$ . Входящая в это равенство величина телесного угла  $d\omega$  определяется следующим образом. Из точки  $O$  (источника света), как из центра, проведем две поверхности — одну коническую, охватывающую площадку  $ds$ , и вторую шаровую с радиусом, равным  $OM = R$ . Коническая поверхность вырежет на шаровой поверхности площадку  $ds' = ds \cdot \cos \vartheta$ , так как нормаль к площадке  $ds$  образует с радиусом  $OM$  угол  $\vartheta$ . При этом величина телесного угла будет равна

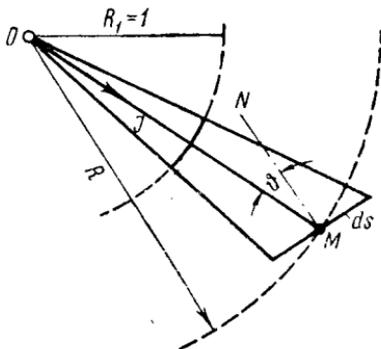


Рис. 4. Зависимость между освещенностью и силой света.

$$d\omega = \frac{ds'}{R^2} = \frac{ds \cdot \cos \vartheta}{R^2},$$

а величина светового потока

$$dF = \frac{I \cdot ds \cdot \cos \vartheta}{R^2}.$$

Подставляя найденное значение  $dF$  в выражение (3), получим:

$$E = \frac{dF}{ds} = \frac{I \cdot ds \cdot \cos \vartheta}{ds \cdot R^2} = \frac{I}{R^2} \cos \vartheta. \quad (4)$$

Единицей измерения освещенности является фот ( $\phi$ ). Освещенность в один фот получается, если световой поток в один люмен падает на освещаемую площадку в один квадратный сантиметр и притом равномерно по ней распределяется. Очевидно, что 1 фот равен 1 люмену на  $1 \text{ см}^2$ .

Для целей практики фот оказывается слишком велик. Практически пользуются другой единицей освещенности — люксом ( $\text{лк}$ ). Освещенность в один люкс получается, если световой поток в один люмен падает, равномерно распределяясь, на площадь в один квадратный метр. Таким образом 1 люкс равен 1 люмену на  $1 \text{ м}^2$ . Легко видеть, что 1 фот равен 10 000 люкс.

## § 4. Яркость. Закон Ламберта

До сих пор мы рассматривали точечные источники света, т. е. такие размеры которых малы по сравнению с расстоянием до освещаемой площадки. В практике, однако, существуют и источники света в виде светящихся поверхностей. Такие источники света, которые самостоятельно излучают в пространство световой поток, мы будем называть первичными. Примерами таких первичных источников света являются солнце и источники искусственного света.

Однако практически световой поток может излучаться в пространство и через посредство тех или иных тел, находящихся вне первичного источника света. Это явление имеет место тогда, когда световой поток, падая от первичного источника света на какое-либо тело, отражается от его поверхности или проходит через него, если тело представляет собою светопрозрачную среду. Такие поверхности, независимо от того, отражают ли они световой поток или пропускают его сквозь себя или, наконец, излучают его самостоятельно, называются в светотехнике светящимися поверхностями.

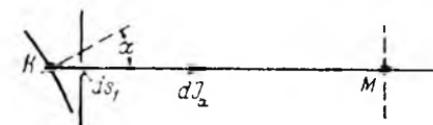


Рис. 5. Схема определения яркости (по Фабри).

Представим себе точку  $M$ , находящуюся на некотором расстоянии от светящейся поверхности (рис. 5). Выберем на этой светящейся поверхности точку  $K$  и соединим ее с точкой  $M$  прямой, которая составит с нормалью к светящейся поверхности угол  $\alpha$ . Ограничим теперь источник света непрозрачным экраном, имеющим весьма малое отверстие  $ds_1$ . Этот экран помещаем возле источника света таким образом, чтобы центр диафрагмы располагался на линии  $MK$ , а плоскость экрана была перпендикулярна к этой линии. Диафрагмированный таким образом источник света имеет в направлении  $MK$  силу света  $dI_\alpha$ . Отношение

$$B = \frac{dI_\alpha}{ds_1}$$

характеризует собою силу света с единицы поверхности в направлении  $MK$  и называется яркостью в данном направлении. Но действующая поверхность источника равна  $ds = \frac{ds_1}{\cos \alpha}$ , откуда получаем, что

$$B = \frac{dI_\alpha}{dc \cdot \cos \alpha} \quad (5)$$

Если каждый квадратный сантиметр равномерно светящейся плоской площадки создает силу света в одну свечу, то яркость такой площадки в перпендикулярном к ней направлении равна единице, которая носит название *стильб (сб)*.

Рассмотрим теперь весьма важный закон, известный под названием **закона Ламберта** и заключающийся в том, что при изменении силы света по закону косинуса, т. е. при  $I_\alpha = I \cdot \cos \alpha$ , яркость светящейся

площадки будет одной и той же во всех направлениях. Действительно, представим себе, что небольшая площадка  $ds$  светится так, что сила света  $I_\alpha = I \cdot \cos \alpha$ , где  $I$  — сила света по направлению нормали к площадке. Если мы будем определять силу света по различным направлениям и откладывать ее в произвольном масштабе от центра площадки по соответственным направлениям, то, соединяя концы этих отрезков кривой, получим для кривой силы света в плоскостях, перпендикулярных к площадке, окружность (рис. 6). Такие кривые силы света образуют в пространстве так называемое фотометрическое тело, которое в данном случае будет, очевидно, шаром. Если  $I_\alpha = I \cdot \cos \alpha$ , то

$$\frac{I_\alpha}{I} = \cos \alpha.$$

Так как

$$\frac{ds_1}{ds} = \cos \alpha,$$

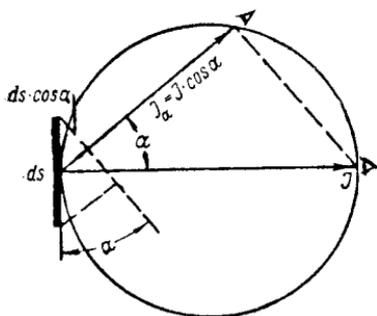


Рис. 6. Закон Ламберта.

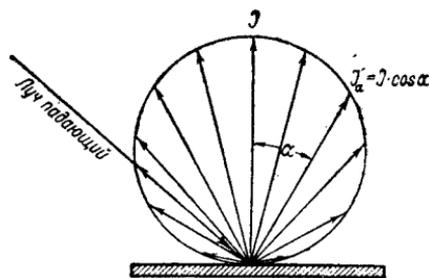


Рис. 7. Яркость рассеивающей поверхности.

то

$$\frac{dI_\alpha}{dI} = \frac{ds_1}{ds},$$

откуда

$$B = \frac{dI_\alpha}{ds_1} = \frac{dI}{ds} = \text{const.}$$

Полученное равенство говорит, что если  $I_\alpha = I \cdot \cos \alpha$ , то светящаяся поверхность характеризуется одинаковой яркостью во всех направлениях (рис. 7).

## § 5. Плотность свечения

Предположим, что светящаяся поверхность излучает световой поток отдельными своими участками неравномерно. Для характеристики светящейся поверхности необходимо знать поверхностную плотность светового потока. Величину светового потока, посылаемого в пространство единицей светящейся поверхности, называют плотностью свечения. Если в пределах некоторой элементарной площадки  $ds$  светящейся поверхности излучается световой поток  $dF$ , плотность свечения будет равна:

$$R = \frac{dF}{ds}. \quad (6)$$

Легко видеть, что плотность свечения представляет собою величину, тождественную с освещенностью. Разница состоит лишь в том, что освещенность характеризует собою световой поток, падающий на поверхность, а плотность свечения — световой поток, излучаемый светящейся поверхностью. Так же, как и освещенность, плотность свечения не имеет направления своего действия и представляет собою просто величину светового потока, равномерно излучаемого в пространство единицей площади светящейся поверхности.

Единицей измерения плотности свечения является радфот ( $pf$ ), который получается, если 1 квадратный сантиметр светящейся поверхности отсылает в пространство световой поток, равный 1 люмену.

## § 6. Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения света

В общем случае при падении на освещаемую поверхность часть светового потока  $F_{отр}$  отражается от нее, часть потока  $F_{пр}$  проходит сквозь среду и, наконец, часть потока  $F_{погл}$  поглощается ею. На основании закона сохранения энергии сумма этих трех потоков должна быть равна световому потоку  $F$ , падающему на тело, т. е.

$$F = F_{отр} + F_{пр} + F_{погл}. \quad (7)$$

Разделив обе части этого равенства на  $F$ , получим:

$$1 = \frac{F_{отр}}{F} + \frac{F_{пр}}{F} + \frac{F_{погл}}{F}.$$

Входящее в это выражение отношение  $\frac{F_{отр}}{F}$  обозначается через  $\rho$  и называется коэффициентом отражения. Соответственно отношение

$\frac{F_{пр}}{F} = \tau$  называется коэффициентом пропускания и, наконец, отношение

$\frac{F_{погл}}{F} = \alpha$  — коэффициентом поглощения. При этом уравнение для общего потока можно переписать в следующем виде:

$$1 = \rho + \tau + \alpha. \quad (8)$$

С практической точки зрения нас в дальнейшем будут интересовать главным образом коэффициенты отражения и пропускания, к рассмотрению которых и переходим.

1. *Коэффициент отражения.* На величину и характер отраженного светового потока прежде всего влияет строение и окраска отражающей поверхности. При этом различают следующие три основных типа отражения: а) зеркальное (направленное), б) рассеянное и в) смешанное.

Зеркальное отражение характеризуется тем, что луч отраженный и луч падающий лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения луча, причем угол падения равен углу отражения (рис. 8, а). Характерной особенностью зеркального отражения является то, что при рассматривании поверхность кажется темной по всем направлениям, за исключением направления отраженного светового луча.

Рассеянное отражение характеризуется тем, что отраженный световой поток рассеивается по всем направлениям. При этом распределение светового потока не зависит от направления луча, падающего на отражающую поверхность. В случае идеального рассеивания отражающая поверхность будет казаться одинаково яркой по всем направлениям (рис. 8, б).

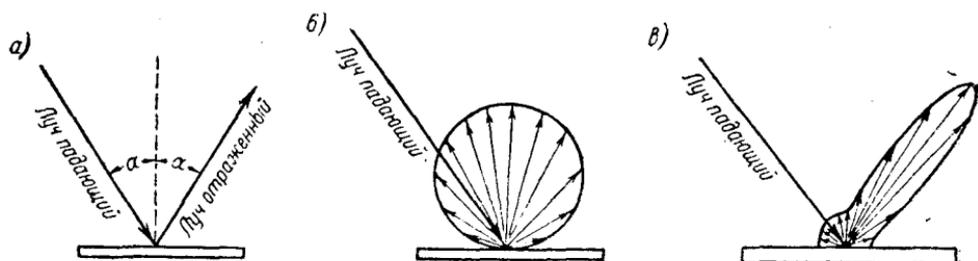


Рис. 8. Схемы отражения светового потока.

Промежуточным типом является смешанное отражение, характеризующееся тем, что луч, падающий на поверхность, отражается частично по принципу зеркального и частично по принципу рассеянного отражения (рис. 8, в). Этот тип отражения наиболее часто встречается в повседневной практике, так как в жизни нет ни идеально зеркального, ни идеально рассеянного отражения. Поэтому чем больше отражающая поверхность будет приближаться к идеальному зеркалу, тем больше отражение будет приближаться к зеркальному и наоборот.

В табл. 2 приведены численные значения коэффициента отражения  $\rho$  для встречающихся в строительной практике рассеивающих поверхностей.

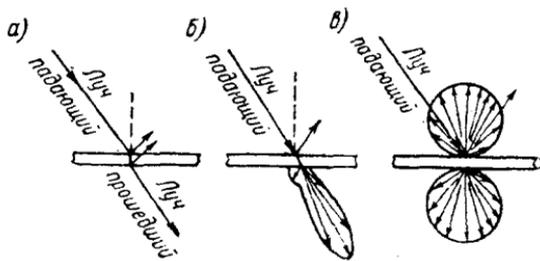


Рис. 9. Схемы пропускания светового потока.

Значения коэффициента отражения  $\rho$

Таблица 2

Поверхность рассеивания	Коэффициент отражения $\rho$	Поверхность рассеивания	Коэффициент отражения $\rho$
Чистый гипс . . . . .	0,85	Дерево свежее . . . . .	0,30—0,40
Белая бумага . . . . .	0,75	Кровельный толь . . . . .	0,10
Штукатурка известковая, тощая . . . . .	0,40	Черный бархат . . . . .	0,004

2. Коэффициент пропускания. Если тело представляет собою прозрачную среду, то, как указано выше, часть падающего на него свето-

ного потока пропускается им. Так же, как и при отражении светового потока, в зависимости от характера поверхностей, ограничивающих среду, могут иметь место следующие три вида пропускания: а) направленное, б) рассеянное и в) смешанное.

Направленное пропускание происходит тогда, когда луч, прошедший среду, имеет то же направление, что и луч, падающий на среду (рис. 9, а).

Рассеянное пропускание происходит тогда, когда прошедший среду световой луч рассеивается во все стороны, причем при идеальном рассеивании поверхность по всем направлениям кажется одинаково яркой (рис. 9, б).

Смешанное пропускание происходит тогда, когда одновременно имеет место частично направленное и частично рассеянное пропускание (рис. 9, в).

В табл. 3 даны коэффициенты пропускания  $\tau$  для некоторых сортов стекла.

Таблица 3

Величина коэффициента пропускания  $\tau$

Вид стекла	Коэффициент пропускания $\tau$	Вид стекла	Коэффициент пропускания $\tau$
Простое оконное . . .	0,90	Матовое . . . . .	0,73
Двойное оконное . . .	0,88	Молочное . . . . .	0,50—0,40
Литое и прессованное .	0,85	Монье . . . . .	0,75—0,65
Рубчатое . . . . .	0,77		

## Глава II

### ИСТОЧНИКИ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА

Под естественным или „дневным“ светом в светотехнике принято понимать свет, создаваемый солнечным и небесным излучениями.

Солнце, как первичный источник света, излучает в мировое пространство мощный поток лучистой энергии, часть которого, пройдя земную атмосферу, достигает поверхности земли в виде прямого солнечного света. Однако при прохождении через толщу атмосферы мельчайшие ее частицы рассеивают часть лучистой энергии путем многократного отражения. Эта отраженная часть лучистой энергии вызывает свечение атмосферы, создавая, так называемое, небесное излучение. Таким образом часть этого отраженного потока лучистой энергии достигает поверхности земли, но уже в виде рассеянного или диффузного света.

В результате освещения естественным светом на открытом месте поверхности земли создается:

- а) прямым солнечным светом и
- б) диффузным светом небесного излучения.

Освещение помещений естественным светом осуществляется путем устройства в стенах или перекрытиях здания световых проемов, через которые световой поток и проникает внутрь помещения. Эти световые проемы, пропускающие внутрь помещения световой поток, являются

вторичными источниками света, всецело зависящими от условий освещения, создающихся солнечным и небесным излучениями. Однако, как это будет подробно изложено ниже, ввиду крайнего непостоянства действия прямого солнечного света, в светотехнических расчетах естественного освещения помещений учитывается только диффузный свет небесного излучения. Для правильного и ясного понимания природных условий освещенности необходимо знание важнейших свойств солнечного и небесного излучений.

## § 7. Солнечное излучение

Солнце представляет собою огромных размеров раскаленное тело (около 150 000 км в поперечнике), поверхностная температура которого составляет около 6000°. Обладая столь высокой температурой, солнце излучает во все стороны в мировое пространство колоссальное коли-

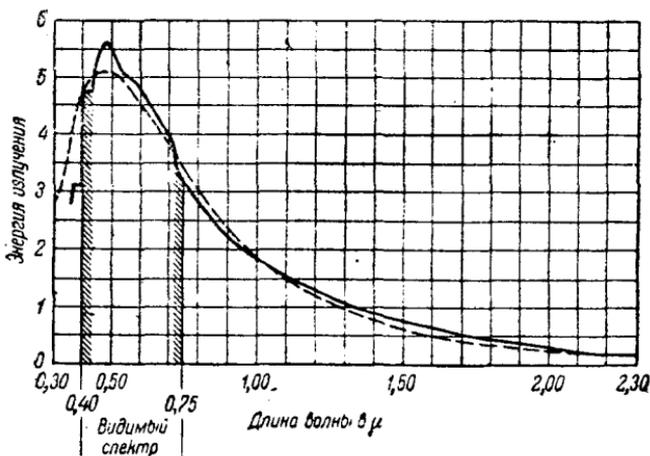


Рис. 10. Распределение энергии в спектре солнца (сплошная кривая) и абсолютно черного тела (пунктирная кривая) при температуре 6000°.

чество лучистой энергии, из которого только ничтожная доля, в виде одной двухбillionной части, падает на поверхность земного шара. Солнце излучает весьма богатый по своему спектральному составу комплекс лучистой энергии, от коротковолновых (ультрафиолетовых) до длинноволновых (инфракрасных) излучений. Распределение энергии в спектре солнечного излучения отличается неравномерностью, приближаясь по своему характеру к кривой распределения энергии для абсолютно черного тела, накаливаемого до величины поверхностной температуры солнца, т. е. до 6000° (рис. 10). Из этого рисунка видно, что максимум энергии располагается в пределах видимой части спектра (от  $\lambda \approx 0,40 \mu$  до  $\lambda \approx 0,75 \mu$ ) в области зеленых лучей при длине волны 0,47 — 0,56  $\mu$ . Вследствие такого неравномерного распределения около 43% всей энергии приходится на инфракрасные лучи, около 52% — на видимые лучи и только около 5% — на ультрафиолетовые.

Солнце, как источник света, характеризуется непрерывностью и достаточным постоянством своего действия. Мощность солнечного излучения, измеряемая в малых калориях, приходящихся на 1 квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной к потоку, в течение одной минуты, принимается постоянной на границе земной атмосферы и называется солнечной постоянной. Согласно измерениям ряда исследователей величина солнечной постоянной принимается равной  $1,95 \text{ кал/мин} \cdot \text{см}^2$ .

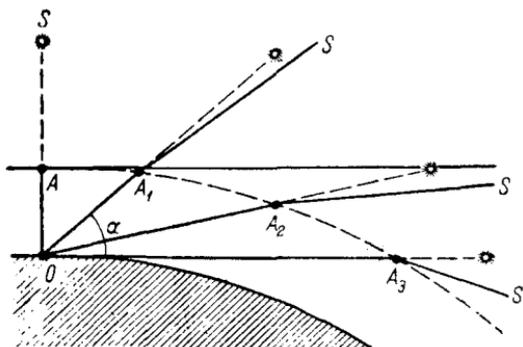


Рис. 11. Схема прохождения солнечного луча через земную атмосферу.

Сказанное относится к солнечному излучению на границе земной атмосферы в безвоздушном пространстве. При прохождении через воздушную оболочку земли — атмосферу — солнечное лучеиспускание претерпевает ряд существенных изменений, при которых однородный солнечный луч в значительной мере теряет свои первоначальные свойства. Эти изменения обуславливаются целым рядом факторов, зависящих от структуры и свойств атмосферы в отношении проходящего через него света.

Основными причинами изменения солнечного излучения в качественном и количественном отношениях являются:

- 1) поглощение света атмосферой и
- 2) рассеивание света атмосферой (молекулами и взвешенными частицами).

Для большей ясности изложения рассмотрим сначала явления, происходящие при прохождении солнечных лучей через так называемую идеальную атмосферу, т. е. без учета содержащихся в ней примесей (пыль, копоть, дым, водяные пары и т. п.).

Мощность солнечных излучений, достигающих поверхности земли, обычно называется солнечной радиацией, которая, как и солнечная постоянная, выражается в  $\text{кал/мин} \cdot \text{см}^2$ . Мощность солнечной радиации зависит прежде всего от длины пути солнечных лучей при прохождении их через земную атмосферу. Длина же этого пути, в свою очередь, зависит от высоты стояния солнца, под которой принято понимать угол стояния солнца по отношению к горизонту (рис. 11). Если принять величину солнечной радиации при

Таблица 4  
Состав лучистой энергии (в %) в зависимости от высоты стояния солнца

Цвет излучения	Высота стояния солнца $h_{\odot}$				
	90°	60°	30°	10°	5°
Синий (0,39—0,47 $\mu$ ) .	18	17	15	6	0
Зеленый (0,47—0,56 $\mu$ ) .	24	24	23	18	2
Желтый (0,56—0,62 $\mu$ ) .	27	27	27	28	28
Красный (0,62—0,76 $\mu$ ) .	31	32	35	48	70

всего от длины пути солнечных лучей при прохождении их через земную атмосферу. Длина же этого пути, в свою очередь, зависит от высоты стояния солнца, под которой принято понимать угол стояния солнца по отношению к горизонту (рис. 11). Если принять величину солнечной радиации при

стоянии солнца в зените, т. е. при  $h_{\odot} = 90^{\circ}$ , за 100%, то, по данным Экснера, при высоте стояния солнца  $h_{\odot} = 11,5^{\circ}$  величина радиации, достигающей поверхности земли, составляет всего только 50%, а при  $h_{\odot} = 7,5^{\circ} — 25\%$ . Когда солнце находится над горизонтом, на поверхность земли падает только 0,5% излучений в зените.

Кроме того, распределение лучистой энергии по отдельным участкам спектра с уменьшением высоты стояния солнца изменяется так, что максимум энергии смещается в сторону длинноволновых радиаций. Происходит это вследствие того, что коэффициент пропускания уменьшается с уменьшением длины волны излучения. Распределение состава лучистой энергии в зависимости от высоты стояния солнца иллюстрируется данными, приведенными в табл. 4.

Данные табл. 4 показывают, что при малых высотах стояния солнца процентное содержание коротковолновой радиации (синих, фиолетовых и ультрафиолетовых лучей) резко уменьшается за счет увеличения радиации красных лучей. При  $h_{\odot} = 5^{\circ}$  ультрафиолетовые, фиолетовые и синие лучи вообще не достигают поверхности земли, чем и объясняется, что восходящее и заходящее солнце кажется красным.

Сказанное относится к так называемой идеальной атмосфере. В действительности в атмосфере содержится большее или меньшее количество разнообразных примесей (водяные пары, пыль, копоть, дым и т. п.), которые в значительной мере ослабляют солнечную радиацию путем ее поглощения и рассеивания. Влияние пыли и копоти особенно сильно в больших городах и промышленных центрах, над которыми до высоты полукилометра висит пылевая „шапка“.

Степень ослабления солнечной радиации всевозможными примесями принято оценивать величиною так называемого фактора помутнения, показывающего, во сколько раз радиация в действительных условиях меньше радиации при идеальной атмосфере. По данным исследований фактор помутнения имеет наименьшее значение зимою, а наибольшее — летом. В среднем фактор помутнения принимается равным 2,25, причем в больших городах он может достигать 3,5.

## § 8. Небесное излучение

При прохождении через земную атмосферу часть энергии лучистого потока диффузно рассеивается молекулами воздуха и взвешенными частицами (водяные пары, пыль, копоть и т. п.), а часть энергии поглощается ими, превращаясь в молекулярную энергию. Однако лучистая энергия, задержанная атмосферой, в значительной своей части достигает земли в виде радиации небесного свода. Именно многократным отражением солнечных лучей от колоссального числа мельчайших частиц и объясняется то, что небесный свод кажется светлым во всех направлениях.

Диффузное рассеивание лучистой энергии, согласно закону Релея, происходит обратно пропорционально четвертой степени длины волны, если рассеивающие частицы имеют размеры меньшие, чем длина волны, что и наблюдается в действительности. По этому закону короткие волны рассеиваются значительно сильнее; в табл. 5 показана интенсивность рассеивания лучей с различной длиной волны, причем рассеивание красных лучей ( $\lambda = 0,70 \mu$ ) условно принято за единицу.

Вследствие сказанного в рассеянной радиации должны преобладать короткие (синие и фиолетовые) и ультрафиолетовые лучи. Этим объясняется освещенность небесного свода и голубой цвет неба; степень синевы неба в значительной мере зависит от прозрачности атмосферы, а также от наличия облачности.

Таблица 5

**Интенсивность рассеивания лучей с различной длиной волны (по Калитину)**

Цвет излучения	Длина волны в микронах ( $\mu$ )	Интенсивность рассеивания
Красный . . . . .	0,70	1,0
Желтый . . . . .	0,57	2,2
Синий . . . . .	0,47	4,9
Ультрафиолетовые лучи	0,41	8,5
	0,30	30,0

Освещенность на открытом месте, как было указано выше, составляется солнечной и небесной радиациями. Данные длительных наблюдений показывают, что доля небесной радиации в создании дневной освещенности не мала и что она зависит от высоты стояния солнца и состояния облачности. На рис. 12 приведена зависимость между освещенностями

горизонтальной поверхности (в килолюксах) от солнца ( $E_{\odot}$ ) и от неба ( $E_h$ ), полученная Дорно в Давосе для безоблачных дней. Кривые показывают, что при увеличении высоты стояния солнца диффузная освещенность небесного свода  $E_h$  растет несравненно медленнее, чем освещенность прямым солнечным светом  $E_{\odot}$ . Однако доля участия  $E_h$  в создании общей освещенности  $E = E_{\odot} + E_h$  довольно значительна, хотя и уменьшается по мере увеличения высоты стояния солнца  $h_{\odot}$ .

Если при безоблачном небе и удастся установить определенную зависимость между прямым солнечным светом и рассеянным светом небесного свода, то при наличии облачности картина резко меняется. В зависимости от характера и степени облачности как общая освещенность  $E$ , так и обе ее составляющие  $E_{\odot}$  и  $E_h$  колеблются в чрезвычайно широких пределах. В частности, при сплошной облачности составляющая от солнца  $E_{\odot}$  близка к нулю, и общая освещенность  $E$  создается исключительно светом от неба  $E_h$ .

Характер облачности зависит от типов облаков, которые отличаются своей структурой и внешним видимым очертанием. При этом высокие облака состоят из ледяных кристаллов, а более низкие из водяных капель.

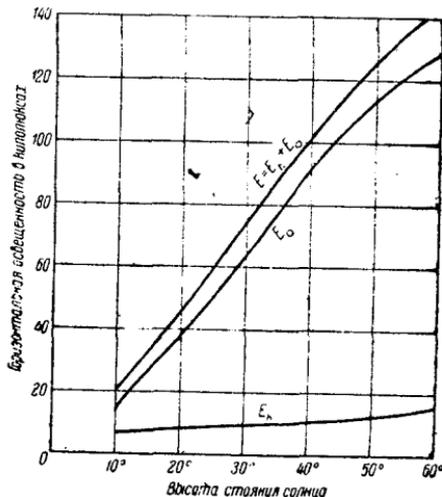


Рис. 12. Зависимость между солнечной и небесной радиациями.

К высоким облакам относятся: перистые (высота около 10 км), перисто-слоистые и перисто-кучевые или барашки (около 7,5 км), высококучевые (около 5 км) и слоисто-кучевые (около 3,5 км). К низким облакам так называемых восходящих потоков относятся дождевые и кучевые облака (около 1,5 км) и грозовые.

Степень облачности характеризуется обычно десятыми долями закрытия облаками поверхности небосвода, называемыми баллами.

Многочисленные непрерывные записи суточного хода горизонтальной освещенности показывают, что в отдельные дни  $E_h$  может даже в течение очень короткого промежутка времени меняться в значительных пределах. Изображенные на рис. 13 и 14 кривые освещенности рассеянным светом атмосферы по записям регистрирующего фотометра, произведен-

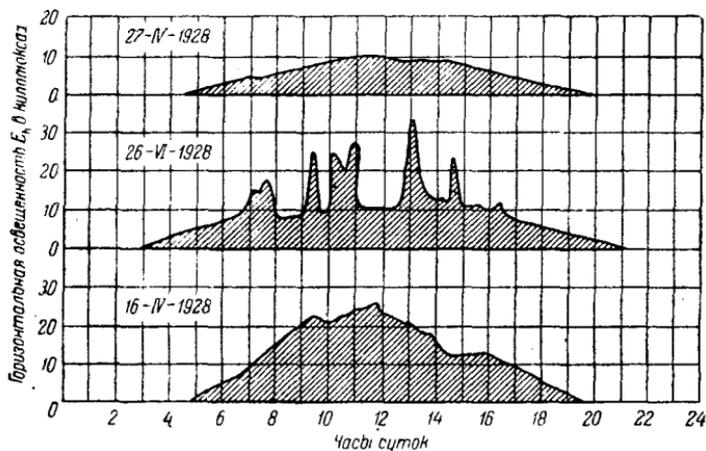


Рис. 13а. Кривые горизонтальной освещенности рассеянным светом атмосферы (по Н. Н. Калитину).

ным проф. Н. Н. Калитиным<sup>1</sup> в г. Слуцке, наглядно иллюстрируют сказанное.

На рис. 13а представлены три кривые  $E_h$ , из которых верхняя была записана в безоблачный день; кривая в этом случае показывает характерный плавный ход освещенности с максимумом в 10 000 лк (около полудня). Средняя кривая была получена в день с малым количеством облаков; виден характерный ход освещенности для безоблачного неба с максимумом в 10 000 лк в полдень, прерываемый отдельными пиками вследствие прохождения по небу гряд высококучевых облаков. Наконец, нижняя кривая была записана, когда небо весь день было покрыто перисто-слоистыми и высококучевыми облаками; абсолютные величины освещенности в этом случае получились значительно большими, с максимумом в 26 000 лк, но с менее плавным ходом кривой освещенности.

Следующие три кривые (рис. 13б) показывают значительно более сильные колебания освещенностей. Верхняя кривая была записана в день

<sup>1</sup> Н. Н. Калитин, Об изучении светового климата СССР, Труды II Всесоюзной светотехнической конференции, т. IV, 1931.

с переменным количеством облаков типа высококучевых и кучевых. Прохождение дождевого облака вызвало около 9 час. утра резкое падение освещенности с 35 000 до 2000 лк. Средняя кривая показывает примерно аналогичную картину. Благодаря облачности типа высокослоистых освещенность к 9 час. утра достигла 37 000 лк, однако далее начали подниматься дождевые облака, в результате чего к полудню наблюдалось длительное падение освещенности до 1500 лк. После ухода

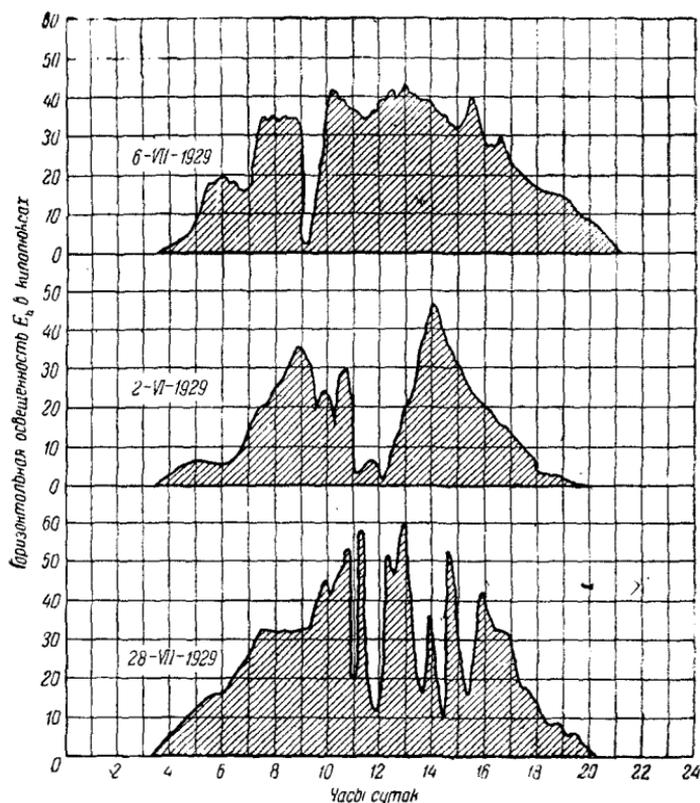


Рис. 136. Кривые горизонтальной освещенности рассеянным светом атмосферы (по Н. Н. Калигину).

земных дождевых облаков остались высокослоистые облака, которые подняли освещенность вновь до 48 000 лк. Наконец, нижняя кривая служит ярким примером резких и быстрых нарастаний и падений освещенностей от 60 000 до 8000 лк вследствие быстрого прохождения плотных облаков типа кучево-дождевых.

Описанные примеры показывают, какое громадное влияние оказывает наличие той или иной облачности на условия освещенности на открытом месте. Исследованиями установлено, что влияние облачности на освещенность неодинаково для различных типов облаков и что это влияние зависит от степени облачности и высоты стояния солнца. Облака, располагающиеся на большой высоте, как, например, высоко-

слоистые, перисто-слоистые, высококучевые и т. п., как правило повышают освещенность по сравнению с безоблачным небом, особенно при средней их плотности. Влияние таких облаков на повышение освещенности наблюдается главным образом в летние периоды. Такие же типы облаков, как, например, кучевые, дождевые и грозовые, могут в значительной мере уменьшить освещенность по сравнению с безоблачным небом, особенно при сплошном покрытии ими небосвода и при большой их плотности. Последние типы облаков оказывают особенно заметное влияние в зимние периоды при небольшой высоте стояния солнца, вследствие чего освещенности в этом случае создаются, вообще говоря, меньшие, чем при безоблачном небе.

На величину освещенности заметное влияние оказывает отражение света земными покровами. Прямые солнечные лучи и свет от небесного свода, отразившись от поверхности земли, снова рассеиваются атмосферой и, увеличивая ее яркость, тем самым повышают освещенность. Увеличение освещенности зависит, с одной стороны, от значений коэффициентов отражения земных покровов (например, трава и лес отражают от 5 до 15%, снег около 60—70% и т. д.) и, с другой стороны, от высоты стояния солнца. Особенно сказывается это влияние зимой при наличии снегового покрова, сильно отражающего падающие на него световые лучи.

Влияние снегового покрова на освещенность при безоблачном небе и при различных высотах солнца согласно измерениям, произведенным проф. Н. Н. Калитиным<sup>1</sup> в г. Слуцке, характеризуется рис. 14, на котором пунктирной линией нанесена кривая освещенности при снеговом покрове. Кривые рис. 14 показывают, что влияние снегового покрова на освещенность особенно сильно сказывается при небольших высотах солнца.

Наконец, следует еще остановиться на вопросе распределения яркостей по небосводу. Исследования, произведенные Дорно в Давосе (46°48' сев. широты и 9°49' вост. долготы) показывают, что распределение яркостей при безоблачном небе неравномерно и закон распределения меняется в зависимости от высоты стояния солнца. При  $h_{\odot} = 0$ , т. е. когда солнце находится на горизонте, яркости распределяются более или менее симметрично относительно вертикали, проходящей через зенит. При увеличении высоты стояния солнца минимум яркости

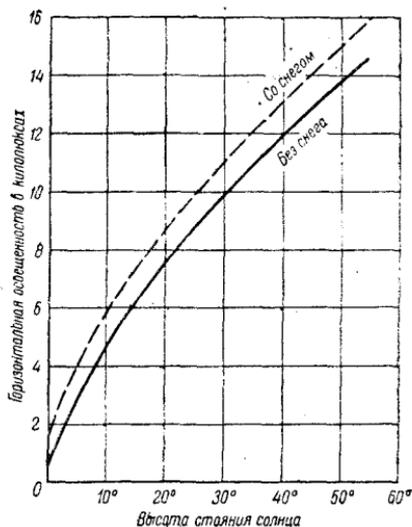


Рис. 14. Горизонтальная освещенность  $E_h$  при безоблачном небе при наличии снегового покрова (пунктирная кривая) и без него (сплошная кривая).

<sup>1</sup> Н. Н. Калитин, Роль облаков в освещенности земной поверхности, Труды Института геодезии и картографии, вып. III, 1931.

смещается от зенита к горизонту. Максимум же яркости небосвода во всех случаях весьма резко выражен вокруг солнца. Отношение максимума к минимуму может достигать нескольких десятков.

В зависимости от степени и характера облачности могут резко меняться как распределение яркостей по небу, так и их абсолютные величины. Только в дни с равномерной облачностью (10 баллов) распределение яркостей по небу приближается к равномерному.

## § 9. Коэффициент естественной освещенности

Природные особенности солнечного и небесного излучений как источника естественного света приводят к тому, что в помещениях создаются исключительно переменные условия освещения не только в течение суток, но даже и в течение весьма коротких промежутков времени. При этом следует отметить, что эти природные условия естественного освещения не представляется возможности ни изменить, ни даже регулировать. Вследствие сказанного задача проектирования естественного освещения сводится по существу к рациональному использованию имеющихся в данном месте природных световых ресурсов. С этой точки зрения искусственное освещение обладает тем важным преимуществом, что позволяет в пределах существующих технических возможностей создавать любые условия освещения помещений и произвольно их изменять. В зависимости от того, в какой мере естественное освещение внутри помещения оказывается недостаточным, оно обычно восполняется (частично или полностью) искусственным освещением, которое, таким образом, неразрывно связано с естественным и представляет в общем единую проблему освещения помещений.

Вследствие крайней переменности природных условий естественного света возникает вопрос установления минимальных освещенностей, которые должны быть достигнуты внутри помещения в результате устройства светопроемов. Наиболее определенной и ясной является регламентация минимальных освещенностей, выраженных в абсолютных фотометрических единицах, т. е. в люксах или фотах. Однако естественное освещение действует периодически только в течение части суток, причем создающиеся на открытом месте освещенности колеблются в чрезвычайно широких пределах — от нуля до нескольких десятков тысяч люксов. В зимнее же время для целого ряда областей Советского Союза эти освещенности вообще оказываются недостаточными для создания необходимого минимума освещения помещения (в зависимости от характера рабочего процесса). К этому следует добавить, что в настоящее время мы располагаем весьма скудными данными о природных условиях освещения на открытом месте. Вследствие сказанного практически не представляется возможным установить минимальные значения освещенностей внутри помещения, выраженные в люксах или фотах.

В связи с этим для характеристики условий освещенности помещения естественным светом была предложена отвлеченная единица измерения, называемая коэффициентом естественной освещенности (сокращенно к. е. о.). При этом под последним понимается отношение освещенности в данной точке внутри помещения к одновременной горизонтальной

освещенности на совершенно открытом месте. Математически это отношение имеет вид:

$$e = \frac{E}{E_0}, \quad (9)$$

где  $e$  — величина к. е. о.,

$E$  — освещенность в точке внутри помещения,

$E_0$  — одновременная горизонтальная освещенность на открытом месте, создаваемая рассеянным светом небосвода.

Вследствие того что освещенность на открытом месте всегда больше освещенности внутри здания, величина к. е. о. всегда меньше единицы. В таком случае величина к. е. о. показывает, во сколько раз освещенность в данной точке меньше одновременной горизонтальной освещенности на открытом месте.

Очень часто величину к. е. о. выражают в процентах, т. е. принимают

$$e = \frac{E}{E_0} 100. \quad (9')$$

Из выражения (9) следует, что

$$E = E_0 \cdot e. \quad (10)$$

Другими словами, освещенность в любой точке внутри помещения равна наружной горизонтальной освещенности, умноженной на величину к. е. о.

## § 10. Световой климат

Световым климатом принято называть всю совокупность данных, характеризующих световые ресурсы, имеющиеся в данном географическом пункте. К числу таких данных относятся освещенности, создаваемые:

а) непосредственно прямым солнечным светом и

б) небесным сводом, т. е. атмосферой, рассеивающей проходящий свет солнца, а также земными покровами, отражающими падающий на них свет солнца и небосвода.

Изменение горизонтальной освещенности прямыми солнечными лучами при безоблачном небе зависит от часа дня и времени года, т. е. от высоты стояния солнца  $h_{\odot}$ .

Наибольший интерес со светотехнической точки зрения представляет собою диффузная освещенность на открытом месте, так как при наличии облачности солнечное излучение характеризуется крайним непостоянством своего действия. По этой причине прямой свет солнца при расчетах во внимание не принимается. При этом за основную величину, суммарно характеризующую условия естественного освещения, принимают горизонтальную освещенность на открытом месте, так как именно эта освещенность создается всем небосводом и является наибольшей в данный момент.

Хотя излучение лучистой энергии солнцем и происходит непрерывно, но благодаря суточному вращению земли естественный свет действует на какую-либо точку земной поверхности только в течение части суток.

Интенсивность же действия небесного излучения зависит от целого ряда факторов, как то: время года, время суток, географическая широта, высота над уровнем моря, состояние облачности и покрова земли и др.

Для составления характеристик светового климата (диффузного света) прибегают к непрерывным записям суточного хода горизонтальной освещенности диффузным светом атмосферы, несколько примеров которых были рассмотрены в § 8 (рис. 13а и 13б). По данным таких записей можно для каждого часа суток вывести среднюю освещенность,

наблюдавшуюся в течение каждого месяца.

Собранные в течение ряда лет данные оказываются более или менее различающимися между собою. Беря соответствующие средние значения освещенностей по часам и месяцам в течение ряда лет, мы получим данные о горизонтальной освещенности на открытом месте, характеризующие световой климат для данной местности.

Систематическое изучение светового климата в Советском Союзе ведется с 1922 г. проф. Н. Н. Калитиным в г. Слуцке под Ленинградом (непрерывная запись ведется только с 1925 г.), в Ленинграде с 1931 г., в Москве с 1933 г. и в Иркутске с 1929 г.

Планомерное изучение светового климата намечено проводить в целом ряде пунктов Советского Союза.

По полученным данным вычисляются средние значения горизонтальной освещенности, по которым составляются таблицы, а также строятся специальные графики средней освещенности по часам для каждого месяца. Для этого по оси абсцисс откладываются часы суток, а по оси ординат — соответствующие средние освещенности для каждого часа месяца, которые затем соединяются плавной кривой.

На рис. 15 для примера приведены кривые светового климата для г. Слуцка.

В заключение необходимо остановиться на вопросе освещения вертикальной площадки на открытом месте при различной ее ориентации. При условии равноркости всего небосвода, положенного в основу описываемых ниже методов расчетов, освещенность вертикальной площадки не зависит от ориентации и равняется

$$E = 0,5 E_h,$$

где  $E_h$  — диффузная освещенность горизонтальной площадки на открытом месте.

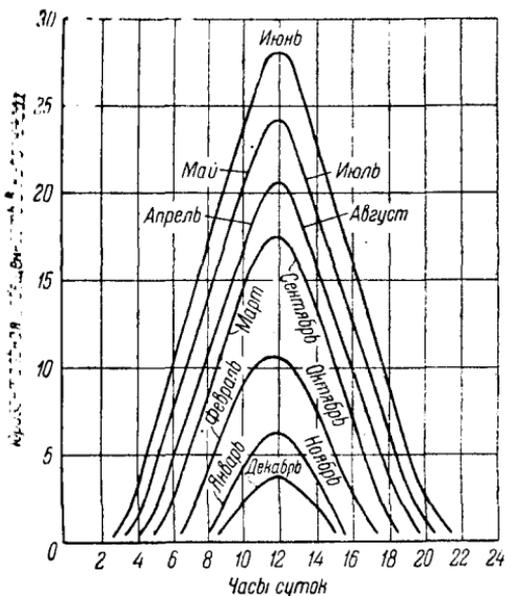


Рис. 15. Кривые светового климата.

В действительности же освещенность вертикальной площадки на открытом месте зависит от ориентации, так как ее освещенность создается светом, идущим от небосвода, обладающего переменной яркостью, и от земли. Измерения показывают, что освещенность вертикальной площадки только в дни с равномерной облачностью (10 баллов) приближается к  $0,5 E_h$ . В дни же с неполным покрытием небосвода облаками вертикальная освещенность может намного превышать указанную теоретическую освещенность в  $0,5 E_h$ . Данные табл. 6 (по Г. П. Богдановичу<sup>1</sup>) показывают, что вертикальная освещенность может превышать одновременную горизонтальную освещенность более чем в 6 раз (в марте при ориентации площадки на юг, что объясняется сильным влиянием снегового покрова).

Таблица 6

Освещенность вертикальной площадки на открытом месте в зависимости от ее ориентации (освещенность горизонтальной площадки принята равной 100)

### § 11. Классификация светопроемов и световых фонарей

Основным элементом, при помощи которого осуществляется освещение помещений естественным светом, является светопроем.

Если светопроемы устраиваются в боковых вертикальных стенах, то они называются окнами, а создаваемое ими освещение — боковым светом.

Если светопроемы устраиваются в перекрытиях, образуя при этом в большинстве случаев надстройку больших или меньших размеров, то они называются световыми фонарями, а создаваемое ими освещение — верхним светом (фонари — зенитные, шеды, буало, монитор, фонд и др.).

Наконец, если устраиваются одновременно и световые фонари и окна, то в результате создается так называемый комбинированный свет.

Светопроемы бокового света могут устраиваться как в одноэтажных, так и в многоэтажных зданиях. Такая система освещения обладает целым рядом специфических особенностей, вследствие чего к ней предъявляются особые требования, изложенные в ОСТ 8545 в разделе „Боковой свет“.

Светопроемы верхнего или комбинированного света устраиваются, как правило, в одноэтажных зданиях. К таким системам предъявляются требования, изложенные в ОСТе в разделе „Верхний или комбинированный свет“ (см. гл. VI).

Световые фонари, в зависимости от формы и расположения световых проемов, разбиваются на ряд систем и типов. Каждый световой

Ориентация по странам света	Время года			
	март	июнь	сентябрь	декабрь
Север . . . . .	150	65	80	106
Запад . . . . .	250	110	120	300
Юг . . . . .	660	120	170	250

<sup>1</sup> См. В. А. Зеленков, Световой климат, „Светотехника“, № 6, 1935.

фонарь может иметь один светопроем (зенитные и шеды) или два светопроема (буало, А-образные, трапециевидные, понды и т. д.).

В зависимости от наклона плоскости светопроемов к горизонту световые фонари можно разбить на следующие три основные группы:

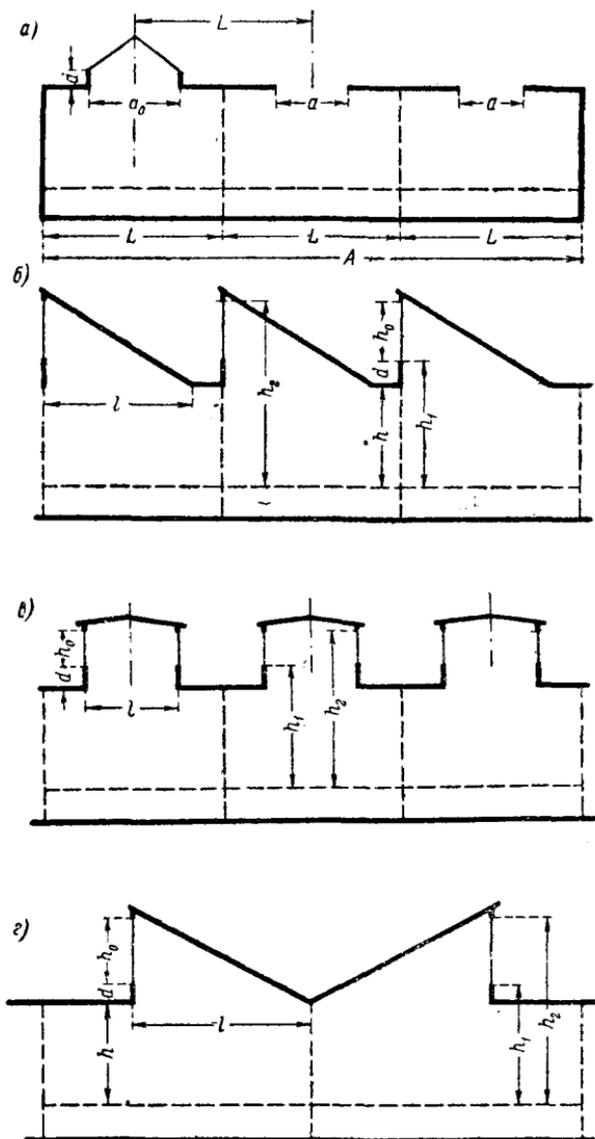


Рис. 16. Схемы световых фонарей: а) двускатный; б) шел с вертикальным остеклением; в) буало и г) М-образный с вертикальным остеклением.

- 1) фонари с горизонтальными светопроемами,
- 2) фонари с вертикальными светопроемами и
- 3) фонари с наклонными светопроемами.

К первой группе относятся зенитные световые фонари (рис. 16, а). Во вторую группу входят шеды с вертикальным остеклением (рис. 16, б), буало (рис. 16, в) и понды с вертикальным остеклением (рис. 16, г).

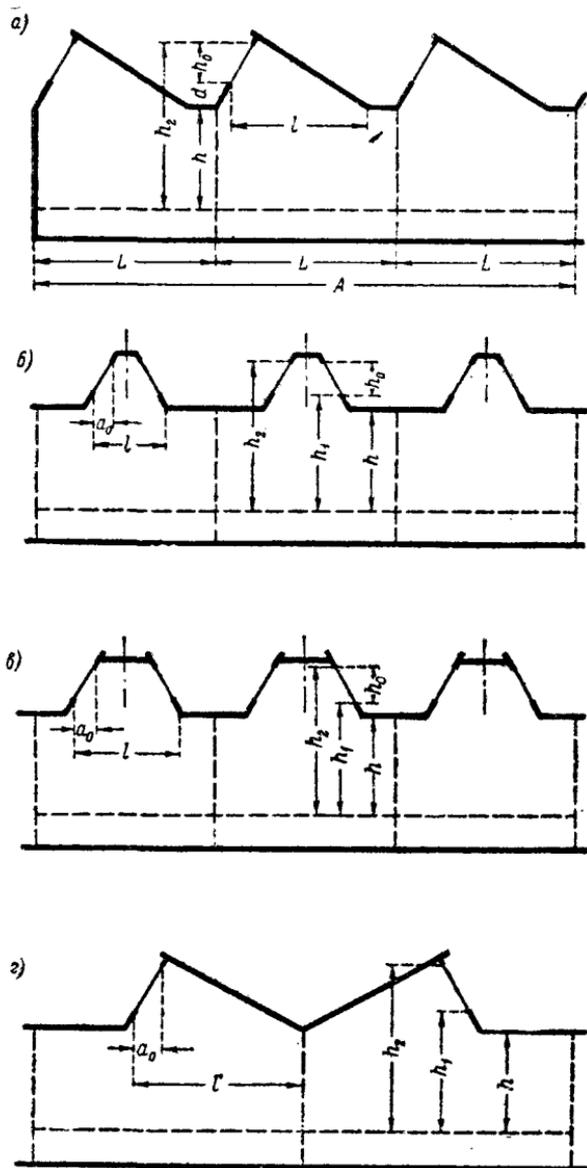


Рис. 17. Схемы световых фонарей: а) шед с наклонным остеклением; б) А-образный; в) трапециевидный и г) М-образный с наклонным остеклением.

К третьей группе относятся шеды с наклонным остеклением (рис. 17, а), А-образные (рис. 17, б), трапециевидные или мониторы (рис. 17, в) и понды с наклонным остеклением (рис. 17, г).

Кроме того, различается освещение одностороннее и двухстороннее.

При одностороннем освещении световой поток, проникая через светопроемы, даже при наличии ряда световых фонарей, освещает продольную вертикальную плоскость преимущественно с одной стороны. Такое освещение можно наблюдать при освещении помещения шедами (рис. 16, б и 17, а), а также окнами бокового света.

При двухстороннем свете, особенно при наличии системы световых фонарей, световой поток, проникая через светопроемы, освещает продольную вертикальную плоскость с обеих ее сторон, как это имеет место при фонарях зенитных, А-образных, буало, трапезиевидных (монитор), пондах и т. п. (рис. 16, а, в и г и рис. 17 б, в и г).

### Глава III

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСВЕЩЕННОСТИ

Световые проемы, при помощи которых осуществляется освещение помещений естественным светом, рассматриваются в светотехническом отношении как светящиеся поверхности (вторичные источники света). Для решения целого ряда задач необходимо уметь определять освещенность в любой точке внутри помещения, как угодно расположенной по отношению к светопроемам того или иного типа. Рассмотрению этих задач посвящена настоящая глава. Однако для вывода основных зависимостей для светящихся поверхностей необходимо знать формулы для определения освещенности от точечных источников света. Исходя из этих соображений, мы сначала остановимся на выводе необходимых формул, относящихся к точечным источникам света, а затем изложим существующие методы расчета естественного освещения помещений.

### § 12. Освещенность от точечных источников света

Освещенность площадки, как угодно расположенной по отношению к точечному источнику света, легко определяется по формуле (4), если известна сила света по направлению от источника к освещаемой площадке.

Для большинства применяемых на практике точечных источников света (исключительно искусственных) сила света по различным направлениям различна. Распределение силы света в пространстве обычно характеризуется полярными кривыми светораспределения, которые можно построить следующим образом. Проведем из центра источника света пучок прямых и отложим на них соответствующие отрезки — векторы, выражающие собою силу света по данному направлению в каком-либо произвольном масштабе. В результате получим целую систему векторов, концы которых расположатся на некоторой поверхности, называемой фотометрической, так как она характеризует распределение силы света источника в пространстве. Пространство, ограниченное фотометрической поверхностью, называется фотометрическим телом. Если через центр источника света провести плоскость, то в результате пересечения ее с фотометрическим телом мы получим интересующую нас кривую силы света в этой плоскости. Для значительного числа точечных источников искусственного света фотометрическое тело представляет собою тело

вращения вокруг некоторой прямой, которую называют осью источника света, вследствие чего во всех плоскостях, проходящих через ось источника света, кривые силы света одинаковы и симметричны относительно этой оси. Такие кривые называются продольными кривыми силы света. В качестве примера приводим продольные кривые света (рис. 18) для

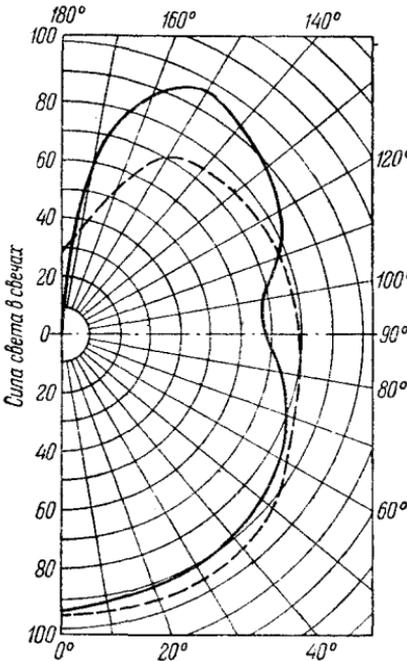


Рис. 18. Продольные кривые света стандартной лампы со спиралью, расположенной в виде разомкнутого кольца, с прозрачной колбой (сплошная кривая) и с матированной колбой (пунктирная кривая).

обычной стандартной электролампы (в 1000 люменов) со спиралью, расположенной в виде разомкнутого кольца с колбой прозрачной (сплошная кривая) и матированной (пунктирная кривая). Рассмотрим частный случай, когда измерение силы света подчиняется закону косинуса, т. е.  $I_\alpha = I \cdot \cos \alpha$ . Кривая силы света для этого случая будет окруж-



Рис. 19. Кривая силы света для косинусного источника света.

ностью, а фотометрическое тело — шаром (рис. 19). Заметим, что всякая весьма малых размеров светящаяся площадка, идеально рассеивающая световой поток по закону косинуса, может рассматриваться как точечный источник света, для которого продольная кривая силы света является окружностью. С такими элементарными косинусными источниками света мы встретимся ниже при выводе основных уравнений для определения освещенности от светящихся поверхностей.

Перейдем теперь к вопросу определения освещенности горизонтальной и вертикальной плоскости от точечных источников света.

*а. Освещенность горизонтальной плоскости.* Рассмотрим случай, когда ось источника света располагается вертикально, а освещаемая плоскость горизонтально.

По формуле (4) освещенность в точке  $M$  площадки, как угодно расположенной по отношению к источнику света, равна:

$$E_r = \frac{I_\alpha}{R^2} \cos \theta,$$

где  $I_\alpha$  — сила света точечного источника света под углом  $\alpha$  к его оси и  $\vartheta$  — угол между нормалью к освещаемой поверхности и лучом света, направленным в рассматриваемую точку.

В нашем случае (рис. 20)  $\alpha = \vartheta$ , поэтому

$$E_r = \frac{I_\alpha}{R^2} \cos \alpha. \quad (11)$$

Так как

$$R = \frac{z}{\cos \alpha},$$

то

$$E_r = \frac{I_\alpha}{z^2} \cos^3 \alpha. \quad (12)$$

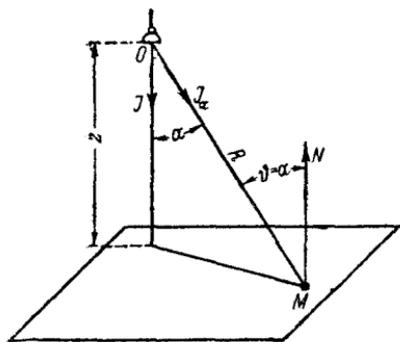


Рис. 20. Освещенность горизонтальной плоскости от точечного источника света.

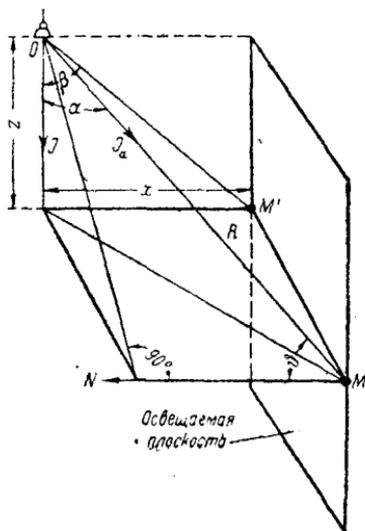


Рис. 21. Освещенность вертикальной плоскости от точечного источника света.

Если сила света  $I_\alpha$  изменяется по закону Ламберта, т. е.

$$I_\alpha = I \cos \alpha,$$

то

$$E_r = \frac{I}{z^2} \cos^4 \alpha. \quad (13)$$

**б. Освещенность вертикальной плоскости.** Предположим, что ось источника света и освещаемая плоскость располагаются вертикально. Освещенность в какой-либо точке этой вертикальной плоскости определится на основе общего уравнения (4) следующим образом. Проведем через точечный источник света  $O$  плоскость, перпендикулярную к освещаемой вертикальной плоскости, и спроектируем на нее луч света  $OM$  в виде отрезка  $OM'$  (рис. 21). Обозначим расстояние от точки  $O$  до освещаемой плоскости через  $x$ , а угол, образуемый вертикалью, проходящей через точку  $O$ , и лучом  $OM'$ , — через  $\beta$ . Из рис. 21 имеем, что

$$\cos \vartheta = \frac{x}{R} \quad \text{и} \quad R = \frac{z}{\cos \alpha}$$

Подставляя эти значения в формулу (4), получим:

$$E_v = \frac{I_\alpha}{R^2} \cos \vartheta = \frac{I_\alpha}{R^3} x = \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{z^2} \cdot \frac{x}{z}.$$



Предположим, что яркость светящейся площадки  $\Delta S_1$  одинакова по всем направлениям и равна  $B$ . Тогда по закону Ламберта сила света площадки  $\Delta S_1$  по направлению к освещаемой точке  $M$  равна:

$$\Delta I_\alpha = \Delta I \cdot \cos \alpha = B \cdot \Delta S_1 \cdot \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между нормалью к светящейся поверхности и лучом света  $OM$ .

Проведем из точки  $M$ , как из центра, полусферу радиусом  $R$  и спроектируем на нее площадку  $\Delta S_1$ . Из рис. 22 видно, что проекция площадки  $\Delta S_1$  равна:

$$\Delta s = \Delta S_1 \cdot \cos \alpha.$$

Тогда на основании предыдущего

$$\Delta I_\alpha = B \cdot \Delta s.$$

Подставляя найденное значение  $\Delta I_\alpha$  в формулу (4), получим:

$$\Delta E = \frac{B \cdot \Delta s}{R^2} \cos \vartheta. \quad (15)$$

В полученном выражении величина  $\frac{\Delta s}{R^2}$  равна телесному углу  $\Delta \omega_1$ , охватывающему из точки  $M$  площадку  $\Delta S_1$ , а  $\frac{\Delta s}{R^2} \cos \vartheta$  — проекции этого телесного угла на освещаемую плоскость, т. е.

$$\frac{\Delta s}{R^2} \cos \vartheta = \Delta \omega_s.$$

При этом формулу (15) можно представить в следующем виде:

$$\Delta E = B \cdot \Delta \omega_s. \quad (16)$$

При конечных размерах светящейся поверхности мы всегда можем последнюю разбить на ряд элементарных площадок и найти по формуле (16) освещенность от каждой из них. Сумма этих элементарных освещенностей и представляет собою искомую освещенность от светящейся поверхности, т. е.

$$E = \sum \Delta E = \sum B \cdot \Delta \omega_s. \quad (16')$$

Если светящаяся поверхность равномерна во всех своих точках, то

$$E = B \cdot \sum \Delta \omega_s = B \cdot \omega_s. \quad (17)$$

Другими словами, освещенность, создаваемая равномерно светящейся поверхностью, равна яркости последней, умноженной на проекцию  $\omega_s$  на освещаемую плоскость того телесного угла, под которым виден этот участок из точки, в которой ищется освещенность. Это и есть „Закон проекции телесного угла“.

Ввиду того что телесный угол обычно определяется площадью поверхности, вырезаемой им на сфере единичного радиуса, то закон проекции телесного угла весьма часто формулируют следующим образом: „Освещенность, создаваемая равномерно светящейся поверхностью, равна

ее яркости  $B$ , умноженной на проекцию на освещаемую плоскость того участка полусферы единичного радиуса, который виден из данной точки через контуры светящейся поверхности".

Рассмотрим теперь предельный случай, когда размеры светящейся поверхности столь велики, что видимый участок небосвода равен всей его поверхности. Этот случай имеет место при освещении горизонтальной площадки на открытом месте всем небосводом. Так как при  $R=1$  проекция всей поверхности небосвода на горизонтальную плоскость равна  $\pi$ , то полная освещенность горизонтальной площадки от всего небосвода

$$E_0 = B \cdot \pi.$$

Однако практически при расчете естественного освещения нас интересует

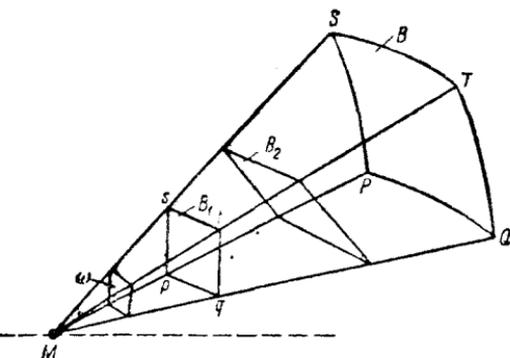


Рис. 23. Закон подобия.

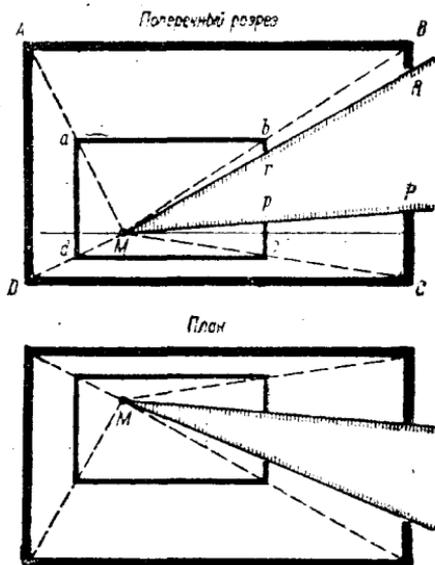


Рис. 24. Закон подобия.

не освещенность, выраженная в абсолютных единицах измерения, а величина к. е. о., которая равна:

$$e = \frac{E}{E_0} = \frac{B \cdot \omega_s}{B \cdot \pi} = \frac{\omega_s}{\pi}. \quad (18)$$

Другими словами, к. е. о. равен деленной на  $\pi$  проекции на освещаемую плоскость участка небосвода единичного радиуса, видимого из данной точки через светопроемы.

Очевидно, что к. е. о., создаваемый всем небосводом, равен  $e_0 = 1$ , так как площадь проекции всей поверхности небосвода равна  $\pi$ .

Предположим, что несколько светящихся поверхностей, яркость которых равна  $B_1, B_2, B_3, \dots, B$ , образуют один и тот же телесный угол  $\omega$  с вершиной в точке  $M$  (рис. 23). Из закона проекции телесного угла следует, что эти светящиеся поверхности создают в точке  $M$  одну и ту же освещенность только в случае равенства их яркостей, т. е. когда

$$B_1 = B_2 = B_3 = \dots = B.$$

Эта зависимость носит название закона подобия, из которого следует, что освещенность в какой-либо точке зависит не от абсолютных,

а от относительных размеров светопроемов и помещения. Так, например, при замене помещения  $ABRPCD$  его уменьшенной моделью  $abrpcd$  (рис. 24) телесный угол, под которым из точки  $M$  виден светопроем  $PR$  или, соответственно,  $pr$ , не меняет своей величины, а следовательно, и не меняется освещенность точки  $M$ . На основании этого же закона при условии равенства яркостей истинный небосвод может быть заменен полусферой любого радиуса, в том числе единичного.

#### § 14. Точные методы определения коэффициента естественной освещенности

Описанный выше закон проекции телесного угла лег в основу всех существующих методов расчета естественной освещенности как аналитических, так и графических. Основная идея всех этих методов сводится к определению тем или иным путем величины проекции телесного угла  $\omega_s$ .

Однако для непосредственного приложения закона проекции телесного угла встречаются препятствия, ибо этот закон верен только при условии равномерной яркости полусферы во всех ее точках. В действительности же, как мы видели выше, яркость небосвода не равномерна даже в безоблачные дни. В облачные же дни, в зависимости от структуры и типа облаков и характера покрытия ими неба, может иметь место еще более неравномерное и притом весьма непостоянное распределение яркостей по небосводу, не подчиняющееся каким-либо закономерностям. Таким образом учесть фактическое распределение яркостей по небосводу не представляется возможным, ввиду чрезвычайной сложности точного расчета. Вследствие этого при расчете естественного освещения обычно прибегают к упрощающим предпосылкам, а именно:

- а) небосвод принимается за полусферу равномерной яркости;
- б) прямой солнечный свет во внимание не принимается;
- в) данная точка внутри помещения освещается только светом, идущим непосредственно от небосвода; рассеянный свет от противоположных зданий и земли во внимание не принимается;
- г) данная точка помещения освещается только прямым светом, поступающим непосредственно через светопроемы; рассеянный свет от потолка, стен и пола во внимание не принимается.

а. *Формула Винера.* К числу первых методов расчета естественного освещения относится метод Винера,<sup>1</sup> по которому освещенность или к. е. о. находится от светопроема, имеющего форму многоугольника, как угодно наклоненного по отношению к освещаемой площадке, по следующей точной формуле:

$$e = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{k=m} \theta_k \cdot \cos \varphi_k, \quad (19)$$

где  $m$  — число сторон многоугольника;

$\theta$  — углы, под которыми видны из освещаемой точки  $M$  стороны многоугольника, в радианах;

<sup>1</sup> Ch. Wiener, Lehrbuch der darstellenden Geometrie, 1884, 1 Buch, S. 401—402.

$\varphi$  — углы между освещаемой плоскостью и плоскостями, проведенными через точку  $M$  и грани многоугольника.

Для доказательства этой формулы рассмотрим сначала освещенность от светопроема в виде равномерно светящегося треугольника.

Представим себе равномерно светящийся треугольник  $ABC$ , от светового действия которого определяется освещенность в точке  $M$  (рис. 25). Из этой точки  $M$ , как из центра, проведем полусферу единичного радиуса, т. е. с  $R=1$ . Далее через точку  $M$  и стороны треугольника  $ABC$  проведем плоскости  $MAB$ ,  $MBC$  и  $MAC$ , которые вырежут на полу-

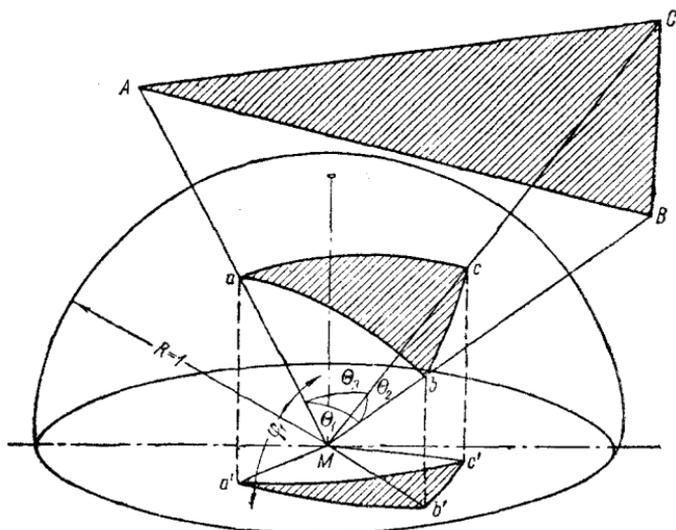


Рис. 25. Схема определения проекции телесного угла (по Винеру).

сфере три дуги большого круга  $ab$ ,  $bc$  и  $ac$ . Обозначим угол  $AMB$  через  $\theta_1$ , угол  $BMC$  через  $\theta_2$  и угол  $AMC$  через  $\theta_3$ . Площади секторов  $Mab$ ,  $Mbc$  и  $Mac$  при  $R=1$  равны:

$$\text{пл. } Mab = \frac{\theta_1 \cdot R^2}{2} = \frac{\theta_1}{2};$$

$$\text{пл. } Mbc = \frac{\theta_2 \cdot R^2}{2} = \frac{\theta_2}{2};$$

$$\text{пл. } Mac = \frac{\theta_3 \cdot R^2}{2} = \frac{\theta_3}{2}.$$

Спроектируем эти секторы на освещаемую плоскость, т. е. на плоскость основания полусферы. Если обозначить углы, образованные плоскостями этих секторов с плоскостью основания полусферы, соответственно через  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ , то проекции площадей секторов будут равны:

для сектора  $Ma'b'$

$$\omega_1' = \frac{\theta_1}{2} \cos \varphi_1;$$

для сектора  $Mb'c'$

$$\omega_2' = \frac{\theta_2}{2} \cos \varphi_2;$$

для сектора  $Ma'c'$

$$\omega_3' = \frac{\theta_3}{2} \cos (\pi - \varphi_3) = -\frac{\theta_3}{2} \cos \varphi_3.$$

Из рис. 25 видно, что площадь проекции участка  $abc$  полусферы равна:

$$\begin{aligned} \omega_s &= \omega_1' + \omega_2' - \omega_3' = \frac{\theta_1}{2} \cos \varphi_1 + \frac{\theta_2}{2} \cos \varphi_2 + \frac{\theta_3}{2} \cos \varphi_3 = \\ &= \frac{1}{2} (\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 + \theta_2 \cdot \cos \varphi_2 + \theta_3 \cdot \cos \varphi_3) = \frac{1}{2} \sum_1^3 \theta_k \cdot \cos \varphi_k. \end{aligned}$$

Следовательно для светящейся поверхности в виде треугольника по формуле (17) будем иметь:

$$E = B \cdot \omega_s = \frac{B}{2} \sum_1^3 \theta_k \cdot \cos \varphi_k \quad (20)$$

и по формуле (18)

$$e = \frac{\omega_s}{\pi} = \frac{1}{2\pi} \sum_1^3 \theta_k \cdot \cos \varphi_k. \quad (20')$$

Любой светящийся многоугольник можно рассматривать состоящим из ряда светящихся треугольников, освещенность от которых находится по формулам (20) и (20'). Освещенность от многоугольников будет равна сумме освещенностей от всех треугольников, причем при суммировании попарно сократятся все относящиеся к общим граням слагаемые, кроме тех, которые относятся к сторонам самого многоугольника. В результате для светящегося многоугольника получим приведенную выше формулу (19) Винера. Для прямоугольного светопроема к. е. о. в любой точке равен:

$$e = \frac{1}{2\pi} (\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 + \theta_2 \cdot \cos \varphi_2 + \theta_3 \cdot \cos \varphi_3 + \theta_4 \cdot \cos \varphi_4). \quad (21)$$

Если требуется определить горизонтальную освещенность в точке  $M$  от вертикального светопроема, то входящие в формулу (21) углы найдутся следующим образом. Проведем через точку  $M$  (рис. 26) и грани окна плоскости, которые в результате взаимного пересечения образуют углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  и  $\theta_4$ . Плоскости, проходящие через точку  $M$  и боковые грани окна, перпендикулярны к освещаемой плоскости, вследствие чего  $\varphi_3 = \varphi_4 = \frac{\pi}{2}$  и  $\cos \varphi_3 = \cos \varphi_4 = 0$ . При этом величина к. е. о. от вертикального окна равна:

$$e = \frac{1}{2\pi} (\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 + \theta_2 \cdot \cos \varphi_2). \quad (22)$$

При бесконечной длине светопроема (в обе стороны от точки  $M$ )  $\theta_1 = \theta_3 = \pi$  и величина к. е. о. равна:

$$e = \frac{1}{2} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2). \quad (23)$$

Если углы  $\varphi$  заменить углами  $\beta$ , отсчитываемыми от нормали к освещаемой плоскости (рис. 26), то  $\cos \varphi_1 = \sin \beta_1$  и  $\cos \varphi_2 = -\sin \beta_2$  и соответственно:

$$e = \frac{1}{2} (\sin \beta_1 - \sin \beta_2). \quad (23')$$

Формула Винера удобна своей общностью, позволяющей определять освещенность от любого, как угодно наклоненного, светящегося многоугольника. Однако определение входящих в нее углов вызывает большие затруднения.

С теоретической точки зрения представляет интерес приводимый ниже вывод формулы Винера для частного случая светящегося прямоугольника путем непосредственного применения закона Ламберта. На этом выводе основано математическое доказательство нашего приближенного метода (см. § 15).

Представим себе горизонтальную равномерно светящуюся прямоугольную поверхность, яркость которой, подчиняясь закону Ламберта, одинакова по всем направлениям. Горизонтальная освещенность от такого источника света может быть найдена следующим образом.

Выделим на светящейся поверхности элементарную равномерно светящуюся площадку  $dx \cdot dy$ . Расположим координатные оси как показано на рис. 27 и выберем точку  $M$  с координатами  $x$ ,  $y$  и  $z$ , в которой требуется определить освещенность. Обозначим отрезок  $OM$  через  $R$ , а проекцию его на плоскость  $ZOX$  через  $R'$ , угол между  $OM$  и  $OZ$  через  $\alpha$ , угол между  $OM'$  и  $OZ$  через  $\beta$  и, наконец, угол между  $OM$  и  $OM'$  через  $\gamma$ .

Заменим элементарный равномерно светящийся прямоугольник элементарным точечным источником света. Так как

$$dI = B \cdot ds = B \cdot dx \cdot dy,$$

то

$$dI_z = dI \cdot \cos \alpha = B \cdot dx \cdot dy \cdot \cos \alpha.$$

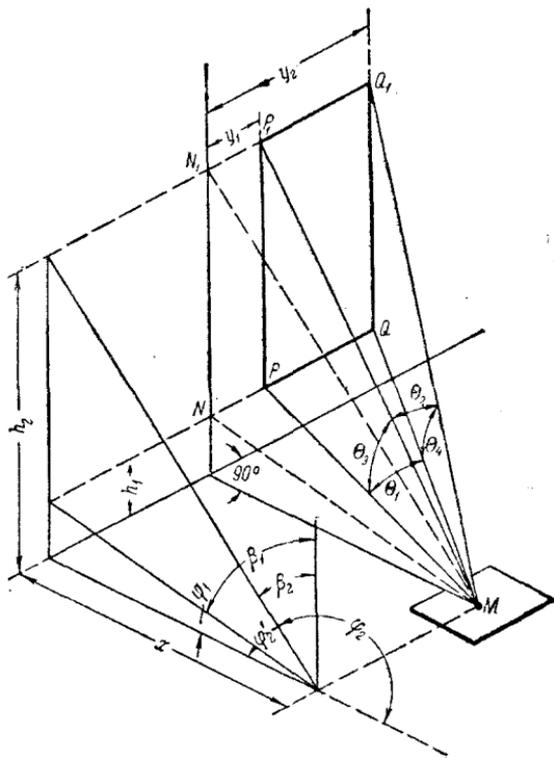


Рис. 26. Определение к. е. о. от вертикального светопроема.



Заменяя в формуле (24) угол  $\gamma$  через  $\gamma'$ , получим:

$$e = \frac{1}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\gamma_1'}^{\gamma_2'} \frac{\cos^2 \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma'}{\cos^2 \gamma' (1 + \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma')^2}.$$

Интегрируя путем подстановки  $\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma' = t$  по переменной  $\gamma'$ , получим:

$$e = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta \cdot \operatorname{arctg} (\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma') d\beta + \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma' \cdot d\beta}{(1 + \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma')} \right].$$

Интегрируя первый интеграл по переменной  $\beta$  по частям, получим:

$$e = \frac{1}{2\pi} \left[ \sin \beta \operatorname{arctg} (\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma') + \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma' d\beta}{(1 + \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma')} + \right. \\ \left. + \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma' d\beta}{(1 + \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma')} \right]_{\gamma_1'}^{\gamma_2'} = \frac{1}{2\pi} \left[ \sin \beta \cdot \operatorname{arctg} (\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma') + \right. \\ \left. + \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\operatorname{tg} \gamma' d\beta}{(1 + \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma')} \right]_{\gamma_1'}^{\gamma_2'}.$$

Интегрируя далее последний интеграл путем подстановки  $\operatorname{tg} \beta = u$ , получим окончательно:

$$e = \frac{1}{2\pi} \left[ \sin \beta \cdot \operatorname{arctg} (\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma') + \sin \gamma' \cdot \operatorname{arctg} (\cos \gamma' \cdot \operatorname{tg} \beta) \right]_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1'}^{\gamma_2'}. \quad (26)$$

Подставляя пределы интегрирования, получим:

$$e = \frac{1}{2\pi} \{ \sin \beta_2 [\operatorname{arctg} (\cos \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_2') - \operatorname{arctg} (\cos \beta_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_1')] - \\ - \sin \beta_1 [\operatorname{arctg} (\cos \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_2') - \operatorname{arctg} (\cos \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_1')] + \\ + \sin \gamma_2' [\operatorname{arctg} (\cos \gamma_2' \cdot \operatorname{tg} \beta_2) - \operatorname{arctg} (\cos \gamma_2' \cdot \operatorname{tg} \beta_1)] - \\ - \sin \gamma_1' [\operatorname{arctg} (\cos \gamma_1' \cdot \operatorname{tg} \beta_2) - \operatorname{arctg} (\cos \gamma_1' \cdot \operatorname{tg} \beta_1)] \}.$$

Входящие в это выражение разности арктангенсов представляют собою углы, под которыми видны соответствующие стороны прямоугольника. Так, например, для стороны  $a$  (рис. 28) на основании формулы (25) имеем:

$$\operatorname{arctg} (\cos \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_2') = \gamma_{2a}; \quad \operatorname{arctg} (\cos \beta_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma_1') = \gamma_{1a}.$$

Так как  $\gamma_{2a} - \gamma_{1a} = \theta_1$ ;  $\gamma_{2b} - \gamma_{1b} = \theta_2$  и т. д., то после подстановки в выражение для  $e$  получим:

$$e = \frac{1}{2\pi} [\theta_2 \cdot \sin \beta_2 - \theta_1 \cdot \sin \beta_1 + \theta_4 \cdot \sin \gamma_2' - \theta_3 \cdot \sin \gamma_1'].$$

Если углы отсчитывать не от нормали (оси  $z$ -ов), а от освещаемой плоскости, то

$$\sin \beta_1 = -\cos \varphi_1; \quad \sin \beta_2 = \cos \varphi_2; \quad \sin \gamma_1' = -\cos \varphi_3; \quad \sin \gamma_2' = \cos \varphi_4.$$

Подставляя эти значения в последнее равенство, получим формулу (21) Винера, т. е.

$$e = \frac{1}{2\pi} [\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 + \theta_2 \cdot \cos \varphi_2 + \theta_3 \cdot \cos \varphi_3 + \theta_4 \cdot \cos \varphi_4].$$

Задача по определению горизонтальной освещенности от вертикального равномерно светящегося прямоугольника решается совершенно аналогичным путем. В этом случае на основании формулы (14)

$$dE = \frac{B \cdot dx \cdot dy}{z^2} \cos^4 \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta = B \cdot \sin \beta \cdot \cos^2 \gamma \cdot d\beta \cdot d\gamma.$$

Величина к. е. о. будет равна:

$$e = \frac{1}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sin \beta \cdot \cos^2 \gamma \cdot d\beta \cdot d\gamma.$$

Заменяя углы  $\gamma$  углами  $\gamma'$ , не зависящими от  $\beta$ , на основании формулы (25) получим:

$$\begin{aligned} e &= \frac{1}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\gamma_1'}^{\gamma_2'} \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta \cdot d\beta \cdot d\gamma'}{\cos^2 \gamma' (1 + \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma')^2} = \\ &= -\frac{1}{2\pi} \cos \beta \cdot \operatorname{arctg} (\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma') \Big|_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1'}^{\gamma_2'} \end{aligned} \quad (26')$$

Подставляя пределы интегрирования и заменяя разность арктангенсов соответствующими углами видимости  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , а также заменяя углы  $\beta$  углами  $\varphi$ , после преобразований получим формулу (22) Винера, т. е.

$$e = \frac{1}{2\pi} (\theta_1 \cdot \cos \varphi_1 + \theta_2 \cdot \cos \varphi_2).$$

*б. Формула Хигби.* Формула Хигби легко получается из формулы Винера, если входящие в нее угловые величины заменить линейными.

Для вертикального прямоугольного окна формула Хигби получается следующим образом. Из рис. 26 имеем, что

$$\theta_1 = \sphericalangle QMN - \sphericalangle PMN; \quad \theta_2 = \sphericalangle Q_1MN_1 - \sphericalangle P_1MN_1;$$

$$\sphericalangle QMN = \operatorname{arctg} \frac{y_2}{\sqrt{h_1^2 + x^2}}; \quad \sphericalangle PMN = \operatorname{arctg} \frac{y_1}{\sqrt{h_1^2 + x^2}};$$

$$\sphericalangle Q_1MN_1 = \operatorname{arctg} \frac{y_2}{\sqrt{h_2^2 + x^2}}; \quad \sphericalangle P_1MN_1 = \operatorname{arctg} \frac{y_1}{\sqrt{h_2^2 + x^2}};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}}; \quad \cos \varphi_2 = -\cos \varphi_2' = -\frac{x}{\sqrt{h_2^2 + x^2}}.$$

Подставляя найденные величины в формулу Винера (22), получим:

$$e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} \left( \operatorname{arctg} \frac{y_2}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \operatorname{arctg} \frac{y_1}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} \right) - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{x}{\sqrt{h_2^2 + x^2}} \left( \operatorname{arctg} \frac{y_2}{\sqrt{h_2^2 + x^2}} - \operatorname{arctg} \frac{y_1}{\sqrt{h_2^2 + x^2}} \right). \quad (27)$$

Формула (27) в этом виде носит название формулы Хигби.<sup>1</sup>

В частном случае, при  $h_1 = 0$ ;  $h_2 = h$  и  $y_1 = 0$ ;  $y_2 = y$ , т. е. когда точка  $M$  располагается против одной из вертикальных граней

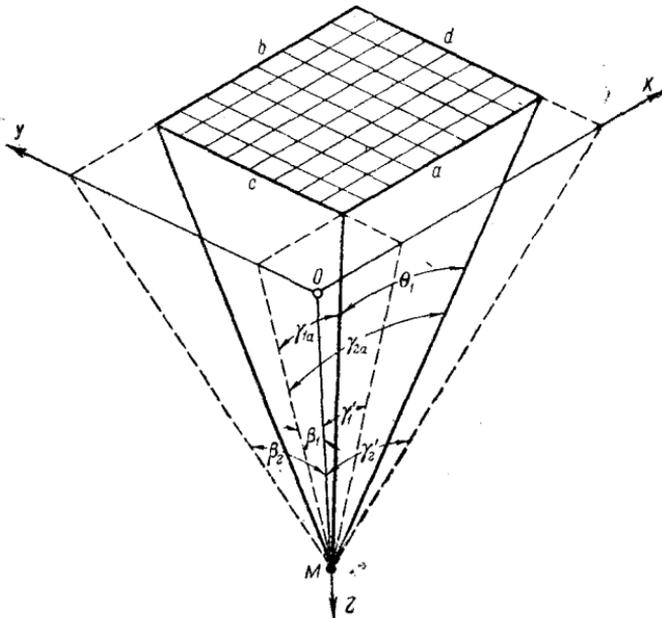


Рис. 28. Схема углов равномерно светящегося прямоугольника.

окна и на высоте подоконника, формула Хигби принимает следующий вид:

$$e = \frac{1}{2\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{y}{x} - \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} \operatorname{arctg} \frac{y}{\sqrt{h^2 + x^2}} \right). \quad (28)$$

Для бесконечно длинного светопроема по формуле (23) будем иметь:

$$e = \frac{1}{2} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) = \frac{x}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{1}{\sqrt{h_2^2 + x^2}} \right). \quad (29)$$

<sup>1</sup> Н. Н. Higbie, Prediction of daylight from vertical windows, Trans. Illum. Eng. Soc., vol. XX, 1925, № 5, p. 433.

## § 15. Приближенные методы расчета коэффициента естественной освещенности

Хотя приведенные выше формулы Винера (19) и Хигби (27) и дают возможность находить математически точные значения к. е. о. в любой точке внутри помещения, все же практически эти формулы оказываются почти неприменимыми, так как требуют многочисленных и весьма кропотливых вычислений. Особенно это относится к случаю наклонных светопроемов.

Указанная сложность математически точных методов расчета к. е. о. заставила ряд авторов обратиться к приближенным методам, к числу которых относятся методы: проф. А. А. Гершун,<sup>1</sup> проф. С. В. Беляева,<sup>2</sup> автора<sup>3</sup> и инж. К. Е. Бабурина.<sup>4</sup> Метод автора был рекомендован I Всесоюзной конференцией по естественному освещению (Ленинград, 1931 г.) в качестве основного метода для проектных организаций СССР. Мы здесь ограничимся изложением нашего метода и метода инж. К. Е. Бабурина, нашедших применение в проектной практике.

*а. Метод автора.* Предложенный нами в 1929 г. графический метод определения к. е. о. был основан на геометрической интерпретации закона проекции телесного угла. Здесь мы приведем следующее найденное нами чисто аналитическое обоснование этого метода.

Как указано выше, углы  $\gamma$  в выражении (24) нами были заменены углами  $\gamma'$ , не зависящими от углов  $\beta$ . Благодаря этому мы получили интеграл в рациональном виде, решение которого привело к известной формуле Винера (19).

Если бы мы смогли подобрать такие средние углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , в пределах которых интегрирование уравнения (24) дало бы точные результаты, то задача определения к. е. о. значительно упростилась бы. В таком случае

$$e = \frac{1}{\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \cos \beta \cdot \cos^2 \gamma \cdot d\beta \cdot d\gamma = \frac{\sin \beta}{2} \left( \frac{\gamma + \sin \gamma \cdot \cos \gamma}{\pi} \right) \Big|_{\beta_1}^{\beta_2} \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2}. \quad (30)$$

Полученное выражение  $\epsilon$  состоит из двух, не зависящих друг от друга множителей. Если ввести обозначения

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) &= \epsilon_I \\ \frac{\gamma + \sin \gamma \cdot \cos \gamma}{\pi} \Big|_{\gamma_1}^{\gamma_2} &= \epsilon_{II} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

<sup>1</sup> А. А. Гершун, Расчет естественного освещения, Труды Государственного оптического института, т. V, вып. 44, Ленинград, 1929.

<sup>2</sup> С. В. Беляев, Определение дневной освещенности помещений. Изд. Лен. Обл. Управления строительного контроля, 1929.

<sup>3</sup> А. М. Данилюк, Новый метод расчета естественного освещения от прямоугольных светопроемов, Труды II Всесоюзной светотехнической конференции, вып. IV, 1931.

<sup>4</sup> К. Е. Бабури н, Графический расчет естественного освещения и анализ световых фонарей промышленных зданий, ОНТИ, 1935, а также статья „К типизации заводов химической промышленности“ в журнале „Химстрой“, 1930, № 3.

<sup>5</sup> Аналогичная формула была получена, как математическая интерпретация нашего метода, в 1932 г. проф. А. А. Гершун, см. Справочник архитектора-

то формула (30) принимает весьма простой вид:

$$e = e_I \cdot e_{II}. \quad (32)$$

По смыслу изложенного углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  должны явиться как бы средними из всех их значений. Для определения этих средних углов можно предложить несколько приближенных решений, суть которых сводится к нахождению угла наклона  $\beta_0$  плоскости, в которой надлежит определять искомые углы  $\gamma$ . При этом можно предложить три основных варианта решения этой задачи, а именно:

1) определение углов  $\gamma$  ведется в плоскости, проходящей через точку  $M$ , в которой ищется освещенность, и наклоненной под углом  $\beta_0$ , определяемым из равенства:

$$\sin \beta_0 = \frac{1}{2} (\sin \beta_1 + \sin \beta_2);$$

2) определение углов  $\gamma$  ведется в плоскости, проходящей через точку  $M$  и продольную ось прямоугольного светопроема, и

3) определение углов ведется в плоскости, проходящей через точку  $M$  и наклоненной под углом  $\beta_0 = \frac{1}{2} (\beta_1 + \beta_2)$ .

Как показало исследование, все три способа дают результаты, достаточно близко приближающиеся к точным значениям к. е. о.

С практической точки зрения наиболее простое, а вместе с тем и достаточно точное, решение дает второй способ, который мы и рекомендуем применять при расчетах естественного освещения.

Третий способ, предложенный проф. А. А. Гершун, применим главным образом при нахождении к. е. о. аналитически по формуле (30).

Коэффициент  $e_I$  является функцией одного только угла  $\beta$ . При изменении  $\beta_1$  от 0 до  $-\frac{\pi}{2}$  и  $\beta_2$  от 0 до  $\frac{\pi}{2}$  коэффициент  $e_I$  принимает соответственно значения от 0 до 1. То же самое относится и к коэффициенту  $e_{II}$ , являющемуся функцией угла  $\gamma$ . Это весьма важное свойство позволяет построить лучевые графики I и II (рис. 29 и 30), состоящие из пучка прямых, исходящих из одного центра (полюса)  $O$ , и отличающиеся друг от друга только законом распределения прямых пучка.

Для построения этих графиков угол  $\pi$  разбивается на  $n = 100$  таких элементарных углов, чтобы каждый коэффициент  $e_I$  или  $e_{II}$  отличался от предыдущего на постоянную величину, равную  $1 : n = 0,01$ , т. е. на 1%. Углы, удовлетворяющие этому условию, находятся из равенств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) &= m \text{ (для графика I)} \\ \frac{1}{\pi} (\gamma + \sin \gamma \cdot \cos \gamma) &= m \text{ (для графика II),} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

где, при числе лучей  $n = 100$ ,  $m$  принимает последовательно значения 0,01; 0,02; 0,03 и т. д. до 0,5.

проектировщика фабрично-заводских зданий, ч. II, Москва, 1932. Однако ранее этого в 1930 г. мы пользовались подобной формулой при вычислении всех примеров к нашему докладу на II Всесоюзной светотехнической конференции.

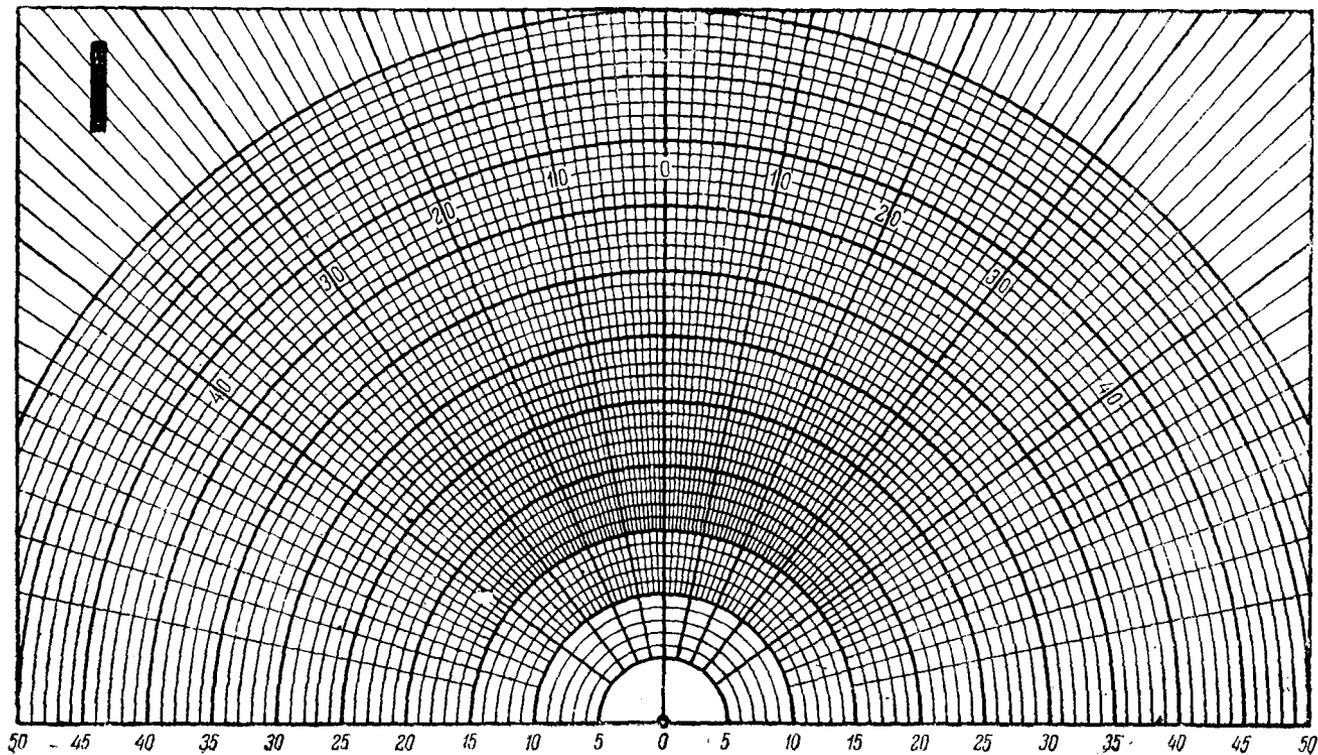


Рис. 29. График I для расчета к. е. о.

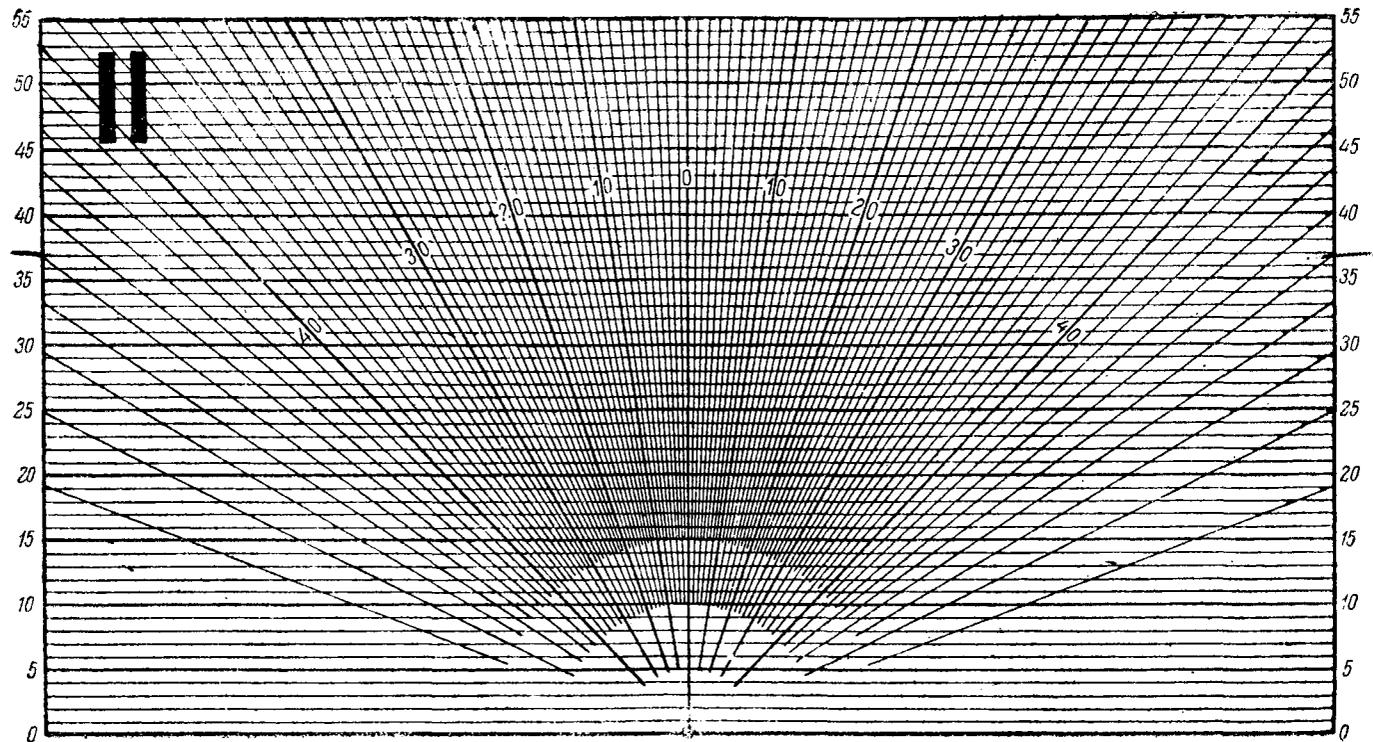


Рис. 30. График II для расчета к. е. о,

Найденные таким образом угловые величины сведены в табл. 7, по данным которой построены графики I и II. Следует отметить, что угловые величины для удобства построений измеряются от оси ординат (вправо и влево).

Кроме того, на графике I нанесена система концентрических полуокружностей, отстоящих друг от друга на равных расстояниях. На графике II соответственно нанесена система горизонтальных прямых, отстоящих друг от друга на том же расстоянии, что и полуокружности графика I.

Обращаясь к рис. 31, на котором показана схема пользования графиками, мы видим, что коэффициент  $\varepsilon_I$  находится по графику I следу-

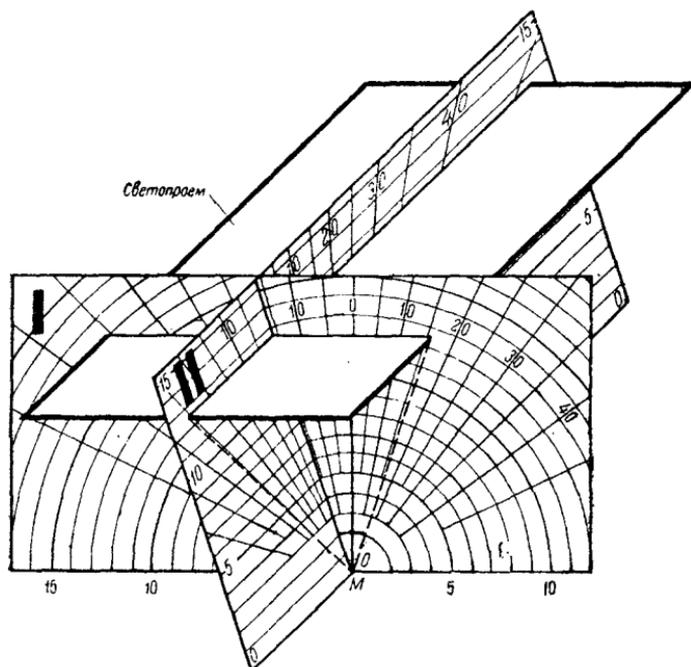


Рис. 31. Пространственная схема пользования графиками I и II.

ющим образом. Полюс графика I совмещаем с точкой  $M$ , в которой ищется освещенность, и располагаем график в плоскости поперечного разреза светопроема так, чтобы основание графика было горизонтально. По совмещению отсчитываем число лучей  $n_I$ , которое уместится в пределах поперечного разреза светопроема. Так как лучей в графике 100, то цена каждого луча равна 0,01. Искомый коэффициент  $\varepsilon_I$  получается умножением найденного числа лучей на 0,01, т. е.

$$\varepsilon_I = n_I \cdot 0,01.$$

Коэффициент  $\varepsilon_{II}$  находится по графику II, для чего, как было указано выше, необходимо график II расположить так, чтобы его полюс совместился с точкой  $M$ , а плоскость его проходила через продольную ось симметрии светопроема (рис. 31). Основание графика при

этом должно располагаться горизонтально. По совмещении находим число лучей, уместяющихся в пределах продольного разреза светопроема. Умножая далее  $n_{II}$  на 0,01, получим второй коэффициент  $\varepsilon_{II}$ , т. е.

$$\varepsilon_{II} = n_{II} \cdot 0,01.$$

Для получения к. е. о. в точке  $M$  остается только перемножить коэффициенты  $\varepsilon_I$  и  $\varepsilon_{II}$ .

Таблица 7

Шкала угловых размеров лучей в графиках I и II

№ луча	График I	График II	№ луча	График I	График II	№ луча	График I	График II	№ луча	График I	График II
	в градусах										
0	0,00	0,00	13	15,07	11,87	26	31,33	24,91	39	70,20	41,74
1	1,15	0,90	14	16,26	12,81	27	32,68	26,02	40	72,00	43,40
2	2,29	1,80	15	17,46	13,76	28	34,06	27,14	41	73,80	45,15
3	3,44	2,70	16	18,66	14,72	29	35,45	28,29	42	75,60	47,02
4	4,59	3,60	17	19,88	15,69	30	36,87	29,46	43	77,40	49,04
5	5,74	4,51	18	21,10	16,66	31	38,32	30,66	44	79,20	51,23
6	6,89	5,42	19	22,33	17,65	32	39,79	31,90	45	81,00	53,65
7	8,05	6,33	20	23,58	18,64	33	41,30	33,16	46	82,80	56,38
8	9,21	7,24	21	24,83	19,65	34	42,84	34,47	47	84,60	59,58
9	10,37	8,15	22	26,10	20,67	35	44,43	35,81	48	86,40	63,56
10	11,54	9,07	23	27,39	21,71	36	46,05	37,21	49	88,20	69,12
11	12,71	10,00	24	28,68	22,76	37	47,73	38,65	50	90,00	90,00
12	13,89	10,93	25	30,00	23,83	38	49,46	40,16			

Практически нахождение коэффициентов  $\varepsilon_I$  и  $\varepsilon_{II}$  по поперечному и продольному разрезам светопроема складывается из следующих операций (независимо от наклона плоскости светопроема):

1. Полюс графика I совмещаем с точкой  $M$  на поперечном разрезе светопроема так, чтобы основание графика расположилось горизонтально, и отсчитываем число лучей  $n_I$ , уместяющихся в пределах разреза светопроема (рис. 32). Коэффициент  $\varepsilon_I$  равен  $0,01n_I$ .

2. Одновременно с чтением отсчета  $n_I$  находим номер полуокружности, которая проходит через точку  $C$  — центр площади остекления светопроема. Этот номер обозначает собою расстояние  $OC$  (рис. 32), выраженное в условных единицах и необходимое для того, чтобы автоматически располагать график II в требуемой плоскости.

3. На графике II находим горизонтальную прямую, соответствующую номеру найденной выше полуокружности. Совмещая далее продольный разрез светопроема с этой горизонтальной линией, а ось ординат с точкой  $M$  или ее проекцией на продольную ось симметрии светопроема, отсчитываем количество лучей  $n_{II}$ , которое уместяется в пределах продольного разреза светопроема. Умножая  $n_{II}$  на 0,01, получим второй коэффициент  $\varepsilon_{II}$ .

Таким образом определение к. е. о. составляется из четырех отдельных операций, а именно:

- 1) нахождение коэффициента  $\epsilon_I$  по графику I;
- 2) нахождение номера полуокружности графика I, проходящей через центр светопроема;
- 3) нахождение по графику II коэффициента  $\epsilon_{II}$ .
- 4) нахождение к. е. о. путем умножения произведения найденных выше коэффициентов  $\epsilon_I$  и  $\epsilon_{II}$  на коэффициент пропускания  $\tau$ , т. е.

$$e = \epsilon_I \cdot \epsilon_{II} \cdot \tau$$

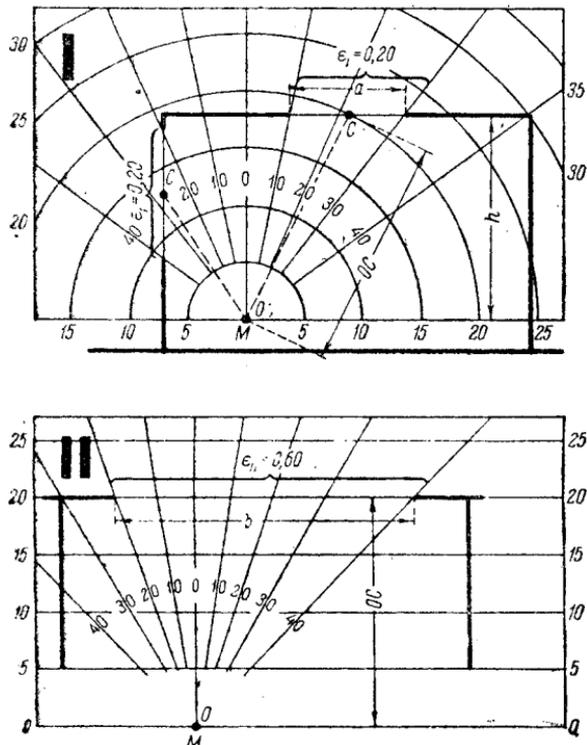


Рис. 32. Схема пользования графиками I и II.

дает центр светопроема  $C$ , умножить на отношение масштабов  $M_2$  и  $M_1$  продольного и поперечного разрезов. Так, например, если центр светопроема  $C$  попадает на полуокружность  $N=12,7$  при масштабе поперечного разреза  $M_1=1:100$  нат. вел., а продольный разрез для графика II вычерчен в масштабе  $M_2=1:200$  нат. вел., то необходимо совместить продольную ось светопроема с горизонтальной линией графика II с номером

$$N' = N \frac{M_2}{M_1} = 12,7 \frac{1:200}{1:100} = 6,35.$$

Остальные действия остаются без изменений.

Благодаря введению в графики систем концентрических полуокружностей и прямых линий нахождение коэффициента  $\epsilon_{II}$  настолько упро-

Коэффициент  $\tau$  учитывает неизбежные потери света при прохождении его через светопроемы вследствие поглощения и отражения света стеклами, затенения переплетами, загрязненности стекол и пр.

Следует отметить весьма важное с практической точки зрения свойство графиков, заключающееся в том, что нахождение  $\epsilon_I$  и  $\epsilon_{II}$  можно производить по разрезам, вычерченным в любых масштабах. Это положение вытекает из закона подобия.

Если поперечный и продольный разрезы вычерчены в различных масштабах, то при нахождении коэффициента  $\epsilon_{II}$  по графику II необходимо только расстояние  $OC$  выдержать в соответствующем масштабе. Для этого следует номер полуокружности  $N$ , на которую попада-

щается, что при этом не требуется производить никаких графических построений, что весьма удобно для целей практики.

Следует отметить, что для всех точек, располагающихся вдоль линии, перпендикулярной к плоскости поперечного разреза, коэффициент  $\epsilon_I$  остается величиною постоянной; изменяется только коэффициент  $\epsilon_{II}$ . Очевидно, что при применении графика II остается постоянной и горизонталь, соответствующая номеру той полуокружности гра-

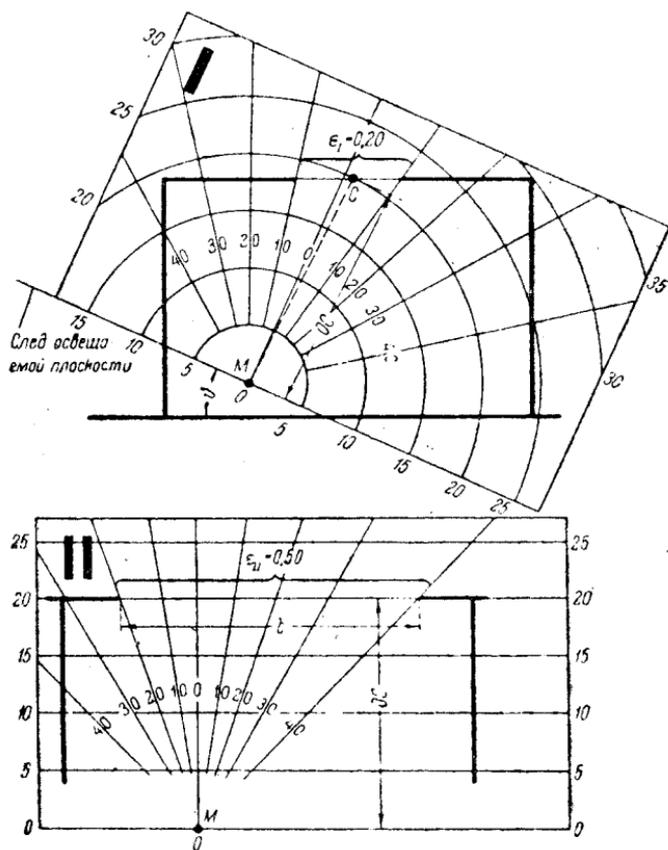


Рис. 33. Схема определения освещенности наклонной плоскости.

фика I, с которой совпадает центр светопроема. Для нахождения коэффициента  $\epsilon_{II}$  в этом случае следует перемещать по горизонтали линию продольного разреза светопроема до совмещения с точкой, в которой ищется освещенность, с осью ординат графика и просчитать число лучей, уместающихся в разрезе светопроема.

Сказанное выше относилось к случаю определения освещенности горизонтальной плоскости. Совершенно аналогично определяется освещенность любой наклонной плоскости (рис. 33). Разница состоит только в том, что при определении величины коэффициента  $\epsilon_I$  основание графика I следует совместить на поперечном разрезе помещения со следом

освещаемой плоскости, а полюс графика с точкой  $M$ , в которой ищется освещенность. Все же остальные операции (определение числа лучей, нахождение номера полуокружности и т. д.) остаются такими же.

—Перейдем теперь к вопросу о погрешностях, получающихся при определении значений  $k$ ,  $e$ ,  $o$ . по описанному выше методу. Здесь мы имеем в виду прежде всего ту основную погрешность, которая происходит вследствие вышеуказанной замены углов  $\gamma'$  средними углами  $\gamma$ . Как показали многочисленные сравнительные расчеты, величина погрешности при расчетах зависит от формы и величины светопроемов. При этом выяснилось, что

1) погрешности увеличиваются с приближением формы светопроема от бесконечной полосы к квадрату, при котором ошибка достигает наибольшей величины, и

2) погрешности увеличиваются с приближением точки к светопроему или, что то же, с пропорциональным увеличением размеров светопроема.

Численно погрешности даже в самых невыгодных случаях, т. е. при квадратных светопроемах, не превышают 5% и обычно колеблются в пределах 1—3%.

Все сказанное о нашем методе показывает, что, пользуясь графиками I и II, можно находить значение  $k$ ,  $e$ ,  $o$ . в любых точках освещаемой плоскости, как угодно наклоненной к горизонтальной плоскости, от светопроемов любого наклона. Характерной особенностью этого метода, по сравнению с другими графическими методами, является его безмасштабность. Как мы видели, для определения  $k$ ,  $e$ ,  $o$ . нет необходимости делать какие-либо дополнительные чертежи, так как при расчете могут быть использованы планы и разрезы помещений, вычерченные в любых масштабах. Благодаря же применению лучевых графиков оказывается возможным учитывать и затенения, например от загораживающего влияния толщины стены.

*б. Метод инж. К. Е. Бабурина.* В ряде случаев могут найти применение и другие методы расчета естественного освещения, как, например, методы проф. С. В. Беляева и инж. К. Е. Бабурина. Оба эти метода аналогичны, вследствие чего мы кратко остановимся только на последнем.

Расчет по этому методу производится по специальным диаграммам, каждая из которых состоит из ряда кривых и соответствует определенному типу светопроемов (вертикальные и горизонтальные). При помощи этих диаграмм определяются значения  $k$ ,  $e$ ,  $o$ . при бесконечной длине светопроемов, соответствующие коэффициенту  $\epsilon_1$ .

На рис. 34 изображена диаграмма для бесконечно длинного вертикального светопроема, на которой по оси абсцисс отложены относительные горизонтальные удаления от плоскости светопроема до точки, в которой ищется освещенность, т. е.  $x' = x : h_2$ , а по оси ординат — значения  $k$ ,  $e$ ,  $o$ . (в %). Кривые даны для различных соотношений  $m = h_0 : h_2$  (от 0,1 до 1,0). Этой диаграммой удобно пользоваться тогда, когда высота  $h_2$  от уровня освещаемой плоскости до верхней грани светопроема задана; в таком случае кривые наглядно иллюстрируют ход освещенности при различной высоте окна  $h_0$ .

Следует отметить, что диаграммы Бабурина (как и Беляева) не дают возможности учесть затеняющее влияние толщины стены, перекрытия

или светопроема, которое в действительности значительно уменьшает реальные значения к. е. о. Это обстоятельство является существенным их недостатком. Выгодной особенностью этих диаграмм является то, что

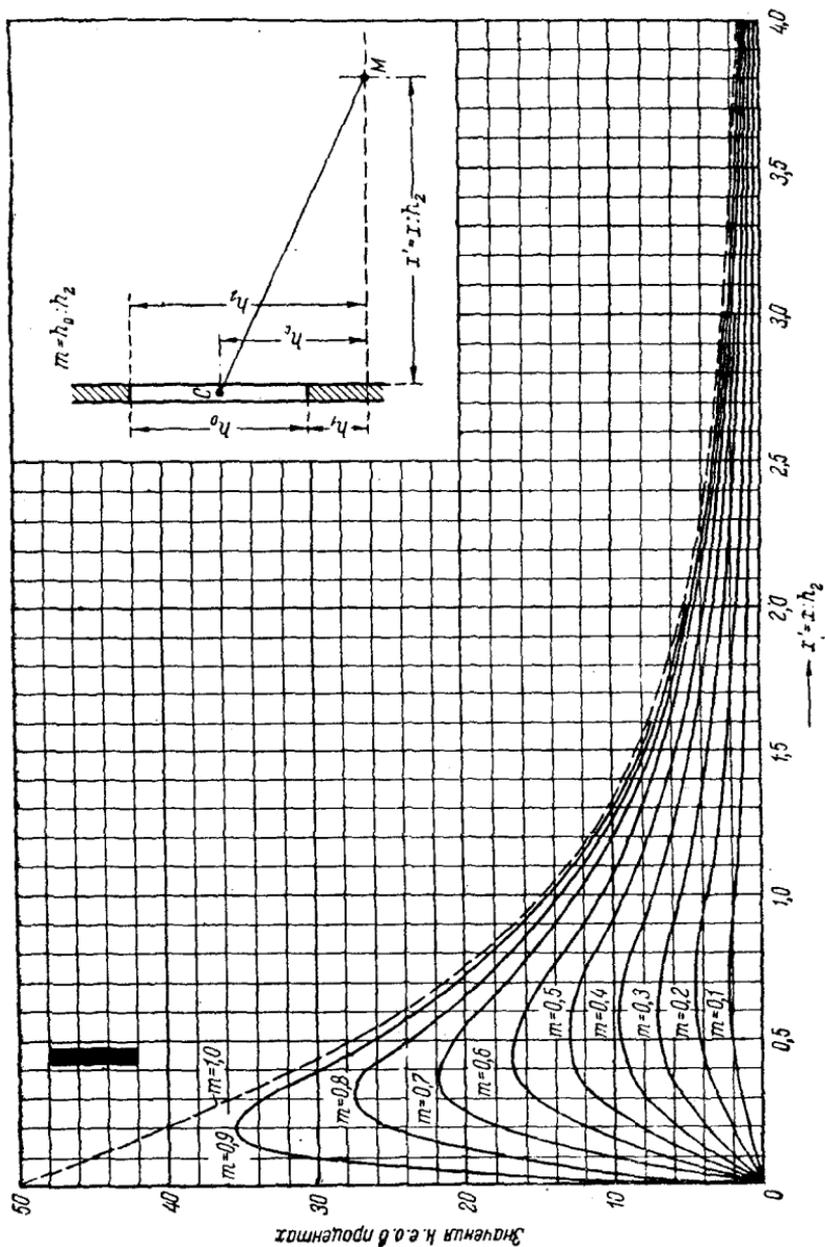


Рис. 34. Диаграмма I Бабурина для определения величины коэффициента  $\epsilon_j$  при освещении вертикальными светопроемами.

при бесконечной длине светопроема кривая к. е. о. может быть построена путем простого переноса ординат соответствующей кривой с диаграммы прямо на поперечный разрез помещения.

Как указано, диаграммы Бабурина (как и Беляева) дают возможность определить к. е. о. только при условии бесконечной длины светопроема.

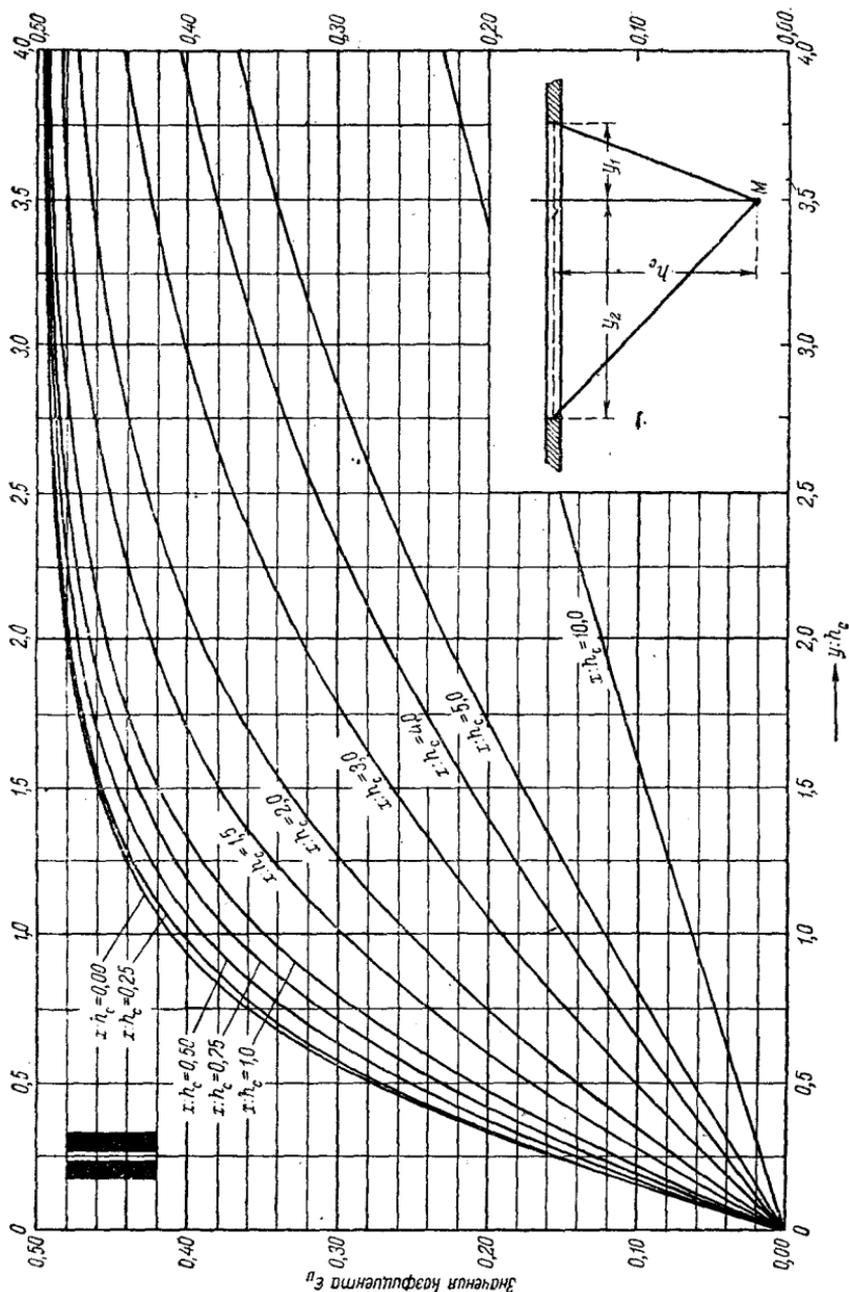


Рис. 35. Диаграмма для определения величины коэффициента  $\epsilon_{II}$ , учитывающего длину светопроемов.

Между тем светопроемы, применяемые в большинстве случаев практики, имеют такую длину, которая не позволяет считать их бесконечно длин-

ными (например, окна, прерываемые по своей длине простенками, и т. д.). Многочисленные сравнительные подсчеты убедительно показывают, что неучет длины светопроемов приводит к значительным ошибкам.

Из сказанного следует, что учет фактической длины светопроемов должен производиться в обязательном порядке, путем введения поправочного множителя, аналогичного коэффициенту  $\epsilon_{II}$  при расчете по нашему методу. Способ определения коэффициента  $\epsilon_{II}$ , положенный в основу нашего метода, может быть полностью применен и в данном случае. Для этой цели можно прежде всего применить наш график II (рис. 30), а также кривую проф. А. А. Гершун, <sup>1</sup> номограмму Бабурина и, наконец, диаграмму II (рис. 35), построенную нами специально для диаграмм типа Бабурина — Беляева.

Кривые диаграммы II (рис. 35) дают возможность определить значение коэффициента  $\epsilon_{II}$  для различных соотношений  $x : h_c$  в зависимости от длины светопроема  $y : h_c$ , отсчитываемой от вертикали, проходящей через точку  $M$ . Кривые этой диаграммы построены по формуле:

$$\epsilon_{II} = \frac{1}{\pi} (\gamma + \sin \gamma \cdot \cos \gamma),$$

в которой углы  $\gamma$  вычисляются из равенства (см. рис. 27):

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{y}{h_c} \cos \beta_0; \operatorname{tg} \beta_0 = x : h_c.$$

Если светопроем располагается по обе стороны от плоскости поперечного разреза, проходящего через точку  $M$ , в которой ищется освещенность, то коэффициенты  $\epsilon_{II}$  определяются для каждой такой части светопроема отдельно и затем суммируются. Если светопроем располагается на некотором расстоянии по одну сторону от плоскости, проходящей через точку  $M$ , то коэффициент  $\epsilon_{II}$  равен разности коэффициентов, определяемых в зависимости от удаления торцевых граней светопроема от этой плоскости.

Способ пользования диаграммами Бабурина в сочетании с нашей диаграммой II (рис. 35) сводится к следующему:

1. На диаграмме (рис. 34) по кривой, соответствующей данному  $m$ , находим значение коэффициента  $\epsilon_{II}$  в зависимости от  $x'$ .

2. Вычисляем отношение  $x : h_c$  и по соответствующей этому значению кривой диаграммы II (рис. 35) находим слагаемые коэффициента  $\epsilon_{II}$  в зависимости от  $y : h_c$ .

3. Определяем значение к. е. о., равное произведению коэффициентов  $\epsilon_I$  и  $\epsilon_{II}$  на коэффициент пропускания  $\tau$ , т. е.

$$e = \epsilon_I \cdot \epsilon_{II} \cdot \tau.$$

## § 16. Затенение противоположными зданиями

Рассмотрим теперь случай, когда свободный доступ света в помещение ограничивается противоположными зданиями, вследствие чего

<sup>1</sup> См. Справочник архитектора-проектировщика фабрично-заводских зданий, ч. II, Москва, 1932.

освещенность внутри помещения уменьшается. Экранирующее влияние противоположащих зданий можно определять следующим, разработанным нами способом, основанным на учете плотности светового потока, падающего на светопроем. Следует отметить, что использование в качестве исходной величины светового потока, падающего на светопроем, было впервые намечено Вебером и затем применено Бурхардом и Фрюлингом при расчете естественного освещения помещений по методу коэффициента использования.<sup>1</sup>

Прежде чем перейти к описанию этого способа, необходимо определить, какую яркость должен иметь вертикальный светопроем  $pqst$  (рис. 23), чтобы при яркости небосвода  $B$  в точке  $M$  создавалась одинаковая освещенность, равная  $E$ . Для этого из точки  $M$  проведем через грани светопроема  $pqst$  телесный угол  $\omega$ , который вырежет на полусфере участок небосвода  $PQST$ . Из закона подобия (§ 13) следует, что любая светящаяся поверхность, вписанная в один и тот же телесный угол  $\omega$ , создает одинаковую освещенность в точке  $M$  в том случае, когда их яркости равны между собою, т. е.  $B_1 = B_2 = \dots = B$ . Другими словами, яркость  $B_1$  светопроема  $pqst$  в этом случае должна быть равна яркости небосвода. При яркости  $B_1$  на светопроем  $pqst$  падает световой поток, плотность которого может быть характеризована значением к. е. о. Для вертикального светопроема  $pqst$  освещенность любой точки его плоскости, при условии наличия свободного горизонта, равна  $e_0 = 0,50$ .

Предположим теперь, что перед светопроемом располагается противоположащее здание, которое экранирует некоторую долю участка небосвода  $PQST$ , видимого из точки  $M$  через светопроем  $pqst$ . В этом случае освещенность в точке  $M$  уменьшится, так как на светопроем падает световой поток меньшей плотности, чем при наличии свободного горизонта, т. е. при отсутствии противоположащих зданий. К тому же плотность светового потока распределится в пределах плоскости светопроема неравномерно, уменьшаясь от верхней грани к нижней. Если обозначить через  $\bar{e}$  среднее значение к. е. о. в пределах всей плоскости светопроема, то на основании закона подобия освещенность в точке  $M$  внутри помещения при наличии затенения равна:

$$E' = E \frac{\bar{e}}{e_0} = E \cdot \eta, \quad (34)$$

где  $E$  — освещенность внутри помещения в точке  $M$  при свободном горизонте и

$\eta$  — коэффициент экранирования (затенения) противоположащими зданиями.

Если перед светопроемом располагается на расстоянии  $L$  бесконечно длинное в обе стороны здание (рис. 36), то среднее значение к. е. о. ( $\bar{e}$ ) в отношении всей плоскости светопроема определяется следующим образом.

<sup>1</sup> Г. Ф р ю л и н г, Освещение помещений естественным светом, его измерение и расчет по методу коэффициента использования, Госстройиздат, 1933.

Освещенность какой-либо точки плоскости вертикального светопроема на основании формулы (23') равна:

$$e = \frac{1}{2}(1 - \sin \beta),$$

где  $\beta$  — угол между нормалью к плоскости светопроема и лучом, падающим на данную точку и проходящим через точку  $G$  (рис. 36).

Для всех точек, располагающихся на уровне и выше точки  $G$ , освещенность равна  $e_0 = 0,50$ , так как  $\beta = 0$ . При расположении точки ниже точки  $G$ , вследствие экранирования противоположными зданиями, освещенность будет меньше  $e_0$ .

Если выразить  $\sin \beta$  через линейные величины, то среднее значение  $k. e. o.$  в пределах высоты светопроема равно:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \frac{1}{2(H_2 - H_1)} \int_{H_1}^{H_2} \left(1 - \frac{H}{\sqrt{L^2 + H^2}}\right) dH = \frac{1}{2h_0} \left[ H - \sqrt{L^2 + H^2} \right]_{H_1}^{H_2} = \\ &= \frac{1}{2h_0} [H_2 - \sqrt{L^2 + H_2^2} - H_1 + \sqrt{L^2 + H_1^2}]. \end{aligned} \quad (35)$$

Так как при отсутствии затенений освещенность любой точки наружной плоскости вертикального светопроема равна  $e_0 = 0,50$ , то коэффициент затенения противоположными зданиями равен:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\bar{e}}{e_0} = \\ &= \frac{1}{h_0} [h_0 - \sqrt{L^2 + H_2^2} + \\ &+ \sqrt{L^2 + H_1^2}] = \frac{F}{h_0}. \end{aligned} \quad (36)$$

Величина  $F$  весьма просто определяется при помощи следующего графического построения (рис. 36).

Проведем из точки  $G$ , как из центра, дугу окружности  $RQ$  до пересечения ее с прямой  $GP$  в точке  $Q$ . Далее из точки  $P$ , как из центра, проведем дугу второй окружности  $QN$  до пересечения ее с плоскостью светопроема  $RP$  в точке  $N$ . Легко показать, что отрезок  $NR$ , измеренный в масштабе разреза, представляет собою величину  $F$ .

Действительно, из рис. 36 видно, что

$$NR = PR - PN = PR - PQ$$

$$PR = h_0; PQ = GP - GR = \sqrt{L^2 + H_2^2} - \sqrt{L^2 + H_1^2}.$$

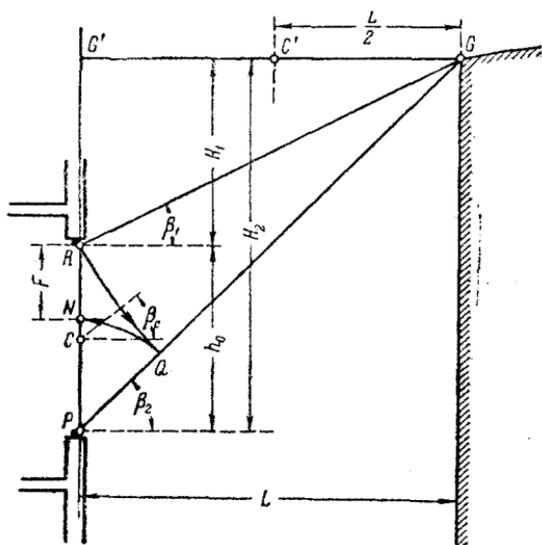


Рис. 36. Определение степени затенения противоположными зданиями.

Таким образом

$$NR = h_0 - \sqrt{L^2 + H_2^2} + \sqrt{L^2 + H_1^2} = F.$$

Если световой поток загораживается и боковыми стенами, например при освещении помещений путем устройства светового двора, то коэффициент затенения  $\eta$  определяется аналогично изложенному как отношение среднего значения к. е. о. окна  $\bar{e}$  к значению к. е. о.  $e_0$  при свободном горизонте. Эта задача решается приближенно следующим образом. Если значения к. е. о. в отдельных точках плоскости окна графически откладывать в перпендикулярном к ней направлении, то мы получим в вертикальных и горизонтальных разрезах световые профили в виде криволинейных трапеций. При обычных размерах окон криволинейные трапеции с достаточной для практики точностью можно заменить прямолинейными. Тогда среднее значение к. е. о. окна можно принять равным значению к. е. о. в его центре. При этом габариты светового двора принимают за светопроем и находят значение к. е. о. от него в центре рассматриваемого окна. Для этого по нашему методу необходимо на разрезе (рис. 36) совместить наружную плоскость окна с основанием графика I таким образом, чтобы центр окна  $C$  совпал с полюсом графика  $O$ , и просчитать число лучей, уместающихся в пределах ширины двора  $G'G = L$ . Умножая найденное число лучей на 0,01, получим значение коэффициента  $\epsilon_I$ . Одновременно отмечаем номер той полуокружности, с которой совпадает ось светового двора  $C'$ . Далее накладываем план светового двора на график II так, чтобы его ось  $C'C'$  расположилась на горизонтали графика того же номера, что и отмеченная полуокружность графика I, а ось ординат графика II — с центром окна  $C$ . Отсчитывая число лучей, уместающихся в пределах длины двора, и умножая его на 0,01, получим значение коэффициента  $\epsilon_{II}$ . Умножая коэффициент  $\epsilon_I$  на  $\epsilon_{II}$ , найдем значение  $e_c \approx \bar{e}$ , т. е.

$$e_c = \epsilon_I \cdot \epsilon_{II}.$$

Деля  $e_c$  на  $e_0 = 0,50$ , получим искомым коэффициент затенения

$$\eta = \frac{e_c}{e_0} = \frac{\epsilon_I \cdot \epsilon_{II}}{0,5}. \quad (37)$$

При бесконечной длине противоположных зданий  $e_c = \epsilon_I$ , так как  $\epsilon_{II} = 1,0$ . В этом случае на основании формулы (23')  $e_c$  может быть найдено и аналитически по формуле:

$$e_c = \frac{1}{2} (1 - \sin \beta_c),$$

где  $\beta_c$  — угол, образованный нормалью к плоскости светопроема с лучом, соединяющим центр окна  $C$  с угловой точкой  $G$  карниза противоположащего здания.

## § 17. Примеры расчета

Поясним изложенные методы определения к. е. о. несколькими примерами.

**Пример 1.** Помещение размерами в плане  $A = 24,0$  м,  $B = 36,0$  м и высоту  $h = 5,0$  м (от рабочей плоскости) освещается одним фона-

рем Буало ( $h_0 = 2,40$  м,  $d = 1,0$  м) и одним двускатным фонарем ( $a_0 = 2,40$  м,  $d = 1,0$  м). Требуется определить освещенность в 9 точках поперечного сечения, расположенного на расстоянии 9,0 м от середины помещения. Поперечный и продольный разрезы помещения с нумерацией точек, в которых необходимо найти освещенность, приведены на рис. 37. Коэффициент пропускания условно принимается равным  $\tau = 0,40$ .

*а. Световой фонарь Буало.* Фонарь Буало состоит из двух вертикальных светопроемов I и II, определение освещенностей от которых производится отдельно.

Светопроем I. Освещенность в точках 0 и 1 равна нулю, так как световой поток на участке 0—1 полностью загороживается перекрытием. Вследствие этого световой профиль располагается только вправо от точки 1 (до точки 8).

Освещенность в точке 2 по нашим графикам I и II определяется следующим образом. Поперечный разрез помещения, вычерченный на кальке, накладывается на график I так, чтобы след рабочей плоскости совместился с основанием графика, а точка 2 — с его полюсом (рис. 29). Отсчитывая число лучей, уместающихся в поперечном разрезе светопроема I, равное в нашем случае  $n_1 = 5,6$ , и умножая это число на 0,01, получим значение коэффициента  $\epsilon_1 = 0,056 = 5,6\%$ . Одновременно отмечаем номер той полуокружности графика I, с которой совпадает точка  $C_1$  — центр светопроема I; в нашем случае  $N = 15,6$ .<sup>1</sup> Для нахождения значения коэффициента  $\epsilon_{II}$  на график II накладываем продольный разрез светопроемов. При этом совмещаем продольную ось светопроемов с горизонтальной линией графика II того же номера  $N = 15,6$ , что и отмеченная выше полуокружность графика I, а след плоскости поперечного разреза — с осью ординат графика. Далее отсчитываем число лучей, уместающихся в продольном разрезе обеих панелей светопроема (84,2 луча). Умножая найденное число лучей на 0,01, получим значение коэффициента  $\epsilon_{II} = 0,842$ .

Умножая произведение найденных значений коэффициентов  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_{II}$  на коэффициент пропускания  $\tau = 0,40$ , получим окончательно:

$$e = 5,6 \cdot 0,842 \cdot 0,40 = 1,89\%.$$

По диаграмме Бабурина (рис. 34) значение коэффициента  $\epsilon_1$  определяется следующим образом.

Предварительно вычисляем

$$m = \frac{h_0}{h_2} = \frac{2,40}{8,40} = 0,286; \quad x' = \frac{x}{h_2} = \frac{3,0}{8,4} = 0,357.$$

По этим значениям на диаграмме отыскиваем кривую  $m = 0,286$ , по которой для  $x' = 0,357$  находим  $\epsilon_1 = 5,6\%$ , т. е. тот же результат, что и по нашему графику I. Определение коэффициента  $\epsilon_{II}$  производится по нашему графику II, как выше изложено.

<sup>1</sup> При расчете автор пользовался графиками, в которых полуокружности и горизонтальные линии располагались через 5 мм. Масштаб разрезов был равен 1 : 100 нат. вел.

Подобным образом определяются коэффициенты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_{II}$  для всех точек профиля, а затем и искомые значения к. е. о. При этом следует только отметить, что для точек 7 и 8 нижняя грань вертикального бортика светопроема II, отмеченная на рис. 37 буквой  $D_2$ , уже оказы-

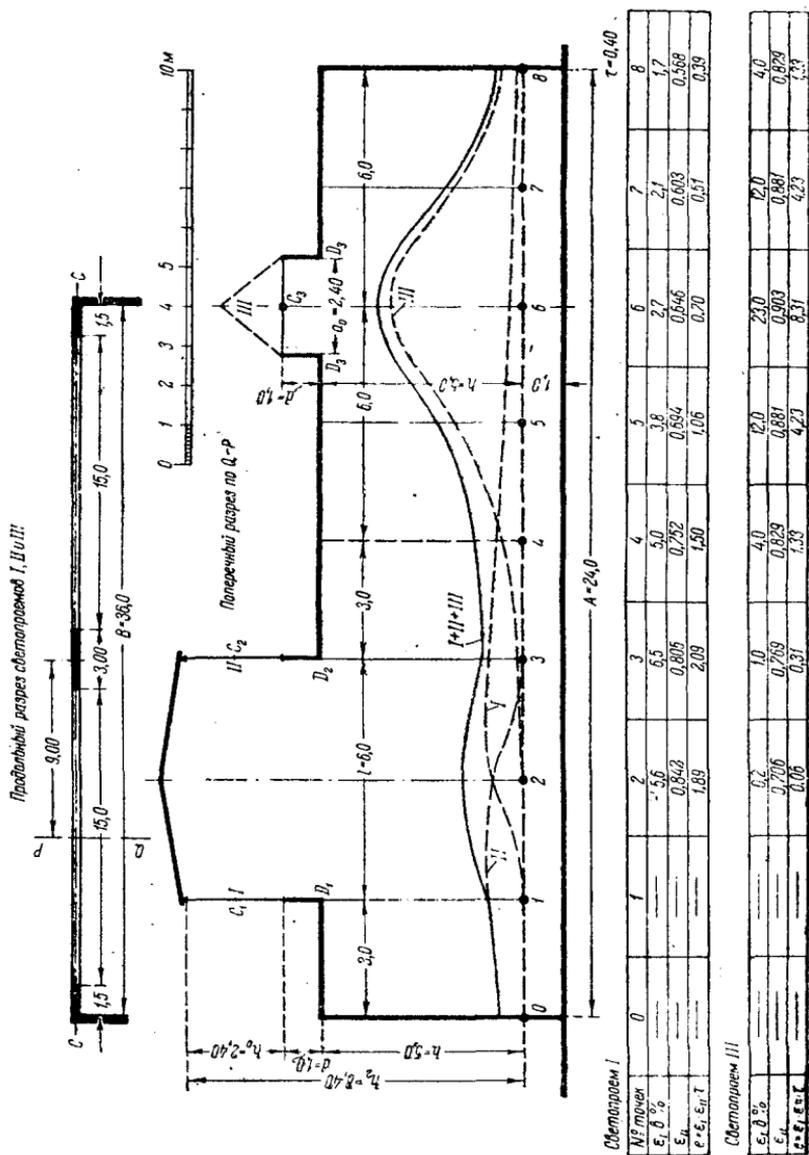


Рис. 37. Пример расчета к. е. о. от световых фонарей.

вает загораживающее влияние, вследствие чего отсчитывается число лучей, уместяющихся в пределах между точкой  $D_2$  и нижней гранью светопроема I. Для удобства все вычисления желательно сводить в таблицу, помещенную непосредственно под поперечным разрезом, как это пока-

зано на рис. 37. При этом легко можно видеть все вычисления, относящиеся к той или иной точке рабочей плоскости.

Светопроем II. Освещенности от светопроема II определяются совершенно аналогичным способом. Вследствие того, что разбивка точек произведена симметрично относительно вертикальной оси фонаря, освещенность от светопроема II в точке 0 равна освещенности от светопроема I в точке 4 и, соответственно, освещенность в точке 1 равна освещенности в точке 3. Очевидно, что освещенности в точке 2 от обоих светопроемов равны между собою, так как точка 2 лежит на оси симметрии.

Таким образом при разбивке точек всегда следует стремиться к тому, чтобы они располагались симметрично относительно вертикальных осей фонарей. В таком случае совершенно достаточно определить значения к. е. о. в ряде точек только от одного самого крайнего светопроема. Сказанное справедливо, конечно, только при равных пролетах и одинаковых световых фонарях.

*б. Двускатный световой фонарь.* Двускатный фонарь состоит только из одного горизонтального светового проема, обозначенного на рис. 37 римской цифрой III. Световой профиль от такого фонаря, симметричен относительно вертикальной оси фонаря, т. е. точки б, вследствие чего достаточно определить освещенности в точках, располагающихся по левую сторону от вертикальной оси фонаря.

Нахождение коэффициентов  $\epsilon_I$  и  $\epsilon_{II}$  от горизонтального светопроема III производится по нашим графикам I и II совершенно так же, как и от вертикальных светопроемов. Найденные значения  $\epsilon_I$  и  $\epsilon_{II}$ , а также величины к. е. о. сведены в таблицу, помещенную под поперечным разрезом на рис. 37.

Освещенности от всех трех светопроемов получают путем суммирования соответствующих значений к. е. о. от каждого светопроема.

Весьма желательно всегда строить световые профили как от каждого светопроема в отдельности, так и суммарную кривую к. е. о. Построение таких световых профилей позволяет выявлять, какую роль играет тот или иной светопроем в создании общей освещенности.

На поперечном разрезе (рис. 37) построены такие световые профили, наглядно показывающие, что освещенности от двускатного фонаря очень быстро уменьшаются по мере удаления от него. Однако он создает максимальную освещенность, в данном случае примерно в четыре раза большую, чем каждый вертикальный проем фонаря Буало с той же площадью остекления.

*Пример 2.* Помещение размерами в плане  $A = 6,0$  м,  $B = 12,0$  м освещается тремя окнами, для которых  $h_1 = 0,0$  м;  $h_2 = h_0 = 3,6$  м и  $b_0 = 2,40$  м. Коэффициент пропускания условно принимаем равным  $\tau = 0,50$ . Необходимо определить значения к. е. о. в поперечном сечении у торцевой стены в точках 1, 2, 3 и 4 (рис. 38).

Расчет начинаем с точки 1. Накладываем разрез помещения (вычерченный на кальке) на график I так, чтобы точка 1 совпала с полюсом графика. Отсчитываем число лучей, уместящихся в пределах высоты светопроема, равное в нашем случае  $n_1 = 7,0$  лучей, и находим  $\epsilon_I = 7,0\%$ . Одновременно отмечаем номер той полуокружности, с которой совпадает центр C светопроема; в нашем случае  $N = 12,6$ . Далее накладываем

план помещения на график II так, чтобы продольная ось светопроемов расположилась на горизонтали  $N=12,6$ , совмещаем ось ординат графика со следом плоскости разреза у торцевой стены и отсчитываем число лучей, уместяющихся в пределах всех трех окон (26,6 лучей); отсюда получаем, что  $\varepsilon_{II}=0,266$ . Умножая произведение коэффициентов на коэффициент пропускания  $\tau=0,50$ , получим величину к. е. о. в точке 1

$$e_1 = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_{II} \cdot \tau = 7,0 \cdot 0,266 \cdot 0,50 = 0,93\%$$

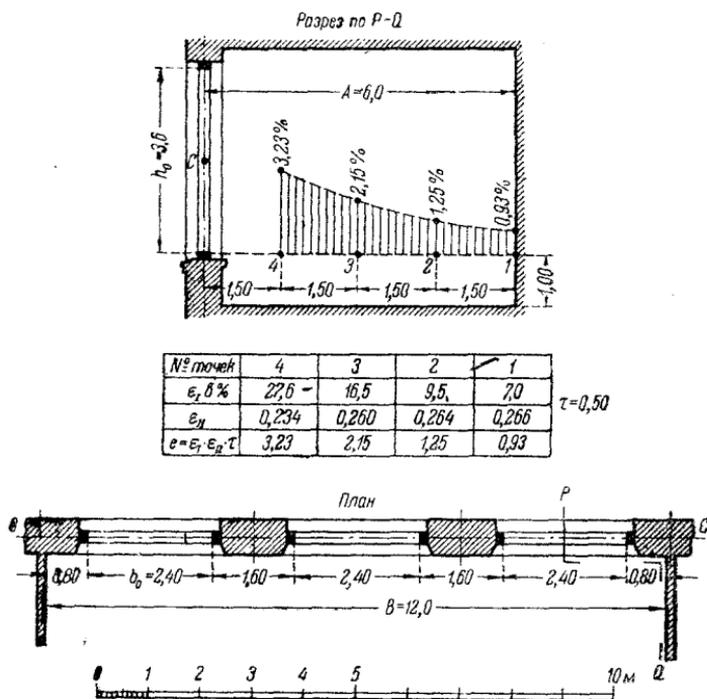


Рис. 38. Пример расчета к. е. о. от окон бокового света.

Таким же образом найдем значения к. е. о. в точках 2, 3 и 4, а именно:

$$e_2 = 9,5 \cdot 0,264 \cdot 0,50 = 1,25\%$$

$$e_3 = 16,5 \cdot 0,260 \cdot 0,50 = 2,15\%$$

$$e_4 = 27,6 \cdot 0,234 \cdot 0,50 = 3,23\%$$

По полученным данным на разрезе (рис. 38) строим (в произвольном масштабе) световой профиль.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ КОЭФИЦИЕНТА ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ

### § 18. Исходные данные

По действующим в настоящее время светотехническим нормам (ОСТ 8545) степень освещенности помещений определяется величиной коэффициента естественной освещенности. Достаточность же освещенности нормируется минимальным значением к. е. о. для бокового света и средним значением к. е. о. для верхнего и комбинированного света.

Описанные в главе III существующие методы расчета позволяют достаточно просто и надежно определять значение к. е. о. в любых точках помещения. Тем самым легко решается задача проверки достаточности освещенности при боковом свете, для чего необходимо только определить значения к. е. о. в точках, в которых ожидаются минимальные освещенности, и сравнить их с допускаемыми по нормам.

Иначе обстоит дело при верхнем свете, так как описанные выше методы не позволяют непосредственно определять средние значения к. е. о., которые и характеризуют достаточность освещенности помещения. По ОСТу это среднее значение к. е. о. должно определяться по, так называемому, характерному разрезу, под которым понимается „поперечный или продольный разрез, сделанный нормально к остеклению окон или продольной оси фонаря в той части помещения, где имеют место средние условия освещенности“. Величина же среднего значения к. е. о. должна определяться по формуле:

$$\bar{e} = \frac{e_0 + e_1 + e_2 + \dots + e_n}{n} \quad (38)$$

Входящие в эту формулу величины  $e_0, e_1, e_2, \dots, e_n$  представляют собою значения к. е. о. в  $n$  отдельных точках светового профиля характерного разреза от светопроемов всех фонарей. Так как существующие методы позволяют определять значения к. е. о. только от одного светопроема (в поперечном разрезе), то при наличии нескольких светопроемов приходится сначала находить значения к. е. о. от каждого светопроема в отдельности, а затем их суммировать. Понятно, что такой способ определения среднего значения к. е. о. отличается большой кропотливостью.

Кроме того, приведенное выше определение характерного разреза как такого, где „имеют место средние условия освещенности“, обладает большой неопределенностью, так как до расчета проектировщик, особенно при отсутствии опыта в проектировании естественного освещения, не может знать местоположения такого разреза. Поэтому местоположение разреза, обладающего свойством характеризовать средние условия освещенности, должно быть задано математической зависимостью.

Наиболее полно средние условия освещенности могут быть охарактеризованы только средним значением к. е. о., взятым в пределах всей

освещаемой площади, так как только эта величина обладает полной определенностью. Математически среднее значение к. е. о. в пределах всей освещаемой плоскости определится как отношение светового потока к освещаемой площади, т. е.

$$\bar{e} = \frac{F}{S}, \quad (39)$$

где  $F$  — величина светового потока, выраженная через к. е. о., и  $S$  — освещаемая площадь.

Входящая в эту формулу величина светового потока может быть найдена при помощи интегрирования выражения для к. е. о. в любой точке помещения в пределах всей освещаемой плоскости, т. е.

$$F = \int_A \int_B e \cdot dA \cdot dB,$$

где  $A$  и  $B$  — ширина и длина освещаемой плоскости.

Точное решение этого интеграла представляет весьма большие трудности вследствие сложности исходного выражения, определяющего освещенность в данной точке. Решений подобного рода еще нет.

В связи с этим возникает мысль о приближенном определении среднего значения к. е. о. в виде произведения двух множителей  $\bar{e}_I$  и  $\bar{e}_{II}$  (по аналогии с нашим основным методом) и притом так, чтобы первый множитель представлял собою среднее значение к. е. о. для бесконечно длинного светопроема, а второй учитывал его длину, т. е.

$$\bar{e} = \bar{e}_I \cdot \bar{e}_{II} \cdot \tau. \quad (40)$$

В таком случае величина первого множителя  $\bar{e}_I$  будет представлять собою среднее значение всех коэффициентов  $e_I$  в пределах ширины  $A$  освещаемой площади. Второй же множитель  $\bar{e}_{II}$ , учитывающий длину светопроемов, будет представлять собою как бы среднее значение всех коэффициентов  $e_{II}$  в пределах всей освещаемой площади  $S$ .

Как оказалось, численные значения первого множителя  $\bar{e}_I$  могут быть найдены достаточно просто чисто графическим путем в зависимости от системы светового фонаря. Способ же определения второго множителя  $\bar{e}_{II}$  остается единым для фонарей всех систем.

## § 19. Определение величины первого множителя $\bar{e}_I$ от светопроемов фонарей различных систем

Среднее значение к. е. о., как указано выше, равно световому потоку  $F$ , деленному на освещаемую площадь  $S$ . При бесконечной длине светопроема и освещаемой плоскости площадь поперечного светового профиля  $f$  является величиной постоянной. Поэтому на любом участке длины  $B$  световой поток  $F = f \cdot B$ . Очевидно, что в этом случае

$$\bar{e}_I = \frac{F}{S} = \frac{f \cdot B}{A \cdot B} = \frac{f}{A}, \quad (41)$$

где  $f$  — площадь светового профиля, определяемая в пределах всей ширины  $A$  освещаемой плоскости (выраженная в единицах длины, так как к. е. о. является величиной отвлеченной).

Следует подчеркнуть, что определение площади светового профиля должно производиться для каждого светопроема в отдельности.

Площадь светового профиля  $f$  может быть найдена путем интегрирования соответствующего выражения для к. е. о. от светового проема бесконечной длины. Однако наиболее просто эта площадь находится путем чисто графических построений. При этом оказалось возможным учитывать затемняющее влияние толщины стен и конструктивных элементов световых фонарей.

Рассмотрим следующие типы световых проемов:

- 1) окна (при комбинированном свете),
- 2) зенитные световые фонари и
- 3) шеды с наклонным и вертикальным остеклением.

Что же касается световых фонарей других систем, как, например, буюло, А-образные, трапециевидные, понды и т. п., то нет необходимости рассматривать их особо, так как они состоят из двух эквивалентных в светотехническом отношении шедов с вертикальным или наклонным остеклением.

*а. Окна при комбинированном свете.* Хотя светопроемы бокового света и рассчитываются на минимальное значение к. е. о., однако при комбинированном свете возникает необходимость знать именно среднее значение к. е. о., создаваемое боковым светом.

Площадь светового профиля от бесконечно длинного вертикального окна в пределах ширины рабочей плоскости  $A$  определяется следующим образом.

Освещенность горизонтальной плоскости в любой точке  $M$  (рис. 39) по формуле (23') равна:

$$e = \frac{1}{2} (\sin \beta_1 - \sin \beta_2).$$

Выразим эту формулу в линейных величинах и притом с учетом толщины стены. Из рис. 39 видно, что

$$\sin \beta_1 = \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} \quad \text{и} \quad \sin \beta_2 = \frac{x + d_0}{\sqrt{h_2^2 + (x + d_0)^2}},$$

где  $d_0$  — толщина стены.

После подстановки этих значений в формулу (23'), получим:

$$e = \frac{1}{2} \left[ \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{x + d_0}{\sqrt{h_2^2 + (x + d_0)^2}} \right].$$

Площадь светового профиля

$$\begin{aligned} f &= \int_0^A e \cdot dx = \frac{1}{2} \int_0^A \frac{x \cdot dx}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{1}{2} \int_0^A \frac{(x + d_0) dx}{\sqrt{h_2^2 + (x + d_0)^2}} = \\ &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + (x + d_0)^2} \right]_0^A = \\ &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + A^2} - \sqrt{h_2^2 + (A + d_0)^2} - h_1 + \sqrt{h_2^2 + d_0^2} \right]. \quad (42) \end{aligned}$$

Полученная формула (42) позволяет непосредственно вычислять площадь светового профиля  $f$ . Однако эта площадь весьма просто может быть найдена следующим чисто графическим построением.

Из крайней точки  $M$  освещаемой плоскости (рис. 39), как из центра, проводим дугу окружности  $P'Q$  до пересечения ее с прямой  $MR$  в точке  $Q$ . Из точки  $R$ , как из центра, проводим вторую дугу окружности  $QN$  до пересечения ее в точке  $N$  с линией  $RK$ . Далее из точки  $K$  проводим третью дугу окружности  $P'T$ , которая пересечет прямую  $RK$  в точке  $T$ . Легко доказать, что отрезок  $NT$ , измеренный в масштабе разреза, представляет собою удвоенную площадь светового профиля, т. е.

$$f = \frac{NT}{2}.$$

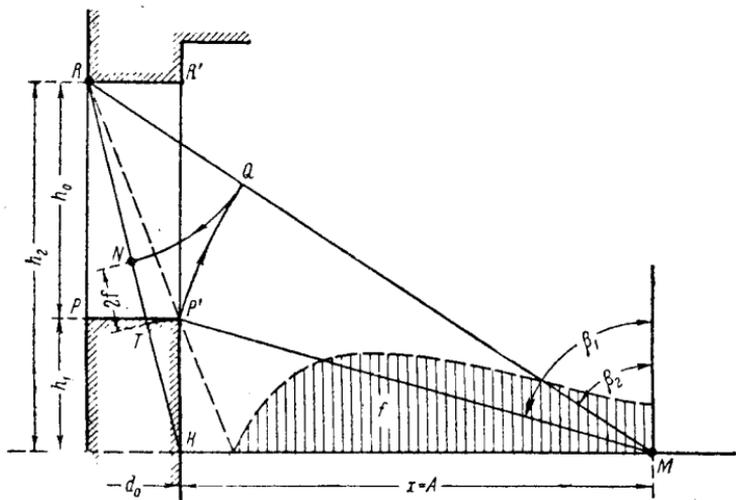


Рис. 39. Определение площади светового профиля от окна бесконечной длины.

Действительно, из рис. 39 видно, что

$$NT = RK - RN - KT$$

$$RK = \sqrt{h_2^2 + d_0^2}$$

$$\begin{aligned} RN &= RQ = MR - MQ = MR - MP' = \\ &= \sqrt{h_2^2 + (A + d_0)^2} - \sqrt{h_1^2 + A^2} \end{aligned}$$

$$KT = KP' = h_1.$$

После подстановки найденных значений отрезков получим, что  $NT = 2f$ .

Таким образом мы видим, что площадь профиля  $f$  может быть найдена при помощи элементарно простых графических построений и притом с учетом загораживающего влияния толщины стены.

б. *Зенитные световые фонари.* Обратимся к схеме бесконечно длинного зенитного двускатного фонаря (рис. 40). В этом случае световой профиль будет симметричен относительно вертикальной оси фонаря, вследствие чего достаточно рассмотреть световой профиль, располагающийся по одну сторону от оси симметрии.

Величина к. е. о. в любой точке  $M$  определяется, как и в предыдущем случае, по формуле (23'). При расположении точки  $M$  в пределах ширины светового фонаря, т. е. при  $x < \frac{a_0}{2}$ ,

$$e = \frac{1}{2} \left[ \frac{x + \frac{a_0}{2}}{\sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2}} + \frac{\frac{a_0}{2} - x}{\sqrt{h_1^2 + \left(\frac{a_0}{2} - x\right)^2}} \right]$$

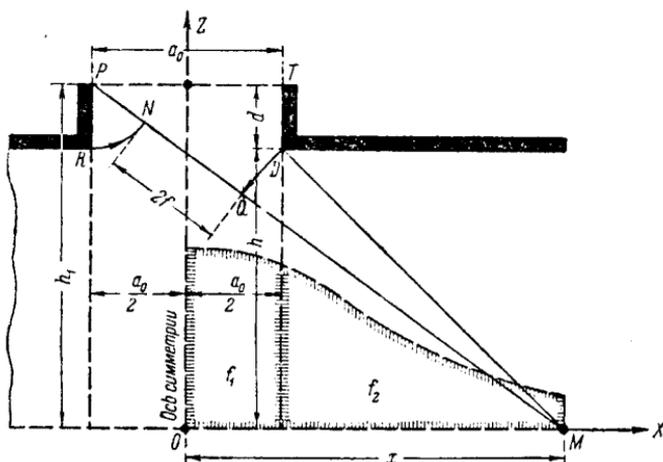


Рис. 40. Определение площади светового профиля от двускатных фонарей бесконечной длины.

Если точка располагается вне ширины светового фонаря, т. е. когда  $x > \frac{a_0}{2}$ , величина к. е. о. определяется с учетом загораживающего влияния нижней грани  $D$  вертикального бортика фонаря и равна:

$$e = \frac{1}{2} \left[ \frac{x + \frac{a_0}{2}}{\sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2}} - \frac{x - \frac{a_0}{2}}{\sqrt{h_2^2 + \left(x - \frac{a_0}{2}\right)^2}} \right]$$

С увеличением расстояния  $x$  величина  $e$  уменьшается и при  $x \geq \frac{a_0(h + h_1)}{2d}$  равна нулю, так как, начиная с этого расстояния, нижняя грань бортика  $D$  полностью загораживает световой поток.

Вследствие сказанного мы будем различать два случая расположения крайней точки освещаемой плоскости. Начало координат располагаем так, чтобы ось  $OZ$  прошла через центр светопроема фонаря.

1-й случай. Крайняя точка освещаемой плоскости располагается так, что нижняя грань вертикального бортика фонаря частично загораживает световой поток, что имеет место при  $x < \frac{a_0(h+h_1)}{2d}$ . В этом случае площадь светового профиля складывается из двух площадей  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 40), причем

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \frac{1}{2} \left[ \int_0^{\frac{a_0}{2}} \frac{\left(x + \frac{a_0}{2}\right) dx}{\sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2}} + \int_0^{\frac{a_0}{2}} \frac{\left(\frac{a_0}{2} - x\right) dx}{\sqrt{h_1^2 + \left(\frac{a_0}{2} - x\right)^2}} \right] = \\
 &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{a_0}{2} - x\right)^2} \right]_0^{\frac{a_0}{2}} = \\
 &= \frac{1}{2} [\sqrt{h_1^2 + a_0^2} - h_1], \\
 f_2 &= \frac{1}{2} \left[ \int_{\frac{a_0}{2}}^x \frac{\left(x + \frac{a_0}{2}\right) dx}{\sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2}} - \int_{\frac{a_0}{2}}^x \frac{\left(x - \frac{a_0}{2}\right) dx}{\sqrt{h^2 + \left(x - \frac{a_0}{2}\right)^2}} \right] = \\
 &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(x - \frac{a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h_1^2 + a_0^2} + h \right].
 \end{aligned}$$

Складывая величины  $f_1$  и  $f_2$  и замечая, что  $d = h_1 - h$ , после сокращений получим полную площадь светового профиля

$$f = f_1 + f_2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(x - \frac{a_0}{2}\right)^2} - d \right]. \quad (43)$$

Весьма просто площадь светового профиля для двускатных фонарей определяется следующим чисто графическим методом. При этом, как и в аналитическом методе, определяем площадь светового профиля, располагающегося по одну сторону от вертикальной оси симметрии фонаря до какой-либо точки  $M$ .

Из точки  $M$ , как из центра (рис. 40), проводим дугу окружности  $DQ$  до пересечения ее с прямой  $MP$  в точке  $Q$ . Из точки  $P$ , как из центра, проводим дугу второй окружности  $RN$  до пересечения ее с той же прямой  $MP$  в точке  $N$ . Легко доказать, что отрезок  $QN$ , измеренный в масштабе разреза, представляет собою удвоенную величину искомой площади светового профиля, располагающегося по одну сторону от оси симметрии, т. е.

$$QN = 2f.$$

Действительно,

$$QN = MP - PN - MQ$$

$$MP = \sqrt{h_1^2 + \left(x + \frac{a_0}{2}\right)^2}; \quad MQ = MD = \sqrt{h^2 + \left(x - \frac{a_0}{2}\right)^2}$$

$$PN = PR = d.$$

После подстановки найденных значений отрезков получим, что  $QN = 2f$ .

2-й случай. Крайняя точка освещаемой плоскости располагается так, что нижняя грань вертикального бортика фонаря полностью загроживает световой поток, что имеет место при  $x \geq \frac{a_0(h+h_1)}{2d}$ . В этом случае величина площади светового профиля достигает своего максимума. Подставляя в формулу (43)  $x = \frac{a_0(h+h_1)}{2d}$ , получим

$$f = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{d^2 + a_0^2} - d \right]. \quad (44)$$

Следует подчеркнуть, что по приведенным выше формулам определяется площадь только части светового профиля, располагающегося справа или слева от вертикальной оси симметрии фонаря. Однако именно такие участки площади светового профиля нам и будут нужны в дальнейшем при определении среднего значения к. е. о., так как величина второго множителя находится отдельно для каждой части светового профиля, располагающегося по ту или другую сторону от оси симметрии.

Если двускатный световой фонарь располагается в середине помещения, то правая и левая части светового профиля, равно как и значения второго множителя, будут одинаковы. В таком случае для нахождения всей площади светового профиля полученное выше значение  $f$  необходимо удвоить.

Рассмотрим теперь случай, когда при исчезающе малой толщине перекрытия высота бортика  $d = 0$ . Такие горизонтальные светопроемы мы будем называть теоретическими, так как в действительности перекрытие всегда имеет некоторую толщину, над которой, в целях лучшей гидроизоляции и защиты от снега, бортик фонаря возвышается на некоторую высоту.

Величина площади светового профиля  $f$  от теоретических горизонтальных светопроемов при  $x \geq \frac{a}{2}$  определяется по формуле (43) при  $d = 0$  и  $h_1 = h$ , т. е.

$$f = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} \right]. \quad (45)$$

При  $x = \infty$  площадь светового профиля достигает своего максимума. Подставляя в формулу (45)  $x = \infty$  и раскрывая неопределенность, получим:

$$\max f = a.$$

*в. Шедовые световые фонари с наклонным и вертикальным остеклением.* Площадь светового профиля от шедовых фонарей определяется так же, как и от горизонтальных световых фонарей. Разница заключается лишь в том, что световой профиль от шедовых фонарей асимметричен. При этом мы будем различать три случая расположения крайней точки освещаемой плоскости. Начало координат располагаем так, чтобы ось  $OZ$  прошла через нижнюю точку светопроема.

1-й случай. Крайняя точка освещаемой плоскости располагается так, что нижняя грань наклонного потолка шеда не загораживает светового потока, что имеет место при  $x < \frac{h_2 l - a_0 h}{h_0 + d}$ . В этом случае площадь светового профиля складывается из трех площадей (рис. 41), т. е.

$$f = f_1 + f_2 + f_3.$$

Каждая из этих трех площадей определяется совершенно аналогично предыдущему, вследствие чего мы не приводим выкладок. Окончательно получаем:

$$f_1 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_2^2 + (x + a_0)^2} - \sqrt{h_1^2 + x^2} \right]_0^c = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_2^2 + (c + a_0)^2} - \sqrt{h_1^2 + c^2} - \sqrt{h_2^2 + a_0^2} + h_1 \right],$$

$$f_2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + (a_0 - x)^2} \right]_0^{a_0} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + a_0^2} - h_2 - h_1 + \sqrt{h_2^2 + a_0^2} \right],$$

$$f_3 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + (x - a_0)^2} \right]_{a_0}^x = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + (x - a_0)^2} - \sqrt{h_1^2 + a_0^2} + h_2 \right].$$

Складывая найденные выражения для  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ , получим:

$$f = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{h_2^2 + (c + a_0)^2} - \sqrt{h_1^2 + c^2} + \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + (x - a_0)^2} \right],$$

Из рис. 41 видно, что

$$\begin{aligned} \sqrt{h_2^2 + (c + a_0)^2} - \sqrt{h_1^2 + c^2} &= h_2 \sqrt{1 + \frac{(c + a_0)^2}{h_2^2}} - h_1 \sqrt{1 + \frac{c^2}{h_1^2}} = \\ &= (h_2 - h_1) \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha} = \frac{h_0}{\sin \alpha}, \end{aligned}$$

где  $\alpha$  — угол наклона светопроема к горизонту.

После подстановки окончательно получим:

$$f = \frac{1}{2} \left[ \frac{h_0}{\sin \alpha} + \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + (x - a_0)^2} \right]. \quad (46)$$

Для шедов с вертикальным остеклением площадь светового профиля получается при подстановке в формулу (46)  $\alpha = 90^\circ$  и  $a_0 = 0$ . При этом

$$f = \frac{1}{2} [h_0 + \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h_2^2 + x^2}]. \quad (46')$$

Весьма просто величина площади светового профиля  $f$  находится следующим чисто графическим способом (рис. 41).

Из точки  $M$ , как из центра, проводим дугу окружности  $PQ$  до пересечения ее с прямой  $MR$  в точке  $Q$ . Из точки  $R$  проводим дугу второй окружности  $QN$  до пересечения ее со следом плоскости остекления фонаря в точке  $N$ . Отрезок  $PN$ , измеренный в масштабе разреза, представляет собою удвоенную площадь светового профиля, заключенного между точкой  $M'$  пересечения следа плоскости остекления со следом освещаемой плоскости и точкой  $M$ , т. е.

$$PN = 2f.$$

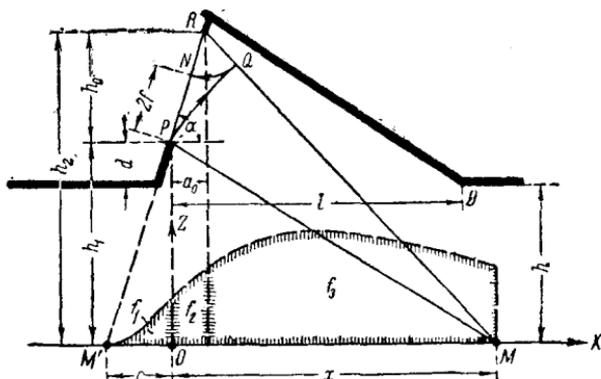


Рис. 41. Определение площади светового профиля от шедовых фонарей бесконечной длины (1-й случай).

Действительно,

$$PN = RP - RN$$

$$RP = \frac{h_0}{\sin \alpha}$$

$$RN = RQ = MR - MQ = MR - MP$$

$$MR = \sqrt{h_2^2 + (x - a_0)^2}; \quad MP = \sqrt{h_1^2 + x^2}.$$

После подстановки найденных значений отрезков получим, что

$$PN = 2f.$$

2-й случай. Крайняя точка освещаемой плоскости располагается так, что нижняя грань  $D$  наклонного потолка шед частично загораживает световой поток, что имеет место, когда  $x > \frac{h_2 l - a_0 h}{h_2 + h}$ .

В этом случае площадь светового профиля складывается из четырех площадей (рис. 42), т. е.

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4.$$

Для получения суммы  $f_1 + f_2 + f_3$  необходимо интегрирование распространить до  $x_1 = \frac{h_2 l - a_0 h}{h_2 + h}$ , начиная с которого нижняя грань на-





оси светопроема. Обозначим это среднее значение через  $\bar{\varepsilon}_{II}$ . Если вычислить такие средние значения  $\bar{\varepsilon}_{II}$  для целого ряда продольных линий, то можно найти среднее значение второго множителя  $\bar{e}_{II}$  в пределах всей освещаемой плоскости. Однако такое решение требует довольно значительного числа вспомогательных вычислений.

Естественно возникает мысль, нельзя ли найти такую продольную линию, для которой  $\bar{\varepsilon}_{II}$  равняется второму множителю  $\bar{e}_{II}$ , который, будучи умножен на первый множитель  $\bar{e}_I$ , даст искомое значение к. е. о. для всей рабочей плоскости. Эта задача может быть решена следующим образом.

Представим себе (рис. 44) два предельных положения продольной линии на освещаемой плоскости — под продольной осью  $C$  светопроема

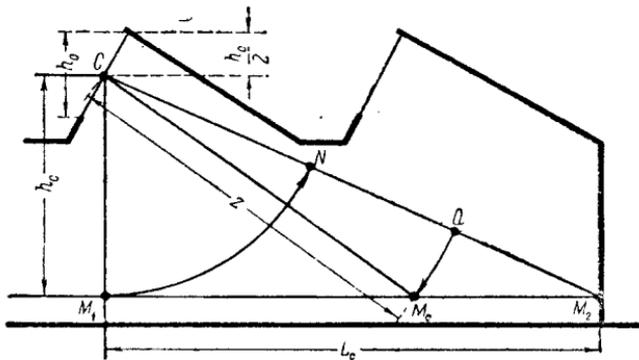


Рис. 44. Местоположение продольной линии при определении величины второго множителя  $\bar{e}_{II}$ .

( $M_1$ ) и у боковой стены ( $M_2$ ). Очевидно, что в первом случае значение  $\bar{\varepsilon}_{II}$  будет больше  $\bar{e}_{II}$ , так как расстояние от линии  $M_1$  до оси светопроема является наименьшим. Во втором же случае значение  $\bar{\varepsilon}_{II}$  будет меньше  $\bar{e}_{II}$ , так как линия  $M_2$  является наиболее удаленной от оси светопроема.

Как показали исследования, достаточно точные результаты получаются, если продольную линию  $M_c$  расположить так, чтобы расстояние  $M_c C$  являлось средним между расстояниями  $M_1 C$  и  $M_2 C$ .

Математически это выражается следующим равенством:

$$z = \frac{\sqrt{h_c^2 + L_c^2} + h_c}{2}, \quad (49)$$

где  $z$  — расстояние  $M_c C$ ,

$h_c$  — высота от освещаемой (рабочей) плоскости до продольной оси светопроема  $C$  и

$L_c$  — расстояние по горизонтали от продольной оси светопроема до линии  $M_2$ .



Следует напомнить, что входящие в эту формулу углы  $\gamma$  измеряются в плоскости, проходящей через продольную ось светопроема и продольную линию на освещаемой плоскости, расстояние между которыми равно  $z$ .

В общем случае светопроем по своей длине может занимать только часть всей длины помещения и располагаться асимметрично, как это показано на рис. 45.

Расположим начало координат  $O$  на освещаемой плоскости так, чтобы ось ординат  $OZ$  проходила через середину длины светопроема. Среднее значение  $\bar{\varepsilon}_{II}$  можно найти путем деления площади, образуемой кривой  $\varepsilon_{II}$ , на длину помещения  $B$ , т. е.

$$\bar{\varepsilon}_{II} = \frac{\omega}{B},$$

где  $\omega$  — площадь, образуемая кривой  $\varepsilon_{II}$  в пределах всей длины помещения  $B$ .

Площадь  $\omega$  определяется путем интегрирования уравнения (50), которое производим раздельно для частей кривой  $\varepsilon_{II}$ , располагающихся справа и слева от оси  $OZ$ . Вследствие загораживающего влияния участков перекрытия  $b_1$  и  $b_2$  каждая из этих частей состоит из двух площадей ( $\omega_1$  и  $\omega_2$  и, соответственно,  $\omega_3$  и  $\omega_4$ ).

Для правой части кривой  $\varepsilon_{II}$  имеем:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{b}{2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\left(y + \frac{b}{2}\right)}{z_1} + \frac{\left(y + \frac{b}{2}\right) z_1}{z_1^2 + \left(y + \frac{b}{2}\right)^2} \right] dy + \\ &+ \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{b}{2}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\left(\frac{b}{2} - y\right)}{z_1} + \frac{\left(\frac{b}{2} - y\right) z_1}{z_1^2 + \left(\frac{b}{2} - y\right)^2} \right] dy = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[ \left(y + \frac{b}{2}\right) \operatorname{arctg} \frac{\left(y + \frac{b}{2}\right)}{z_1} - \left(\frac{b}{2} - y\right) \operatorname{arctg} \frac{\left(\frac{b}{2} - y\right)}{z_1} \right]_0^{\frac{b}{2}} = \\ &= \frac{b}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b}{z_1}. \\ \omega_2 &= \frac{1}{\pi} \int_{\frac{b}{2}}^{\left(\frac{b}{2} + b_1\right)} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\left(y + \frac{b}{2}\right)}{z_1} + \frac{\left(y + \frac{b}{2}\right) z_1}{z_1^2 + \left(y + \frac{b}{2}\right)^2} \right] dy - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{\pi} \int_{\frac{b}{2}}^{\left(\frac{b}{2} + b_1\right)} \left[ \operatorname{arctg} \frac{\left(y - \frac{b}{2}\right)}{z_2} + \frac{\left(y - \frac{b}{2}\right) z_2}{z_2^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2} \right] dy = \\
& = \frac{1}{\pi} \left[ (b + b_1) \operatorname{arctg} \frac{(b + b_1)}{z_1} - b_1 \operatorname{arctg} \frac{b_1}{z_2} - b \operatorname{arctg} \frac{b}{z_1} \right].
\end{aligned}$$

Складывая площади  $w_1$  и  $w_2$ , получим:

$$w_1 + w_2 = \frac{1}{\pi} \left[ (b + b_1) \operatorname{arctg} \frac{(b + b_1)}{z_1} - b_1 \operatorname{arctg} \frac{b_1}{z_2} \right].$$

Аналогично для левой части кривой находим:

$$w_3 + w_4 = \frac{1}{\pi} \left[ (b + b_2) \operatorname{arctg} \frac{(b + b_2)}{z_1} - b_2 \operatorname{arctg} \frac{b_2}{z_2} \right].$$

Входящие в эти формулы величины арктангенсов представляют собою углы, обозначенные на рис. 45 через  $\theta_1$  и  $\theta_2$  для правой части кривой и через  $\theta_3$  и  $\theta_4$  для левой части. Заменяя арктангенсы соответствующими углами, получим:

$$w = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = \frac{1}{\pi} [(b + b_1) \theta_1 - b_1 \theta_2 + (b + b_2) \theta_3 - b_2 \theta_4].$$

Если углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  и  $\theta_4$  выразить не в радианах, а в градусах, то

$$w = \frac{1}{180} [(b + b_1) \theta_1^\circ - b_1 \theta_2^\circ + (b + b_2) \theta_3^\circ - b_2 \theta_4^\circ].$$

Принимая

$$k_1 = \frac{\theta_1^\circ}{180}; \quad k_2 = \frac{\theta_2^\circ}{180}; \quad k_3 = \frac{\theta_3^\circ}{180} \quad \text{и} \quad k_4 = \frac{\theta_4^\circ}{180},$$

получим окончательно:

$$w = [(b + b_1) k_1 - b_1 k_2 + (b + b_2) k_3 - b_2 k_4].$$

Среднее значение  $\bar{\varepsilon}_{\text{II}}$  равно площади  $w$ , деленной на длину помещения  $B$ , т. е.

$$\bar{\varepsilon}_{\text{II}} = \frac{w}{B} = \frac{1}{B} [(b + b_1) k_1 - b_1 k_2 + (b + b_2) k_3 - b_2 k_4]. \quad (51)$$

Если светопроем располагается по длине помещения симметрично, то

$$b_1 = b_2; \quad k_1 = k_3 \quad \text{и} \quad k_2 = k_4.$$

В этом случае

$$\bar{\varepsilon}_{\text{II}} = \frac{2}{B} [(b + b_1) k_1 - b_1 k_2]. \quad (52)$$

Наконец, когда длина светопроема равна длине помещения,  $b_1 = 0$ ;  $b = B$  и  $k_2 = 0$ . При этом

$$\bar{\varepsilon}_{\text{II}} = 2 \cdot k_1. \quad (53)$$

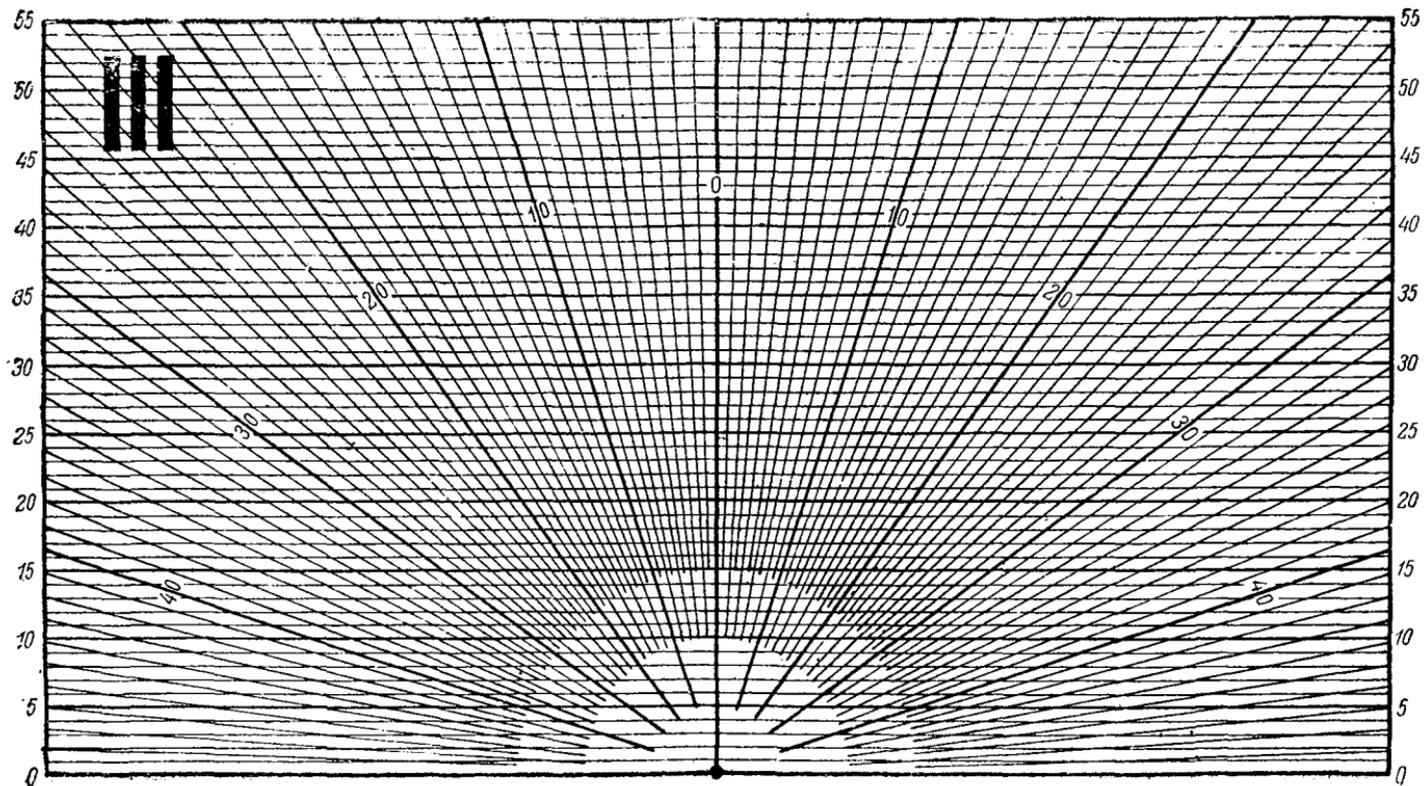


Рис. 46. График III для определения величины  $\bar{\epsilon}_{II}$ .

Как легко видеть, при изменении угла  $\theta^\circ$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  коэффициент  $k$  принимает соответственно значения от 0 до 0,50. Это свойство позволяет построить лучевой график III (рис. 46), аналогичный графикам I и II (рис. 29 и 30) нашего основного метода. Для построения графика III угол в  $90^\circ$  разбивается на 50 таких углов, чтобы каждый коэффициент  $k$  отличался от предыдущего на постоянную величину, равную 0,01, т. е. на  $1\%$ . Углы, удовлетворяющие этому условию, находятся из равенства

$$\theta^\circ = 180^\circ \cdot m, \quad (54)$$

где  $m$  принимает последовательно значения 0,01; 0,02; 0,03 и т. д. до 0,5.

Кроме того, на графике III нанесена система горизонтальных прямых, отстоящих друг от друга на том же расстоянии, что и полуокружности графика I.

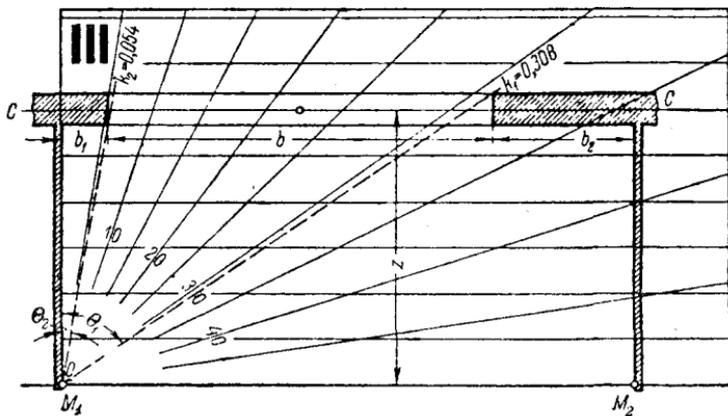


Рис. 47. Определение по графику III коэффициентов  $k$ .

Покажем теперь, как при помощи графика III определяется среднее значение  $\varepsilon_{II}$  при известном  $z$  (рис. 44).

Для этого накладываем продольный разрез светопроема (рис. 47), вычерченный на кальке, на график III так, чтобы его продольная ось расположилась параллельно основанию графика на расстоянии  $z$  от него, а полюс графика совпал с левой крайней угловой точкой  $M_1$ . Отсчитываем число лучей, уместяющихся в пределах каждого из углов видимости  $\theta_1^\circ$  и  $\theta_2^\circ$ . Умножая найденные числа лучей на 0,01, получим значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ . Совмещая далее полюс графика III с правой крайней угловой точкой  $M_2$ , отсчитываем число лучей, уместяющихся в пределах углов  $\theta_3^\circ$  и  $\theta_4^\circ$ ; умножая их на 0,01, получим значения коэффициентов  $k_3$  и  $k_4$ .

Подставляя найденные значения  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$  в формулу (51), получим искомую величину среднего значения  $\varepsilon_{II}$ .

При симметричном расположении по длине помещения нескольких светопроемов (окон) или панелей одного светопроема все вычисления упрощаются, так как в этом случае достаточно определить значения

первых двух коэффициентов из правой или левой угловой точки (для каждого светопроема или каждой панели в отдельности). Подставляя найденные таким образом значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  в формулу (52), найдем значения  $\bar{\varepsilon}_{II}$  от каждого светопроема или панели в отдельности, а по ним уже и суммарное значение  $\bar{\varepsilon}_{II}$ .

Еще более упрощаются вычисления в том случае, когда длина светопроема равна длине помещения, так как в этом случае среднее значение  $\bar{\varepsilon}_{II}$  равно удвоенному значению коэффициента  $k_1$ , определяемого по графику III для правой или левой угловой точки.

Изложенное относится к нахождению  $\bar{\varepsilon}_{II}$  для любой линии, параллельной продольной оси светопроема.

Величина второго множителя  $\bar{\varepsilon}_{II}$  равна  $\bar{\varepsilon}_{II}''$  для продольной линии  $M_c$ , для которой  $z = M_c C$ . Это расстояние определяется по формуле (49) или графически (рис. 44).

## § 21. Определение среднего значения к. е. о. для продольной линии

Как было изложено выше, для всех точек, располагающихся на продольной линии, перпендикулярной к плоскости поперечного разреза,  $\varepsilon_I$  остается постоянным. Величина же  $\varepsilon_{II}$  меняется по длине продольной линии. Поэтому среднее значение к. е. о. для продольной линии равно:

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon_I \cdot \bar{\varepsilon}_{II} \cdot \tau. \quad (55)$$

Среднее значение к. е. о.  $\bar{\varepsilon}$  определяется по нашим графикам I (рис. 29) и III (рис. 46) следующим образом.

Поперечный разрез помещения, вычерченный на кальке, накладывается на график I, и, как описано выше, определяется величина  $\varepsilon_I$ . Одновременно отмечается номер той полуокружности, с которой совпадет центр светопроема. Далее накладываем продольный разрез помещения на график III так, чтобы продольная ось светопроема совпала с горизонтальной линией графика того же номера, что и отмеченная полуокружность графика I, а крайняя точка продольной линии — с полюсом графика. Отсчитывая число лучей, уместяющихся в углах видимости  $\theta$ , и умножая их на 0,01, получим коэффициенты  $k$ . Подставляя значения коэффициентов  $k$  в формулу (51) или, соответственно (52) или (53), найдем значение  $\bar{\varepsilon}_{II}$ .

Умножая произведение найденных коэффициентов  $\varepsilon_I$  и  $\bar{\varepsilon}_{II}$  на коэффициент пропускания  $\tau$ , получим среднее значение к. е. о.  $\bar{\varepsilon}$  для рассматриваемой продольной линии.

## § 22. Примеры расчета

Покажем применение найденных графических построений на нескольких примерах.

**Пример 1.** Помещение размерами в плане  $A = 30$  м,  $B = 45$  м и высотой  $h = 9$  м (от рабочей плоскости) освещается тремя двускат-

ными световыми фонарями шириною в свету  $a_0 = 2,22$  м и длиной  $b = 45$  м, при высоте вертикального бортика  $d = 1,0$  м ( $h_1 = 10$  м). Коэффициент пропускания условно принимается равным  $\tau = 0,40$ . Требуется определить среднее значение к. е. о. (в пределах всей рабочей плоскости), т. е. величину  $\bar{e}$ .

Расчет ведем по описанному выше графическому методу, по которому нахождение значений множителей  $\bar{e}_I$  и  $\bar{e}_{II}$  производится отдельно для каждой части освещаемой плоскости, располагающейся вправо и влево от вертикальной оси симметрии рассматриваемого светового фонаря.

### Световой фонарь I

Левая часть освещаемой плоскости. По формуле (41) первый множитель равен

$$\bar{e}_I = \frac{f_1}{A} 100.$$

Входящую в эту формулу величину площади светового профиля  $f_1$  определяем графическим построением для I-го случая, так как

$$x = 5,0 \text{ м} < \frac{a_0(h + h_1)}{2d} = \frac{2,22(9,0 + 10,0)}{2 \cdot 1,0} = 21,09 \text{ м}.$$

Для этого из крайней точки  $M$  (рис. 48), как из центра, проводим дугу окружности  $D_1Q_1$  до пересечения ее с прямой  $MP_1$  в точке  $Q_1$ . Из точки  $P_1$ , как из центра, проводим дугу окружности  $R_1N_1$  до пересечения ее с прямой  $MP_1$  в точке  $N_1$ . Измеряя отрезок  $Q_1N_1$  в масштабе разреза, получим  $Q_1N_1 = 2f_1 = 0,91$  м, откуда  $f_1 = 0,455$  м. Подставляя найденное значение  $f_1$  в формулу (41), получим:

$$\bar{e}_I = \frac{0,455}{30,0} 100 = 1,517\%.$$

Величина второго множителя определяется по формуле (53), так как длина светового фонаря равна длине помещения, т. е.

$$\bar{e}_{II} = 2 \cdot k,$$

где  $k$  — коэффициент, определяемый по графику III (рис. 46).

Предварительно находим след плоскости  $C_1M_1$ , в которой необходимо вести определение коэффициента  $k$ . Для этого из центра  $C_1$  светопроема I проводим дугу окружности  $EF$  до пересечения ее с прямой  $MC_1$  в точке  $F$  (рис. 48). Далее из точки  $C_1$ , как из центра, проводим через точку  $G$  — середину отрезка  $MF$  — дугу окружности  $GM_1$  до пересечения ее со следом освещаемой плоскости в точке  $M_1$ . Отрезок  $M_1C_1$  определяет собой след той плоскости, в которой должен располагаться график III. Для определения величины коэффициента  $k$  продольный разрез светопроема, вычерченный на кальке, накладываем на график III так, чтобы продольная ось светопроема расположилась параллельно основанию графика на расстоянии  $M_1C_1 = 10,59$  м от него, а полюс графика совпал с угловой крайней точкой  $M$ . Определяем число лучей, уместяющихся в пределах разреза светопроема, которое в нашем случае

равно 42,7 лучей. Умножая число лучей на 0,01, находим  $k = 0,427$  и  $\bar{e}_{II} = 2 \cdot 0,427 = 0,854$ .

Подставляя найденные значения множителей в формулу (40), получим:

$$\bar{e} = 1,517 \cdot 0,854 \cdot 0,40 = 0,518\%$$

Правая часть освещаемой плоскости. Вследствие того, что расстояние от оси симметрии фонаря I до правой точки освещаемой плоскости  $x = 25,0$  м больше найденного выше  $x = 21,09$  м, определение площади светового профиля ведем для 2-го случая по формуле (44). Эта площадь светового профиля нами здесь обозначена через  $f_3$ , так как на рис. 48 для ясности графических построений изображена такая же часть профиля, но относящаяся к фонарю III, который располагается зеркально по отношению к фонарю I. По формуле (44)

$$f_3 = \frac{1}{2} [\sqrt{d^2 + a_0^2} - d] = \frac{1}{2} [\sqrt{1,0^2 + 2,22^2} - 1,0] = 0,72 \text{ м.}$$

Графически площадь светового профиля  $f_3$  определяется следующим построением (рис. 48). Из точки  $P_3$ , как из центра, проводим дугу окружности  $R_3N_3$  до пересечения ее с диагональю  $D_3P_3$  в точке  $N_3$ . Измеряя в масштабе разреза отрезок  $D_3N_3$ , получим  $D_3N_3 = 2f_3 = 1,44$  м и  $f_3 = 0,72$  м, т. е. тот же результат, что и выше. Величина первого множителя  $\bar{e}_I$  по формуле (41) равна:

$$\bar{e}_I = \frac{0,72}{30} 100 = 2,40\%$$

Далее таким же построением, как и при нахождении точки  $M_1$ , определяем положение точки  $M_3$ ; расстояние  $M_3C_3 = 18,46$  м. По графику III находим  $k = 0,376$ , откуда

$$\bar{e}_{II} = 2 \cdot 0,376 = 0,752.$$

Среднее значение к. е. о. равно:

$$\bar{e} = 2,40 \cdot 0,752 \cdot 0,40 = 0,722\%$$

Складывая найденные значения  $\bar{e}$  справа и слева от оси симметрии, получим среднее значение к. е. о., создаваемое световым фонарем I в пределах всей рабочей плоскости:

$$\bar{e} = 0,518 + 0,722 = 1,24\%$$

### Световой фонарь II

Для фонаря II средние значения к. е. о. для правой и левой частей рабочей плоскости вследствие симметрии равны между собою.

Графическим построением (как для левой части от фонаря I) находим, что  $f_2 = 0,705$  м, откуда  $\bar{e}_I = 2,35\%$ .

Расстояние  $M_2C_2 = 14,01$  м. По графику III находим  $k = 0,404$ , откуда  $\bar{e}_{II} = 0,808$ .

Среднее значение к. е. о. равно:

$$\bar{e} = 2,35 \cdot 0,808 \cdot 0,40 = 0,76\%$$

Среднее значение к. е. о. в пределах всей освещаемой плоскости от фонаря II равно:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= 0,76 + 0,76 = \\ &= 1,52\% \end{aligned}$$

Световой фонарь III

Световой фонарь III располагается зеркально относительно фонаря I, вследствие чего среднее значение к. е. о., создаваемое фонарем III в пределах всей рабочей плоскости, равно среднему значению к. е. о. от фонаря I, т. е.

$$\begin{aligned} \bar{e} &= 0,722 + 0,518 = \\ &= 1,24\% \end{aligned}$$

Суммируя найденные средние значения к. е. о. от всех трех световых фонарей, получим окончательно:

$$\begin{aligned} \bar{e} &= 1,24 + 1,52 + \\ &+ 1,24 = 4,0\% \end{aligned}$$

Проверочный точный расчет показывает, что  $\bar{e} = 4,15\%$ . Таким образом погрешность в данном случае меньше  $4\%$ .

**Пример 2.** Помещение размерами в плане  $A = 30$  м,  $B = 45$  м и высотой  $h = 9$  м (от рабочей плоскости) освещается тремя наклонными шедовыми световыми фонарями ( $\alpha = 60^\circ$ ) высотой  $h_0 = 2,52$  м и длиной  $b = 45$  м, при высоте бортика фонаря  $d = 1,0$  м. Коэффи-

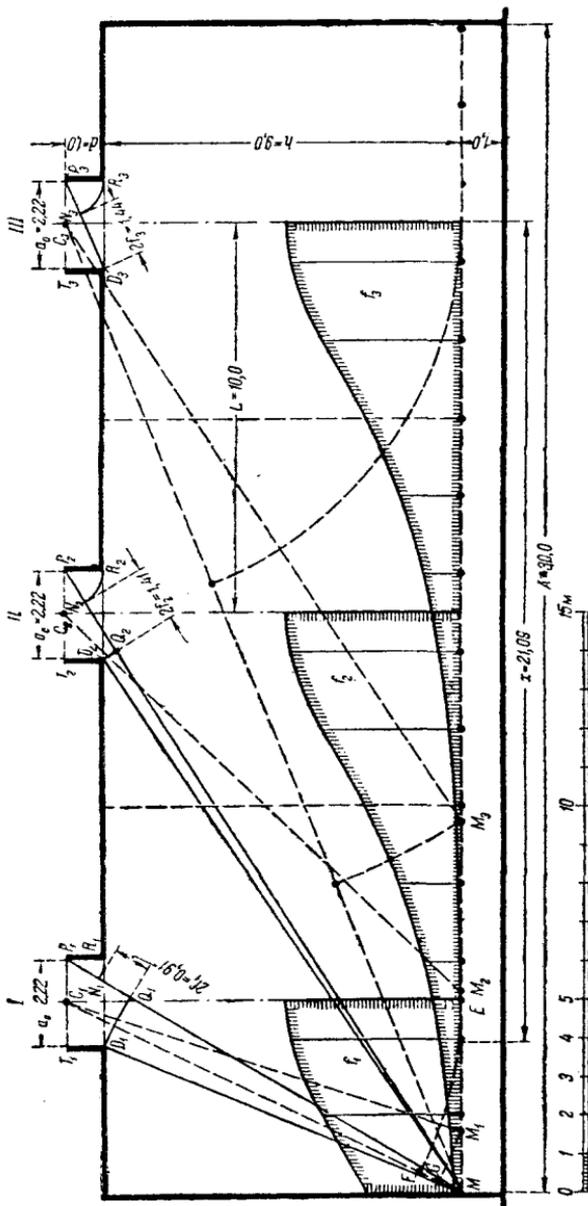


Рис. 48. Пример определения среднего значения к. е. о. от двухскатных фонарей.

коэффициент пропускания  $\tau = 0,40$ . Требуется построить световой профиль средних значений к. е. о. для продольных линий, располагающихся через 2,0 м. Схема световых фонарей с нумерацией точек показана на рис. 49.

Среднее значение к. е. о. для любой продольной линии определяем по формуле (55)

$$\bar{e} = \varepsilon_I \cdot \bar{\varepsilon}_{II} \cdot \tau.$$

Сначала строим полный световой профиль от светового фонаря I, причем значение  $\bar{e}$  определяем и для точек  $p$  и  $q$ , располагающихся между точкой 0 и точкой  $p_1$  пересечения следа плоскости остекления со следом освещаемой плоскости.

Описание определения значений  $\bar{e}$  приводим только для точки 1, так как все действия одинаковы для всех точек профиля.

Накладывая поперечный разрез, вычерченный на кальке, на график I, совмещаем точку 1 с полюсом графика. Отсчитывая число лучей, уместяющихся в светопроеме I, получаем  $n_I = 6,1$  лучей, откуда  $\varepsilon_I = 6,1\%$ . Далее отмечаем номер той окружности, с которой совпадает центр светопроема  $C_1$ ; в нашем случае  $N = 22,5$ .

Так как длина световых фонарей равна длине помещения, то величина  $\bar{\varepsilon}_{II}$  определяется по формуле (53) при помощи графика III:

$$\bar{\varepsilon}_{II} = 2 \cdot k.$$

Накладываем продольный разрез на график III так, чтобы продольная ось светопроема совпала с горизонтальной линией графика того же номера, что и полуокружность графика I, а крайняя точка продольной линии — с полюсом графика. Отсчитывая число лучей ( $n = 42,2$  луча) и умножая его на 0,01, получим коэффициент  $k = 0,422$ , откуда

$$\bar{\varepsilon}_{II} = 2 \cdot k = 2 \cdot 0,422 = 0,844.$$

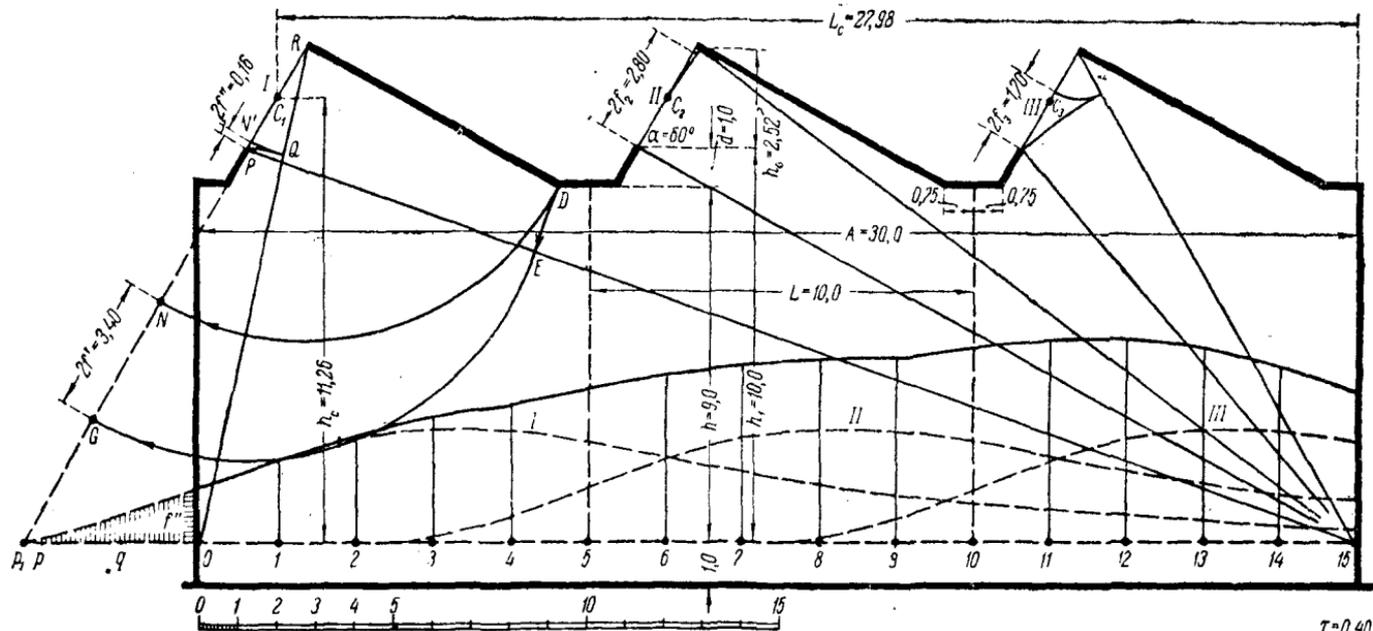
Умножая произведение найденных коэффициентов на коэффициент пропускания  $\tau = 0,40$ , получим среднее значение к. е. о. для продольной линии 1:

$$\bar{e} = 6,1 \cdot 0,844 \cdot 0,40 = 2,059\%.$$

То же самое проделываем и для всех остальных точек профиля (включая и дополнительные точки  $p$  и  $q$ ). Для удобства ведения расчета сводим вычисления в таблицу, помещаемую непосредственно под поперечным разрезом, как это показано на рис. 49. По данным этой таблицы можно построить световой профиль от фонаря I.

Значения  $\bar{e}$  для всех точек световых профилей от фонарей II и III уже имеются, так как, например, освещенность в точке  $p$  от фонаря I равна освещенности в точке 3 от фонаря II и, соответственно, в точке 3 от фонаря III. Таким образом остается только вписать значения  $\bar{e}$  в соответствующие графы таблицы (рис. 49).

Суммируя значения  $\bar{e}$  в каждом столбце таблицы, получим суммарные значения  $\bar{e}$  от всех трех световых фонарей для каждой продольной



$\tau = 0,40$

№ точки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
$\bar{\epsilon}_n, \%$	0,1	2,0	4,2	6,1	8,0	8,4	8,5	7,8	6,7	5,8	4,9	4,1	3,55	3,0	2,7	2,3	1,8	1,25
$\bar{\epsilon}_n$	0,830	0,836	0,840	0,844	0,840	0,836	0,824	0,812	0,798	0,779	0,760	0,739	0,720	0,700	0,680	0,662	0,642	0,616
$\bar{\epsilon}_n \bar{\epsilon}_n \tau$	0,332	0,669	1,411	2,059	2,688	2,809	2,802	2,534	2,139	1,807	1,490	1,212	1,022	0,840	0,734	0,609	0,462	0,308

Светлоприем I	$\bar{\epsilon} \%$	1,411	2,059	2,688	2,809	2,802	2,534	2,139	1,807	1,490	1,212	1,022	0,840	0,734	0,609	0,462	0,308
Светлоприем II	$\bar{\epsilon} \%$	—	—	—	0,332	0,669	1,411	2,059	2,689	2,809	2,602	2,534	2,139	1,807	1,490	1,212	1,022
Светлоприем III	$\bar{\epsilon} \%$	—	—	—	—	—	—	—	—	0,332	0,669	1,411	2,059	2,688	2,809	2,802	2,534
Суммарные	$\bar{\epsilon} \%$	1,411	2,059	2,688	3,141	3,471	3,945	4,198	4,495	4,331	4,683	4,967	5,038	5,229	4,908	4,406	3,864

Рис. 49. Пример определения среднего значения к. е. о. от наклонных шедовых фонарей.

линии. По полученным данным на поперечном разрезе нанесен световой профиль, наглядно иллюстрирующий качество проектного решения.

Зная значение  $\bar{e}$  для всех продольных линий, можно по формуле (38) найти и среднее значение к.е.о. для всей рабочей плоскости:

$$\bar{e} = \left( \frac{1,411}{2} + 2,059 + 2,688 + 3,141 + 3,471 + 3,945 + 4,198 + \right. \\ \left. + 4,495 + 4,631 + 4,683 + 4,967 + 5,038 + 5,229 + 4,908 + \right. \\ \left. + 4,476 + \frac{3,864}{2} \right) \frac{1}{15} = 4,04\%.$$

Определим теперь среднее значение к.е.о. для всей рабочей плоскости описанным выше графическим методом.

Световой фонарь I. Площадь светового профиля равна разности между площадью  $f'$ , располагающейся между точками  $p_1$  и 15, и площадью  $f''$ , располагающейся между точками  $p_1$  и 0 (рис. 49).

Площадь  $f'$  находится следующим образом (2-й случай). Из точки 15, как из центра, проводим дугу окружности  $DE$  до пересечения ее с прямой  $15P$  в точке  $E$ . Из точки  $P$ , как из центра, проводим дугу второй окружности  $EG$  до пересечения ее со следом плоскости светопроема  $RG$  в точке  $G$ . Из точки  $R$ , как из центра, проводим дугу третьей окружности  $DN$  до пересечения ее с тем же следом  $RG$  в точке  $N$ . Измеряя отрезок  $NG$  в масштабе разреза, получим  $2f' = 3,40$  м, откуда  $f' = 1,70$  м.

Для нахождения площади  $f''$  (1-й случай) проводим из точки 0, как из центра, дугу окружности  $PQ$  до пересечения ее с прямой  $OR$  в точке  $Q$ . Далее из точки  $R$ , как из центра, проводим дугу второй окружности  $QN'$  до пересечения ее со следом плоскости светопроема в точке  $N'$ . Измеряя отрезок  $N'P$ , получим  $2f'' = 0,16$  м, откуда  $f'' = 0,08$  м.

Площадь светового профиля, располагающегося в пределах освещаемой плоскости, т. е. между точками 0 — 15, равна:

$$f_1 = f' - f'' = 1,70 - 0,08 = 1,62 \text{ м},$$

откуда по формуле (41)

$$\bar{e}_I = \frac{f_1}{A} 100 = \frac{1,62}{30,0} 100 = 5,40\%.$$

Для определения величины второго множителя  $\bar{e}_{II}$  предварительно находим:

$$h_c = 10,0 + \frac{2,52}{2} = 11,26 \text{ м}; L_c = 27,25 + \frac{2,52 \cdot \text{ctg } 60^\circ}{2} = 27,98 \text{ м}$$

и по формуле (49)

$$M_1 C_1 = \frac{\sqrt{h_c^2 + L_c^2} + h_c}{2} = \frac{\sqrt{11,26^2 + 27,98^2} + 11,26}{2} = 20,68 \text{ м}.$$

Далее по нашему графику III определяем  $k = 0,363$  и  $\bar{e}_{II} = 0,726$ .

Среднее значение к.е.о. от фонаря I равно:

$$\bar{e} = 5,40 \cdot 0,726 \cdot 0,40 = 1,568\%$$

Световой фонарь II. Производя графические построения, аналогичные произведенным при отыскании площади  $f''$  от I светопроема, получим  $2f_2 = 2,80$  м, откуда  $f_2 = 1,40$  м и  $\bar{e}_I = 4,667\%$ .

Значение второго множителя  $\bar{e}_{II} = 0,780$  (при  $M_2C_2 = 16,20$  м и  $k = 0,390$ ).

Среднее значение к.е.о. от фонаря II равно

$$\bar{e} = 4,667 \cdot 0,780 \cdot 0,40 = 1,456\%$$

Световой фонарь III. Производя аналогичные построения, находим  $f_3 = 0,85$  м;  $\bar{e}_I = 2,833\%$ ;  $M_3C_3 = 12,48$  м;  $k = 0,414$  и  $\bar{e}_{II} = 0,828$ , откуда

$$\bar{e} = 2,833 \cdot 0,828 \cdot 0,40 = 0,938\%$$

Складывая найденные средние значения к.е.о. от всех трех световых фонарей, получим окончательно:

$$\bar{e} = 1,568 + 1,456 + 0,938 = 3,962\%$$

Сравнивая полученный результат с найденным выше средним значением к.е.о. для всей освещаемой плоскости по средним значениям к.е.о. в 16 продольных линиях, находим, что расхождение составляет всего около  $2^0/0$ .

**Пример 3.** Помещение, размерами в плане  $A = 6,0$  м и  $B = 12,0$  м освещается тремя окнами  $h_0 = 3,6$  м и  $b_0 = 2,4$  м, расположенными, как показано на рис. 50 ( $h_1 = 0$  и  $h_2 = 3,6$  м). Требуется определить среднее значение минимальных к.е.о.  $\min \bar{e}$ , если коэффициент пропускания  $\tau = 0,50$ , а коэффициент затенения  $\eta = 1,0$ .

Среднее значение минимальных к.е.о. определяется по формуле (55) для продольной линии, располагающейся у внутренней стены, т. е.

$$\min \bar{e} = \varepsilon_I \cdot \bar{e}_{II} \cdot \tau.$$

Значение  $\varepsilon_I$  определяется по графику I. Для этого на график I накладываем поперечный разрез и совмещаем точку  $M$  с полюсом графика. Отсчитывая число лучей, уместящихся по высоте окна, находим, что  $\varepsilon_I = 7,0^0/0$ . Далее находим, что центр окна  $C$  располагается на полуокружности графика  $N = 12,6$ .

Значение второго коэффициента  $\bar{e}_{II}$  определяется по графику III и формуле (52), так как окна располагаются в плане симметрично относительно середины помещения.

План помещения накладываем на график III так, чтобы продольная ось светопроемов совпала с горизонтальной линией графика  $N = 12,6$ , а крайняя точка  $M$  продольной линии — с полюсом графика. Обозначим проекции вертикальных граней окон цифрами 1, 2, 3, 4, 5 и 6. Отсчитываем число лучей, уместящихся между осью ординат графика и соответственно точками 1, 2 и т. д. Умножая число лучей на 0,01,

получим  $k_1 = 0,040$ ;  $k_2 = 0,150$ ;  $k_3 = 0,208$ ;  $k_4 = 0,272$ ;  $k_5 = 0,304$  и  $k_6 = 0,338$ .

Далее измеряем расстояния от граней 1, 2, 3, 4, 5 и 6 до оси ординат графика, т. е.  $y_1 = 0,80$  м;  $y_2 = 3,20$  м;  $y_3 = 4,80$  м;  $y_4 = 7,20$  м;  $y_5 = 8,80$  м;  $y_6 = 11,20$  м.

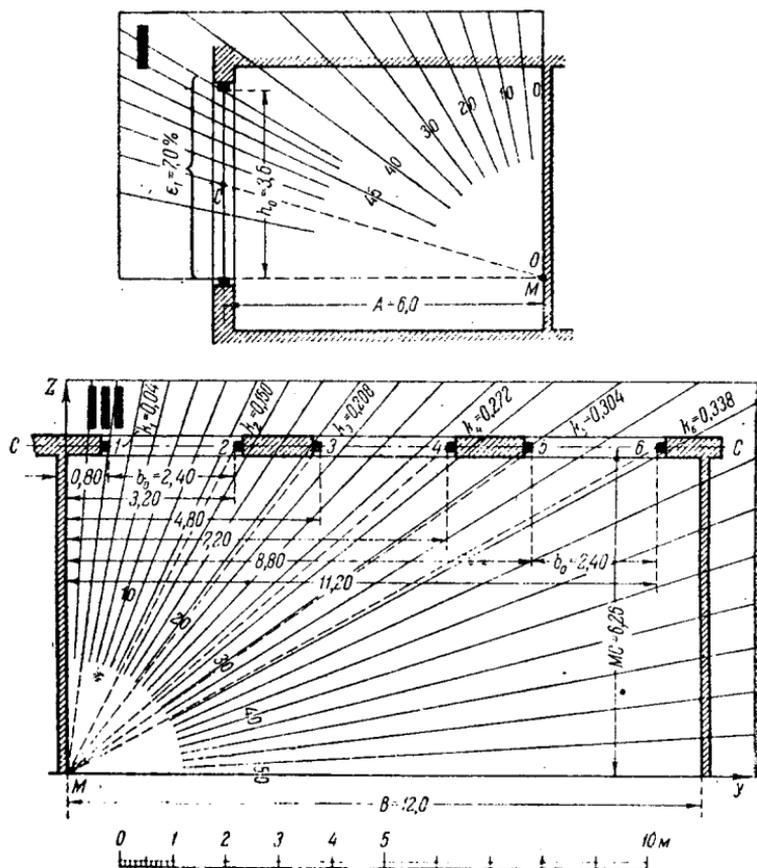


Рис. 50. Пример определения среднего значения минимальных к. е. о. от окон бокового света.

По формуле (52)

$$\bar{\epsilon}_{II} = \frac{2}{12,0} (0,150 \cdot 3,20 - 0,040 \cdot 0,80 + 0,272 \cdot 7,20 - 0,208 \cdot 4,80 + 0,338 \cdot 11,20 - 0,304 \cdot 8,80) = \frac{2}{12,0} 2,518 = 0,420.$$

Подставляя найденные значения  $\epsilon_I$  и  $\bar{\epsilon}_{II}$  в формулу (55), найдем искомое среднее значение минимальных к.е.о., т. е.

$$\min \bar{\epsilon} = 7,0 \cdot 0,420 \cdot 0,50 = 1,47\%.$$

## РАСЧЕТ СВЕТОВЫХ ФОНАРЕЙ И СВЕТОПРОЕМОВ БОКОВОГО СВЕТА

### § 23. Основные предпосылки

В предыдущих главах нами были подробно рассмотрены методы определения как значений к.е.о. в любой точке помещения, так и среднего значения к.е.о. Эти методы находят широкое применение при поверочных расчетах, когда необходимо выявить картину распределения светового потока в уже запроектированном здании и установить достаточность освещенности.

В начальной же стадии проектирования возникает обратная задача определения таких размеров световых фонарей, чтобы в помещении создавалась требуемая освещенность. Задача эта существующими методами непосредственно не решается, вследствие чего практически определение размеров светопроемов производится путем попыток, пробными расчетами, даже при наличии большого опыта в проектировании естественного освещения помещений. Производство же пробных расчетов хотя принципиально и не сложно, но отличается кропотливостью, так как освещенности в намеченных точках поперечного сечения необходимо определять от каждого светопроема фонарей в отдельности и затем их суммировать. Все это приводит, естественно, к значительной затрате времени и, как следствие, к тому, что проектировщик нередко откладывая проверку условий освещенности до такой стадии проекта, когда уже существенных изменений вносить в проект нельзя без коренной его переделки.

Следует отметить, что рекомендуемый ОСТом на проектирование естественного освещения промзданий способ предварительного определения размеров световых фонарей дает более или менее верные результаты только в одном частном случае, именно, — при бесконечных размерах помещения. В большинстве же случаев практики приходится иметь дело с помещениями сравнительно ограниченных размеров, и в этих случаях указанный способ, как показывают сравнительные расчеты, дает результаты, сильно расходящиеся с действительными. Вследствие сказанного применение этого способа должно быть ограничено только случаями расчета помещения с действительно большими размерами.

Все это побудило нас разработать приближенный практический метод расчета световых фонарей,<sup>1</sup> учитывающий реальные размеры помещений, выбранное расчетное среднее значение к.е.о. и всевозможные светопотери и даже затеняющие влияния конструктивных элементов световых фонарей. При этом особенно просто находятся размеры световых проемов фонарей различных систем чисто графическим методом, основанным на графических способах определения среднего значения к.е.о., изложенных в главе IV.

<sup>1</sup> Метод в основных чертах опубликован в журнале „Архитектура Ленинграда“ № 2 за 1940 г.

По этому методу расчет световых фонарей сводится к следующему:

1) световые проемы фонарей мысленно заменяются теоретическими горизонтальными светопроемами, размеры которых определяются так, чтобы в помещении создавалась требуемая величина среднего значения к.е.о., и

2) по найденной ширине теоретических горизонтальных светопроемов определяются эквивалентные размеры принятого типа фонарей.

## § 24. Определение размеров теоретических горизонтальных светопроемов

Представим себе помещение с исчезающе малой толщиной перекрытия, освещаемое несколькими горизонтальными светопроемами, которые мы в дальнейшем будем называть теоретическими, так как в этом случае отсутствует загороживание светового потока конструкцией светопроемов. В зависимости от числа светопроемов, их размеров и расположения в плане в помещении создаются те или иные условия освещенности.

Для выявления влияния на величину среднего значения к.е.о. ( $\bar{e}$ ) числа и взаимного расположения горизонтальных теоретических свето-

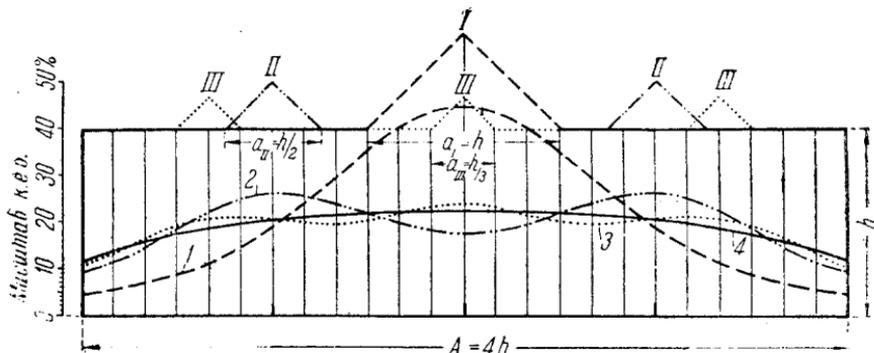


Рис. 51. Форма светового профиля в зависимости от числа равномерно распределенных светопроемов при постоянной площади их остекления  $S = 0,25 S_0$ . Кривая 1 — один светопроем типа I; кривая 2 — два светопроема типа II; кривая 3 — три светопроема типа III; кривая 4 — бесконечно большое число элементарных светопроемов.

проемов, суммарной площади их остекления, измеряемой в долях от площади потолка (пола)  $S_0$ , и, наконец, пропорций помещений нами был произведен ряд сравнительных расчетов. Данные этих расчетов позволили установить некоторые закономерности, которые были положены в основу описываемого ниже метода расчета световых фонарей.

Прежде всего рассмотрим изменение светового профиля при увеличении числа светопроемов, на которое разбивается заданная площадь остекления, при условии равномерного размещения их в плане. На рис. 51 приведены световые профили для бесконечно длинного помещения высотой  $h : A = 1 : 4$  (четыре квадрата), освещаемого одним светопроемом I (кривая 1), двумя светопроемами II (кривая 2), тремя

светопроемами III (кривая 3) и, наконец, бесконечно большим числом светопроемов (кривая 4) с общей площадью остекления, равной во всех случаях  $S = 0,25 S_0$ .

При одном светопроеме распределение светового потока характеризуется крайней неравномерностью, так как освещенность с  $\max e = 44,6\%$  в середине помещения падает до  $\min e = 4,7\%$  у боковой стены. Неравномерность освещения помещения в этом случае равна  $\max e : \min e = 44,6 : 4,7 = 9,5$ . При освещении помещения двумя светопроемами (с той же площадью остекления) распределение светового потока происходит значительно более равномерно. Здесь мы уже имеем  $\max e = 26,3\%$  и  $\min e = 9,8\%$ , и их отношение равно 2,7. По мере дальнейшего увеличения числа светопроемов равномерность повышается и, наконец, при бесконечно большом их числе достигает своего предела, равного  $\max e : \min e = 22,35 : 12,13 = 1,84$ .

Из рис. 51 видно, что с увеличением числа светопроемов кривая светового профиля все более приближается к кривой светового профиля при бесконечно большом числе светопроемов (кривая 4), которая служит как бы осевой линией для остальных кривых (1, 2 и 3).

Эти же кривые наглядно показывают, что с увеличением числа светопроемов площадь светового профиля по своей величине приближается к той площади светового профиля, которая получается при бесконечно большом числе равномерно распределенных светопроемов. Это подтверждается табл. 8, в которой приведены данные изменения среднего значения к.е.о. при постоянной суммарной площади остекления, равной  $S = 0,25 S_0$ , в зависимости от числа равномерно размещенных в плане светопроемов и относительной высоты  $h:A$  бесконечно длинного помещения. Эти данные наглядно показывают, что среднее значение к.е.о. уменьшается, асимптотически приближаясь к пределу, который получается, когда заданная площадь остекления разбита на бесконечно большое число равномерно распределенных элементарных светопроемов. Величина этого предела  $\bar{e}$  по своей величине во столько раз меньше среднего значения к.е.о. при остеклении всей площади потолка  $\bar{e}_0$ , во сколько раз суммарная площадь остекления светопроемов  $S$  меньше всей площади потолка  $S_0$ . Другими словами,

$$\bar{e} = \frac{S}{S_0} \bar{e}_0.$$

Если сконцентрировать заданную площадь остекления в виде одного светопроема, расположенного по середине помещения, то, как видно из табл. 8, величина среднего значения к.е.о. превышает величину  $\bar{e}$  при разбивке той же площади остекления на бесконечно большое число равномерно распределенных светопроемов примерно на 7—14%. При разбивке той же площади остекления на два светопроема и равномерном размещении их в плане указанное увеличение  $\Delta \bar{e}$  составляет всего 2—7%. Если разбить площадь остекления на четыре равномерно размещенных в плане светопроема, то приращение  $\Delta \bar{e}$  снижается до 0,4—2,5%.

Кроме того, из табл. 8 видно, что с уменьшением относительной высоты помещения  $h:A$  приращение  $\Delta \bar{e}$  увеличивается.

Влияние числа светопроемов на величину среднего значения к. е. о. при постоянной площади остекления ( $25^{0/0}$ ) и различной относительной высоте бесконечно длинного помещения

Относительная высота помещения $h:A$	Число светопроемов при постоянной площади остекления $S = 0,25 S_0$								Вся площадь потолка $S$ остеклена
	1		2		4		$\infty$		
	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	
1:1	11,13	7,43	10,52	1,54	10,40	0,39	10,36	0	41,42
1:2	17,54	13,52	15,95	3,24	15,57	0,78	15,45	0	61,81
1:4	22,25	13,99	20,62	5,64	19,79	1,38	19,52	0	78,08
1:8	24,21	9,70	23,45	6,25	22,63	2,54	22,07	0	88,28

Данные табл. 8 относились к случаю постоянной площади остекления горизонтальных теоретических светопроемов ( $S = 0,25 S_0$ ). Для выяснения влияния площади остекления на величину среднего значения к.е.о. составлена табл. 9, в которой даны значения  $\bar{e}$  в зависимости от числа светопроемов при постоянной высоте помещения. При этом, как и в табл. 8, соответствующие средние значения к.е.о. сравниваются со средними значениями к.е.о., получающимися при разбивке площади остекления  $S$  на бесконечно большое число светопроемов.

Таблица 9

Влияние площади остекления, числа и расположения светопроемов на величину среднего значения к. е. о. для бесконечно длинного помещения при  $h:A = 1:4$

Расположение светопроемов	Суммарная площадь остекления $S$	Число светопроемов							
		1		2		3		$\infty$	
		$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$	$\bar{e}$	$\Delta\bar{e}^{0/0}$
Равномерное (рис. 51)	0,50 $S_0$	43,70	+ 11,94	40,81	+ 4,53	39,83	+ 2,02	39,04	0
	0,25 $S_0$	22,25	+ 13,99	20,62	+ 5,64	20,02	+ 2,56	19,52	0
	0,125 $S_0$	11,17	+ 14,45	10,34	+ 5,94	10,03	+ 2,77	9,76	0
Неравномерное (рис. 52)	0,50 $S_0$	39,04	0,00	34,38	- 11,94	36,00	- 7,79	—	—
	0,25 $S_0$	17,19	- 11,94	15,03	- 23,00	16,87	- 13,58	—	—

Из табл. 9 видно, что приращение  $\Delta\bar{e}$  медленно растет по мере уменьшения площади остекления. Так, например, при уменьшении площади остекления в четыре раза (с  $S = 0,50 S_0$  до  $S = 0,125 S_0$ ) приращение  $\Delta\bar{e}$  возрастает с 12 до 14,5%.

Следует отметить, что существующими нормами помимо достаточности освещенности, характеризуемой средним значением к. е. о., нормируется также и равномерность распределения светового потока, определяемая отношением  $\max e$  к  $\min e$ , которое не должно превышать 3 в пределах одного пролета. Сравнительные расчеты показывают, что при одном светопроеме неравномерность значительно превышает допустимую по нормам. Поэтому этот случай имеет ограниченное применение и не является характерным. При двух и более светопроемах неравномерность распределения светового потока в обычных случаях не превышает допустимой.

Все приведенные выше данные относились к случаю равномерного размещения светопроемов в плане. Большой интерес представляет вопрос об изменении среднего значения к. е. о. при неравномерном располо-

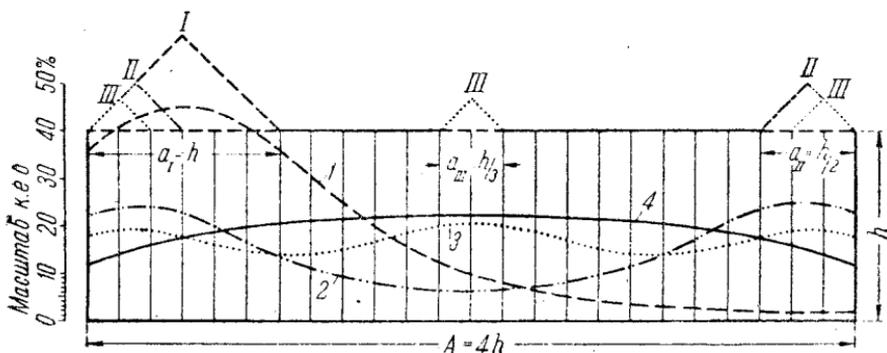


Рис. 52. Форма светового профиля в зависимости от числа светопроемов при постоянной площади их остекления и предельно неравномерном их расположении.

Кривая 1 — один светопроем типа I; кривая 2 — два светопроема типа II; кривая 3 — три светопроема типа III; кривая 4 — бесконечно большое число равномерно распределенных элементарных светопроемов.

жении светопроемов в плане. В табл. 9 приведены величины среднего значения к. е. о. при предельно неравномерном расположении одного, двух и трех светопроемов, как это показано на рис. 52. В этих случаях величина среднего значения к. е. о. становится уже меньшей, чем при бесконечно большом числе равномерно распределенных светопроемов. Наиболее резкое уменьшение среднего значения к. е. о. наблюдается при двух светопроемах, расположенных вплотную к боковым стенам остекления (рис. 52), и притом тем большее, чем меньше площадь остекления. Однако при трех светопроемах, размещенных согласно рис. 52, указанное выше уменьшение становится уже менее резким.

Отмеченное выше уменьшение среднего значения к. е. о. происходит вследствие более неравномерного распределения светового потока в помещении. Другими словами, в подобных случаях доля светового потока, падающего на освещаемую плоскость, уменьшается за счет увеличения доли, падающей на боковые стены.

В случае небольшого отклонения размещения светопроемов в плане от равномерного средние значения к. е. о. будут либо совпадать со средними значениями к. е. о. при разбивке заданной площади остекления на бесконечно большое число равномерно распределенных светопроемов, либо отличаться от них на небольшую величину.

Приведенные выше данные сравнительных расчетов позволяют сделать следующие выводы:

1) Чем больше число горизонтальных теоретических светопроемов, на которое разбивается заданная площадь остекления  $S$ , и чем равномернее они распределяются по площади потолка, тем больше приближается величина среднего значения к. е. о. к тому среднему значению к. е. о., когда площадь остекления  $S$  разбита на бесконечно большое число равномерно распределенных светопроемов.

2) При разбивке заданной площади остекления  $S$  на бесконечно большое число равномерно распределенных горизонтальных светопроемов величина среднего значения к. е. о., создаваемая ими на уровне рабочей плоскости, равна среднему значению к. е. о. при остеклении всей площади потолка, умноженной на отношение заданной площади остекления к площади всего потолка, т. е.

$$\bar{e} = \bar{e}_0 \frac{S}{S_0}.$$

3) При разбивке заданной площади остекления  $S$  на число светопроемов, не меньшее двух, и относительной высоте пролетов помещения  $h:L > 1:4$ , среднее значение к. е. о., создаваемое светопроемами, отличается от среднего значения к. е. о. при разбивке той же площади остекления  $S$  на бесконечно большое число горизонтальных светопроемов не больше, чем на 5—6%. Так как при расчетах принимается целый ряд упрощающих допущений (например, о равномерной яркости небосвода во всех его точках), то указанной погрешностью безусловно можно практически пренебречь и считать, что величина среднего значения к. е. о. зависит только от суммарной площади остекления светопроемов.

Приведенные выводы позволяют расчленив задачу расчета световых фонарей на два этапа, а именно:

а) определение площади остекления горизонтальных теоретических светопроемов, необходимой для создания в помещении заданной степени освещенности, и

б) определение эквивалентных размеров световых фонарей выбранного типа.

Выше было найдено, что если пренебречь влиянием числа светопроемов и их размещения в плане, то с известным допущением можно принять, что

$$\bar{e} = \bar{e}_0 \frac{S}{S_0}, \quad (56)$$

откуда

$$S = \frac{\bar{e}}{\bar{e}_0} S_0, \quad (57)$$

где  $\bar{e}$  — среднее значение к. е. о., создаваемое площадью остекления светопроемов  $S$ , и

$\bar{e}_0$  — среднее значение к. е. о., создаваемое при остеклении всей площади потолка  $S_0$ .

Если площадь остекления  $S$  неизвестна, то величина  $\bar{e}$  представляет собою то среднее значение к. е. о., которое должно быть достигнуто в результате устройства горизонтальных теоретических светопроемов искомого размера. При расчете эта величина устанавливается по ОСТу с учетом всех светопотерь, происходящих при прохождении светового потока через светопроемы (поглощение и отражение света стеклами, затенение светового потока переплетами и т. п.). Величину же  $\bar{e}_0$ , т. е. среднее значение к. е. о. при остеклении всей площади потолка, удобнее определять без учета светопотерь. При этом в знаменатель формулы (57) надо ввести коэффициент пропускания  $\tau$ . Тогда

$$S = \frac{\bar{e}}{\bar{e}_0 \cdot \tau} S_0. \quad (58)$$

Если разделить необходимую площадь остекления  $S$  на длину  $b$  и общее число  $n$  горизонтальных теоретических светопроемов, то получим их ширину

$$a = \frac{S}{b \cdot n}. \quad (59)$$

Средние значения к. е. о. при остеклении всей площади потолка определяются по нашему методу на основании формулы (40)

$$\bar{e}_0 = \bar{e}_I \cdot \bar{e}_{II}.$$

Если обозначить через  $A$ ,  $B$  и  $h$  ширину, длину и высоту (от уровня рабочей плоскости до потолка) помещения, то при остеклении всей площади потолка будем иметь:  $a = A$  и  $b = B$ .

Величина первого множителя  $\bar{e}_I$  может быть найдена на основании формул (41) и (45) при  $x = \frac{a}{2} = \frac{A}{2}$ . При этом следует учесть, что по формуле (45) определяется площадь светового профиля  $f$ , располагающаяся по одну сторону от оси симметрии светопроема, т. е. в нашем случае на половине ширины помещения. Для получения полной площади светового профиля необходимо значение  $f$ , определяемое по формуле (45), удвоить. Тогда величина первого множителя  $\bar{e}_I$  будет равна:

$$\bar{e}_I = \frac{\sqrt{h^2 + A^2} - h}{A}.$$

Величина второго множителя  $\bar{e}_{II}$ , равная по формуле (53)  $\bar{e}_{II} = 2k$ , должна определяться для линии  $M_c$ , для которой расстояние  $M_c C$  по формуле (49) равно:

$$z = \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2} + h}{2}.$$

Средние значения ( $\bar{e}$ ) при остеклении всей площади потолка (в %)

$\frac{h}{A}$ \ $\frac{B}{A}$	1,00	1,25	1,50	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	$\infty$
0,05	78,80	81,95	84,10	85,65	86,81	88,47	89,56	90,35	90,95	91,41	91,78	92,34	92,73	93,03	93,26	93,45	95,13
0,10	73,44	76,71	78,94	80,56	81,78	83,51	84,67	85,49	86,11	86,59	87,00	87,57	87,99	88,30	88,54	88,74	90,50
0,15	68,35	71,72	74,03	75,72	77,00	78,80	80,01	80,87	81,53	82,04	82,43	83,06	83,49	83,82	84,08	84,27	86,12
0,20	63,52	67,00	69,38	71,13	72,45	74,33	75,59	76,50	77,17	77,70	78,12	78,78	79,23	79,57	79,84	80,05	81,98
0,25	58,95	62,51	64,97	66,77	68,15	70,10	71,40	72,34	73,05	73,61	74,04	74,72	75,19	75,55	75,82	76,05	78,06
0,30	54,71	58,32	60,84	62,71	64,11	66,12	67,49	68,46	69,20	69,77	70,23	70,92	71,41	71,79	72,07	72,31	74,40
0,35	50,73	54,38	56,96	58,85	60,31	62,38	63,77	64,79	65,55	66,15	66,63	67,34	67,85	68,24	68,54	68,78	70,95
0,40	47,03	50,70	53,32	55,25	56,73	58,86	60,31	61,35	62,12	62,74	63,24	63,98	64,51	64,91	65,21	65,46	67,70
0,45	43,61	47,29	49,92	51,88	53,39	55,57	57,04	58,11	58,92	59,55	60,06	60,82	61,37	61,77	62,10	62,35	64,66
0,50	40,44	44,11	46,75	48,73	50,27	52,49	53,99	55,09	55,91	56,56	57,08	57,85	58,42	58,84	59,17	59,43	61,80
0,60	34,83	38,43	41,07	43,07	44,64	46,91	48,46	49,59	50,45	51,14	51,67	52,49	53,08	53,52	53,86	54,13	56,62
0,70	30,11	33,57	36,17	38,16	39,73	42,04	43,63	44,80	45,68	46,38	46,94	47,79	48,38	48,85	49,20	49,48	52,07
0,80	26,12	29,43	31,95	33,92	35,49	37,27	39,41	40,60	41,49	42,21	42,78	43,65	44,27	44,74	45,11	45,40	48,06
0,90	22,78	25,90	28,33	30,25	31,79	34,10	35,71	36,91	37,82	38,55	39,13	40,02	40,65	41,13	41,51	41,81	44,54
1,00	19,96	22,89	25,21	27,07	28,58	30,85	32,45	33,67	34,59	35,32	35,91	36,81	37,46	37,95	38,33	38,64	41,42
1,50	11,10	13,14	14,88	16,36	17,63	19,63	21,13	22,29	23,19	23,92	24,52	25,43	26,10	26,61	27,01	27,33	30,28
2,00	6,88	8,29	9,56	10,69	11,69	13,36	14,66	15,71	16,55	17,24	17,81	18,70	19,36	19,87	20,27	20,60	23,61

Выражая  $k$  в линейных величинах на основании выражений, приведенных при выводе формул (51), (52) и (53), получим:

$$\bar{e}_{II} = 2 \frac{\theta^\circ}{180^\circ} = \frac{2}{\pi} \theta = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{B}{z} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2B}{\sqrt{h^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2} + h}$$

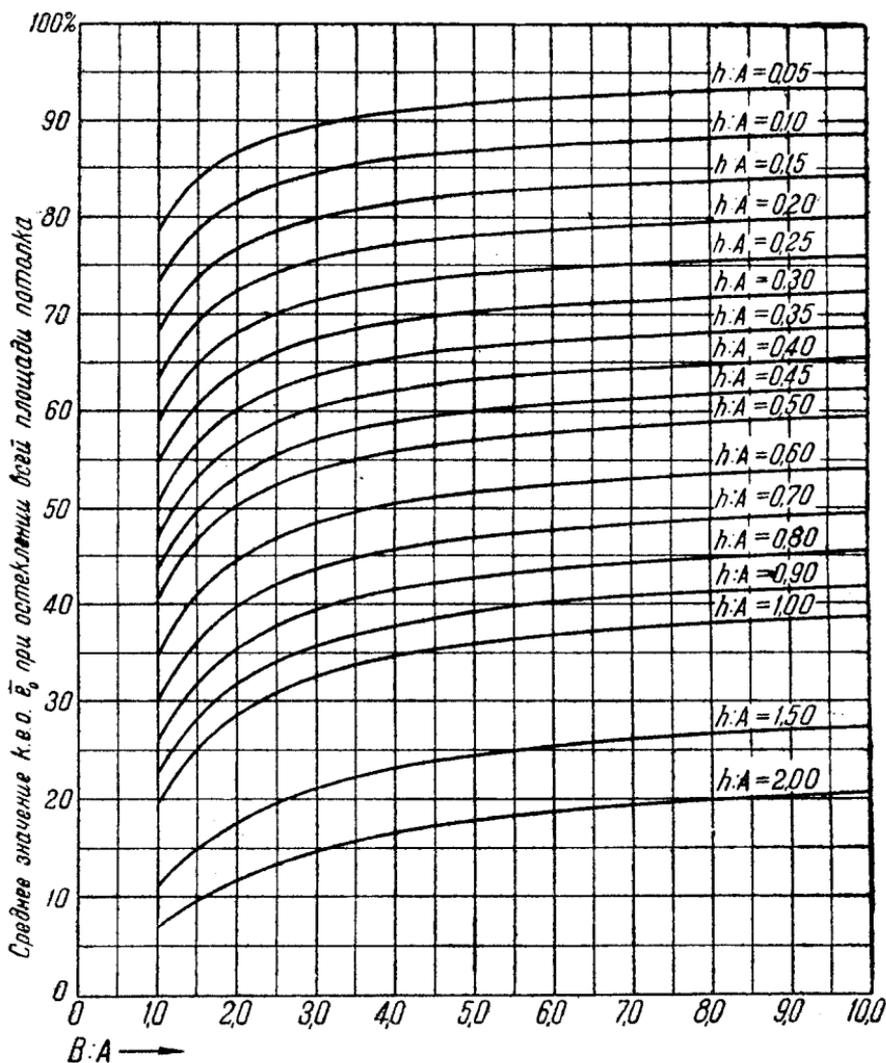


Рис. 53. Номограмма для определения среднего значения к. е. о.  $\bar{e}_0$  при остеклении всей площади потолка.

Таким образом

$$\bar{e}_0 = \bar{e}_I \cdot \bar{e}_{II} = \frac{\sqrt{h^2 + A^2} - h}{A} \cdot \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2B}{\sqrt{h^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2} + h} \quad (60)$$

По формуле (60) нами были вычислены значения  $\bar{e}_0$  для различных  $A$ ,  $B$  и  $h$ , причем для удобства длина  $B$  и высота  $h$  были выражены в долях ширины помещения  $A$ . Полученные таким путем данные сведены в табл. 10. Для удобства определения величин  $\bar{e}_0$  нами построена номограмма (рис. 53).

## § 25. Определение эквивалентных размеров световых фонарей различных систем

Размеры теоретических горизонтальных светопроемов определялись нами в предположении исчезающе малой толщины перекрытия. В действительности же часть светового потока, проходящего через светопроемы, загораживается конструкцией световых фонарей. Как показали сравнительные расчеты, в зависимости от типа, числа и размеров фонарей уменьшение светового потока может достигать значительных размеров, вследствие чего изложенный выше прием не может быть непосредственно применен для целей практики. Ввиду этого возникает мысль, нельзя ли по размерам теоретических светопроемов определить эквивалентные размеры световых фонарей различных типов. Эта задача может быть решена приближенно, если принять, что величина светового потока, падающая от фонарей рассчитываемого типа на рабочую плоскость, должна равняться световому потоку от теоретических горизонтальных светопроемов.

Так как размеры теоретических горизонтальных светопроемов определяются с учетом длины помещения, то без большой погрешности можно сравнение световых потоков от фонарей и теоретических горизонтальных светопроемов производить при бесконечной длине их.

Далее необходимо отметить, что ввиду сложности получаемых уравнений сравнение световых потоков практически возможно только для одного светового фонаря и соответствующего ему теоретического светопроема. Однако, как показало исследование, результаты, получаемые для одного фонаря, при условии расположения его в середине помещения, могут быть с достаточной для практики точностью распространены на случай нескольких фонарей того же типа.

Исходя из этих основных положений, нами были получены приводимые ниже уравнения и формулы, а также найден графический метод определения размеров световых фонарей различных типов. При этом расчетные формулы и графические построения приводятся только для зенитных фонарей и шедов с наклонным и вертикальным остеклением, так как все остальные фонари (буало, трапециевидные, М-образные и др.) в светотехническом отношении могут рассматриваться состоящими из шедовых светопроемов.

*а. Двускатные (зенитные) световые фонари.* Для двускатных световых фонарей искомой величиной является ширина проема фонаря  $a_0$ .

Площадь светового профиля  $f_A$  на всей ширине  $A$  помещения от одного фонаря бесконечной длины, расположенного в середине помещения, на основании формулы (43) равна:

$$f_A = 2f = \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{A + a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(\frac{A - a_0}{2}\right)^2} - d.$$



определяется по формуле (59). Через крайнюю точку  $M$  рабочей плоскости и точку  $N$  проводим прямую  $MN$ , на продолжении которой откладываем отрезок  $NG = d$ , где  $d$  — высота бортика фонаря. Через точку  $D$  проводим вертикаль  $DT = d$ , а из точки  $M$ , как из центра, опишем дугу окружности  $GP$  до ее пересечения в точке  $P$  с горизонтальной линией, проведенной через точку  $T$ . Легко доказать, что отрезок  $PT$  с достаточной для практики точностью представляет собою искомую эквивалентную ширину двускатного фонаря.

Проведем из точки  $M$ , как из центра, через точку  $D$  дугу окружности  $DQ$  до пересечения ее с прямыми  $MP$  и  $MN$  в точках  $Q'$  и  $Q$ . Легко доказать, что

$$QN = \sqrt{h^2 + \left(\frac{A+a}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(\frac{A-a}{2}\right)^2}.$$

Проведем теперь из точки  $P$ , как из центра, дугу окружности радиуса  $d$  до пересечения ее в точке  $N'$  с прямой  $MP$ . Можно доказать, что

$$Q'N' = \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{A_1+a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(\frac{A_1-a_0}{2}\right)^2} - d.$$

Отрезок  $Q'N'$  выражает собою графически величину площади светового профиля от двускатного фонаря шириною  $a_0$  на ширине освещаемой плоскости, равной  $A_1 = A + a_0 - a$ . Сравнительные расчеты показали, что это приращение ширины помещения ( $a_0 - a$ ) обычно мало по сравнению с общей шириною помещения  $A$ , а потому его влияние на величину площади светового профиля ничтожно. Вследствие этого можно принять  $A_1 = A$ . При этом

$$Q'N' = \sqrt{h_1^2 + \left(\frac{A+a_0}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(\frac{A-a_0}{2}\right)^2} - d.$$

По построению  $Q'N' = QN$ . Приравнявая найденные для них выражения, получаем исходное уравнение.

При расположении одного двускатного фонаря в середине помещения приращение площади светового профиля  $\Delta f$  по мере увеличения ширины помещения  $A$  уменьшается вследствие загораживающего влияния бортика фонаря. При ширине помещения  $A = \frac{a_0(h_1+h)}{d}$  площадь светового профиля достигает своего максимума и при дальнейшем увеличении ширины помещения остается постоянной.

Нахождение эквивалентных размеров двускатных световых фонарей в этом случае значительно упрощается, так как при этом площадь светового профиля на основании формулы (44) равна:

$$f_A = 2f = \sqrt{d^2 + a_0^2} - d,$$

откуда

$$a_0 = \sqrt{f_A^2 + 2f_A \cdot d}. \quad (62)$$

Входящая в эту формулу величина площади светового профиля  $f_A$  от теоретического горизонтального светопроема, расположенного в середине помещения, определяется по формуле (45) или следующим графическим построением.

На поперечном разрезе (рис. 54, б) в середине помещения наносим теоретический горизонтальный светопроем  $ND$ . Из крайней точки рабочей плоскости  $M$ , как из центра, проводим дугу окружности  $DQ$  до пересечения ее с прямой  $MN$  в точке  $Q$ . Отрезок  $QN$ , измеренный в масштабе разреза, равен искомой площади светового профиля  $f_A$ .

Эквивалентная ширина двускатного фонаря в этом случае графически находится следующим образом (рис. 55).

На линии потолка в произвольном месте, например в его середине, откладываем отрезок  $GD = f_A + d$ . Через точку  $D$  проводим вертикаль  $DT = d$  и из нее же, как из центра, описываем дугу окружности  $GP$  до ее пересечения в точке  $P$  с горизонтальной линией, проведенной через точку  $T$ . Отрезок  $PT$  равен искомой эквивалентной ширине двускатного фонаря  $a_0$  (в масштабе разреза).

### б. Шедовые световые фонари с наклонным и вертикальным остеклением.

Размеры шедовых световых фонарей определяются совершенно аналогично, т. е. путем сравнения площадей световых профилей от одного теоретического горизонтального светопроема и одного шеда при бесконечной их длине и расположении в середине помещения.

При этом, как и в главе IV, мы будем рассматривать три случая, в зависимости от расположения крайней точки  $M$  рабочей плоскости относительно светопроема.

1-й случай. Крайняя точка рабочей плоскости располагается так, что нижняя грань наклонного потолка шеда не загромождает светового потока. Расположим один шедовой фонарь бесконечной длины в середине помещения, как это показано на рис. 56. При этом по формуле (46) величина площади светового профиля равна:

$$f = \frac{1}{2} \left[ \frac{h_0}{\sin \alpha} + \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{(h_1 + h_0)^2 + (x - a_0)^2} \right],$$

где  $a_0$  и  $h_0$  — горизонтальная и вертикальная проекции светопроема шеда и

$x$  — горизонтальное расстояние от нижней точки наклонного светопроема шеда до вертикали, проходящей через точку  $M$ .

При эквивалентных размерах шедовых фонарей величина  $f$  в этом уравнении должна равняться площади  $f_A$  светового профиля от горизонтального теоретического светопроема бесконечной длины, расположенного над серединой освещаемой плоскости. На основании формулы (45)

$$f_A = \sqrt{h^2 + \left(\frac{A+a}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(\frac{A-a}{2}\right)^2}.$$

Подставляя это значение  $f_A$  в полученное выше уравнение и решая его относительно  $h_0$ , найдем искомую высоту светопроема шеда. Однако решение этого уравнения весьма сложно.

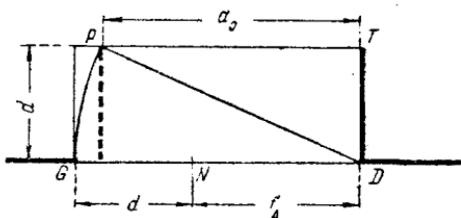


Рис. 55. Расчет двускатных световых фонарей (2-й случай).

В частном случае при вертикальном остеклении, т. е. при  $\alpha = 90^\circ$  и  $a_0 = 0$ , уравнение упрощается и принимает следующий вид:

$$h_0 + \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{(h_1 + h_0)^2 + x^2} = 2f_A.$$

Решая это уравнение относительно  $h_0$ , получим:

$$h_0 = \frac{2f_A(\sqrt{h_1^2 + x^2} - f_A)}{\sqrt{h_1^2 + x^2} - h_1 - 2f_A}. \quad (63)$$

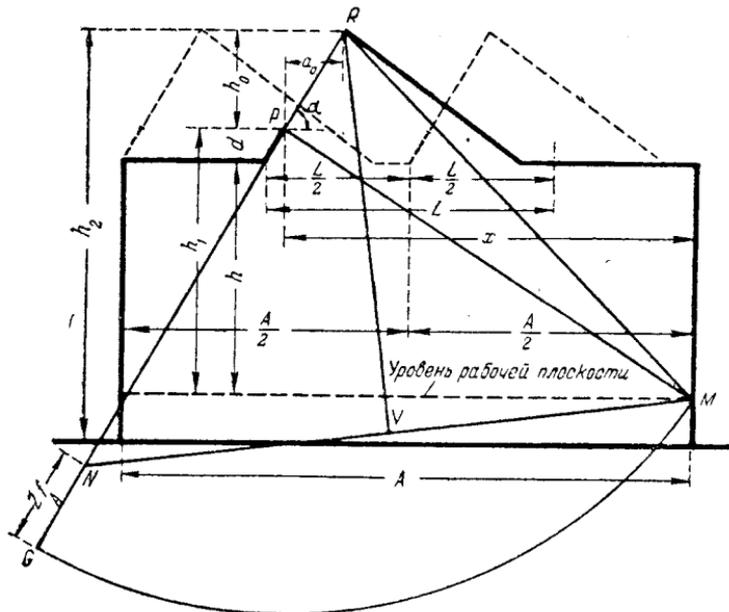


Рис. 56. Расчет шедовых световых фонарей (1-й случай).

Входящая в уравнение (63) величина  $f_A$  может определяться по формуле (61) или описанным выше графическим построением (рис. 54, б).

Весьма просто эквивалентная высота  $h_0$  наклонного или вертикального светопроема шед находится следующим графическим способом (рис. 56). Из точки  $P$ , как из центра, проводим дугу окружности  $MG$  до пересечения ее с продолжением следа плоскости светопроема  $PR$  в точке  $G$ . От точки  $G$  по линии  $GR$  откладываем отрезок  $GN = 2f_A$ . Далее на отрезке  $NM$ , как на основании, строим равнобедренный треугольник. Для этого из точки  $V$  — середины отрезка  $MN$  — восстанавливаем перпендикуляр  $VR$  до пересечения его со следом плоскости остекления  $PR$  в точке  $R$ , которая представляет собою верхний конец светопроема; отрезок же  $PR$  является искомым размером светопроема шедового фонаря.

Действительно, из рис. 56 видно, что

$$GN = PR + PG - RN = PR + PM - RM$$

$$GN = 2f; PR = \frac{h_0}{\sin \alpha}; PM = \sqrt{h_1^2 + x^2}; RM = \sqrt{h_2^2 + (x - a_0)^2}.$$

После подстановки этих значений получим в точности исходное уравнение (46).

2-й случай. Крайняя точка рабочей плоскости располагается так, что нижняя грань  $D$  наклонного потолка загораживает часть светового потока, проходящего через светопроем. Эквивалентные размеры шеста определяются так же, как и в 1-м случае. При расположении одного шедового фонаря бесконечной длины (с наклонным остеклением) в сере-

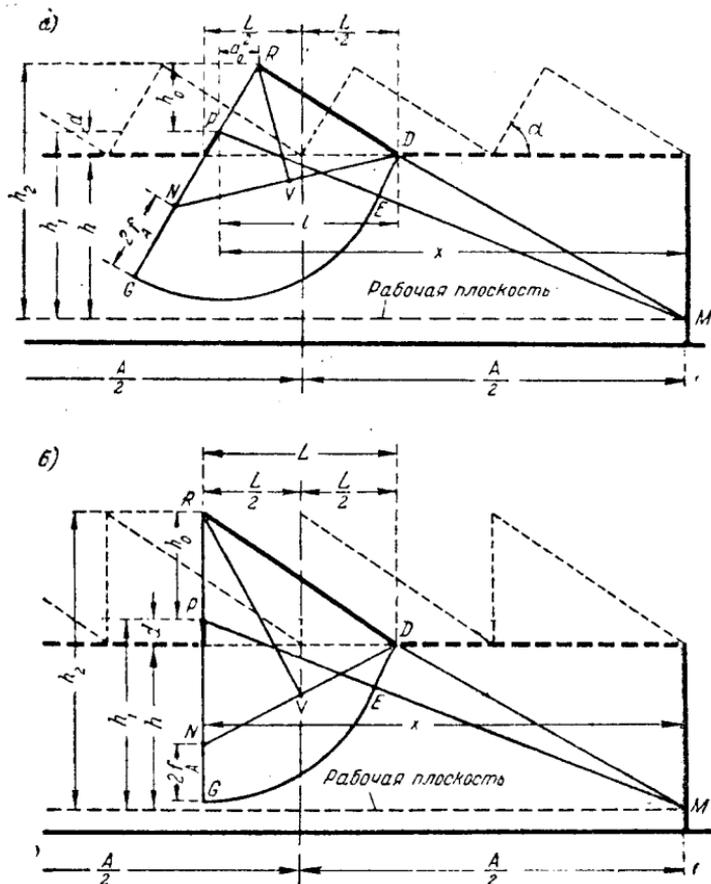


Рис. 57. Расчет шедовых световых фонарей (2-й случай).

дине помещения (рис. 57, а) площадь светового профиля по формуле (47) равна:

$$f = \frac{1}{2} \left[ \frac{h_0}{\sin \alpha} - \sqrt{(h_0 + d)^2 + (l - a_0)^2} + \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h^2 + (x - l)^2} \right].$$

При эквивалентных размерах шедовых фонарей величина  $f$  в этом уравнении должна равняться площади  $f_A$  светового профиля от горизонтального теоретического светопроема бесконечной длины, расположенного в середине помещения.



центра, проводим дугу окружности  $DG$  до пересечения ее с продолжением следа плоскости светопроема в точке  $G$ . От точки  $G$  откладываем отрезок  $GN$ , равный  $2f_A$ . Далее строим равнобедренный треугольник, для чего из точки  $V$  — середины отрезка  $ND$  — восстанавливаем перпендикуляр до пересечения его со следом плоскости светопроема в точке  $R$ . Отрезок  $RP$ , измеренный в масштабе разреза, представляет собою искомый размер светопроема шеда.

*в. Световые фонари системы Буало, трапецевидные и М-образные.*  
До сих пор мы рассматривали световые фонари, составленные каждый из одного светопроема (зенитные и шедовые). Аналогичным способом рассчитываются световые фонари, составленные каждый из двух световых проемов, как, например, фонари системы Буало, трапецевидные, М-образные и др.

В этом случае для нахождения ширины горизонтальных теоретических светопроемов  $a$  площадь остекления  $S$ , определяемая по формуле (58), делится на длину фонарей и на общее число светопроемов, равное удвоенному числу световых фонарей. Располагая горизонтальный теоретический светопроем шириною  $a$  в середине помещения, находим площадь светового профиля, т. е. величину  $f_A$ . Далее в середине помещения располагаем один световой фонарь рассчитываемого типа и определяем описанным выше графическим способом размеры одного правого или левого светопроема фонаря (ввиду их симметрии).

Практически можно наметить следующий единый ход расчета световых фонарей:

1) По данным ОСТА определяется разряд помещения и соответствующее расчетное среднее значение  $\bar{e}$ , которое должно быть достигнуто в результате устройства светопроемов искомых размеров. Далее намечается число, длина и примерная конструкция световых фонарей и устанавливается коэффициент пропускания  $\tau$ .

2) Для помещения размерами в плане  $A \times B$  по номограмме (рис. 53) или табл. 10 определяется среднее значение к. е. о.  $\bar{e}_0$  при остеклении всей площади потолка.

3) По формуле (58) определяется необходимая площадь остекления  $S$ . Деля последнюю на общее число светопроемов  $n$  и их длину  $b$ , получаем расчетную ширину горизонтальных теоретических светопроемов  $a$ .

4) По найденной ширине  $a$  определяется площадь светового профиля  $f_A$  на всю ширину  $A$  помещения от теоретического горизонтального светопроема бесконечной длины, расположенного в середине помещения.

5) В зависимости от типа световых фонарей производятся соответствующие графические построения, в результате чего определяются искомые размеры световых фонарей.

## **§ 26. Определение размеров светопроемов бокового света по заданному среднему значению минимальных к. е. о.**

Боковой свет характеризуется крайней неравномерностью распределения светового потока в направлении от светопроема к внутренней стене. Минимальные освещенности создаются вдоль линии у внутренней

стены, уменьшаясь, в свою очередь, к торцевым стенам, где освещенность достигает своего наименьшего значения.

Исходя из этих соображений, достаточность освещенности при боковом свете регламентируется нормами величиной минимального значения к. е. о. Однако последняя недостаточно характеризует условия освещенности всей рабочей плоскости. Ввиду этого представляется более целесообразным, по аналогии с верхним светом, оценивать условия освещенности при боковом свете величиной среднего значения минимальных к. е. о., т. е. величиной среднего значения к. е. о., взятых в пределах длины наиболее удаленной от окон продольной линии. При этом будут учтены освещенности во всех наиболее удаленных от окон точках, в том числе и в той точке, где имеет место наименьшая освещенность. Регламентирование достаточности освещенности при боковом свете именно величиной среднего значения минимальных к. е. о. позволяет избежать случайной оценки условий освещенности всей рабочей плоскости только по одной точке с минимальной освещенностью.

Если принять за расчетную величину среднее значение минимальных к. е. о., то, как будет описано ниже, оказывается возможным определять размеры светопроемов и при боковом свете.

Остановимся сначала в общих чертах на некоторых специфических особенностях проектирования бокового света. Светопроемы бокового света устраиваются в наружных стенах, вследствие чего их форма и взаимное расположение варьируются сравнительно мало. Что же касается размеров светопроемов бокового света, то в большинстве случаев они оказываются ограниченными. Действительно, если принять во внимание, что обычно окна устраиваются на некоторой высоте от уровня пола (0,7—1,0 м), а над окнами располагаются перемычки, то высота окон оказывается всецело зависящей от высоты помещения. Высота же помещения, в свою очередь, лимитируется нормативными данными, производственно-технологическими факторами и т. п. и часто бывает величиной заданной. В этих случаях расчет светопроемов бокового света сводится к нахождению такого их числа и ширины, чтобы обеспечивались заданные условия освещенности.

Так же, как и при верхнем свете, среднее значение минимальных к. е. о. сравнительно мало зависит от числа светопроемов, на которое разбивается площадь остекления или их общая ширина (при заданной высоте), при условии равномерного распределения светопроемов по фасаду. При этом чем больше число светопроемов, тем более среднее значение минимальных к. е. о. приближается к тому его значению, которое получается при разбивке заданной площади остекления на бесконечно большое число равномерно распределенных по длине помещения светопроемов. Это хорошо подтверждается данными табл. 11, показывающей изменение среднего значения минимальных к. е. о. при постоянной суммарной ширине светопроемов, равной половине длины помещения, т. е. 0,5 В, в зависимости от числа светопроемов и их относительной высоты.

Данные табл. 11 показывают, что при устройстве одного окна шириною  $b = 0,50 В$  значение  $\min \bar{e}$  примерно на 12% больше того  $\min \bar{e}$ , которое получается при бесконечно большом числе окон с той же площадью остекления.

При устройстве двух окон шириною по  $0,25 B$  приращение  $\Delta \bar{e}$  колеблется в пределах  $3\%$ . Наконец, при четырех окнах шириною по  $0,125 B$  указанное приращение снижается до  $\Delta \bar{e} \approx 1\%$ . Относительная высота помещения при этом играет незначительную роль.

Из табл. 11 видно, что при разбивке заданной ширины остекления на бесконечно большое число равномерно распределенных светопроемов среднее значение минимальных к. е. о.  $\min \bar{e}$  во столько раз меньше  $\min \bar{e}_0$  при ширине остекления, равной всей длине помещения, во сколько раз ширина остекления  $b$  меньше длины помещения  $B$ , т. е.

$$\min \bar{e} = \frac{b}{B} \min \bar{e}_0. \quad (65)$$

Таким образом, если пренебречь влиянием числа светопроемов на величину среднего значения минимальных к. е. о., которое при числе окон более двух колеблется в пределах до  $3\%$ , то искомая ширина окон может быть найдена из формулы (65), т. е.

$$b = \frac{\min \bar{e}}{\min \bar{e}_0} B. \quad (66)$$

При этом, как и при верхнем свете, светопотери, происходящие при прохождении светового потока через окна, должны быть учтены коэффициентом пропускания  $\tau$ , так как величину  $\min \bar{e}_0$  удобнее находить без учета светопотерь. Тогда формула (66) принимает следующий вид:

$$b = \frac{\min \bar{e}}{\min \bar{e}_0 \cdot \tau} B. \quad (67)$$

Таблица 11

**Влияние числа светопроемов на величину среднего значения минимальных к. е. о. при постоянной суммарной ширине светопроемов  $b = 0,50 B$**

Относительная высота светопроемов $h : A$	Число светопроемов при $b = 0,50 B; B : A = 2$ и $\tau = 1,0$								$b = B$ 1
	1		2		4		$\infty$		
	$\min \bar{e}$	$\Delta \bar{e}$	$\min \bar{e}$	$\Delta \bar{e}$	$\min \bar{e}$	$\Delta \bar{e}$	$\min \bar{e}$	$\Delta \bar{e}$	
1 : 1	5,510	11,7	5,077	2,9	4,969	0,69	4,935	0	9,870
1 : 2	2,068	12,4	1,895	3,0	1,855	0,82	1,840	0	3,680
1 : 4	0,586	12,1	0,539	3,1	0,528	0,96	0,523	0	1,046

Если разделить найденную суммарную ширину  $b$  на общее число окон  $n$ , то получим ширину каждого окна  $b_0$ , т. е.

$$b_0 = \frac{b}{n}.$$

Величина  $\min \bar{e}_0$  определяется по формуле (55) при  $\tau = 1,0$

$$\min \bar{e}_0 = \varepsilon_I \cdot \bar{\varepsilon}_{II}$$

Значения  $\min \bar{e}_0$  мы будем определять для продольной линии, расположенной на уровне нижней грани окна (при  $h_1 = 0$  и  $h_2 = h_0$ ), так как по таким значениям  $\min \bar{e}_0$  составлена табл. 12 и построена номограмма (рис. 60). При этом величину  $h_2 = h_0$  мы будем обозначать через  $h$ , так как в дальнейшем в зависимости от решаемых практических задач под  $h$  будут подразумеваться высоты  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_0$ . Тогда на основании формулы (23') будем иметь:

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} (\sin \beta_1 - \sin \beta) = \frac{1}{2} (1 - \sin \beta),$$

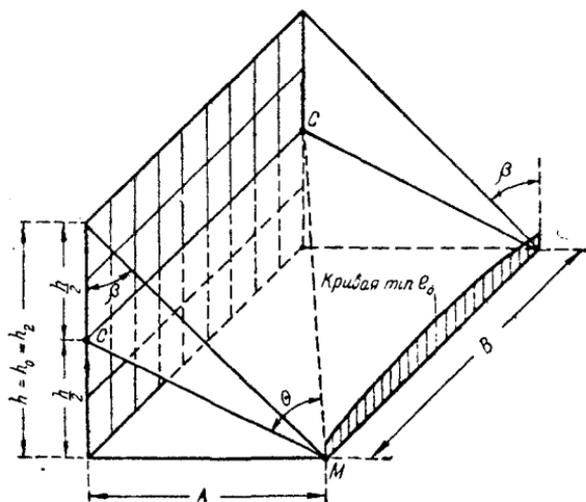


Рис. 59. Схема определения среднего значения минимальных к. е. о.  $\min \bar{e}_0$ .

Тогда по формуле (53)

$$\bar{\varepsilon}_{II} = 2k.$$

Выражая  $k$  в линейных величинах на основании выражений, приведенных при выводе формул (51), (52) и (53), получим:

$$\bar{\varepsilon}_{II} = 2 \frac{\theta^2}{180^2} = \frac{2}{\pi} \theta = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{B}{z} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2B}{\sqrt{h^2 + 4A^2}}.$$

Таким образом

$$\min \bar{e}_0 = \varepsilon_I \cdot \bar{\varepsilon}_{II} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{A}{\sqrt{h^2 + A^2}} \right) \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2B}{\sqrt{h^2 + 4A^2}}. \quad (68)$$

По формуле (68) нами были вычислены величины  $\min \bar{e}_0$  для различных значений  $h : A$  и  $B : A$ , которые сведены в табл. 12. По данным этой таблицы построена номограмма (рис. 60), состоящая из кривых,

так как при  $h_1 = 0$   $\beta_1 = 90^\circ$  и  $\sin \beta_1 = 1$ .

Выражая эту формулу в линейных величинах (рис. 59), получим:

$$\varepsilon_I = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{A}{\sqrt{h^2 + A^2}} \right).$$

Величина  $\bar{\varepsilon}_{II}$  определяется в плоскости, проходящей через продольную ось окна  $CC$  (на высоте  $\frac{h}{2}$ ) и продольную линию  $M$  у внутренней стены помещения. Из рис. 59 видно, что

$$z = MC = \frac{1}{2} \sqrt{h^2 + 4A^2}.$$

Средние значения минимальных к. е. о. ( $\min \epsilon_0$ ) при ширине окна, равной длине помещения (в ‰)

$\frac{h}{A}$ \ $\frac{B}{A}$	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	$\infty$	
0,1	0,07	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,25
0,2	0,29	0,40	0,48	0,55	0,61	0,65	0,68	0,73	0,77	0,80	0,82	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,91	0,97
0,3	0,62	0,86	1,05	1,20	1,31	1,41	1,48	1,60	1,67	1,73	1,78	1,81	1,84	1,89	1,92	1,94	1,96	1,97	1,97	2,11
0,4	1,04	1,44	1,77	2,02	2,22	2,38	2,50	2,69	2,83	2,93	3,01	3,07	3,12	3,19	3,25	3,29	3,32	3,35	3,35	3,58
0,5	1,50	2,12	2,59	2,96	3,26	3,49	3,68	3,97	4,17	4,32	4,43	4,52	4,60	4,72	4,80	4,86	4,90	4,93	4,93	5,28
0,6	2,03	2,83	3,47	3,97	4,37	4,69	4,94	5,33	5,61	5,81	5,97	6,09	6,19	6,34	6,46	6,54	6,60	6,65	6,65	7,13
0,7	2,54	3,55	4,35	4,99	5,50	5,91	6,24	6,73	7,09	7,35	7,55	7,71	7,84	8,03	8,17	8,28	8,37	8,43	8,43	9,04
0,8	3,03	4,24	5,22	6,00	6,61	7,11	7,51	8,12	8,55	8,87	9,12	9,32	9,48	9,72	9,89	10,02	10,13	10,21	10,21	10,96
0,9	3,50	4,90	6,04	6,95	7,68	8,26	8,74	9,46	9,97	10,35	10,65	10,88	11,07	11,36	11,57	11,72	11,85	11,94	11,94	12,84
1,00	3,92	5,51	6,80	7,84	8,68	9,34	9,89	10,72	11,32	11,76	12,10	12,37	12,59	12,92	13,17	13,35	13,49	13,61	13,61	14,65
1,25	4,79	6,77	8,40	9,73	10,81	11,68	12,40	13,50	14,29	14,88	15,34	15,70	16,00	16,46	16,77	17,02	17,21	17,36	17,36	18,77
1,50	5,39	7,66	9,56	11,13	12,42	13,47	14,35	15,69	16,67	17,41	17,97	18,42	18,79	19,36	19,76	20,07	20,31	20,50	20,50	22,27
1,75	5,77	8,24	10,35	12,11	13,57	14,78	15,79	17,38	18,51	19,37	20,05	20,59	21,03	21,70	22,19	22,55	22,84	23,07	23,07	25,19
2,0	5,98	8,58	10,83	12,72	14,34	15,68	16,81	18,58	19,89	20,88	21,66	22,28	22,79	23,57	24,13	24,56	24,90	25,17	25,17	27,64

характеризующих изменение  $\min \bar{e}_0$  в зависимости от  $B : A$  для различных  $h : A$  (сплошные кривые) и  $B : h$  (пунктирные кривые).

При расположении продольной линии  $M$  на уровне нижней грани окна значения  $\min \bar{e}_0$  определяются непосредственно по табл. 12 или номограмме (рис. 60). Если же нижняя грань окон располагается на некоторой высоте  $h_1$  от уровня рабочей плоскости, то  $h_0 = h_2 - h_1$ . В таком случае из величины  $\min \bar{e}_0$  для высоты  $h_2$  надо вычесть величину  $\min \bar{e}_0$  для высоты  $h_1$ . Но высота  $h_1$  обычно мала по сравнению с шириной  $A$ , вследствие чего величиной  $\min \bar{e}_0$  от нее можно пренебречь.

Если перед окнами располагается противоположащее здание, то затеняющее влияние последнего может быть учтено коэффициентом затенения  $\eta$ , численное значение которого определяется, как было изложено в § 16. В таком случае суммарная ширина окон определяется по формуле:

$$b = \frac{\min \bar{e}}{\min \bar{e}_0 \cdot \tau \cdot \eta} B. \quad (69)$$

Все сказанное относилось к случаю определения по данным  $\min \bar{e}$ ;  $h_2 : A$ ;  $h_1 : A$  и  $B : A$  ширины окон. Однако при проектировании светопроемов бокового света часто возникают еще и другие задачи.

В проектной практике часто встречается необходимость в определении при заданных размерах помещения и суммарной ширине окон такой их высоты, чтобы для наиболее удаленной продольной линии обеспечивалась расчетная величина  $\min \bar{e}$  (т. е. заданы  $\min \bar{e}$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $b$  и  $h_1$ ). Эта задача решается при помощи табл. 12 или номограммы (рис. 60) следующим образом.

По формуле (69) определяется то значение  $\min \bar{e}_0$ , при котором обеспечивается заданная величина  $\min \bar{e}$ , т. е.

$$\min \bar{e}_0 = \frac{\min \bar{e}}{\tau \cdot \eta} \cdot \frac{B}{b}. \quad (70)$$

Для относительной высоты  $h_1 : A$  на диаграмме (рис. 60) отыскиваем соответствующую кривую. Далее на вертикали, соответствующей относительной длине помещения  $B : A$ , откладываем от кривой  $h_1 : A$  вверх отрезок, равный величине  $\min \bar{e}_0$  (в масштабе ординат диаграммы). Предположим, что верхний конец этого отрезка располагается на кривой  $h : A = m$ . Тогда

$$h_2 = m \cdot A$$

и искомая высота окон

$$h_0 = h_2 - h_1 = m \cdot A - h_1. \quad (71)$$

Другая часто встречающаяся задача заключается в определении предельной ширины помещения  $A$  („глубины заложения“), при которой еще обеспечивается расчетное значение  $\min \bar{e}$ . При этом должны быть известны  $\min \bar{e}$ ,  $B$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  и  $b$ . При помощи номограммы (рис. 60) эта задача решается следующим образом.

По формуле (70) определяем:

$$\min \bar{\epsilon}_0 = \frac{\min \bar{\epsilon}}{\tau \cdot \eta} \cdot \frac{B}{b}.$$

Далее на полоске бумаги откладываем в масштабе ординат номограммы (рис. 60) отрезок, равный найденной величине  $\min \bar{\epsilon}_0$ . Этот

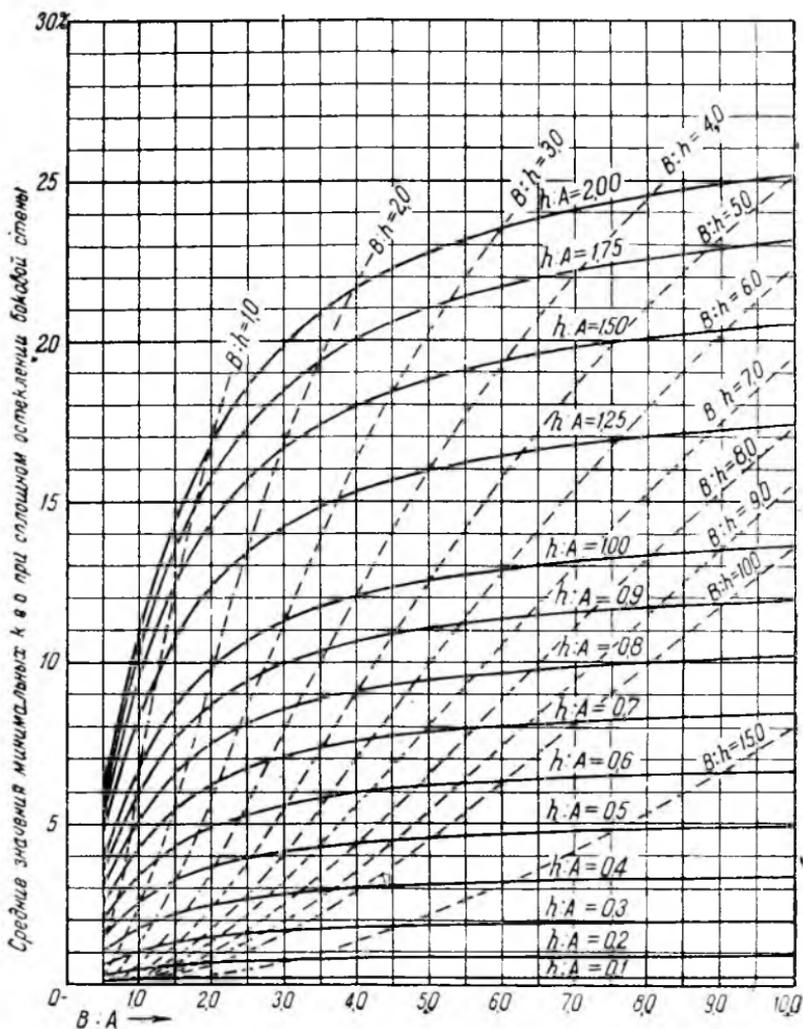


Рис. 60. Номограмма для определения среднего значения минимальных к. е. о.  $\min \bar{\epsilon}_0$ .

отрезок располагаем параллельно оси ординат так, чтобы он уместился на диаграмме между пунктирными кривыми  $B:h_1$  и  $B:h_2$ . Для этого, соблюдая параллельность между линией отрезка и осью ординат диаграммы, передвигаем нижний конец отрезка по пунктирной кривой  $B:h_1$

характеризующих изменение  $\min \bar{e}_0$  в зависимости от  $B : A$  для различных  $h : A$  (сплошные кривые) и  $B : h$  (пунктирные кривые).

При расположении продольной линии  $M$  на уровне нижней грани окна значения  $\min \bar{e}_0$  определяются непосредственно по табл. 12 или номограмме (рис. 60). Если же нижняя грань окон располагается на некоторой высоте  $h_1$  от уровня рабочей плоскости, то  $h_0 = h_2 - h_1$ . В таком случае из величины  $\min \bar{e}_0$  для высоты  $h_2$  надо вычесть величину  $\min \bar{e}_0$  для высоты  $h_1$ . Но высота  $h_1$  обычно мала по сравнению с шириной  $A$ , вследствие чего величиной  $\min \bar{e}_0$  от нее можно пренебречь.

Если перед окнами располагается противоположащее здание, то затеняющее влияние последнего может быть учтено коэффициентом затенения  $\eta$ , численное значение которого определяется, как было изложено в § 16. В таком случае суммарная ширина окон определяется по формуле:

$$b = \frac{\min \bar{e}}{\min \bar{e}_0 \cdot \tau \cdot \eta} B. \quad (69)$$

Все сказанное относилось к случаю определения по данным  $\min \bar{e}$ ;  $h_2 : A$ ;  $h_1 : A$  и  $B : A$  ширины окон. Однако при проектировании светопроемов бокового света часто возникают еще и другие задачи.

В проектной практике часто встречается необходимость в определении при заданных размерах помещения и суммарной ширине окон такой их высоты, чтобы для наиболее удаленной продольной линии обеспечивалась расчетная величина  $\min \bar{e}$  (т. е. заданы  $\min \bar{e}$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $b$  и  $h_1$ ). Эта задача решается при помощи табл. 12 или номограммы (рис. 60) следующим образом.

По формуле (69) определяется то значение  $\min \bar{e}_0$ , при котором обеспечивается заданная величина  $\min \bar{e}$ , т. е.

$$\min \bar{e}_0 = \frac{\min \bar{e}}{\tau \cdot \eta} \cdot \frac{B}{b}. \quad (70)$$

Для относительной высоты  $h_1 : A$  на диаграмме (рис. 60) отыскиваем соответствующую кривую. Далее на вертикали, соответствующей относительной длине помещения  $B : A$ , откладываем от кривой  $h_1 : A$  вверх отрезок, равный величине  $\min \bar{e}_0$  (в масштабе ординат диаграммы). Предположим, что верхний конец этого отрезка располагается на кривой  $h : A = m$ . Тогда

$$h_2 = m \cdot A$$

и искомая высота окон

$$h_0 = h_2 - h_1 = m \cdot A - h_1. \quad (71)$$

Другая часто встречающаяся задача заключается в определении предельной ширины помещения  $A$  („глубины заложения“), при которой еще обеспечивается расчетное значение  $\min \bar{e}$ . При этом должны быть известны  $\min \bar{e}$ ,  $B$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  и  $b$ . При помощи номограммы (рис. 60) эта задача решается следующим образом.

По формуле (70) определяем:

$$\min \bar{\epsilon}_0 = \frac{\min \bar{\epsilon}}{\tau \cdot \eta} \cdot \frac{B}{b}.$$

Далее на полоске бумаги откладываем в масштабе ординат номограммы (рис. 60) отрезок, равный найденной величине  $\min \bar{\epsilon}_0$ . Этот

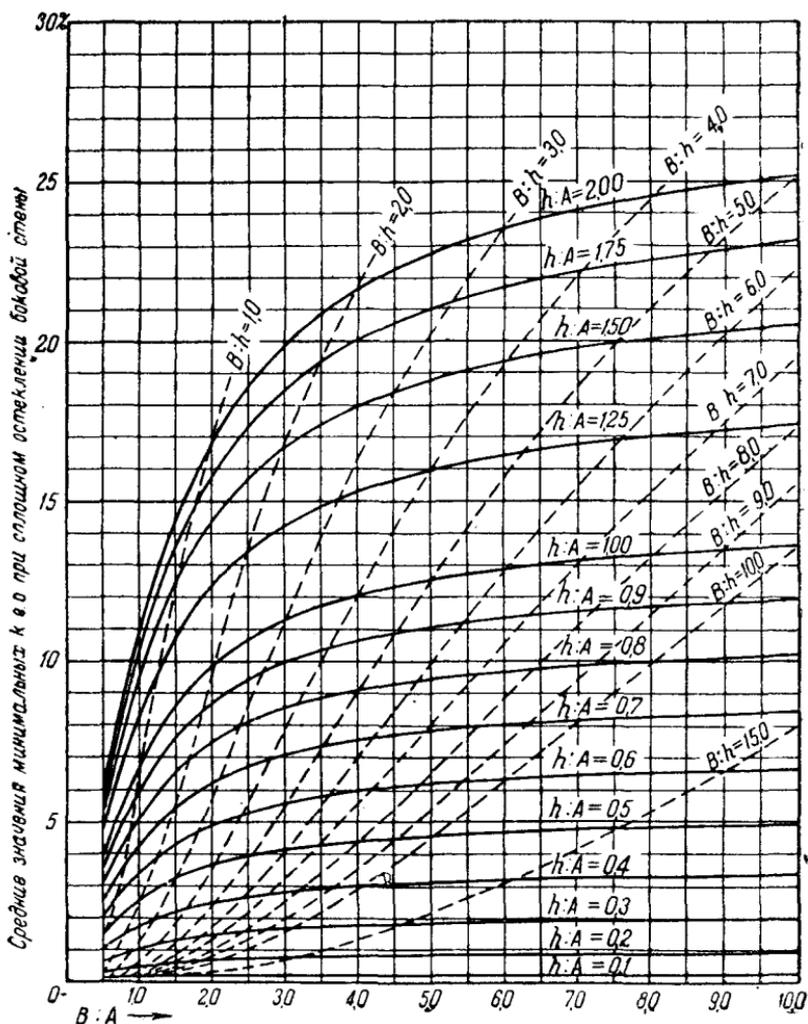


Рис. 60. Номограмма для определения среднего значения минимальных к. е. о.  $\min \bar{\epsilon}_0$ .

отрезок располагаем параллельно оси ординат так, чтобы он уместился на диаграмме между пунктирными кривыми  $B : h_1$  и  $B : h_2$ . Для этого, соблюдая параллельность между линией отрезка и осью ординат диаграммы, передвигаем нижний конец отрезка по пунктирной кривой  $B : h_1$

до тех пор, пока его верхний конец не совпадет с кривой  $B : h_2$ . Верхний конец отрезка одновременно располагается на некоторой кривой  $h_2 : A = m$ . Тогда искомая ширина помещения равна:

$$A = \frac{h_2}{m}$$

Совершенно аналогичным способом рассчитываются светопроемы при двустороннем, боковом свете, когда окна располагаются в обеих продольных стенах. При одинаковых размерах и расположении окон в обеих стенах минимальные освещенности будут располагаться в середине помещения. Другими словами, расчетная ширина  $A$  будет равна половине ширины между осями здания  $A_0$ , т. е.

$$A = \frac{A_0}{2}$$

Минимальные же освещенности будут складываться из освещенностей, создаваемых от правых и левых окон. Вследствие этого размеры окон правой или левой стороны должны рассчитываться на половинную величину среднего значения минимальных к. е. о., т. е.

$$b = \frac{\min \bar{e} \cdot B}{2 \cdot \min \bar{e}_0 \cdot \tau \cdot \eta} \quad (72)$$

В остальном расчет остается прежним.

В заключение следует отметить, что в нормах даются только значения минимальных к. е. о. Средние же значения минимальных к. е. о. ( $\min \bar{e}$ ) будут несколько выше минимальных. В связи с этим возникает вопрос, как вести расчет по средним значениям минимальных к. е. о., чтобы при этом соблюдалась заданная по ОСТу минимальная освещенность. Как показали сравнительные расчеты, достаточно близкие результаты получаются, если считать, что

$$\min \bar{e} = 1,5 \min e.$$

## § 27. Примеры расчета

Покажем применение найденных формул и графических построений на нескольких примерах.

**Пример 1.** Помещение размерами в плане  $A = 30$  м,  $B = 45$  м и высотой  $h = 9$  м (от рабочей плоскости) освещается тремя световыми фонарями длиной  $b = 45$  м при высоте бортика  $d = 1$  м. Требуется определить размеры световых фонарей, принимая их сначала двускатными, а затем шедовыми с вертикальным или наклонным остеклением, при условии обеспечения на уровне рабочей плоскости среднего значения к. е. о.  $\bar{e} = 4,0\%$  (помещение II разряда точности). Коэффициент пропускания  $\tau = 0,40$ . Площадь потолка  $S_0 = 30 \cdot 45 = 1350$  м<sup>2</sup>.

Предварительно определяем размеры теоретических горизонтальных светопроемов. По формуле (60)

$$\begin{aligned} \bar{e}_0 &= \frac{\sqrt{h^2 + A^2} - h}{A} \cdot \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2B}{\sqrt{h^2 + \left(\frac{A}{2}\right)^2} + h} = \\ &= \frac{\sqrt{9,0^2 + 30,0^2} - 9,0}{30,0} \cdot \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 45,0}{\sqrt{9,0^2 + 15,0^2} + 9,0} = \\ &= 0,744 \cdot \frac{2 \cdot 73,6^\circ}{180^\circ} = 0,6084 = 60,84\% \end{aligned}$$

То же значение  $\bar{e}_0$  можно найти непосредственно по табл. 10 или номограмме (рис. 53) при  $h : A = 9,0 : 30,0 = 0,30$  и  $B : A = 45,0 : 30,0 = 1,5$ .

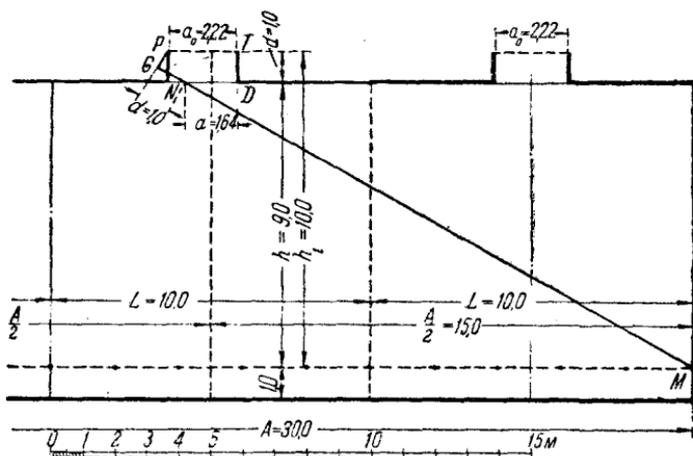


Рис. 61. Пример расчета двускатных световых фонарей.

Необходимая площадь остекления горизонтальных теоретических светопроемов  $S$  по формуле (58) равна:

$$S = \frac{\bar{e}}{\tau \cdot e_0} S_0 = \frac{4,0}{0,40 \cdot 60,84} 1350 = 221,89 \text{ м}^2.$$

При числе светопроемов  $n = 3$  ширина теоретического светопроема по формуле (59) равна:

$$a = \frac{S}{b \cdot n} = \frac{221,89}{45,0 \cdot 3} = 1,64 \text{ м}.$$

Зная ширину горизонтального теоретического светопроема, находим эквивалентные размеры светового фонаря.

*а. Двускатные световые фонари.* На поперечном разрезе в середине ширины потолка наносим теоретический горизонтальный светопроем  $ND$  шириною  $a = 1,64 \text{ м}$  (рис. 61). На высоте  $h_1 = 9,0 + 1,0 = 10,0 \text{ м}$

проводим горизонтальную линию  $PT$ , которая пересекается с вертикальной линией  $DT$  в точке  $T$ . Далее на прямой  $MN$  от точки  $N$  откладываем отрезок  $NG$ , равный  $d = 1,0$  м. Из точки  $M$ , как из центра, проводим дугу [окружности  $GP$  до пересечения ее с горизонтальной линией  $PT$  в точке  $P$ . В результате получаем отрезок  $PT$ , который в масштабе разреза дает ширину двускатного светового фонаря  $a_0 = 2,22$  м.

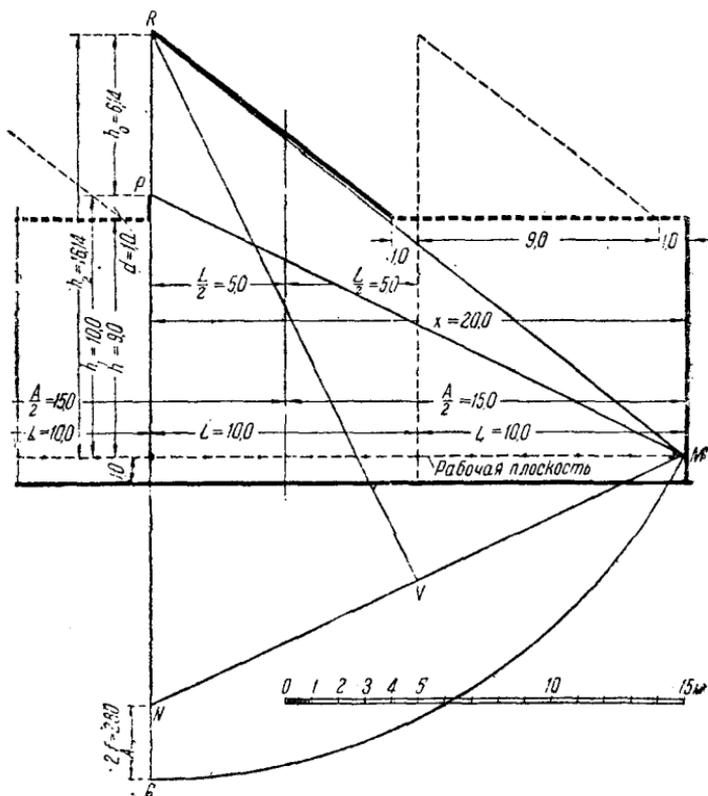


Рис. 62. Пример расчета шедовых фонарей с вертикальным остеклением.

Проверочный расчет показывает, что при найденных размерах двускатных световых фонарей в помещении на уровне рабочей плоскости создается среднее значение к. е. о., равное  $\bar{e} = 4,15\%$ . Таким образом погрешность в данном случае составляет всего около  $4\%$  от заданного среднего значения к. е. о.  $\bar{e} = 4,0\%$ . Следует отметить, что при этих же данных мы при помощи графических построений в примере 1 § 22 непосредственно получили среднее значение  $\bar{e} = 4,0\%$ .

*б. Шеды с вертикальным остеклением.* Размеры шедов определяем аналитически. Для этого предварительно по формуле (61) определяем

площадь светового профиля от одного теоретического горизонтального светопроема, расположенного в середине помещения:

$$f_A = \sqrt{h^2 + \left(\frac{A+a}{2}\right)^2} - \sqrt{h^2 + \left(\frac{A-a}{2}\right)^2} = \\ = \sqrt{9,0^2 + \left(\frac{30,0 + 1,64}{2}\right)^2} - \sqrt{9,0^2 + \left(\frac{30,0 - 1,64}{2}\right)^2} = 1,40 \text{ м.}$$

При расположении одного шеста над серединой помещения световой профиль распространяется на участке  $x = 20,0$  м (рис. 62). Крайняя

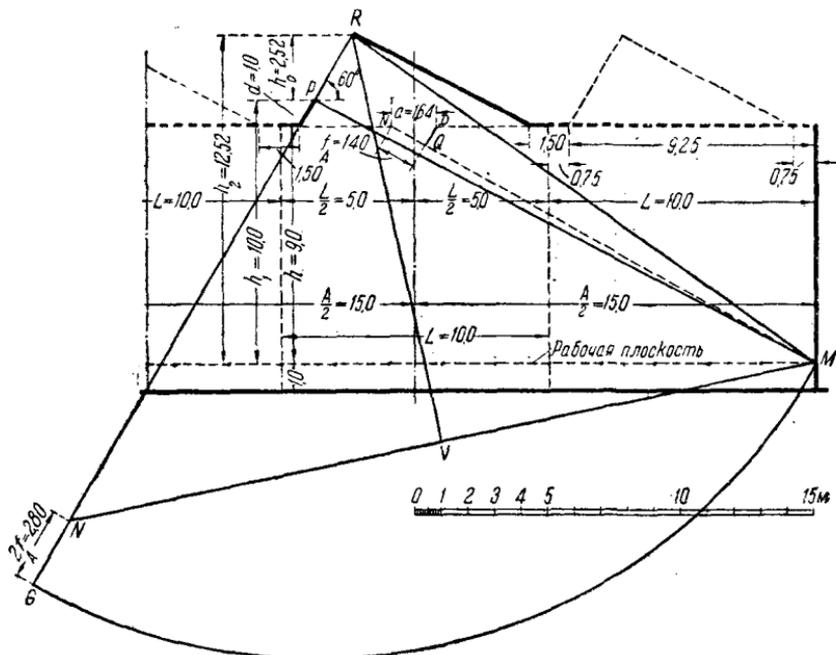


Рис. 63. Пример расчета шедовых фонарей с наклонным остеклением.

точка  $M$  располагается так, что нижняя грань наклонного потолка шеста не загорживает светового потока (1-й случай). При этом по формуле (63)

$$h_0 = \frac{2f_A (\sqrt{h_1^2 + x^2} - f_A)}{\sqrt{h_1^2 + x^2} - h_1 - 2f_A} = \frac{2 \cdot 1,40 (\sqrt{10,0^2 + 20,0^2} - 1,40)}{\sqrt{10,0^2 + 20,0^2} - 10,0 - 2 \cdot 1,40} = 6,14 \text{ м.}$$

Легко убедиться, что графический расчет (рис. 62) дает те же результаты.

Поверочный расчет показывает, что при высоте  $h_0 = 6,14$  м в помещении на уровне рабочей плоскости создается среднее значение к. е. о.  $\bar{e} = 3,82\%$ . Погрешность, таким образом, составляет около  $4,5\%$ .

*в. Шеды с наклонным остеклением ( $\alpha = 60^\circ$ ).* В этом случае ведем расчет чисто графическим способом, причем предварительно также графически определяем площадь светового профиля  $f_A$  от теоретического

горизонтального светопроема, расположенного над серединой помещения. Для этого на поперечном разрезе помещения наносим теоретический горизонтальный светопроем  $ND$  шириною  $a = 1,64$  м (рис. 63). Далее из точки  $M$ , как из центра, проводим дугу окружности  $DQ$  до пересечения ее с прямой  $MN$  в точке  $Q$ . Получаем отрезок  $QN$ , который в масштабе разреза дает  $f_A = 1,40$  м.

Эквивалентные размеры шеда с наклонным светопроемом определяем следующим образом (при расположении точки по 1-му случаю). Располагаем один шедовый фонарь рассчитываемого типа над серединой помещения. Из точки  $P$ , как из центра, проводим дугу окружности  $MG$  до пересечения ее со следом плоскости светопроема в точке  $G$ . От этой точки в масштабе разреза откладываем отрезок  $GN$ , равный  $2f_A = 2,80$  м. Соединяем точки  $N$  и  $M$  прямой и строим на отрезке  $NM$ , как на основании, равнобедренный треугольник. Для этого из точки  $V$  — середины отрезка  $NM$  — восстанавливаем перпендикуляр до пересечения его со следом плоскости светопроема в точке  $R$ , которая определяет собою верхний конец светопроема наклонного шеда. В масштабе разреза находим  $h_0 = 2,52$  м.

Поверочный расчет показывает, что при найденной высоте светопроема шедов в помещении создается на уровне рабочей плоскости среднее значение к. е. о.  $\bar{e} = 4,04\%$ . Погрешность составляет всего  $1\%$ .

**Пример 2.** Помещение (рис. 50) размерами в плане  $A = 6,0$  м и  $B = 12,0$  м освещается тремя окнами высотой  $h_0 = 3,6$  м. Требуется определить ширину окон  $b_0$ , если  $h_1 = 0,0$  м;  $h_2 = 3,6$  м;  $\min \bar{e} = 1,5\%$ ;  $\tau = 0,50$  и  $\eta = 1,0$  (противолежащие здания отсутствуют).

Предварительно определяем относительные размеры помещения:  $h_1 : A = 0$ ;  $h_2 : A = 3,6 : 6,0 = 0,60$  и  $B : A = 12,0 : 6,0 = 2,0$ . Далее по номограмме (рис. 60) или табл. 12 находим  $\min \bar{e}_0 = 4,94\%$ . Подставляя найденное значение в формулу (69), получим:

$$b = \frac{\min \bar{e}}{\min \bar{e}_0 \cdot \tau \cdot \eta} B = \frac{1,5}{4,94 \cdot 0,50 \cdot 1,0} 12,0 = 7,30 \text{ м.}$$

Деля найденную суммарную ширину окон  $b$  на число окон  $n = 3$ , находим:

$$b_0 = \frac{b}{n} = \frac{7,30}{3} = 2,43 \text{ м.}$$

Округляя, принимаем окончательно  $b_0 = 2,40$  м.

Поверочный расчет показывает, что при найденных размерах окон в помещении на уровне рабочей плоскости обеспечивается среднее значение минимальных к. е. о.  $\min \bar{e} = 1,47\%$  (см. § 22, пример 3). Погрешность составляет  $2\%$ .

Определим теперь, какую высоту окон необходимо принять, чтобы в помещении создавалось среднее значение минимальных к. е. о.  $\min \bar{e} = 1,00\%$  при тех же размерах помещения, т. е.  $A = 6,0$  м;  $B = 12,0$  м;  $h_1 = 0,0$  м и  $b = 2,40 \cdot 3 = 7,20$  м.

Для достижения заданного  $\min \bar{e} = 1,00\%$  необходимое значение  $\min \bar{e}_0$  по формуле (70) должно быть равно:

$$\min \bar{e}_0 = \frac{\min \bar{e}}{b \cdot \tau \cdot \eta} B = \frac{1,00}{7,20 \cdot 0,50 \cdot 1,0} 12,0 = 3,33\%$$

По табл. 12 видно, что в вертикальном столбце для  $B:A = 12,0:6,0 = 2,0$  найденная величина  $\min \bar{e}_0 = 3,33\%$  располагается между  $h:A = 0,4$  и  $h:A = 0,50$ . Интерполируя, находим:

$$h_2:A = 0,40 + \frac{3,33 - 2,50}{3,68 - 2,50} 0,10 = 0,47.$$

Искомая высота окон  $h_2$  равна:

$$h_2 = 0,47 \cdot A = 0,47 \cdot 6,0 = 2,82 \text{ м.}$$

Определим еще, какая ширина помещения  $A$  может быть допущена при  $B = 12,0 \text{ м}$ ;  $h_1 = 0,0 \text{ м}$ ;  $h_2 = 4,0 \text{ м}$  и  $b = 2,40 \cdot 3 = 7,20 \text{ м}$ , если требуется обеспечить на уровне рабочей плоскости среднее значение минимальных к. е. о.  $\min \bar{e} = 1,50\%$ .

По формуле (70) находим:

$$\min \bar{e}_0 = \frac{\min \bar{e}}{b \cdot \tau \cdot \eta} B = \frac{1,5}{7,20 \cdot 0,50 \cdot 1,0} 12,0 = 5,00\%$$

Отношение  $B:h_2 = 12,0:4,0 = 3,0$ .

Проведем теперь на номограмме (рис. 60) на высоте  $\min \bar{e}_0 = 5,00\%$  горизонтальную линию, которая пересечет пунктирную кривую  $B:h_2 = 3,0$  в точке, которая располагается между кривыми  $h:A = 0,6$  и  $0,7$  так, что, интерполируя на-глаз, получаем  $h_2:A = 0,62$ . Тогда искомая ширина помещения равна:

$$A = h_2 : 0,62 = 4,0 : 0,62 = 6,45 \text{ м.}$$

## Глава VI

### НОРМЫ И ТЕХНИКА РАСЧЕТА ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Изложенные в предыдущих главах принципы проектирования и методы расчета позволяют достаточно надежно и просто находить эффективные решения естественного освещения помещений.

Однако для того чтобы применить эти методы и путем расчета получить все необходимые данные, проектировщик должен предварительно установить численные значения констант проектирования, регламентируемые действующими нормами. При этом следует особенно подчеркнуть, что от правильного и удачного выбора этих констант зависит обеспечение требуемых нормами условий освещения помещений в натуре, что и является конечной целью светорасчета. Вследствие сказанного в настоящей главе мы рассмотрим основные нормативные данные и методику светорасчетов.

## § 28. Методы нормирования естественного освещения помещений

Нормирование естественного освещения может производиться двумя основными методами — косвенным и прямым.

При косвенном методе размеры светопроемов, при которых достигаются требуемые условия освещенности, регламентируются цифровыми отношениями площади остекления к площади пола.

При прямом методе, наоборот, регламентируется непосредственно та величина освещенности, которая должна быть достигнута в результате устройства светопроемов искомого размера.

До последнего времени единственным способом определения размеров светопроемов служил широко внедрившийся в проектную практику косвенный метод, так называемого, геометрического нормирования. Этот метод заключается в том, что в зависимости от назначения и размеров помещения и расположения светопроемов в нормах даются соотношения между площадью остекления светопроемов и площадью пола помещения, выработанные на основании векового опыта. Однако геометрическим нормированием невозможно учесть ни величины светового потока, падающего на освещаемую плоскость, ни закона распределения его по этой плоскости, т. е. как раз те факторы, которые в конечном счете и определяют достаточность, а при верхнем свете и равномерность освещения. Кроме того, такими нормами совершенно не учитываются светопотери, весьма существенно влияющие на условия освещения рабочей плоскости; это происходит оттого, что простыми „цифровыми“ соотношениями нельзя учесть ни основных величин и констант проектирования, ни всего многообразия применяемых на практике типов светопроемов. Особенно сказанное относится к комбинированному свету, т. е. когда помещение освещается одновременно и световыми фонарями и окнами.

По указанным причинам I Всесоюзная светотехническая конференция (Ленинград, 1931 г.) признала необходимым и своевременным замену косвенного (геометрического) нормирования прямым.

При прямом методе нормирования регламентируется непосредственно величина освещенности. При этом вследствие крайнего непостоянства природных условий естественного освещения освещенность нормируется не в абсолютных единицах (фотах или люксах), а в относительных в виде коэффициента естественного освещения (к. е. о.). Нормируя величины освещенности, нормы тем самым не фиксируют жестко типов, размеров и расположения светопроемов, а требуют только получения определенного светового эффекта, который должен быть достигнут в результате устройства светопроемов. Поэтому такое нормирование может быть названо светотехническим, так как оно позволяет учитывать все особенности распределения светового потока по рабочей плоскости и притом при любых типах и комбинациях светопроемов с учетом всевозможных светопотерь. Этим перед проектировщиком открываются возможности для достижения требуемых нормами условий освещенности подбирать, свободно располагать и комбинировать различные типы светопроемов. Таким путем оказывается возможным в наибольшей степени приблизить данные расчетов к тем, которые будут получаться

в натуре. Зная же величины к. е. о. и данные о световом климате, мы имеем возможность уже при проектировании с достаточной точностью подсчитывать те периоды времени, в течение которых будет обеспечиваться необходимая для работы абсолютная освещенность. Эти последние данные позволяют, в свою очередь, подсчитать время действия искусственного света и тем самым решать вопросы экономики освещения здания.

## § 29. Основные нормативные данные на проектирование естественного освещения промышленных зданий

По действующему в настоящее время ОСТу на естественное освещение промышленных зданий (ОСТ 8545) степень освещенности нормируется величиной к. е. о., выраженной в процентах. При этом для верхнего света (световые фонари различных систем) и комбинированного света (световые фонари и окна) достаточность освещенности помещений регламентируется средним значением к. е. о., а для бокового света (окна) — минимальным значением к. е. о.

Для каждого из упомянутых видов освещения расчетное значение к. е. о. устанавливается в зависимости от условий зрительной работы, производимой в помещении. По ОСТу все основные и подсобные помещения промышленных зданий, предназначенные для постоянного пребывания и работы в дневное время, разбиваются на следующие четыре основных разряда:

I — помещения с мелкой и точной работой;

II — помещения с работой средней точности и помещения с работой, представляющей опасность травматизма рабочих;

III — помещения с грубой работой или с работой, не требующей непосредственного участия в рабочих процессах человека, если требования безопасности не предъявляют повышенных требований к освещенности;

IV — складские помещения, предназначенные для хранения сыпучих материалов, крупных и средних предметов.

Для облегчения установления разряда помещения в ОСТе помещен примерный перечень основных и вспомогательных помещений промышленных зданий в зависимости от требований освещенности, которым и следует пользоваться в практической работе.

*Верхний или комбинированный свет.* При верхнем или комбинированном свете качество освещения помещения естественным светом нормируется двумя факторами: 1) достаточностью освещенности, характеризуемой средним значением к. е. о.  $\bar{e}$  и 2) равномерностью распределения светового потока в пределах рабочей плоскости, характеризуемой отношением  $\max e : \min e$ .

Средние значения к. е. о. для помещений, освещаемых верхним или комбинированным светом, должны лежать в пределах, указанных в табл. 13.

При этом согласно указаниям ОСТа большее из допустимых для каждого разряда значений к. е. о. следует выбирать в следующих случаях:

а) при большой загруженности объема помещения и площади пола оборудованием;

б) при темном фоне рабочих поверхностей с коэффициентом отражения  $\rho < 30\%$ .

Таблица 13

Нормы средних значений к. е. о. ( $\bar{e}$ ) при верхнем и комбинированном свете

Разряд помещения	Среднее расчетное значение к. е. о. в %	Разряд помещения	Среднее расчетное значение к. е. о. в %
I	5—7	III	2—3
II	3—5	IV	1—2

Кроме того, в южных местностях при географической широте  $45^\circ$  (и менее) средние значения к. е. о. могут быть снижены на  $25\%$  против норм, указанных в таблице.

Равномерность распределения светового потока определяется в пределах одного пролета отношением  $\text{шаге} : \text{шаге}$ , численная величина которого не должна превышать 3,0.

Исследованиями распределения светового потока по помещению, произведенными К. Е. Бабуриным, было установлено, что равномерность зависит не от абсолютной величины пролетов фонарей  $L$ , а от отношения  $L : h_1$ , размер же светопроема при этом не оказывает значительного влияния. На основании этого исследования были установлены оптимальные относительные расстояния между осями световых фонарей различных систем, приведенные в табл. 14.

Таблица 14

Максимально допустимые горизонтальные расстояния между осями фонарей  $L$

Тип фонаря	Расстояние между осями фонарей	Примечание
Шед . . . . .	$2,5 h_1$	$h_1$ — высота нижнего края светопроема фонаря над уровнем рабочей плоскости
Буало . . . . .	$4,0 h_1$	
Двускатный и А-образный . . . . .	$2,5 h_1$	
Трапециевидный . . . . .	$2,0 h_1$	

**Боковой свет.** Качество освещения при боковом свете характеризуется только одним минимальным значением к. е. о. Происходит это вследствие того, что, в противоположность верхнему свету, при котором вообще можно достигнуть любой степени равномерности освещения,

при боковом свете световой поток распределяется (в плоскости поперечного разреза) весьма неравномерно. При этом характер светового профиля в поперечном разрезе не изменяется, как бы мы ни располагали окна. Ввиду этого при боковом свете расчет ведется на минимальную величину к. е. о., численные значения которой в зависимости от разряда помещений приводятся в табл. 15.

Таблица 15

Минимальные значения к. е. о. при боковом свете

Разряд помещений	Величина минимального к. е. о. в %	Разряд помещений	Величина минимального к. е. о. в %
I	1,5	III	0,5
II	1,0	IV	0,3

*Коэффициенты пропускания.* При описании методов расчета мы уже упоминали, что при прохождении светового потока через светопроемы часть его безвозвратно теряется для целей освещения вследствие неполного пропускания и отражения света стеклами, затемнения переплетами, загрязненности стекол, загромождения светового потока конструкциями и т. п. Эти потери света практически принято учитывать общим коэффициентом пропускания, представляющим собою произведение частных коэффициентов пропускания, т. е.

$$\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4, \quad (73)$$

где  $\tau_1$  — коэффициент пропускания стеклами диффузного света;  
 $\tau_2$  — коэффициент, учитывающий затемнение светового потока переплетами;  
 $\tau_3$  — коэффициент, учитывающий загрязнение стекол;  
 $\tau_4$  — коэффициент затемнения конструкциями ферм и фонарей.

*Коэффициент  $\tau_1$ .* При прохождении света через светопрозрачную среду часть светового потока поглощается этой средой, часть отражается обеими ее поверхностями и только часть, характеризующая коэффициентом пропускания  $\tau_1$ , проходит через среду.

Поглощение света чистым стеклом зависит от его прозрачности и толщины, а также от угла падения луча на стекло вследствие изменения длины пути луча света в толще стекла.

Отражение света зависит от структуры поверхности стекла и угла падения луча, отсчитываемого от нормали к поверхности стекла. На рис. 64 показана по Лекишу<sup>1</sup> зависимость между величиной отражения света одной и двумя поверхностями и углом падения света при прохождении его через гладкое чистое стекло (поглощение света в самом стекле условно не учитывается). Эта зависимость показывает, что при увеличении угла падения примерно до 45° процент отраженного света

<sup>1</sup> М. Лекиш, Свет и работа, ОНТИ, 1934.

возрастает медленно, оставаясь в пределах 11%; при дальнейшем же увеличении угла падения нарастание происходит все быстрее; при угле, равном 90°, процент отраженного света достигает 100% (рис. 64).

Коэффициент пропускания  $\tau_1$  уменьшается при возрастании угла падения луча света. Наибольшего своего значения коэффициент пропускания  $\tau_1$  достигает для лучей, падающих перпендикулярно к поверхности стекла.

Приведенные выше данные относятся к направленному свету. При диффузном свете, каким и является естественный свет от небосвода, лучи света падают на стекло под самыми различными углами, вследствие чего и коэффициент пропускания  $\tau_1$  при диффузном свете оказывается меньшим, чем при направленном свете. В табл. 16 приводятся полученные Лекишем коэффициенты пропускания  $\tau_1$  для некоторых видов стекол как для случая перпендикулярного падения луча света на стекло, так и для диффузного света.

**Коэффициент  $\tau_2$ .** Коэффициент затенения светового потока переплетами  $\tau_2$  зависит от сечения переплетов и отношения площади остекления к полной площади светопроема, а также от угла падения проходящих в помещение лучей света. При падении лучей света под углом пропускание уменьшается вследствие того, что на плоскость светопроема проектируется толщина профиля горбылей и импостов. Исследуя отдельно затенение горизонтальными и вертикальными элементами переплетов для целого ряда точек рабочей плоскости, К. Е. Бабури<sup>1</sup> нашел, что коэффициент  $\tau_2$  составляет 90% при обычных и 70% при двойных переплетах от

величины отношения площади остекления к полной площади светопроема. Результаты этих исследований приводятся в табл. 17, в которой меньшие значения  $\tau_2$  относятся к створным переплетам американского типа, а большие — к глухим облегченным переплетам.

Данные табл. 17 позволяют вести расчет при стеклах любых сортов. В практической работе оказывается более удобной табл. 18, помещенная в ОСТе, в которой для обычных гладких стекол (т. е. при

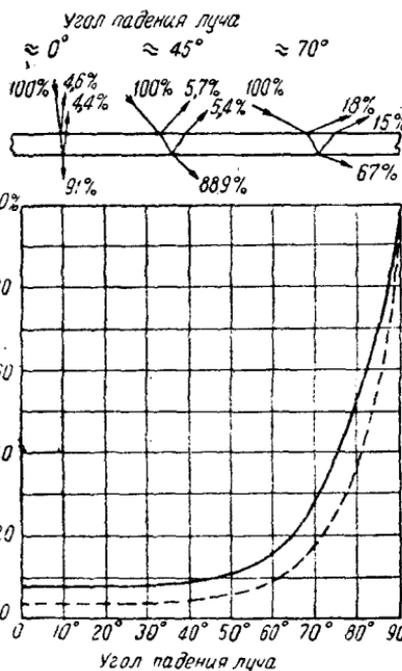


Рис. 64. Отражение света от одной (пунктирная кривая) и от двух (сплошная кривая) поверхностей гладкого стекла в зависимости от угла падения света (по Лёкишу).

<sup>1</sup> К. Е. Бабури и Н. М. Гусев, Нормализация расчета и проектирования естественного освещения промышленных зданий, ОНТИ, 1938, Раздел III, § 3.

**Коэффициенты пропускания некоторых видов стекол для прямого  
и рассеянного света**

Сорт стекла	Сторона, обра- щенная к свету	Коэффициент пропускания $\tau_1$	
		освещение перпендику- лярным лучком	освещение диф- фузным светом
Гладкое . . . . .	—	0,90	0,80
Матированное . . . . .	Шероховатая	0,78	0,70
	Гладкая	0,74	0,70
Галькообразное . . . . .	Шероховатая	0,85	0,75
	Гладкая	0,79	0,75
Крупноребристое . . . . .	Шероховатая	0,77	0,62
	Гладкая	0,52	0,62
Мелкоребристое . . . . .	Шероховатая	0,86	0,79
	Гладкая	0,79	0,79
Воляистое . . . . .	Шероховатая	0,88	0,82
	Гладкая	0,86	0,82

Таблица 17

**Коэффициенты  $\tau_2$ , учитывающие затенение переплетами**

Характер остекления	Деревянные или железо- бетонные переплеты		Металлические пере- плеты	
	верхний свет	боковой свет	верхний свет	боковой свет
Одиночное . . . . .	0,50—0,60	0,70—0,80	0,70—0,80	0,80—0,90
Двойное . . . . .	0,35—0,45	0,50—0,65	0,55—0,65	0,65—0,75

Таблица 18

**Коэффициенты  $\tau_1 \cdot \tau_2$ , учитывающие светопотери в остеклении и переплетах**

Характер остекления	Деревянные или железо- бетонные переплеты		Металлические пере- плеты	
	верхний свет	боковой свет	верхний свет	боковой свет
Одиночное . . . . .	0,40—0,50	0,55—0,65	0,55—0,65	0,65—0,75
Двойное . . . . .	0,25—0,30	0,35—0,40	0,35—0,40	0,45—0,55

$\tau_1 = 0,80$  для одиночного остекления и  $\tau_1 = 0,64$  для двойного) учтены сразу светопотери от остекления и от переплетов, т. е. даны величины  $\tau_1 \cdot \tau_2$ . При этом, как и в табл. 17, меньшие значения  $\tau_1 \cdot \tau_2$  относятся к створным переплетам американского типа, а большие — к глухим облегченным переплетам.

**Коэффициент  $\tau_3$ .** Коэффициент  $\tau_3$  учитывает светопотери, происходящие от загрязненности стекол. На численную величину  $\tau_3$  оказывают влияние следующие факторы:

а) Состав и интенсивность выделений производства (дым, копоть, испарения и т. п.) и атмосферные условия, от которых зависит плотность загрязнения с внутренней и внешней сторон остекления. Оседание выделений производства и грязи происходит, вообще говоря, интенсивнее с внутренней стороны остекления, так как, помимо всего прочего, грязь с наружной стороны частично сдувается ветром и смывается дождем.

б) Угол наклона остекления. Загрязнение стекол происходит тем интенсивнее, чем меньше угол  $\alpha$  наклона остекления к горизонту. Наименьшая загрязненность наблюдается у светопроемов с вертикальным остеклением, так как на наклонных плоскостях стекла, вообще говоря, слой пыли и копоти отлагается значительно более интенсивно, особенно при загрязненности атмосферы заводской территории.

в) Продолжительность загрязнения. Как показали исследования (Рендолл и Мартин), уменьшение пропускания происходит приблизительно пропорционально времени загрязнения, за исключением первого месяца эксплуатации (например после очистки стекол), в течение которого загрязнение происходит более интенсивно.

Согласно ОСТу все производственные помещения разбиваются на две основные группы:

1) помещения с незначительным пылевыведением (например механические, инструментальные, типографии, текстильные фабрики и т. п.), т. е. такие, в которых отсутствуют вредные выделения производства, а загрязнение обуславливается обычными причинами (материальный износ полов, занос пыли извне, атмосферные условия и т. п.);

2) помещения с повышенным пылевыведением (например деревообделочные, мельницы, цементные заводы), а также помещения с выделением дыма и копоти (например литейные, кузнечные, прокатные и т. п.).

Численные значения коэффициента загрязнения  $\tau_3$  даются в ОСТе в зависимости от группы помещений и наклона остекления светопроемов, причем различаются только вертикальное и наклонное остекления, так как горизонтальное остекление применяется в строительной практике редко. При этом нормальные сроки очистки принимаются:

для помещений 1-й группы — два раза в год;

для помещений 2-й группы — четыре раза в год.

В табл. 19 приводятся коэффициенты  $\tau_3$ , рекомендуемые ОСТом.

Приведенные в табл. 19 нормативные данные коэффициента  $\tau_3$  могут соответствовать действительности только при условии соблюдения указанного выше режима очистки остекления от загрязнения.

При проектировании световых проемов и их конструкции должна быть заранее предусмотрена возможность удобной и легкой очистки остекления путем целесообразного распределения створных элементов переплетов, обеспечения удобного подхода к остеклению и т. п.

**Коэффициент  $\tau_4$ .** Кроме свотопотерь, происходящих непосредственно при прохождении светового потока через светопроемы, имеют место еще дополнительные светопотери, обусловленные затенением строительными конструкциями как самого светового фонаря, так и перекрытий (фермы, арки, балки и т. п.). Вследствие разнообразия конструктивных форм фонарей и перекрытий и большой сложности точного учета этих светопотерь последние учитываются приближенно. При этом степень затенения зависит от размеров сечений элементов указанных конструкций и их взаимного расположения.

Для приближения данных расчета к наблюдаемым в натуре учет коэффициента затенения является безусловно необходимым. Рекомендуемые численные значения этого коэффициента  $\tau_4$  по данным ОСТА приводятся в табл. 20.

Помимо указанных потерь, на пути прохождения светового потока от светопроемов к освещаемой плоскости могут происходить затенения рабочих мест оборудованием, машинами и т. п., расположение которых обуславливается технологическим процессом. Подобного рода затенения нормами не учитываются, хотя в некоторых случаях они и могут оказать существенное влияние на условия освещения. Во всех таких случаях необходимо световые фонари располагать так, чтобы по возможности избежать вредных теней на рабочих местах.

Подставляя в формулу (73) частные значения коэффициентов пропускания  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и  $\tau_4$ , получим расчетное значение коэффициента пропускания, которое обычно не превышает  $\tau = 0,5$ ; в отдельных же случаях при большой загрязненности стекол (например в литейных, кузнечных и т. п. помещениях) и затененности несущими конструкциями ферм и т. п. этот расчетный коэффициент пропускания может снизиться до  $\tau = 0,20$  и даже ниже.

Таблица 19

Величины коэффициента загрязнения  $\tau_3$

Группа помещений	Вертикальное остекление	Наклонное остекление
1-я	0,75—0,60	0,65—0,55
2-я	0,60—0,50	0,55—0,45

Таблица 20

Величины коэффициента  $\tau_4$ , учитывающего светопотери от затенения конструкциями фонарей и перекрытий

Род конструкций	Величина коэффициента $\tau_4$
Деревянные и железобетонные несущие конструкции перекрытия (фермы, арки, рамы) . .	0,70—0,90
Металлические несущие конструкции перекрытия	0,90—1,0

### § 30. Методика проектирования и техника расчета естественного освещения помещений

При проектировании естественного освещения перед проектировщиком, особенно при отсутствии опыта в этой специальной области, возникает вопрос, в каком порядке и как вести проектирование и расчет световых проемов. В настоящем параграфе мы опишем ход расчета естественного освещения только промышленных зданий, так как именно здесь проблема освещения выступает в своем наиболее полном виде.

В общем случае можно рекомендовать следующий ход проектирования и расчета естественного освещения, неоднократно проверенный на практике:

- а) установление расчетного значения  $k$ . е. о.;
- б) выявление расчетных размеров освещаемого помещения и выбор типа освещения и фонарей;
- в) определение коэффициентов светопотерь;
- г) определение размеров светопроемов;
- д) поверочный расчет.

*а. Установление расчетного значения  $k$ . е. о.* Предварительно производится ознакомление с производственным процессом и оборудованием. Далее по условиям зрительной работы, согласно данным перечня основных и вспомогательных помещений ОСТА, устанавливается разряд помещения. Затем по данным соответствующих таблиц ОСТА в зависимости от типа освещения (верхний, комбинированный или боковой свет) и разряда помещения производится выбор расчетных значений  $k$ . е. о.

*б. Выявление расчетных размеров освещаемого помещения и выбор типа освещения и фонарей.* После того как установлены разряд помещения и соответствующее расчетное значение  $k$ . е. о., необходимо выявить расчетные размеры помещения. Только в исключительных случаях многопролетное одноэтажное здание сплошной застройки, освещаемое целой системой световых фонарей, представляет собою в светотехническом отношении единое помещение. В большинстве случаев такое здание разделяется сплошными перегородками, коридорами, вспомогательными помещениями и т. п. на ряд самостоятельных в светотехническом отношении помещений. Для расчета в таком случае необходимо выбрать такое помещение, освещенность которого можно было бы распространить на все остальные помещения.

При выборе типа фонарей следует в первую очередь решить вопрос о наиболее целесообразном, по условиям зрительной работы, направлении светового потока, падающего на рабочие поверхности. Нередко эффективная система освещения может оказаться неприемлемой из-за затеняющего влияния оборудования или обрабатываемых предметов, вследствие чего освещенность рабочего места может снизиться до недопустимых пределов. В таком случае должна быть выбрана наиболее подходящая система световых фонарей с таким их расположением, чтобы устранялись указанные выше дефекты (тени).

Значительную роль играют вопросы защиты помещения от проникания внутрь помещения, в частности на рабочие поверхности, прямых солнечных лучей (инсоляция).

Вообще говоря, проникание в помещение солнечных лучей может играть как положительную, так и отрицательную роль. С одной стороны, прямые солнечные лучи оказывают несомненно большое биологическое и психофизиологическое действие, расцениваемое как положительный фактор. С другой же стороны, прямые солнечные лучи могут оказывать тем или иным образом отрицательное действие, как, например, при возникновении явления слепимости, нарушающей зрительные функции человека. При большой инсоляции в летнее время появляется опасность перегрева помещения, особенно в южных местностях, что ведет к ухудшению условий труда. Эти вопросы решаются прежде всего выбором соответствующего типа световых фонарей и правильной их ориентации. Наиболее совершенными с этой точки зрения являются шеды с вертикальным остеклением при ориентации их остекления на север. Далее идут фонари типа Буало с ориентацией остекления на север и юг. Шедовые и трапезиевидные фонари с наклонным остеклением ориентируются подобным же образом: первые на север и вторые — на север и юг. При этом наклон остекления выбирается в зависимости от угла летнего солнцестояния. Наихудшим типом фонаря, с точки зрения защиты от инсоляции, являются зенитные световые фонари.

Устранение влияния инсоляции может производиться путем соответствующей окраски остекления фонарей или введения светорассеивающих стекол, козырьков, штор и т. п. Однако все эти мероприятия в значительной мере уменьшают и без того незначительную величину светового потока, проникающего через светопроемы.

Кроме того, при выборе типа фонарей следует иметь в виду еще целый ряд факторов теплотехнических, конструктивных и эксплуатационных, которые находятся в тесной связи с особенностями технологического процесса. Световые фонари служат не только для целей освещения рабочих поверхностей, но используются и для целей аэрации. Особенное значение этот вопрос приобретает в цехах с интенсивным выделением тепла и газов, удаление которых представляет собою весьма сложную задачу, служащую предметом специальных исследований. Для наилучшей циркуляции воздуха должны быть предусмотрены впускные (нижние) и выпускные (верхние) створные регулируемые переплеты.

Необходимо также обращать внимание на возможность скопления снега. Для предотвращения этого при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать такой ориентации фонарей, при которой продольная ось их располагается параллельно направлению господствующих ветров в зимние месяцы. Сказанное особенно относится к районам, богатым снежными бурями (Сибирь, Урал). При этом следует стремиться к возможному увеличению ширины междуфонарных пространств.

Интенсивность освещения при верхнем свете зависит главным образом от типа фонаря и площади остекления. Как было показано в главе V, для одного и того же типа фонарей интенсивность освещения, т. е. величина среднего значения к. е. о., зависит преимущественно от площади остекления. Равномерность же освещения зависит главным образом от типа фонарей и числа светопроемов или, точнее, относительного расстояния между осями фонарей (выраженного в долях высоты  $h_1$ ).

Некоторую помощь при выборе типа световых фонарей могут оказать специальные таблицы,<sup>1</sup> содержащие ориентировочные данные о фонарях наиболее часто встречающихся типов.

Однако руководствуясь данными таких таблиц, возможно только ориентировочно наметить типы световых фонарей, удовлетворяющих заданным требованиям. Окончательное же решение этого вопроса возможно только путем сравнительных расчетов, ибо нередко при получающейся геометрической схеме фонарей выбранного типа в конкретных условиях или вовсе невозможно создать требуемую интенсивность освещения или же размеры остекления получаются неприемлемыми из экономических и архитектурных соображений.

*в. Определение коэффициентов пропускания.* Коэффициенты пропускания  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и  $\tau_4$  определяются по таблицам 16—20, для чего предварительно должна быть намечена конструкция светопроемов (двойное или ординарное остекление, глухие или створные, деревянные или металлические переплеты). На выбор соответствующих коэффициентов пропускания следует обратить особенное внимание, так как от удачного их выбора зависит приближение результатов расчета к тем условиям, которые получаются в натуре.

Следует вообще стремиться по возможности сводить к минимуму светопотери, достигающие нередко значительных величин. Уменьшение светопотерь достигается прежде всего введением одиночного остекления, выбором стекол большого размера и уменьшением сечений конструктивных элементов фонарей. Большое влияние оказывают условия эксплуатации световых фонарей, т. е. периодическая очистка остекления от загрязнения, окраска или побелка несущих конструкций и элементов фонаря — импостов, переплетов и т. п.

*г. Определение размеров светопроемов.* Предварительные размеры световых фонарей определяются по изложенному в главе V методу, дающему в общем достаточно близкие результаты к тем, которые получаются при поверочных расчетах.

При нахождении размеров окон бокового света необходимо сначала по минимальному значению к. е. о. (см. пункт а) определить расчетное среднее значение минимальных к. е. о., которое мы рекомендуем считать равным  $\bar{e} = 1,5 \cdot \min e$ .

*д. Поверочный расчет.* При боковом свете поверочный расчет сводится к определению значений к. е. о. в тех наиболее удаленных от окон точках рабочей плоскости, в которых ожидается наименьшая освещенность, и к сравнению полученных величин к. е. о. с допускаемыми по нормам. При боковом свете такие точки располагаются обычно у торцевых стен. В случае двустороннего бокового света минимальные значения к. е. о. располагаются также у торцевых стен, но только по середине помещения, если размеры и расположение окон в обеих стенах одинаковы. В противном случае точка минимума несколько смещается в сторону окон с меньшими размерами.

---

<sup>1</sup> См., например, Н. М. Гусев, Комплексное проектирование естественного освещения в южных районах, Проектирование промышленных зданий, том IV, Стандартгиз, 1936.

Поверочный расчет при верхнем свете заключается в установлении достаточности освещенности и равномерности распределения светового потока по рабочей плоскости (в пределах одного пролета). Для этого необходимо определить по методу, изложенному в главе IV, средние значения к. е. о. в ряде продольных линий. Последние следует располагать симметрично относительно вертикальной оси фонарей, так как в таком случае достаточно определить средние значения к. е. о. только от одного самого крайнего светопроема. По этим данным можно определить суммарные средние освещенности в каждой точке от всех светопроемов. По полученным данным строится световой профиль, наглядно иллюстрирующий качество проектного решения.

Среднее значение к. е. о. в отношении всей рабочей плоскости определяется по формуле (38)

$$\bar{e} = \frac{\frac{\bar{e}_0}{2} + \bar{e}_1 + \bar{e}_2 + \dots + \frac{\bar{e}_n}{2}}{n}$$

Значительно проще среднее значение к. е. о. определяется непосредственно по методу, описанному в главе IV.

Зная средние значения к. е. о. в намеченных продольных линиях, производят проверку равномерности освещения, для чего вычисляют в каждом пролете отношение  $\max \bar{e} : \min \bar{e}$ , численное значение которого не должно превышать 3,0.

### § 31. Приемы расчета естественного освещения при проектировании

В предыдущих главах были подробно описаны отдельные звенья расчета естественного освещения помещений при помощи целого ряда приемов, графиков и формул. Здесь мы покажем весь ход расчета на двух примерах проектирования верхнего и бокового света промышленных зданий, для которых нормы разработаны наиболее полно.

**Пример 1.** В производственном помещении промышленного здания с незначительным пылевыделением необходимо запроектировать световые фонари. По условиям зрительной работы помещение отнесено к II разряду, для которого установлено среднее значение к. е. о.  $\bar{e} = 3,0\%$ .

Общие размеры помещения, входящего в состав здания, составляют  $A = 12,0 \cdot 3 = 36,0$  м;  $B = 72,0$  м;  $h = 7,2$  м (от уровня рабочей плоскости до внутренней поверхности перекрытия) и  $d = 0,8$  м.

Учитывая особенности производства, требующего хорошей равномерности освещения и минимальной инсоляции, т. е. попадания прямых солнечных лучей на рабочие места, выбираем световые фонари типа Буало (рис. 65). Фонари располагаем по одному в каждом пролете. При этом расстояние между осями фонарей равно  $L = 12,0$  м, что обеспечивает достаточно хорошую равномерность освещения, так как отношение  $L : h_1 = 12,0 : (7,2 + 0,8) = 1,5$  при допускаемом для фонарей типа Буало  $L : h_1 = 4,0$  (см. таблицу 14). Ширину фонарей принимаем равной  $l = 0,5 L = 0,5 \cdot 12,0 = 6,0$  м, так как практикой установлено, что для фонарей типа Буало наилучшее соотношение между шириной  $l$  и пролетом  $L$  равно 0,40 — 0,50. Длину фонарей принимаем

равной  $b = 60$  м. Расчетная схема световых фонарей показана на рис. 65

Световые фонари проектируются металлической конструкции с металлическими створными переплетами и с одиночным остеклением из про-

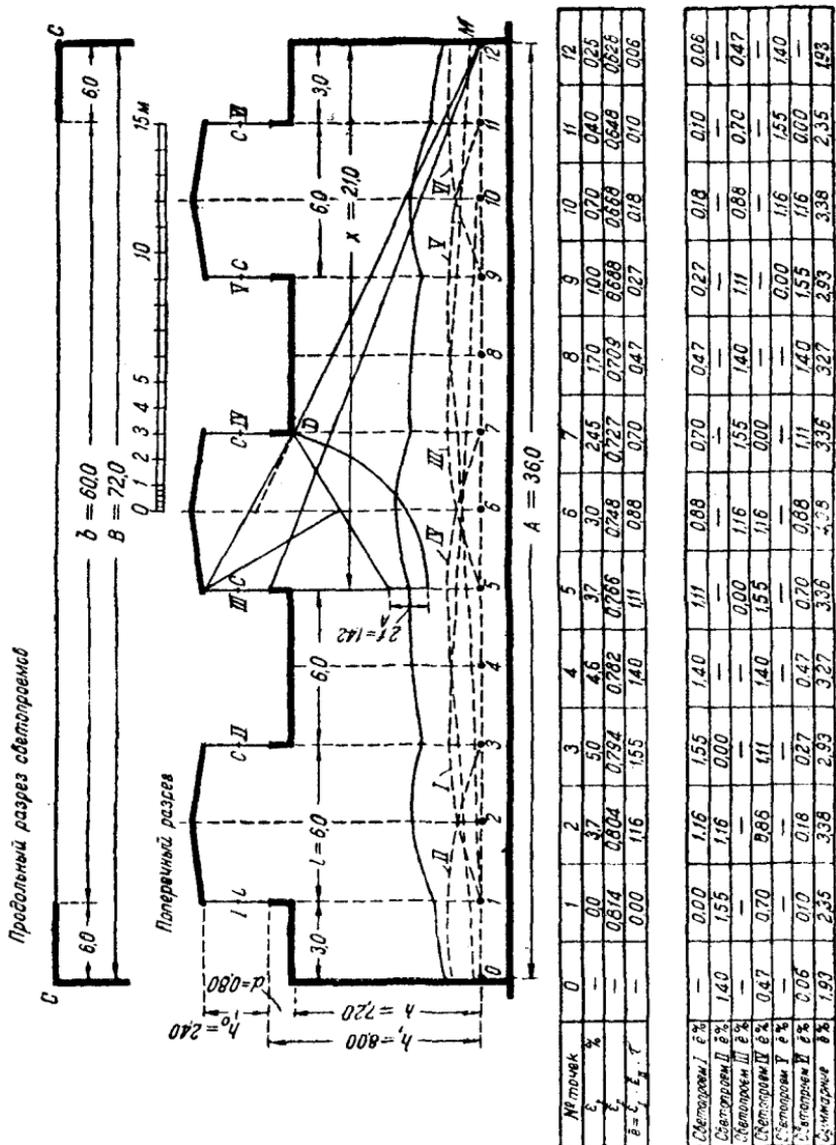


Рис. 65. Пример расчета световых фонарей типа Буало.

стых гладких стекол, для которых по табл. 18 принимаем величину коэффициента пропускания от остекления и переплета  $\tau_1 \cdot \tau_2 = 0,55$ . Коэффициент загрязнения для вертикального остекления при беспыльном производстве принимаем равным  $\tau_3 = 0,75$ . Затенения несущими кон-

струкциями учитываются коэффициентом  $\tau_4 = 0,95$ . В результате расчетный коэффициент пропускания  $\tau$  равен:

$$\tau = 0,55 \cdot 0,75 \cdot 0,95 = 0,39.$$

Расчет световых фонарей ведем по методу, изложенному в главе V.

Предварительно по табл. 10 или номограмме (рис. 53) находим, что при  $h : A = 7,2 : 36,0 = 0,2$  и  $B : A = 72,0 : 36,0 = 2,0$  среднее значение к. е. о. при остеклении всей площади потолка ( $S_0 = 36,0 \cdot 72,0 = 2592 \text{ м}^2$ ) равно  $\bar{e}_0 = 72,45\%$ . Подставляя в формулу (58) полученные значения входящих в нее величин, найдем необходимую площадь остекления горизонтальных теоретических светопроемов, т. е.

$$S = \frac{\bar{e}}{e_0 \cdot \tau} S_0 = \frac{3,0}{72,45 \cdot 0,39} 2592 = 275,2 \text{ м}^2.$$

Число горизонтальных теоретических светопроемов в данном случае равно  $n = 2 \cdot 3 = 6$ , так как каждый фонарь Буало состоит из двух вертикальных светопроемов. При длине световых фонарей  $b = 60 \text{ м}$  ширина теоретических горизонтальных светопроемов равна:

$$a = \frac{S}{b \cdot n} = \frac{275,2}{60,0 \cdot 6} = 0,76 \text{ м}.$$

Площадь светового профиля от одного теоретического светопроема, расположенного над серединой рабочей плоскости, по формуле (61) равна:

$$f_A = \sqrt{7,2^2 + \left(\frac{36,0 + 0,76}{2}\right)^2} - \sqrt{7,2^2 + \left(\frac{36,0 - 0,76}{2}\right)^2} = 0,71 \text{ м}.$$

При расположении одного светового фонаря Буало в середине помещения горизонтальное расстояние  $x$  от плоскости светопроема до крайней точки рабочей плоскости  $M$  равно:

$$x = \frac{A}{2} + \frac{l}{2} = 18,0 + 3,0 = 21,0 \text{ м}.$$

Эквивалентную высоту светопроемов фонарей Буало определяем аналитически по формуле (64) для 2-го случая, так как для крайней точки  $M$  рабочей плоскости нижняя грань бортика среднего фонаря  $D$  уже загораживает часть светового потока.

Предварительно определяем

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{h_1^2 + x^2} - \sqrt{h^2 + (x - l)^2} = \\ &= \sqrt{8,0^2 + 21,0^2} - \sqrt{7,2^2 + (21,0 - 6,0)^2} = 5,83 \text{ м}. \end{aligned}$$

Подставляя найденные величины в формулу (64), получим:

$$h_0 = \frac{d^2 + l^2 - (p - 2f_A)^2}{2(p - d - 2f_A)} = \frac{0,80^2 + 6,00^2 - (5,83 - 2 \cdot 0,71)^2}{2(5,83 - 0,80 - 2 \cdot 0,71)} = 2,38 \text{ м}.$$

Округляя, принимаем окончательно:

$$h_0 = 2,40 \text{ м}.$$

Легко убедиться, что графический расчет дает те же результаты (рис. 65).

Для выявления степени равномерности распределения светового потока по рабочей плоскости производим определение средних значений к. е. о. в 13 продольных линиях так, как это было описано в § 21 и в примере 2 § 22. При этом определение значений  $\epsilon_I$  производим по графику I, а значений  $\epsilon_{II}$  — по графику III и формуле (52).

В данном случае для построения суммарной кривой к. е. о. достаточно определить значения  $\bar{e}$  только от светопроема I в точках 0—12 (с учетом загораживающего влияния нижней грани D бортика фонаря). Данные расчета значений  $\bar{e}$  от светопроема I помещены в таблице, расположенной на поперечном разрезе помещения (рис. 65) под соответствующими точками рабочей плоскости. Сводная же таблица, помещенная ниже, составлена на том основании, что значения  $\bar{e}$  от светопроема I в точках 1, 2, 3, 4 и т. д. соответственно равны значениям  $\bar{e}$  от светопроема II в точках 3, 2, 1, 0, от светопроема III в точках 5, 6, 7, 8 и т. д. Вписывая в соответствующие графы таблицы значения освещенностей от каждого из шести светопроемов и складывая их в каждом столбце, получим искомые суммарные значения  $\bar{e}$  в каждой точке профиля.

По полученным данным по формуле (38) находим среднее значение к. е. о. в пределах всей рабочей плоскости

$$\bar{e} = \frac{\frac{1,93}{2} + 2,35 + 3,38 + 2,93 + 3,27 + 3,36 + \frac{4,08}{2}}{6} = 3,05\%$$

Таким образом при найденных размерах световых фонарей Буало в помещении создается среднее значение к. е. о.  $\bar{e} = 3,05\%$  вместо заданного  $\bar{e} = 3,0\%$ . Погрешность равна  $1,7\%$ .

Помимо достаточности освещенности, качество запроектированного освещения помещения определяется еще и степенью равномерности распределения светового потока по рабочей плоскости, характеризуемой отношением  $\max e$  к  $\min e$ , которое в пределах одного пролета не должно превышать 3,0. В данном случае равномерность распределения светового потока характеризуется следующими данными:

для крайних пролетов

$$\frac{\max \bar{e}}{\min \bar{e}} = \frac{3,38}{1,93} = 1,75 < 3,0,$$

для средних пролетов

$$\frac{\max \bar{e}}{\min \bar{e}} = \frac{4,08}{3,27} = 1,25 < 3,0.$$

Полученные данные свидетельствуют о хорошей равномерности распределения светового потока.

**Пример 2.** Необходимо запроектировать боковое двустороннее освещение производственных помещений, располагающихся в 1-м и 2-м этажах корпуса, изображенного на рис. 66. При этом по обе сто-

роны здания на расстоянии  $L = 20,0$  м располагаются противолежащие здания высотой от уровня земли  $H = 11,0$  м (условно простирающиеся на бесконечность в обе стороны).

Помещения предназначаются для работ средней точности, для которых при боковом свете следует обеспечить на уровне рабочей плоско-

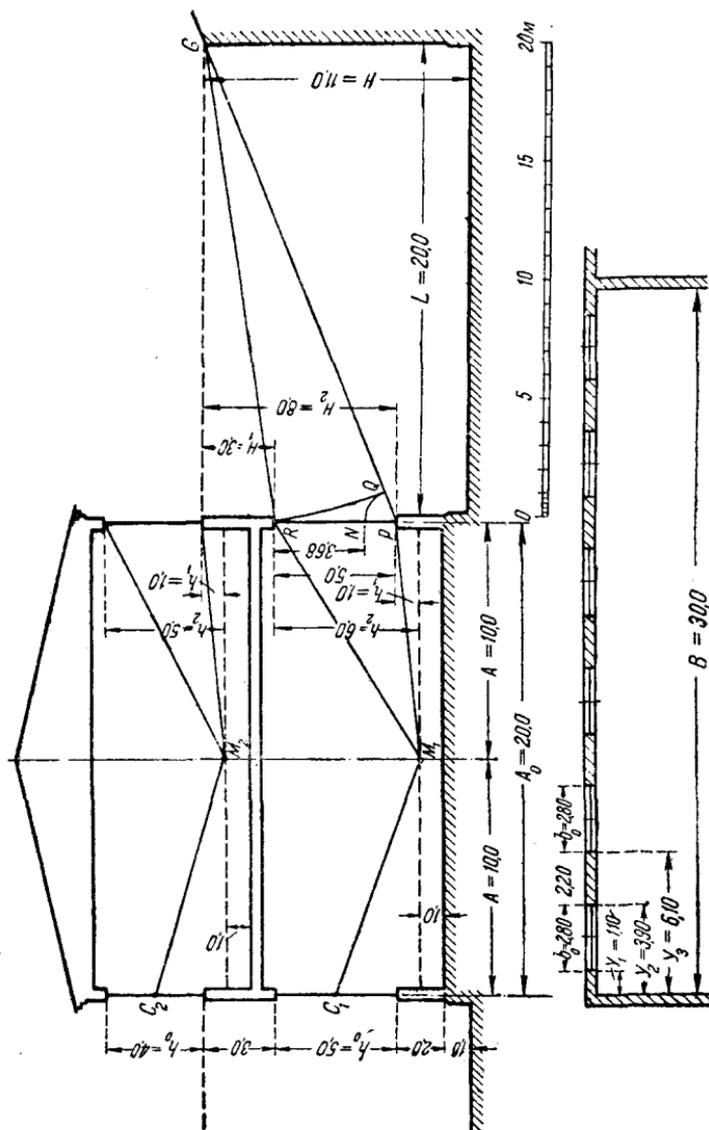


Рис. 66. Пример расчета окон двустороннего бокового света.

сти минимальное значение  $k$ . е. о.  $\min e = 1,00/0$ ; производство с незначительным пылевыделением.

Общие размеры помещений:

- 1-й этаж:  $A_0 = 20$  м;  $B = 30$  м;  $h_1 = 1$  м;  $h_2 = 6,0$  м;
- 2-й этаж:  $A_0 = 20$  м;  $B = 30$  м;  $h_1 = 1$  м.

Требуется определить в помещении 1-го этажа ширину окон с учетом затеняющего влияния противоположащих зданий, а во 2-м этаже — высоту окон, принимая их ширину по 1-му этажу.

Окна проектируются с двойным гладким остеклением по металлическим створным переплетам, для которых по табл. 18 коэффициент пропускания от остекления и переплета принимается равным  $\tau_1 \cdot \tau_2 = 0,45$ . Коэффициент загрязнения для вертикального остекления при беспыльном производстве принимаем равным  $\tau_3 = 0,75$ . Общий коэффициент пропускания  $\tau$  получается равным:

$$\tau = 0,45 \cdot 0,75 = 0,338.$$

Расчет светопроемов ведем по методу, изложенному в § 26 главы V.

1-й этаж. Помещение 1-го этажа, как видно из рис. 66, затеняется с обеих сторон противоположащими зданиями. В этом случае величина коэффициента затенения определяется по формуле (36) или графическим построением. При  $h_0 = 5,0$  м;  $H_1 = 3,0$  м;  $H_2 = 8,0$  м и  $L = 20,0$  м величина коэффициента затенения равна:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{h_0 - \sqrt{H_2^2 + L^2} + \sqrt{H_1^2 + L^2}}{h_0} = \\ &= \frac{5,0 - \sqrt{8,0^2 + 20,0^2} + \sqrt{3,0^2 + 20,0^2}}{5,0} = \frac{3,68}{5,0} = 0,736. \end{aligned}$$

Графически коэффициент затенения  $\eta$  находится следующим образом (рис. 66). Из карнизной точки  $G$  противоположащего здания, как из центра, проводим дугу окружности  $RQ$  до пересечения ее с прямой  $GP$  в точке  $Q$ . Из точки  $P$ , как из центра, проводим вторую дугу окружности  $QN$  до пересечения ее со следом плоскости окна в точке  $N$ . Измеряя отрезок  $NR$  в масштабе разреза, получим  $NR = 3,68$  м, откуда

$$\eta = \frac{NR}{PR} = \frac{3,68}{5,0} = 0,736.$$

Согласно изложенным в § 26 соображениям при требующейся минимальной освещенности  $\min e = 1,0^0/0$  расчетное среднее значение минимальных к. е. о. можно принять равным:

$$\min \bar{e} = 1,5 \cdot \min e = 1,5 \cdot 1,0 = 1,5^0/0.$$

Суммарная ширина светопроемов  $b$  определяется по формуле (72), причем входящая в нее величина  $\min \bar{e}_0$  находится предварительно по табл. 12 или номограмме (рис. 60).

При

$$A = \frac{A_0}{2} = \frac{20,0}{2} = 10,0 \text{ м}; \quad h_1 : A = 1,0 : 10,0 = 0,10.$$

$$h_2 : A = 6,0 : 10,0 = 0,60 \quad \text{и} \quad B : A = 30,0 : 10,0 = 3,0$$

будем иметь:

$$\min \bar{e}_0 = 5,61 - 0,20 = 5,41^0/0.$$

Подставляя найденные величины в формулу (72), получим суммарную ширину окон

$$b = \frac{\min \bar{e} \cdot B}{2 \cdot \min \bar{e}_0 \cdot \tau \cdot \eta} = \frac{1,5 \cdot 30,0}{2 \cdot 5,41 \cdot 0,338 \cdot 0,736} = 16,72 \text{ м.}$$

По архитектурным соображениям, исходя из желания иметь в 1-м этаже окна с пропорциями не более двух квадратов, устанавливаем число окон равным 6; при этом ширина каждого окна будет равна:

$$b_0 = \frac{16,72}{6} = 2,79 \approx 2,80 \text{ м.}$$

При полученной ширине окон  $b_0 = 2,80$  м пропорции их будут характеризоваться отношением  $b:h_0 = 1:1,8$ .

2-й этаж. По архитектурным соображениям ширину окон во 2-м этаже принимаем такую же, как и в 1-м этаже, т. е.  $b_0 = 2,80$  м, при которой суммарная ширина окон равна  $b = 2,80 \cdot 6 = 16,80$  м. При этом неизвестной величиной является высота окон, которая находится следующим образом.

Как видно из рис. 66, для помещений 2-го этажа затеняющее влияние противоположными зданиями отсутствует, вследствие чего величина коэффициента затенения равна  $\eta = 1,0$ .

Как изложено выше, в табл. 12 или номограмме (рис. 60) даются величины среднего значения минимальных к. е. о.  $\min \bar{e}_0$  от сплошных ленточных окон длиной  $B$ , нижняя грань которых располагается на уровне освещаемой плоскости. Вследствие этого при расположении нижней грани окон на некоторой высоте  $h_1$  над освещаемой плоскостью величину  $\min \bar{e}_0$  от ленточного окна высотой  $h_0 = h_2 - h_1$  приходится определять как разность между величинами  $\min \bar{e}_0$  для ленточных окон высотой  $h_2$  и  $h_1$ .

При решении обратной задачи нам, очевидно, необходимо найти ту высоту  $h_2$ , при которой величина  $\min \bar{e}_0$  равна сумме величин  $\min \bar{e}_0$ , создаваемых ленточным окном высотой  $h_0 = h_2 - h_1$  и окном высотой  $h_1$ .

Величина  $\min \bar{e}_0$ , создаваемая ленточным окном высотой  $h_0 = h_2 - h_1$ , по формуле (72) равна:

$$\min \bar{e}_0 = \frac{\min \bar{e} \cdot B}{2 \cdot b \cdot \tau \cdot \eta} = \frac{1,50 \cdot 30,0}{2 \cdot 16,80 \cdot 0,338 \cdot 1,00} = 3,96\%.$$

Величина  $\min \bar{e}_0$ , создаваемая ленточным окном высотой  $h_1$  (при  $h_1:A = 0,10$  и  $B:A = 3,0$ ), равна:

$$\min \bar{e}_0 = 0,20\%.$$

Суммарное значение  $\min \bar{e}_0$ , которое должно быть достигнуто при высоте ленточного окна  $h_2$ , равно:

$$\min \bar{e}_0 = 3,96 + 0,20 = 4,16\%.$$

Из табл. 12 видно, что в столбце для  $B:A=3,0$  значение  $\min \bar{e}_0 = 4,16\%$  почти точно получается при  $h_2:A=0,50$ , откуда

$$h_2 = 0,50 \cdot A = 0,50 \cdot 10,0 = 5,0 \text{ м.}$$

Искомая же высота окна

$$h_0 = h_2 - h_1 = 5,0 - 1,0 = 4,0 \text{ м.}$$

Для выявления правильности полученных результатов производим поверочный расчет, как это было описано в примере 3 § 22.

Определение среднего значения минимальных к. е. о. ведем для продольной линии, расположенной в середине помещения, так как при двустороннем освещении и одинаковых светопроемах в обеих боковых стенах минимальные освещенности располагаются по линии, равноудаленной от окон. По формуле (55)

$$\min \bar{e} = \varepsilon_1 \cdot \bar{\varepsilon}_{II} \cdot \tau \cdot \eta.$$

Помещение 1-го этажа. Величина коэффициента  $\varepsilon_1$ , определяемого по графику I, равна  $\varepsilon_1 = 6,88\%$ . Величина коэффициента  $\bar{\varepsilon}_{II}$  находится по графику III и формуле (52). Располагаем продольную ось светопроемов параллельно основанию графика на расстоянии  $M_1C_1 = 10,60$  м от него и совмещаем крайнюю точку оси помещения (у торцевой стены) с полюсом графика. Отсчитывая число лучей, умещающихся между осью ординат графика и каждой из вертикальных граней окон и умножая их на 0,01, получим значения коэффициентов:  $k_1 = 0,032$ ;  $k_2 = 0,112$ ;  $k_3 = 0,167$ ;  $k_4 = 0,222$ ;  $k_5 = 0,258$ ;  $k_6 = 0,293$ ;  $k_7 = 0,314$ ;  $k_8 = 0,337$ ;  $k_9 = 0,351$ ;  $k_{10} = 0,367$ ;  $k_{11} = 0,377$  и  $k_{12} = 0,388$ . При этом горизонтальные расстояния от торцевой стены до соответствующих вертикальных граней окон равны:  $y_1 = 1,10$  м;  $y_2 = 3,90$  м;  $y_3 = 6,10$  м;  $y_4 = 8,90$  м;  $y_5 = 11,10$  м;  $y_6 = 13,90$  м;  $y_7 = 16,10$  м;  $y_8 = 18,90$  м;  $y_9 = 21,10$  м;  $y_{10} = 23,90$  м;  $y_{11} = 26,10$  м и  $y_{12} = 28,90$  м.

Далее по формуле (52) находим:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{II} = \frac{2}{30,0} (0,112 \cdot 3,90 - 0,032 \cdot 1,10 + 0,222 \cdot 8,90 - 0,167 \cdot 6,10 + \\ + 0,293 \cdot 13,90 - 0,258 \cdot 11,10 + 0,337 \cdot 18,90 - 0,314 \cdot 16,10 + \\ + 0,367 \cdot 23,90 - 0,351 \cdot 21,10 + 0,388 \cdot 28,90 - 0,377 \cdot 26,10) = 0,441. \end{aligned}$$

Подставляя найденные значения коэффициентов в формулу (55), получим среднее значение минимальных к. е. о. от окон, расположенных с одной стороны:

$$\min \bar{e} = 6,88 \cdot 0,441 \cdot 0,338 \cdot 0,736 = 0,755\%.$$

Суммарное же среднее значение минимальных к. е. о. от окон с обеих сторон равно:

$$\min e = 0,755 \cdot 2 = 1,51\%.$$

По условиям же расчета необходимо обеспечить  $\min e = 1,50\%$ . Погрешность, таким образом, составляет менее  $1\%$ .

Поверочный расчет показывает, что минимальное значение к. е. о., располагающееся по оси помещения у торцевой стены, равно  $\min e = 0,958\%$  вместо заданного  $\min e = 1,00\%$ .

Помещение 2-го этажа. Поверочный расчет показывает, что в этом случае  $\varepsilon_I = 5,03\%$  и  $\bar{\varepsilon}_{II} = 0,442$ , откуда

$$\min \bar{e} = 5,03 \cdot 0,442 \cdot 0,338 = 0,752\%.$$

От окон с обеих сторон в середине помещения создается суммарное среднее значение минимальных к. е. о., равное

$$\min \bar{e} = 0,752 \cdot 2 = 1,504\% > 1,50\%.$$

Погрешность составляет всего около  $0,3\%$ .

Минимальная освещенность рабочей плоскости по оси помещения у торцевой стены равна  $\min e = 0,960\%$  вместо заданного  $\min e = 1,0\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- В. В. Мешков и З. Б. Смелянский, Гигиена освещения, Госмедиздат, 1934.
- Л. И. Сиротинский и Б. Ф. Федоров, Основы техники электрического освещения, Энергоиздат, 1934.
- Н. Н. Калигин, Основы физики атмосферы в применении к медицине, Биомедгиз, 1935.
- П. Н. Тверской, Курс геофизики, ОНТИ, 1939.
- М. Лекиш, Свет и работа, ОНТИ, 1934.
- А. А. Гершун, Расчет естественного освещения, Труды Г. О. И., том V, вып. 44, 1929.
- Г. Фрюлинг, Освещение помещений естественным светом, Госстройиздат, 1933.
- В. А. Зеленков, Естественное освещение, Изд. Уч. комбината Гражд. возд. флота, Л., 1934.
- Л. А. Серк, Промышленная архитектура, Госстройиздат, т. I, гл. XIII, 1935.
- К. Е. Бабури и Н. М. Гусев, Нормализация расчета и проектирования естественного освещения, ОНТИ, 1938.
- Н. М. Гусев, Свет в архитектуре, Госстройиздат, 1938.
- С. В. Беляев, Вопросы естественного освещения при проектировании помещений, Изд. В. А. А., 1938.
- Труды II Всесоюзной светотехнической конференции, вып. IV, 1931.
- Труды I Всесоюзной конференции по естественному освещению, вып. I, II и III, ОНТИ, 1932 и 1933.
-

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Основные обозначения . . . . .	4
Введение . . . . .	5
<b>Глава I. Основные светотехнические понятия и определения . . .</b>	<b>7</b>
§ 1. Световая энергия и световой поток . . . . .	7
§ 2. Сила света . . . . .	9
§ 3. Освещенность . . . . .	10
§ 4. Яркость. Закон Ламберта . . . . .	12
§ 5. Плотность свечения . . . . .	13
§ 6. Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения света . . . . .	14
<b>Глава II. Источники естественного света . . . . .</b>	<b>16</b>
§ 7. Солнечное излучение . . . . .	17
§ 8. Небесное излучение . . . . .	19
§ 9. Коэффициент естественной освещенности . . . . .	24
§ 10. Световой климат . . . . .	25
§ 11. Классификация светопроемов и световых фонарей . . . .	27
<b>Глава III. Методы расчета освещенности . . . . .</b>	<b>30</b>
§ 12. Освещенность от точечных источников света . . . . .	30
§ 13. Освещенность от светящейся поверхности . . . . .	33
§ 14. Точные методы определения коэффициента естественной освещенности . . . . .	36
§ 15. Приближенные методы расчета коэффициента естественной освещенности . . . . .	44
§ 16. Затенение противоположащими зданиями . . . . .	55
§ 17. Примеры расчета . . . . .	58
<b>Глава IV. Метод определения среднего значения коэффициента есте-         ственной освещенности . . . . .</b>	<b>63</b>
§ 18. Исходные данные . . . . .	63
§ 19. Определение величины первого множителя $\bar{e}_I$ от свето- проемов фонарей различных систем . . . . .	64
§ 20. Определение величины второго множителя $\bar{e}_{II}$ . . . . .	73
§ 21. Определение среднего значения к. е. о. для продоль- ной линии . . . . .	80
§ 22. Примеры расчета . . . . .	80
<b>Глава V. Расчет световых фонарей и светопроемов бокового света</b>	<b>89</b>
§ 23. Основные предпосылки . . . . .	89
§ 24. Определение размеров теоретических горизонтальных светопроемов . . . . .	90
§ 25. Определение эквивалентных размеров световых фона- рей различных систем . . . . .	98

	Стр.
§ 26. Определение размеров светопроемов бокового света по заданному среднему значению минимальных к. е. о.	105
§ 27. Примеры расчета . . . . .	112
<i>Глава VI. Нормы и техника расчета естественного освещения . . . .</i>	<i>117</i>
§ 28. Методы нормирования естественного освещения помещений . . . . .	118
§ 29. Основные нормативные данные на проектирование естественного освещения промышленных зданий . . . .	119
§ 30. Методика проектирования и техника расчета естественного освещения помещений . . . . .	126
§ 31. Приемы расчета естественного освещения при проектировании . . . . .	129
Литература . . . . .	138
Приложения 1, 2 и 3	

Отв. редактор *А. М. Петерсон*

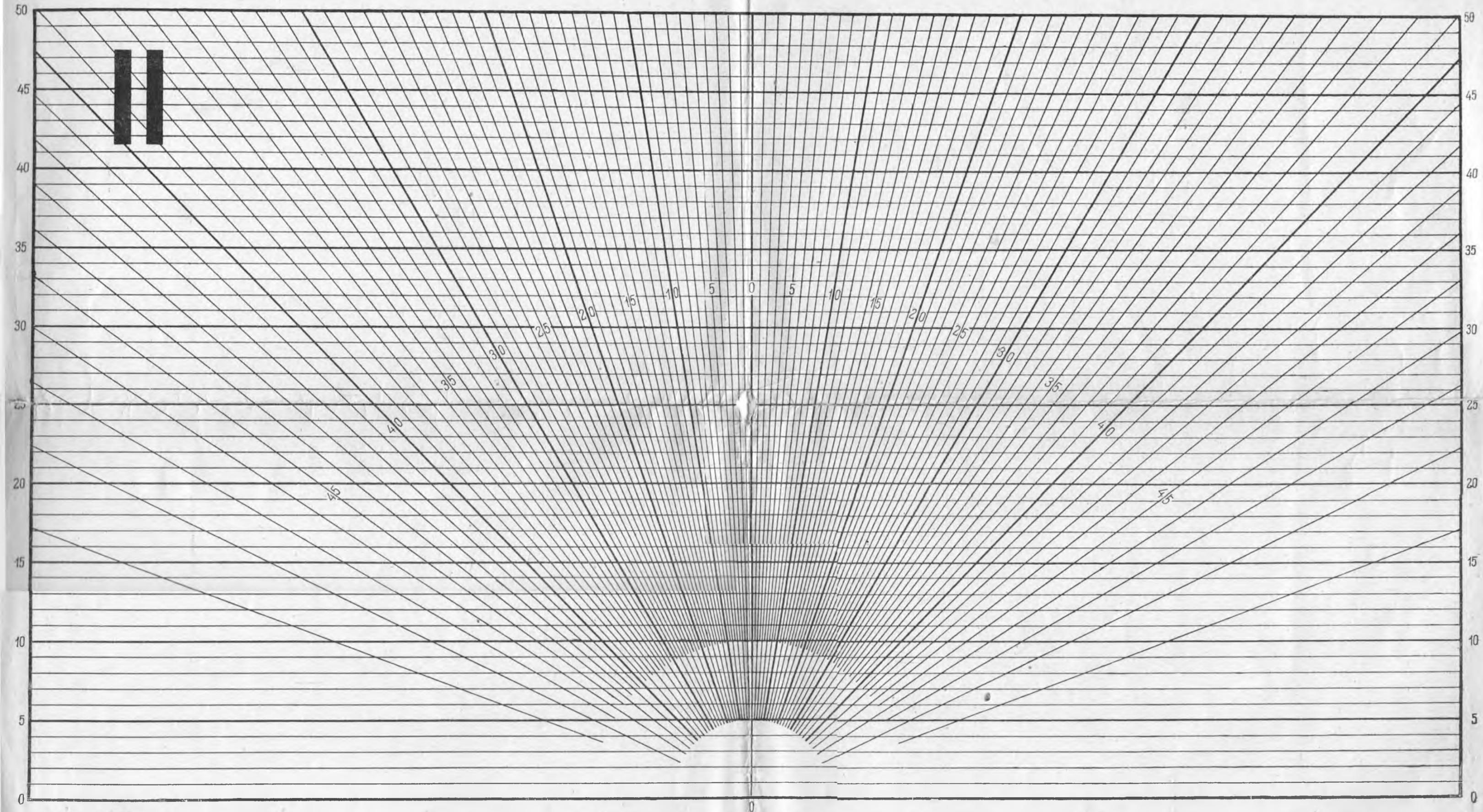
---

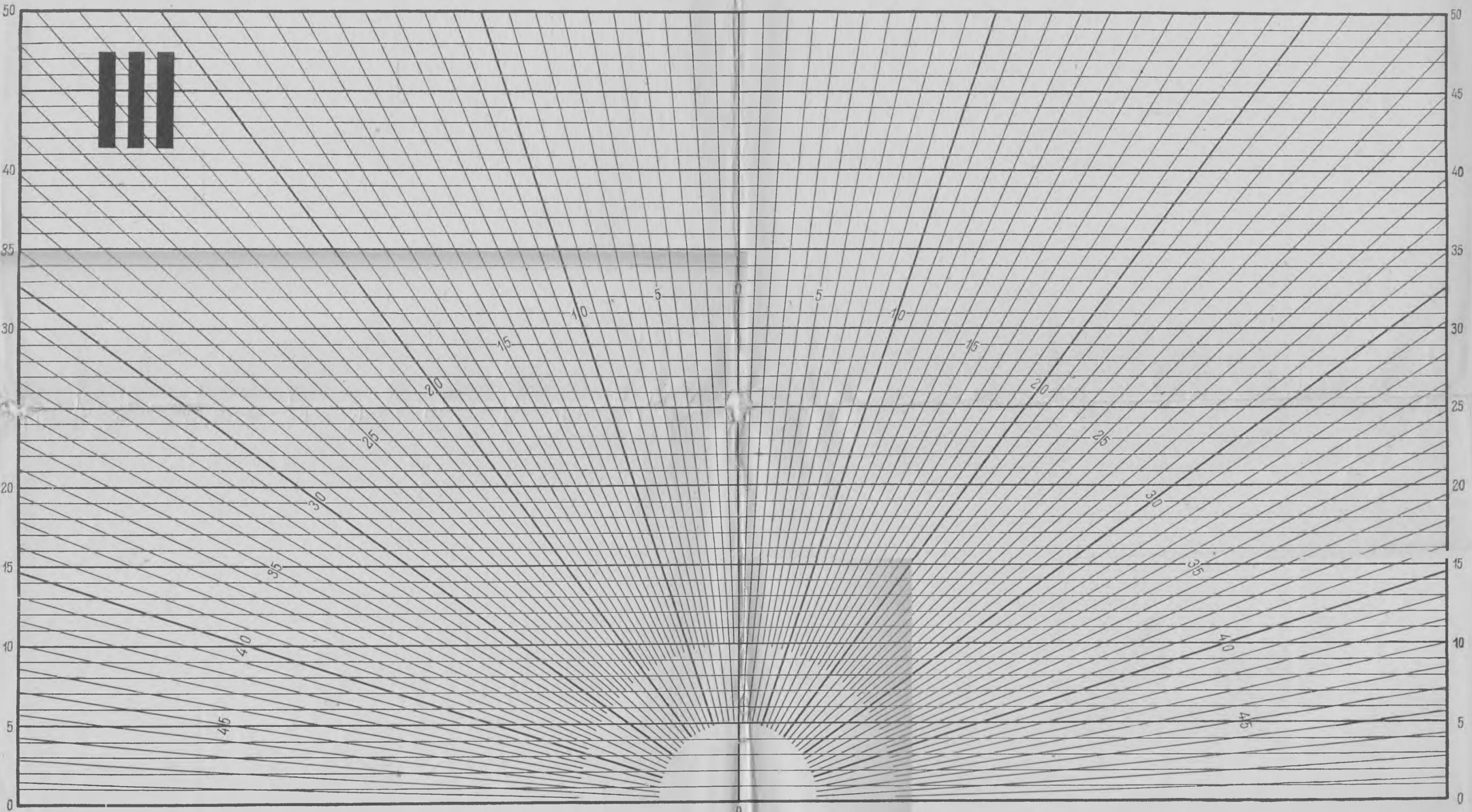
Тираж 4000.	Подписано к печати 24/XII 1940 г.	М 39063
Автор. лист. 11,41		Печ. лист. 8 <sup>3</sup> / <sub>4</sub> + 3 вкл.
Колич. тип. знаков в печ. листе 53856.		Заказ № 4817
Цена 4 руб. 75 коп., пер. 80 коп.		

---

4-я типография ОГИЗ'а РСФСР, треста «Полиграфнига» имени Евгении Соколовой.  
Ленинград, проспект Красных Командиров, 29.







Цена б р 55 к.