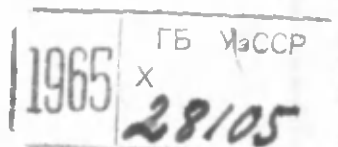


Д-р техн. наук проф.
Н. М. ГУСЕВ,
канд. техн. наук доц.
П. П. КЛИМОВ

Строительная физика

Допущено
Министерством высшего и среднего специального
образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
архитектурных вузов и факультетов

VII
12411



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ
Москва — 1965

Рецензенты:

Кафедра архитектуры

**Московского инженерно-строительного института
имени В. В. Куйбышева;**

**Кандидаты техн. наук В. Н. НИКОЛЬСКИЙ
и С. А. КЛЮЕВ**

Научный редактор —

канд. техн. наук Б. Ф. ВАСИЛЬЕВ

Книга составлена на основе учебной программы Архитектурного института, утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования СССР, и состоит из трех разделов: «Светотехника», «Акустика» и «Строительная теплотехника».

В разделе «Светотехника» излагаются основные данные по расчету, нормированию и проектированию осветительных установок естественного и искусственного освещения. Приведены примеры расчета их, а также данные о физико-технических свойствах светопрозрачных ограждений.

В разделе «Акустика» даны основные сведения о методах акустического проектирования залов различного назначения, о звукопоглощающих материалах и конструкциях, указаны способы борьбы с шумами и необходимые данные для решения задач звукоизоляции зданий. Приведены основные данные для акустического проектирования открытых театров.

В разделе «Строительная теплотехника» излагаются основные теплотехнические характеристики строительных материалов и ограждающих конструкций зданий.

Приводятся примеры теплотехнического расчета ограждающих конструкций для зимних и летних условий эксплуатации здания, а также расчет влажностного состояния ограждающих конструкций к концу холодного периода года.

Книга объединяет основные разделы строительной физики, представляет первый опыт создания учебного пособия по данной дисциплине и предназначена для студентов архитектурных вузов и факультетов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга написана как учебное руководство по курсу строительной физики, читаемому студентам архитектурных и инженерно-строительных институтов по специальности «Архитектура». Содержание соответствует принятой в настоящее время программе этой дисциплины в Московском архитектурном институте.

В соответствии с учебной программой дисциплина состоит из трех частей: светотехники, акустики и теплотехники. Изложение материала в них строго ограничено с учетом архитектурной специальности и количества часов учебной программы.

Основное внимание уделяется принципам нормирования, практическим методам расчета и проектирования освещения и акустики зданий и теплотехники ограждающих конструкций, а также оценке и характеристикам современных технических средств; это позволяет студентам находить конкретные решения при разработке курсовых и дипломных архитектурных проектов.

С этой же целью в книге приводятся иллюстративные примеры из отечественной и зарубежной практики.

Учебное руководство по строительной физике, рассчитанное на студентов архитектурной специальности, по мнению авторов, должно давать в основном приближенные, практически удобные методы расчета, соответствующие уровню математической подготовки студентов.

Архитектурный профиль книги нашел свое выражение прежде всего в стремлении авторов показать единство функциональной и эстетической сторон вопроса; способствует этому и характер подобранных иллюстраций.

Разделы «Архитектурная светотехника» и «Архитектурная акустика» написаны проф. Н. М. Гусевым; раздел «Строительная теплотехника» — доц. П. П. Климовым. В компоновке иллюстративного материала принимал участие ст. преподаватель кафедры строительной физики Московского архитектурного института В. Г. Макаревич.

Учитывая первый опыт создания комплексного учебного пособия по дисциплине «Строительная физика», авторы просят замечания по книге направлять в адрес издательства: Москва, К-12, Третьяковский пр., д. 1.



АРХИТЕКТУРНАЯ СВЕТОТЕХНИКА

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ

1. Лучистая энергия

Из курса физики известно, что всякое тело, обладающее температурой выше абсолютного нуля, излучает в окружающее пространство энергию, которую называют лучистой энергией.

Солнце является мощным источником лучистой энергии, переносимой его лучами на поверхность земли. О количестве этой энергии дает представление следующая цифра: на каждый квадратный километр земной поверхности в средней широте в полдень солнце посылает около 700 000 кВт.

Лучистую энергию измеряют в эргах (э) или джоулях (дж). В практике нас интересует не энергия излучения W , а мощность лучистой энергии F , т. е. энергия, излучаемая в единицу времени:

$$F = \frac{dW}{dt}, \quad (1.1)$$

где dt — промежуток времени, в течение которого излучение является равномерным.

Мощность лучистой энергии называют **лучистым потоком**.

Единица лучистого потока — ватт (вт).

Строительной светотехникой называется наука об использовании лучистой энергии оптической области спектра в строительстве и архитектуре.

Оптическое излучение — излучение, длины волн которого расположены в диапазоне от 10^{-2} нм (нанометров) до 10 м (метров)

* Для измерения длин волн оптической части спектра в качестве единицы измерения в настоящее время применяется «нанометр» (нм), равный 1 мкм (миллимикрон): $1 \text{ нм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$.

электромагнитного спектра, включающего области ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучений (л. I, рис. I). Каждый из этих видов излучений определяется:

ультрафиолетовое — длинами волн в диапазоне от 10 до 380 нм; это излучение оказывает сильное действие на кожу человека, вызывая ее загар, на фотографические эмульсии, вызывая их почернение, и т. д.;

видимое — длинами волн в диапазоне от 380 до 760 нм; излучение воспринимается нашим глазом как свет;

инфракрасное — длинами волн в диапазоне от 0,77 до 340 мкм; это излучение обнаруживается по тепловому действию.

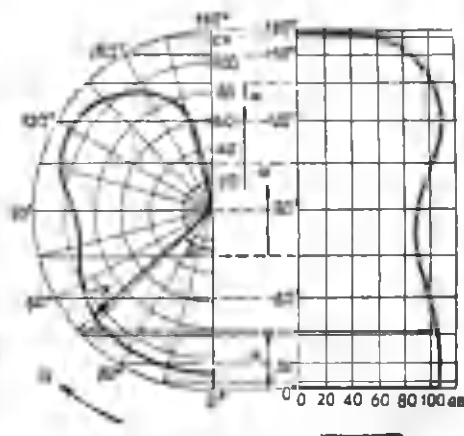
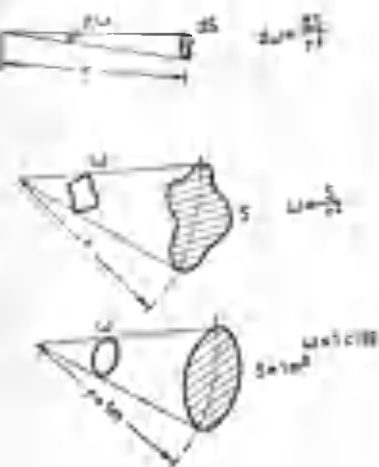
2. Видимое излучение

Излучения различаются между собой мощностью и спектральным составом. С точки зрения спектрального состава простейшим является однородное излучение с какой-либо длиной волны (λ). Мощность такого излучения — F_λ .

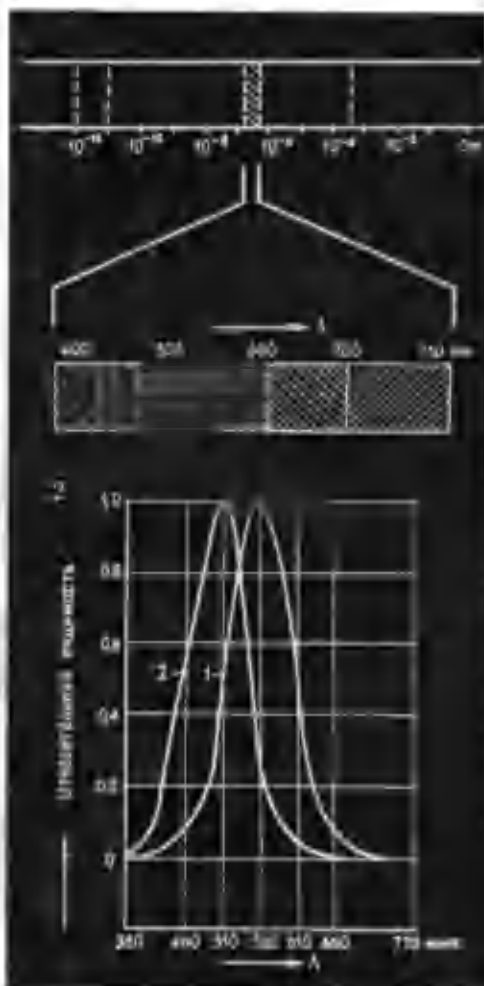
Видимые излучения примерно одинаковой мощности при совокупном действии воспринимаются глазом как белый свет. Дневной свет — пример сплошного и равномерного излучения на всем видимом участке спектра.

Однородные излучения, действуя на глаз, вызывают ощущение того или иного цвета. Приближенные границы цветных полос видимого излучения приводятся в табл. I.1.

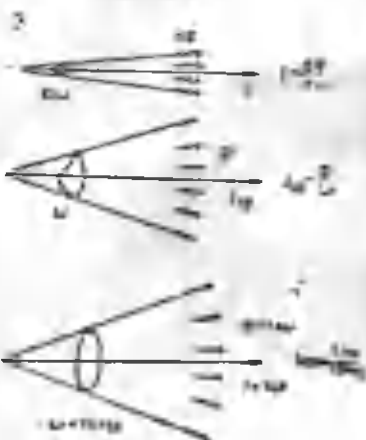
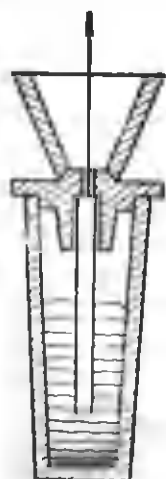
Опытами установлено, что однородные лучистые потоки одинаковой мощности, отличающиеся между собой длиной волны, вызывают в глазу неодинаковые ощущения. Это сви-



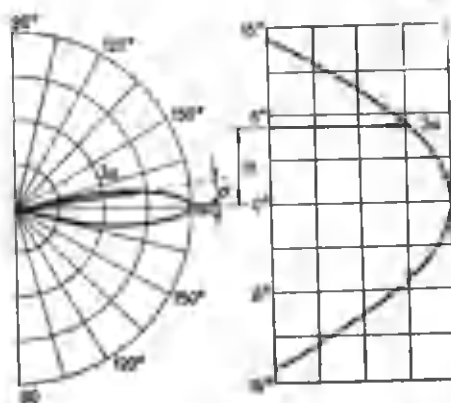
2



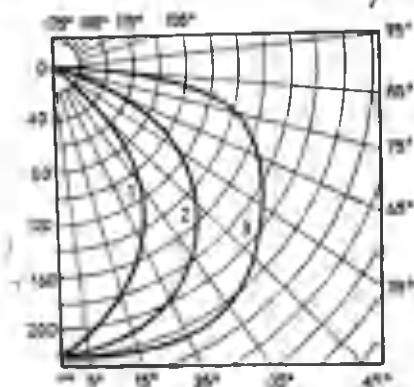
3



6



7



Лист I СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ

- Рис. 1. Спектр оптической области излучения
Рис. 2. Кривые относительной видности для дневного 1 и сумеречного 2 освещения
Рис. 3. Схемы к определению силы света
Рис. 4. Схемы к определению телесного угла
Рис. 5. Схема прибора для определения эталона силы света
Рис. 6. Продольная кривая распределения силы света для симметричного осветительного прибора (дается в полярной системе координат)
Рис. 7. Семейство 1—3 продольных кривых силы света несимметричного осветительного прибора для разных плоскостей (дается в полярной системе координат)
Рис. 8. Продольная кривая распределения силы света прожектора (дается в прямоугольной системе координат)

Таблица 1.1

Цветовые полосы спектра видимого излучения

Цвет	Длина волн в нм	Цвет	Длина волн в нм
Фиолетовый	450—380	Желтый	575—585
Синий	480—450	Оранжевый	585—620
Зеленый	510—550	Красный	620—760

детельствует о том, что чувствительность глаза к излучениям различных длин волн неодинакова.

Средний человеческий глаз, т. е. глаз, спектральная чувствительность которого при заданных условиях имеет установленные значения¹, наиболее чувствителен к желто-зеленым излучениям с длиной волны $\lambda = 555$ нм.

При одинаковой величине лучистого потока синие и красные излучения, длины волн которых близки к границам спектра видимого излучения, вызывают относительно малое световое ощущение.

На л. I, рис. 2 приводятся кривые относительной видности для дневного 1 и сумеречного 2 освещения. Сравнение кривых показывает, что средний человеческий глаз при сумеречном освещении наиболее чувствителен к зелено-голубым излучениям с длиной волны $\lambda = 510$ нм.

Чтобы создать одинаковое зрительное ощущение (видность), необходимо мощность монохроматического² синего излучения увеличить в 16,6 раза, а красного излучения — в 9,35 раза по сравнению с желто-зеленым.

Если принять видность желто-зеленого излучения за единицу, то относительная вид-

¹ В СССР значения спектральной чувствительности среднего человеческого глаза при дневном зрении установлены ГОСТ 8485.

² Монохроматическое излучение — излучение, характеризующееся одной частотой или одной длиной волны.

ность других излучений может быть представлена в виде кривой относительной видности однородных излучений, представленный на л. I, рис. 2.

Кривая относительной видности, принятая международным соглашением, характеризует распределение по спектру чувствительности среднего человеческого глаза и равна отношению спектральной чувствительности среднего человеческого глаза для данного монохроматического излучения к наибольшей спектральной чувствительности глаза¹.

3. Световой поток

Понятие относительной видности однородных излучений позволяет оценивать световое ощущение, вызываемое каким-либо монохроматическим лучистым потоком F_λ , а именно — ощущение будет пропорционально произведению лучистого потока на соответствующее значение относительной видности:

$$\Phi_\lambda = c F_\lambda k_\lambda, \quad (1.2)$$

где Φ_λ — световой поток монохроматического излучения;

c — постоянный множитель; зависит от выбранных единиц светового и лучистого потоков;

k_λ — относительная видность монохроматического излучения с длиной волны λ .

Световой поток представляет количественную характеристику лучистого потока, выражающую его способность производить световое ощущение, оцениваемое по относительной видности². За единицу светового потока принят люмен (лм). Люмен — световой поток, излучаемый в единичном пространственном угле (стерадиане) равномерным источником; имеет силу света в одну свечу.

Экспериментальным путем установлено, что лучистый поток монохроматического излучения с длиной волны $\lambda = 555$ нм, равный 1 вт, эквивалентен световому потоку, равному 683 лм. Пользуясь этим эквивалентом, связь между световым и лучистым потоками моно-

¹ В СССР значения относительной видности стандартизованы (ОСТ/ВКС 7637).

² По данным Международной комиссии по освещению (МКО) относительная видность монохроматического излучения длины волны λ представляет отношение лучистого потока с длиной волны λ_m к лучистому потоку с длиной волны λ , производящих одинаковые зрительные ощущения в специфированных фотометрических условиях; причем λ должно быть выбрано таким образом, чтобы максимум этого отношения был равен единице.

хроматического излучения можно выразить в следующем виде:

$$\Phi_{\lambda} = 683 k_{\lambda} F_{\lambda}, \quad (1.3)$$

где Φ_{λ} — световой поток в лм;

F_{λ} — лучистый поток в вт.

При нескольких монохроматических излучениях суммарный световой поток определяется как сумма монохроматических световых потоков, т. е.

$$\Phi = 683 [k_{\lambda_1} F_{\lambda_1} + k_{\lambda_2} F_{\lambda_2} + \dots + k_{\lambda_n} F_{\lambda_n}] = 683 \sum k_{\lambda} F_{\lambda}. \quad (1.4)$$

При сплошном спектре излучения (например, дневной свет) распределение светового потока характеризуется спектральной интенсивностью светового потока (φ), которая равна отношению элементарного светового потока в бесконечно малом интервале волн λ к этому интервалу, т. е.

$$\varphi_{\lambda} = \frac{d\Phi_{\lambda}}{d\lambda}. \quad (1.5)$$

Спектральная интенсивность светового потока измеряется в люменах на нанометр.

Световой поток со сплошным спектром излучения равен

$$\Phi = 683 \Delta\lambda \sum \varphi_{\lambda} \bar{k}_{\lambda}, \quad (1.6)$$

где $\varphi_{\lambda} = \lim_{\Delta\lambda} \frac{dF_{\lambda}}{\Delta\lambda}$ — спектральная интенсивность лучистого потока;

$\bar{\varphi}_{\lambda}$ — среднее значение спектральной интенсивности на узком участке спектра со средней длиной волны λ ;

$\bar{k}_{\lambda}$ — среднее значение относительной видности излучения на узком участке спектра со средней длиной волны λ ;

$\Delta\lambda$ — узкие участки спектра, одинаковые по своей длине спектра, в пределах которых изменение φ_{λ} невелико.

При решении некоторых практических задач (например, при оценке продолжительности использования естественного света для освещения помещений и др.) необходимо учитывать не только световой поток, но и время его действия, т. е. световую энергию W_c , которая представляет произведение светового потока на время его действия и определяется по формуле

$$W_c = \Phi t. \quad (1.7)$$

Световая энергия измеряется в люмен-секундах (лм · сек).

4. Сила света

Световой поток определяет только общую световую мощность источника света. При излучении источником одинакового светового потока по всем направлениям для характеристики этого излучения было бы достаточно знать величину светового потока. Однако применяемые на практике источники света распределяют световой поток в пространстве неравномерно. Поэтому для характеристики светового действия источника света в каком-либо определенном направлении пользуются понятием силы света.

Силой света I источника в данном направлении называют пространственную плотность светового потока, равную отношению светового потока $d\Phi$ к величине телесного угла $d\omega$, в котором равномерно распределяется излучение (л. I, рис. 3).

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad (1.8)$$

Если световой поток Φ равномерно распределяется в телесном угле ω (л. I, рис. 3), то сила света в направлении оси телесного угла равна

$$I = \frac{\Phi}{\omega}. \quad (1.9)$$

Телесным углом называют часть пространства, ограниченную конической поверхностью (л. I, рис. 4). Телесный угол измеряется отношением площади S , которую он вырезает на поверхности сферы, описанной из его вершины, к квадрату радиуса этой сферы, т. е.:

$$\omega = \frac{S}{r^2}. \quad (1.10)$$

Единицей телесного угла служит стерадиан, угол, который вырезает на поверхности сферы участок, равный квадрату радиуса.

За единицу силы света принята свеча (св), равная силе света точечного источника¹ в тех направлениях, в которых он испускает световой поток в 1 лм, равномерно распределенный внутри телесного угла в один стерадиан (1 стер).

В настоящее время величина свечи опреде-

¹ Точечный источник — источник, размеры которого малы по сравнению с расстоянием, на котором определяется световое действие источника (например, солнце).

ляется через яркость абсолютно черного тела¹; при температуре затвердевания платины, равной 60 свечам с 1 см².

Согласно ГОСТ 7932—56 свеча равна силе света в перпендикулярном направлении плоской поверхности абсолютно черного тела площадью 1,6667 мм² при температуре $T=2046^{\circ}\text{K}$. Схема установки для определения эталона силы света приводится в л. I, рис. 5.

Для наглядного представления о распределении в различных направлениях в пространстве силы света электрических ламп и осветительных приборов пользуются кривыми распределения силы света². Эти кривые строятся обычно в полярных координатах следующим образом: сила света в различных направлениях откладывается в принятом масштабе на радиусах-векторах, проведенных из центра. Если концы векторов, соответствующие значениям силы света в различных направлениях, соединить, то получим замкнутую поверхность; часть пространства, ограниченная этой поверхностью, называется фотометрическим телом силы света.

Для наиболее распространенных источников света и осветительных приборов фотометрическое тело симметрично относительно некоторой оси, т. е. представляет тело вращения. Эти источники света и осветительные приборы называются симметричными. Кривые силы света в плоскостях, проходящих через ось симметрии, называют продольными кривыми силы света (л. I, рис. 6).

Для симметричных источников света и осветительных приборов строят половину продольной кривой оси света (от 0 до 180°).

При отсутствии у фотометрического тела оси симметрии продольные кривые силы света неодинаковы; это наблюдается, например, у несимметричных осветительных приборов (кососвета и т. п.). Распределение силы света в этих осветительных приборах характеризуется семейством продольных кривых силы света (л. I, рис. 7).

Характерной кривой силы света обладают прожекторы, в которых световой поток, излучаемый лампой, концентрируется в малом телесном угле. Кривую силы света прожектора удобнее изображать не в полярной, а в прямоугольной системе координат (л. I, рис. 8); при этом за ось ординат принимается направление оптической оси прожектора, а по оси

абсцисс откладывается угол между направлением силы света и оптической осью прожектора.

5. Освещенность

Для оценки освещения обычно пользуются поверхностной плотностью светового потока излучения, падающего на поверхность, равной отношению светового потока Φ к величине освещаемой поверхности S , по которой он равномерно распределен (л. II, рис. 1).

При неравномерном распределении светового потока по площади

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (I.11)$$

а при равномерном распределении светового потока Φ на площади S

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (I.12)$$

Из уравнений (I.11) и (I.12) видно, что освещенность не зависит от свойств освещаемой поверхности (фактуры, цвета и т. п.).

Единица освещенности — люкс (лк) — поверхностная плотность светового потока в 1 лм, равномерно распределенного на площади в 1 м² (л. II, рис. 1). О величине освещенности, равной 1 лк, можно судить по примерам, приведенным в табл. I.2.

Таблица I.2

Освещенность некоторых поверхностей

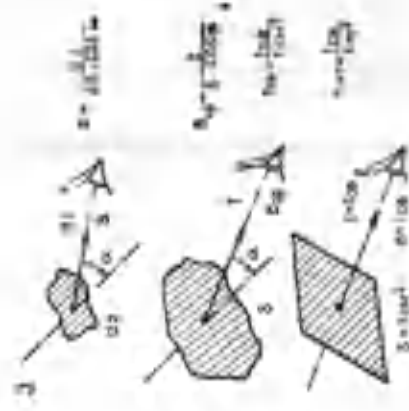
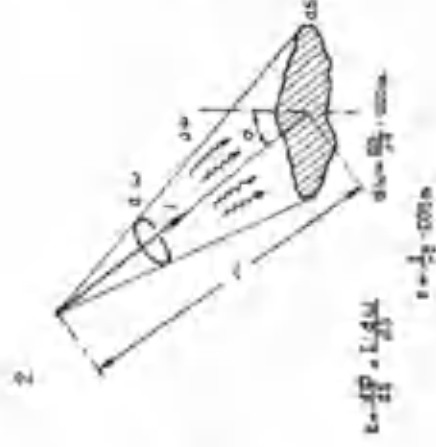
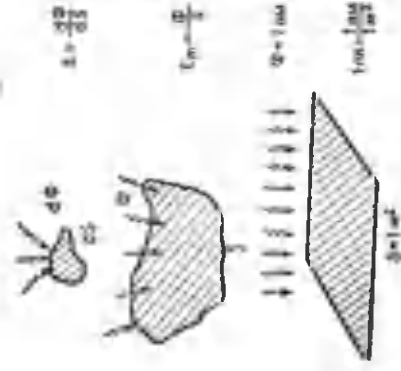
Поверхности	Освещенность в лк
Поверхность земли:	
при высоком стоянии солнца	100 000—120 000
при диффузном (рассеянном) освещении от неба (в пасмурный день)	15 000—20 000
при лунном освещении (в полнолуние)	0,2
при звездном освещении (в безлунную ночь)	0,001—0,002
Минимальная освещенность на магистралях больших городов	0,5

Практически освещенность удобнее определять по силе света. Зависимость между освещенностью и силой света находится следующим образом.

Представим точечный источник света, расположенный в центре сферы радиусом r . Освещенность площади dS определяется по формуле (I.11).

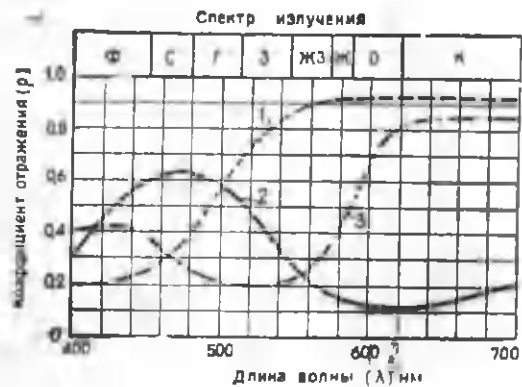
¹ Абсолютно черное тело — тело, которое поглощает все падающие на него излучения независимо от длины волны и направления излучения.

² Плоскость, в которой изображается сила света (обычно меридиональная), если источник света имеет ось симметрии.





8



Лист II
СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ

Рис. 1. Схемы к определению освещенности

Рис. 2. Схема к формуле для расчета освещенности от точечного источника света (закон квадрата расстояний)

Рис. 3. Схемы к определению яркости поверхности

Рис. 4. Схема к определению падающего на тело светового потока на составляющие потоки: отраженный, проходящий

Рис. 5

а — схема, показывающая зеркальное отражение света от полированной поверхности; б — схема, показывающая направленное-рассеянное отражение света от поверхности; в — г — схемы, показывающие (преимущественно рассеянное и диффузное) отражение света от шероховатой поверхности

Рис. 6

а — схема, показывающая прохождение света через прозрачное стекло; б — схема, показывающая прохождение света через матированное стекло; в — г — схемы, показывающие прохождение света через молочное стекло различной толщины

Рис. 7. Кривые спектрального коэффициента отражения для поверхностей, окрашенных в разные цвета (от фиолетового Φ до красного K)

1 — при желтой окраске; 2 — при синей окраске; 3 — при красной окраске

Рис. 8. Кривые спектрального коэффициента пропуска света для цветных фильтров (от фиолетового Φ до красного K)

1 — ЖС-7; 2 — СС-3; 3 — КС-1

Если dS заменить выражением, полученным из уравнения (1.10), то получим

$$E = \frac{d\Phi}{r^2 d\omega} = \frac{d\Phi}{d\omega} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (1.13)$$

т. е. освещенность площади dS , перпендикулярной направлению падающего на нее светового потока, прямо пропорциональна силе света I , излучаемой в направлении к этой площадке источником света, и обратно пропорциональна квадрату расстояния r^2 от источника света до освещаемой площадки (л. II, рис. 2).

При расположении площадки dS_1 под некоторым углом к падающему световому потоку зависимость между освещенностью и силой света находится следующим образом.

Так как

$$dS_1 = dS \cos \alpha,$$

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi}{d\omega} \cdot \frac{\cos \alpha}{r^2} \quad \text{или} \quad E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}. \quad (1.14)$$

Следовательно, освещенность в какой-либо точке поверхности прямо пропорциональна силе света и косинусу угла падения светового потока и обратно пропорциональна квадрату расстояния от этой точки до источника света.

Эта зависимость освещенности от силы света, относимая только к точечным источникам света¹, называется законом квадрата расстояния.

¹ Практически это относится к источникам, размеры которых в 10 и более раз меньше расстояния до освещаемой поверхности.

6. Яркость и светность

Яркость характеризует свечение источника света и освещаемых ими поверхностей и является световой величиной, которую непосредственно воспринимает глаз. Согласно принятой в светотехнике терминологии яркость определяется как поверхностная плотность силы света в заданном направлении, равная отношению силы света к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению.

Световой поток, отраженный от поверхности или от самосветящегося тела, попадая на светочувствительную оболочку глаза, вызывает световое ощущение. При этом уровень светового ощущения определяется величиной силы света, излучаемого рассматриваемой глазом поверхностью.

Если глаз рассматривает плоскую поверхность площадью S , излучающую равномерно в направлении, перпендикулярном к ней, силу света I , то яркость поверхности в направлении глаза определяется уравнением

$$B = \frac{I}{S}. \quad (1.15)$$

При неравномерной яркости светящейся поверхности ее определяют для бесконечно малого участка поверхности по формуле

$$B_\alpha = \frac{dI_\alpha}{dS \cos \alpha}.$$

Если рассматривать ту же светящую поверхность под углом α к перпендикуляру к ней, то глаз увидит часть этой поверхности, а именно ее проекцию на направление, перпендикулярное к линии зрения площадью $S \cos \alpha$ (л. II, рис. 3).

В этом случае яркость выражается уравнением

$$B_\alpha = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha}. \quad (1.16)$$

Единицей яркости служит нит¹ (нт). Яркостью в один нит обладает равномерно светящая плоская поверхность, которая в перпендикулярном к ней направлении излучает с 1 м² силу света, равную одной свече.

Более крупной единицей является стильб (сб); 1 сб = 10⁴ нт.

Уравнения (1.15) и (1.16) показывают, что световое ощущение от светящей поверхности не зависит от расстояния между светящей поверхностью и наблюдателем. Однако этот вывод правилен только при отсутствии поглощения света на пути прохождения световых лучей.

¹ Международная комиссия по освещению (МКО) рекомендует принимать за единицу яркости свечу с 1 м².

В общем случае яркость светящей поверхности является различной в разных направлениях. Примером поверхностей, обладающих различной яркостью в разных направлениях, служит обычное зеркало. Поэтому яркость, подобно силе света, характеризуется не только величиной, но и направлением, в котором она определяется.

Поверхности, обладающие одинаковой яркостью по всем направлениям, называются равнорядными излучателями. К равнорядным излучателям относятся, например, свежевыпавший снег, оштукатуренные поверхности стен и потолка в помещениях, осветительный прибор в виде шара из молочного стекла и т. п.

Для светящей плоской равнорядкой во всех направлениях поверхности справедливо соотношение

$$B = \frac{I_{\alpha}}{S \cos \alpha} = \frac{I}{S} = \text{const.} \quad (1.17)$$

Из этого уравнения получаем

$$I_{\alpha} = I \cos \alpha. \quad (1.18)$$

Таким образом, светящая плоская поверхность, обладающая одинаковой яркостью во всех направлениях, излучает свет по закону косинуса (закон Ламберта).

Для поверхностей, обладающих одинаковой яркостью во всех направлениях, интенсивность свечения удобно определять поверхностной плотностью светового потока, излучаемого такими поверхностями.

Поверхностная плотность светового потока, излучаемого поверхностью, равная отношению светового потока Φ к площади светящей поверхности S , называется светностью R .

Из изложенного следует, что

$$R = \frac{\Phi}{S}. \quad (1.19)$$

При неравномерной светности поверхности ее вычисляют для бесконечно малого участка поверхности, т. е.

$$R = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (1.20)$$

Светность — величина, подобная освещенности, однако светность представляет собой поверхностную плотность светового потока, испускаемого поверхностью, в то время как освещенность характеризует поверхностную плотность светового потока, падающего на поверхность.

Единица светности — люмен на квадратный метр (лм/м^2). Это — светность равнорядкой во всех направлениях плоской поверх-

ности, испускающей в одну сторону от себя с 1 м^2 площади световой поток в 1 лм .

Все встречающиеся в архитектурной практике материалы отражают только часть падающего на них светового потока.

Если обозначить коэффициент отражения поверхности через ρ , а отраженный от поверхности поток через Φ_{ρ} , то

$$R = \frac{\Phi_{\rho}}{S} = E\rho. \quad (1.21)$$

Светность самосветящей поверхности (например, матовый или молочный рассеиватель осветительного прибора и т. п.) зависит от доли света, проходящего через защитный колпак. Если обозначить эту долю через τ (коэффициент пропускания), то светность светящегося колпака найдется из уравнения

$$R = E\tau. \quad (1.22)$$

В табл. 1.3 приводится яркость некоторых освещенных и самосветящихся поверхностей.

Таблица 1.3

Яркость некоторых освещенных и самосветящихся поверхностей

Поверхности	Яркость в нт
Небо, в зените сплошь покрытое облаками — в полдень	7000—8000
Небо в зените ясное — в полдень	2500—4000
Солнце — в зените	$1,5 \cdot 10^9$
Луна — при полнолунии	2500
Снег, освещенный солнцем	25 000
Снег, освещенный луной, — при полнолунии	0,05
Вольфрамовая нить лампы накаливания 220 в, 100 вт при $T=2700^\circ$	$5,5 \cdot 10^4$
Пламя стеариновой свечи	5000

Между яркостью и освещенностью поверхностей, идеально рассеивающих падающий или проходящий через них свет, существует следующая зависимость.

Возьмем гипсовую пластинку площадью S с идеальной рассеивающей поверхностью; пусть она равномерно освещается каким-либо источником света и имеет освещенность E . Если коэффициент отражения пластинки обозначить через ρ , то отраженный пластинкой световой поток

$$\Phi_{\rho} = \rho ES = RS. \quad (1.23)$$

С другой стороны, отраженный от пластинки световой поток можно выразить через силу света, а именно:

$$\Phi_{\rho} = \pi I = \pi BS, \quad (1.24)$$

где I — сила света, отраженного гипсовой пластинкой по направлению, перпендикулярному пластинке, в св;

B — яркость отраженного пластинкой излучения (в нитах — нт).

Из уравнений (1.23) и (1.24) следует, что

$$\rho E = \pi B,$$

откуда

$$B = \frac{E \rho}{\pi} \text{ нт}; \quad (1.25)$$

$$B = \frac{R}{\pi}. \quad (1.26)$$

При световом потоке, проходящем через рассеивающее стекло (молочное) с коэффициентом пропускания τ , зависимость между освещенностью и яркостью выражается уравнением

$$B = \frac{\tau E}{\pi} \text{ нт}. \quad (1.27)$$

По характеру распределения световых потоков, отраженных поверхностью или пропущенных телом, различают следующие основные виды их:

1) рассеянное (диффузное) отражение или пропускание; например, отражение от оштукатуренной поверхности потолка, пропускание света молочным стеклом и т. п.;

2) направленно-рассеянное отражение или пропускание, например при отражении света от поверхностей, окрашенных масляной краской, или при пропускании света матированным стеклом;

3) направленное отражение или пропускание, например при отражении света от зеркал и от полированных поверхностей металла, или пропускание через бемское стекло.

Как характеристикой распределения яркости в различных направлениях пользуются коэффициентом яркости r_α :

$$r_\alpha = \frac{B_\alpha}{B_0}, \quad (1.28)$$

где r_α — коэффициент яркости поверхности под углом α к перпендикуляру на эту поверхность;

B_α — яркость поверхности под углом α к перпендикуляру на эту поверхность;

B_0 — яркость идеально рассеивающей поверхности, имеющей коэффициент отражения $\rho=1$ и одинаковую освещенность с исследуемой поверхностью.

Если заменить яркость B_0 согласно уравнению (1.25) отношением $\frac{E}{\pi}$, так как $\rho=1$, то

$$r_\alpha = \frac{B_\alpha \pi}{E}$$

или

$$B_\alpha = \frac{r_\alpha E}{\pi} \text{ нт}. \quad (1.29)$$

Из уравнений (1.25), (1.27) и (1.29) следует, что для поверхностей, диффузно отражающих свет, а также обладающих идеально рассеивающим пропусканием, коэффициент яркости одинаков по всем направлениям и численно равен коэффициенту отражения или пропускания.

7. Световые свойства тел

В общем случае при падении светового потока Φ_i на тело часть этого потока Φ_p отражается от него, часть проходит через тело Φ_τ и распространяется по другую сторону его по законам, зависящим от свойств тела и, наконец, часть поглощается телом Φ_α (л. II, рис. 4). На основании закона сохранения энергии имеем, что

$$\Phi_i = \Phi_p + \Phi_\tau + \Phi_\alpha.$$

Разделив обе части этого равенства на Φ_i , получим

$$1 = \frac{\Phi_p}{\Phi_i} + \frac{\Phi_\tau}{\Phi_i} + \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_i}.$$

Для количественной оценки отражения, пропускания и поглощения света различными телами пользуются соответствующими коэффициентами.

Коэффициент отражения ρ определяется отношением отраженного телом светового потока к падающему

$$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi_i}. \quad (1.30)$$

Коэффициент пропускания τ определяется отношением прошедшего через тело светового потока к падающему

$$\tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_i}. \quad (1.31)$$

Коэффициент поглощения α определяется отношением поглощенного светового потока к падающему

$$\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_i}. \quad (1.32)$$

Эти три коэффициента связаны между собой равенством

$$\rho + \tau + \alpha = 1. \quad (1.33)$$

В практике проектирования архитектуры надо знать не только соотношения световых потоков отраженного, пропущенного и погло-

щенного телом к световому потоку, падающему на тело, но и распределение в различных направлениях отраженного и пропущенного световых потоков, а также изменения спектрального состава светового потока при их отражении и пропускании.

Усредненные значения коэффициентов отражения, пропускания и поглощения света некоторыми строительными материалами приводятся в табл. I.4.

Таблица I.4

Усредненные значения коэффициентов отражения, пропускания и поглощения света строительными материалами

Материалы	Толщина в мм	Коэффициенты в %		
		ρ	τ	α
Стекло:				
листовое оконное	2—3	8	90	2
узорчатое прокатное	3—6,5	20	70	10
матированное	2—3	10	85	5
молочное	2—3	45	15	40
Мраморные плиты, полированные с одной стороны	8—9	55	5	40
Зеркало посеребрянное	—	85	—	15
Окраска белая	—	80	—	20

Из курса физики известно, что полированные поверхности отражают луч света по закону: угол падения равен углу отражения (л. II, рис. 5, а). Зеркальные поверхности кажутся яркими только в направлении отраженного светового луча, во всех других направлениях такая поверхность воспринимается темной. Другим крайним случаем являются шероховатые поверхности, которые диффузно отражают свет по всем направлениям, независимо от направления падающего луча (л. II, рис. 5, г). Такие поверхности кажутся равномерно яркими под любым углом наблюдения.

Промежуточное положение между этими крайними случаями занимают поверхности, обладающие направленно-диффузным отражением (рис. 5, б, в). При таком отражении световой поток отражается преимущественно в направлениях, близких к направлению зеркального отражения.

При падении светового луча на прозрачное тело (например, стекло) луч после преломления сохраняет направление падающего луча (л. II, рис. 6, а). Через такое стекло отчетливо виден источник света, посылающий луч.

При прохождении луча через тело, обладающее идеальной рассеивающей способностью (например, молочное стекло), световой луч, пройдя это тело, распространяется по всем

направлениям независимо от угла падения луча (л. II, рис. 6, г). Наряду с этим существуют тела (например, матированное стекло), которые хотя и рассеивают проходящий через них световой поток, однако при этом основная доля светового потока сохраняет направление, параллельное падению (л. II, рис. 6, б, в).

Отраженные от большинства поверхностей световые потоки по спектру отличаются от спектра падающих световых потоков. Это свидетельствует о том, что поверхности отражают, а следовательно, и поглощают световой поток избирательно, т. е. коэффициент отражения для монохроматических световых потоков неодинаков. Отсюда следует, что цвет поверхностей зависит не только от спектра падающего светового потока, но и от разной отражательной способности материалов для различных монохроматических излучений.

Характеристикой коэффициента отражения поверхности для монохроматических излучений при определенной длине волны служит спектральный коэффициент отражения ρ_λ , который представляет отношение монохроматического светового потока, отраженного телом, к монохроматическому потоку $\Phi_{\lambda, i}$, падающему на него:

$$\rho_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda, p}}{\Phi_{\lambda, i}} \quad (I.34)$$

В л. II, рис. 7 приводятся кривые спектрального коэффициента отражения для некоторых окрашенных поверхностей. Из кривых видно, что цветные поверхности обладают наибольшим коэффициентом отражения в соответствующих по цвету областях спектра.

Пропускание света просвечивающими телами происходит также избирательно. Характеристикой коэффициента пропускания просвечивающих тел служит спектральный коэффициент пропускания τ_λ , который представляет отношение монохроматического светового потока $\Phi_{\lambda, t}$, прошедшего через тело, к монохроматическому потоку $\Phi_{\lambda, i}$, падающему на него:

$$\tau_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda, t}}{\Phi_{\lambda, i}} \quad (I.35)$$

В л. II, рис. 8 приводятся кривые спектрального коэффициента пропускания для некоторых цветных фильтров (ЖС-7; СС-3; КС-1).

По заданному спектральному составу падающего на поверхность светового потока и зависимости спектрального коэффициента отражения от длины волны вычисляют общий (интегральный) коэффициент отражения избира-

тельно отражающей поверхности как отношение суммарного отраженного светового потока к падающему. На практике общий коэффициент отражения вычисляется как отношение суммы ординат (берутся обычно через 10—

20 нм) для кривых, характеризующих спектральный состав отраженного и падающего световых потоков.

Применяемые в строительной светотехнике световые величины и единицы сведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Световые величины и единицы

Величины		Расчетная формула	Единицы	
наименование	обозначение		наименование	обозначение
Световой поток	Φ	$\Phi = I \omega$	люмен	лм
Сила света	I	$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{E r^2}{\cos \alpha}$	свеча	св
Освещенность	E	$E = \frac{I}{S} = \frac{I_a \cos \alpha}{r^2}$	люкс	лк
Яркость	B	$B = \frac{I_a}{S \cos \alpha} = \frac{E \rho}{\pi} = \frac{R}{\pi}$	нит	нт
Светность	R	$R = \frac{\Phi_a}{S} = E \rho = \pi B$	—	лм/м ²
Телесный угол	ω	$\omega = \frac{S}{r^2}$	стерадиан	стер.
Коэффициент:			относительная величина	
отражения	ρ	$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi_l} = \frac{R}{E}$	то же	
пропускания	τ	$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_l}$		
поглощения	α	$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_l}$		
яркости	r_a	$r_a = \frac{\pi B_a}{E}$		
Спектральный коэффициент:				
отражения	ρ_λ	$\rho_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda, p}}{\Phi_{\lambda, l}}$		
пропускания	τ_λ	$\tau_\lambda = \frac{\Phi_{\lambda, t}}{\Phi_{\lambda, l}}$		

ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ЗДАНИЙ

1. Коэффициент естественной освещенности

Для регламентации переменного по характеру естественного освещения зданий принимается отвлеченная единица измерения, выраженная в процентах, — коэффициент естественной освещенности (сокращенно к. е. о.). Коэффициент естественной освещенности e_m в какой-либо точке M помещения представляет отношение освещенности в этой точке E_m к одновременной наружной освещенности горизонтальной площадки на открытом месте, освещенной диффузным светом всего небосвода, E_n .

Аналитически к. е. о. выражается таким образом:

$$e_m = \frac{E_m}{E_n} 100\%. \quad (1.36)$$

К. е. о. показывает, какую долю освещенность в данной точке помещения составляет от одновременной горизонтальной освещенности на открытом месте при диффузном свете неба.

Абсолютную величину этой освещенности в любой точке помещения можно найти, пользуясь формулой (1.36), а именно:

$$E_m = \frac{E_n e_m}{100} \text{ лк.} \quad (1.37)$$

Эта формула показывает, что для определения величины освещенности в помещении в тот или иной момент времени необходимо знать одновременную величину наружной освещенности; она находится по кривым наружной освещенности при диффузном свете неба, определяемой в результате многолетних наблюдений на метеорологических станциях.

2. Основные законы строительной светотехники

Расчет естественного освещения зданий основывается на законе проекции телесного угла и законе светотехнического подобия.

Закон проекции телесного угла говорит, что освещенность в какой-либо точке поверхности в помещении E_m , создаваемая равномерно светящейся поверхностью неба, прямо пропорциональна яркости неба и площади проекции на освещаемую поверхность телесного угла, под которым из данной точки виден участок неба.

Для вывода основной формулы этого закона рассмотрим случай, когда поверхность горизонтальна.

Проведем из точки M полусферу, радиус которой примем равным единице (л. III, рис. 1). Обозначаем яркость полусферы через B и найдем освещенность в точке M , создаваемую весьма малым участком полусферы ΔS , который в этом случае можно принять за точечный источник света.

Сила света, излучаемая участком ΔS , определится:

$$\Delta I = B \Delta S.$$

Лист III

Рис. 1. Схема к выводу закона проекции телесного угла
Рис. 2. Схемы (а, б) к определению освещенности в какой-либо точке помещения на основе закона проекции телесного угла

Рис. 3. Сравнение относительной освещенности на разных поверхностях при одинаковой площади светопроема

Рис. 4. Схема к закону светотехнического подобия

Рис. 5. Искусственный небосвод в Институте строительной физики (система Н. М. Гусева)

а — схема; б — общий вид
1 — граница угла затенения; 2 — источники света: зеркальные и люминесцентные лампы; 3 — прожектора

Освещенность в точке M будет

$$\Delta E_d = \frac{\Delta I \cos \alpha}{r^2}.$$

Заменив ΔI через яркость и положив $r=1$, имеем, что

$$\Delta E_d = B \Delta S \cos \alpha,$$

но

$$\Delta S \cos \alpha = \Delta \sigma,$$

т. е. площади проекции участка на горизонтальную освещаемую плоскость.

Таким образом:

$$\Delta E_d = B \Delta \sigma.$$

Если принять, что полусфера имеет одинаковую яркость, то

$$E_m = B \sigma. \quad (1.38)$$

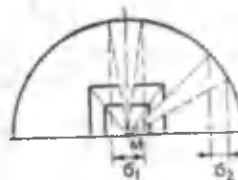
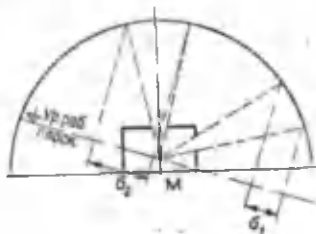
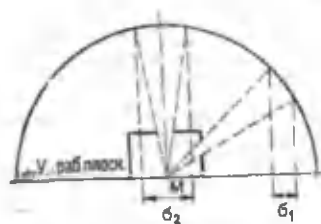
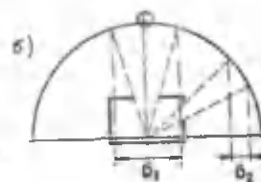
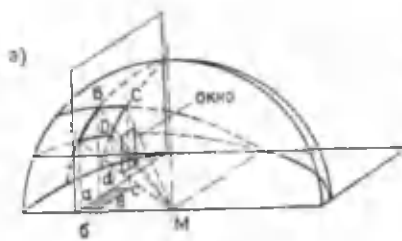
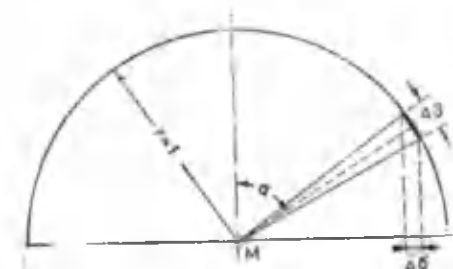
Эта формула выражает закон проекции телесного угла. Графическая интерпретация этого закона приводится на л. III, рис. 2.

Если точка M находится на открытом месте и освещается всей полусферой с одинаковой яркостью, то

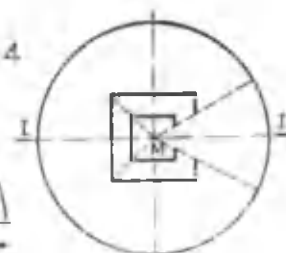
$$E_m = B \pi r^2.$$

Проекция полусферы на горизонтальную плоскость равна площади круга радиусом r , поэтому при радиусе, равном 1, имеем

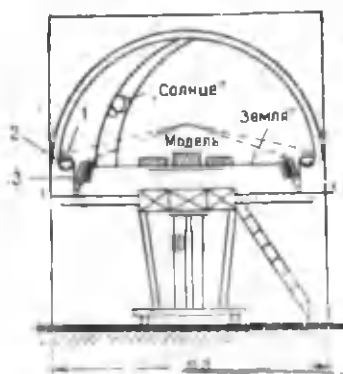
$$E_d = B \sigma. \quad (1.39)$$



Разрез I-I



План



Пользуясь формулами (1.38) и (1.39), находим геометрическую интерпретацию к. е. о., а именно:

$$e_n = \frac{B \sigma}{B \pi} = \frac{\sigma}{\pi}, \quad (1.40)$$

т. е. к. е. о. в какой-либо точке M представляет отношение площади проекции видимого из данной точки участка полусферы на освещаемую поверхность к величине π .

Пользуясь законом проекции телесного угла, можно определять относительную световую активность разных видов светопроемов, применяемых для освещения данной рабочей поверхности, а также сопоставлять освещенности, создаваемые одним и тем же светопроемом, различно расположенным относительно рабочей плоскости (л. III, рис. 3).

На основе этого закона разработаны удобные для практики графические способы расчета к. е. о.

Для примера на рис. 3 приводится сопоставление освещенностей, создаваемых на горизонтальной поверхности окном и фонарем, имеющими одинаковые размеры. При сравнении проекций σ_1 и σ_2 видно, что фонарь обладает более высокой светоактивностью, чем окно.

Закон светотехнического подобия является логическим следствием закона проекции телесного угла.

Сущность закона подобия уясняется из схемы, приведенной на л. III, рис. 4. Освещенность точки M в помещении создается через окна, обладающие различной яркостью B_1, B_2 . Различная яркость окон может создаваться, например, применением различных сортов стекла (оконного листового, узорчатого, матированного и др.).

У этих окон один и тот же телесный угол ω , вершина которого совпадает с точкой M .

Из закона проекции телесного угла следует, что освещенность в точке M будет одинаковой, если

$$B_1 = B_2 = \dots = \text{const.}$$

Таким образом, освещенность в какой-либо точке помещения зависит не от абсолютных, а от относительных размеров световых проемов.

Закон подобия имеет большое практическое значение, позволяя при расчетах освещенности пользоваться чертежами разного масштаба. На этом законе основана возможность моделирования, позволяющая оценивать условия освещения помещений на моделях. Практика показывает, что при масштабе мо-

Лист IV ДАННЫЕ О СОЛНЕЧНОМ СИЯНИИ

Рис. 1. Горизонтальная система координат солнца: высота стояния солнца и азимут солнца. Азимут отсчитывается или от точки юга на восток и запад или от точки севера по часовой стрелке

Рис. 2. Среднее годовое количество часов естественного освещения, которое можно использовать для освещения зданий (при критической наружной освещенности, равной 5000 лк)

Рис. 3. Распределение солнечной энергии в течение года: 1 — на полюс; 2 — в центральных районах; 3 — на экваторе

Рис. 4. Карта светоклиматических поясов, составленная на основе многолетних актинометрических измерений в разных пунктах СССР

Рис. 5. Соотношение прямого и рассеянного света в безоблачный день в разных городах СССР

Рис. 6. Сравнение одновременно измеренных освещенностей в Павловске (1) и Ленинграде (2)

делей не менее чем $1/20$ натуральной величины результаты измерений освещенности на моделях достаточно достоверны, если при изготовлении моделей строго соблюдены все параметры натуры.

На основе закона подобия осуществляются лабораторные установки, называемые искусственным небом, применяемые для различных светотехнических исследований. Схема и общий вид искусственного неба приводятся на л. III, рис. 5.

3. Источники естественного освещения

Природное освещение земли по интенсивности и по времени действия делится на дневное, сумеречное и ночное. В безоблачную или частично облачную погоду наблюдаются три основные компоненты дневной освещенности: прямого света от солнца E_n , рассеянного — от неба E_{π} и отраженного — от земли и окружающих предметов E_3 .

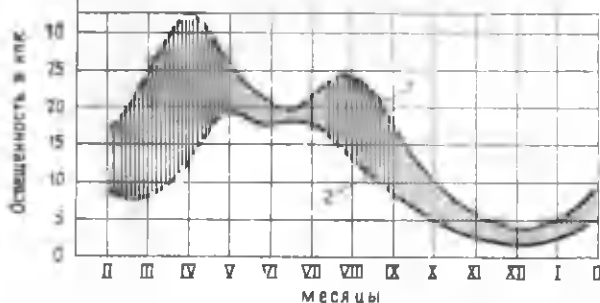
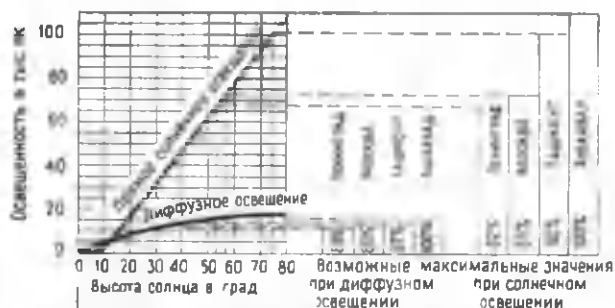
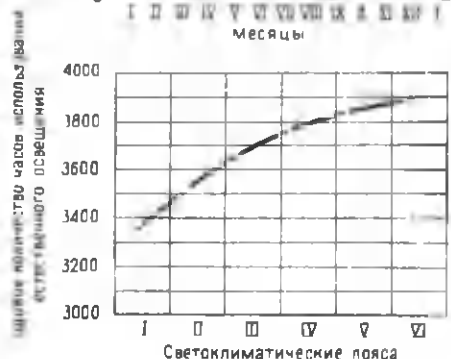
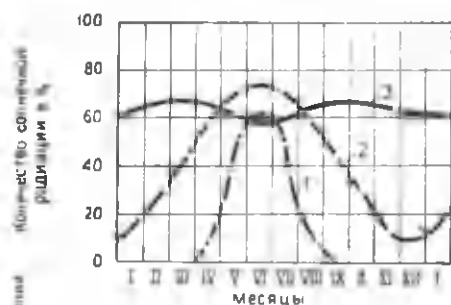
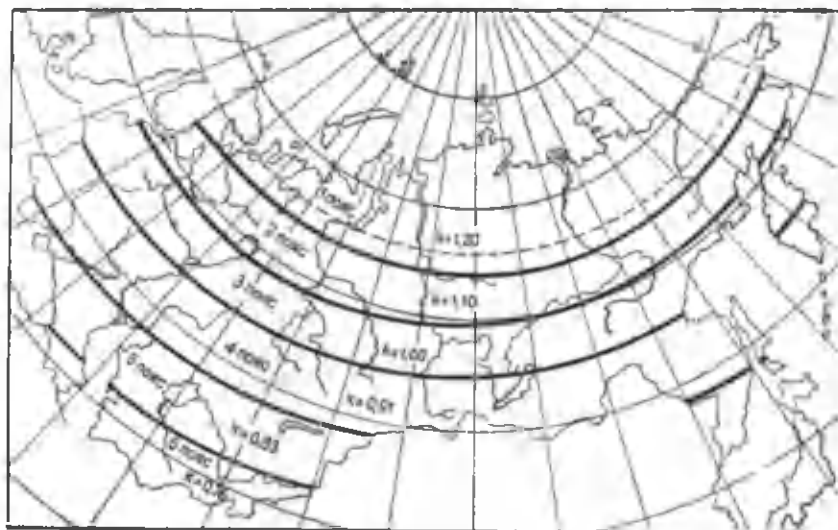
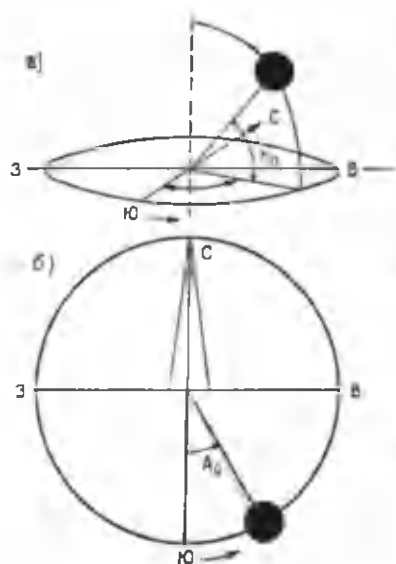
Суммарная освещенность E_c , получаемая какой-либо поверхностью, определяется по формуле

$$E_c = E_n + E_{\pi} + E_3. \quad (1.41)$$

Весьма важной характеристикой естественного освещения является контрастность освещения K , выражаемая отношением

$$K = \frac{E_c}{E_n + E_3}. \quad (1.42)$$

Степень контрастности освещения изменяется в разных районах СССР в зависимости от высоты стояния солнца, характера облачности и подстилающего слоя земли. В южных районах, как правило, контрастность освещения более высокая благодаря значительному увеличению компоненты E_{π} .



Освещенность естественным светом поверхности в каждый данный момент определяется астрономическими и геофизическими факторами. Астрономическим фактором является положение солнца на небе для данного пункта. При расчетах естественного освещения удобно пользоваться горизонтальными координатами: высотой солнца h_0 и азимутом A_0 (л. IV, рис. 1).

Важнейшими геофизическими факторами, определяющими освещенность при естественном свете, являются количество и характер облаков, прозрачность и рассеивающая способность воздуха и состояние земного покрова.

Большое влияние земной атмосферы на естественное освещение вынуждает при исследованиях наружного освещения пользоваться

статистическими методами, широко применяемыми при изучении других метеорологических элементов: температуры и влажности воздуха, осадков, ветра и т. д.

Диапазон освещенностей и яркостей, наблюдаемых при естественном освещении, очень велик. Так, освещенность в полдень ясного дня на открытом месте может превосходить 100 000 лк, в то время как в момент захода солнца в пасмурный день она может равняться нескольким люксам.

Солнце представляет собою шар радиусом 695 000 км. Среднее расстояние от Земли до Солнца, равное большой полуоси элемента земной орбиты, равно $149,5 \cdot 10^6$ км; это расстояние в астрономии принимается за единицу длины (астрономическая единица). С расстояния, равного астрономической единице, Солнце представляется диском, угловой размер полудиаметра которого характеризуется телесным углом, равным $6,8 \cdot 10^{-5}$ стер.

Основной характеристикой, которая определяет излучательную способность Солнца, служит световая солнечная постоянная E_0 , она представляет собой визуальную освещенность плоскости, расположенной перпендикулярно лучам и удаленной от Солнца на расстояние, равное астрономической единице. Приближенная величина световой солнечной постоянной на границе атмосферы 135 000 лк. Соответствующая этой освещенности средняя яркость Солнца составляет $2 \cdot 10^9$ нт.

Зная световую солнечную постоянную E_0 , расстояние до Солнца в заданный момент, а также коэффициент пропускания атмосферы T , изменяющийся в зависимости от высоты Солнца, и прозрачность воздуха p , можно определить освещенность от Солнца на плоскости, перпендикулярной направлению солнечных лучей, по формуле

$$E_{\perp} = \frac{E_0}{\Delta^2} p^m, \quad (1.43)$$

где m — так называемая воздушная масса, которую необходимо преодолеть солнечным лучам; значения m изменяются от 1 до 26,96 — соответственно изменению высоты Солнца от 90° до 0° .

Освещенность от солнца на горизонтальной плоскости определяется по формуле

$$E_{\perp} = E_{\perp} \sin h_0. \quad (1.44)$$

Пример. Требуется определить освещенность горизонтальной поверхности при высоте солнца 30° и при средней прозрачности воздуха $p=0,8$.

По формуле (1.44) имеем, что:

$$E_{\perp} = E_{\perp} \sin 30^\circ$$

$$E_{\perp} = \frac{130\,000}{1^2} 0,8^m$$

Для $h_0 = 30^\circ$ по таблице Бемпорада $m=2$ и $\sin 30^\circ = 0,52$.

Таким образом, $E_{\perp} = 130\,000 \cdot 0,8^2 = 83\,200$ лк.

Следовательно, $E_{\perp} = 83\,200 \sin 30^\circ = 83\,200 \cdot 0,52 = 41\,600$ лк.

Другой характеристикой Солнца является тепловая солнечная постоянная; она показывает количество лучистой энергии, падающей на поверхность, расположенную перпендикулярно направлению лучей в течение 1 мин при расстоянии этой поверхности от Солнца, равном 1 астрономической единице. Численное значение этой солнечной постоянной по европейской шкале принимается равным $1,895$ кал/см²мин.

По результатам многолетних измерений метеорологическими станциями составляются карты с данными о продолжительности солнечного сияния в течение года.

Эти данные приходится учитывать при проектировании микрорайонов города, генеральных планов промышленных предприятий, а также жилых, общественных и производственных зданий.

Распределение солнечной энергии в течение года в разных местах земного шара характеризуется кривыми, приведенными на л. IV, рис. 3.

В табл. I.6 приводятся данные о годовом количестве солнечной радиации для некоторых городов СССР.

Таблица I.6

Количество солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, для некоторых пунктов СССР

Города СССР	Количество радиации в кал/см ²	В % по отношению к Павловску
Павловск (под Ленинградом)	39 800	100
Евпатория	81 700	205
Тбилиси	75 400	190
Ташкент	104 500	275
Иркутск	60 300	150

Данные о солнечной радиации имеют решающее значение в южных и тропических районах; обилие солнечных дней в году и высокая интенсивность солнечной радиации в этих районах вынуждают предусматривать специальные архитектурно-планировочные и конструктивные средства для защиты зданий от перегрева в летнюю половину года (см. главу IV).

Из таблицы видно, что в течение года солнечная радиация изменяется в больших пределах, достигая максимальных значений в Средней Азии.

Пользуясь пропорциональной зависимостью между интенсивностью солнечной радиации и уровнями свечения, можно приближенно определять вероятные величины наружной освещенности по имеющимся данным о солнечной радиации. При этом величины наружной освещенности вычисляются умножением значений интенсивности солнечной радиации на так называемой световой эквивалент, численно выражающий соотношение между интенсивностью радиации и освещенностью. По Ю. Д. Янишевскому (Главная геофизическая обсерватория), световой эквивалент в среднем составляет 71 000—73 000 лк — 1 кал/мин см².

Вычисленные среднегодовые значения так называемой эффективной освещенности для разных пунктов СССР позволили составить карту светоклиматического районирования территории СССР (л. IV, рис. 4). На карте указаны значения коэффициентов, на которые следует умножать нормированные значения к. е. о. (СНиП 1962 г.) при проектировании зданий в разных районах.

Эффективная освещенность учитывает то обстоятельство, что уровни зрительного восприятия примерно пропорциональны логарифмам освещенности, т. е. $E_{эф} = \lg E$ (закон Вебера — Фехнера).

Диффузное естественное освещение создается многократным отражением солнечных лучей от взвешенных в атмосфере частиц воды, пыли и др. С теоретической точки зрения сплошной облачный покров представляет собой слой сравнительно крупных рассеивающих частиц большой оптической плотности.

Поэтому на величину диффузной освещенности большое влияние оказывают характер и степень облачности.

Опыт показывает, что тонкая сплошная пелена перистых облаков заметно повышает общую яркость неба, а следовательно, и освещенность; наиболее темными являются гроззовые облака, обладающие очень малой яркостью.

Величину диффузной освещенности E_d определяют по формуле

$$E_d = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{B_z}{1 + \sin^2 h_0}, \quad (1.45)$$

где B_z — яркость неба в зените.

Степень облачности оценивается баллами в зависимости от процента покрытой облаками

поверхности неба: сплошная облачность оценивается 10 баллами, ясное небо — 0 баллов.

Соотношение между освещенностью, создаваемой прямым светом солнца E_n , и рассеянным светом безоблачного неба E_d приближенно определяется по формуле

$$E_n = KE_d,$$

где K — постоянная; численные значения K в зависимости от географической широты находятся в пределах 0,2—0,1.

При заданной освещенности, создаваемой небом E_d , можно определить суммарную освещенность E_c , а именно:

$$E_c = E_n + E_d = E_d p^m \sin h_0 + E_d,$$

но $E_n = KE_d$, следовательно:

$$E_c = E_d p^m (\sin h_0 + K). \quad (1.46)$$

Соотношение прямого и рассеянного света в безоблачный день в большой степени зависит от высоты стояния солнца h_0 (л. IV, рис. 5).

Однако диффузная составляющая с увеличением высоты растет медленно, достигая 20 000 лк при высоте солнца 80°.

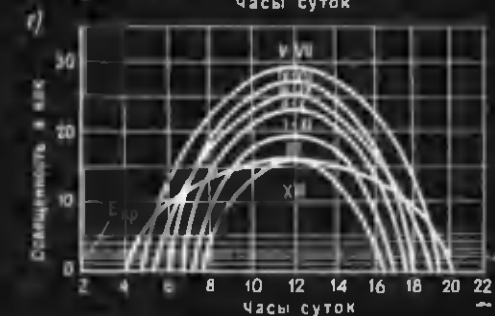
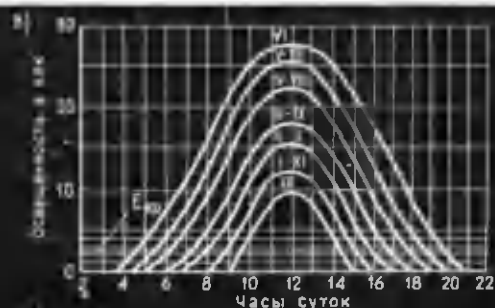
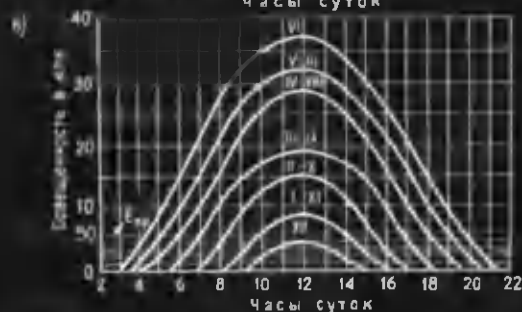
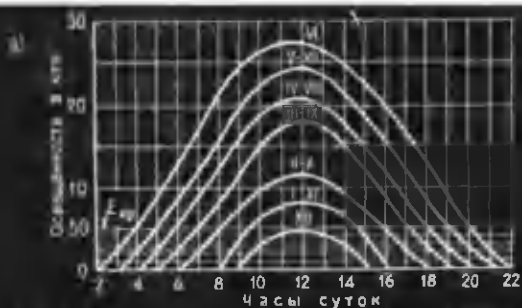
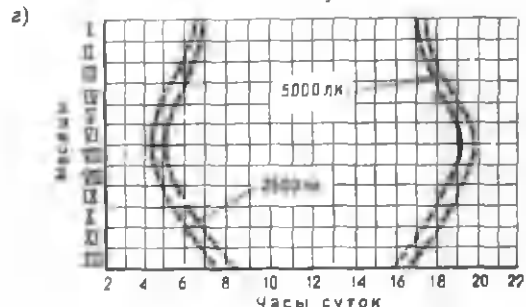
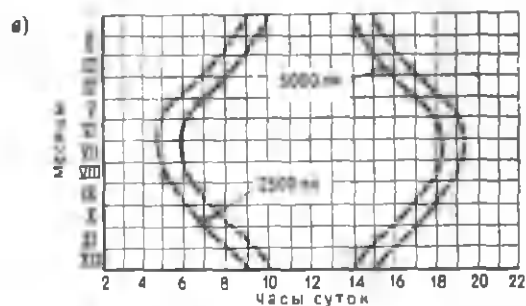
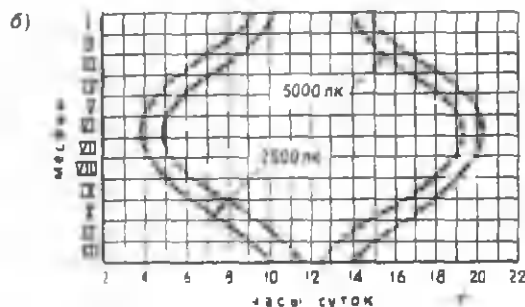
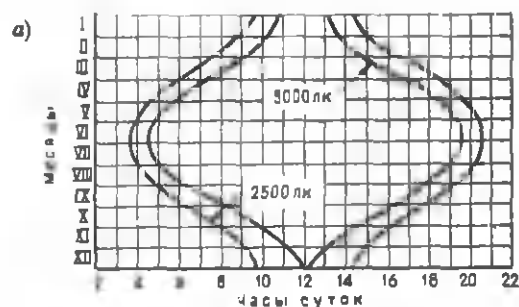
Совокупность данных о природных ресурсах световой энергии называют световым климатом местности. Наиболее важной составляющей светового климата является наружное диффузное освещение. Величина наружного диффузного освещения зависит в основном от высоты стояния солнца и характера облачности. Наряду с этим существенное влияние на величину диффузной наружной освещенности оказывает прозрачность воздуха и состояние земного покрова.

Освещенность от облачного неба определяют обычно по таблицам или графикам усредненных значений, полученных на основе многолетних измерений на метеорологических станциях.

На л. V, рис. 1 приводятся кривые наружной освещенности горизонтальной поверхности диффузным светом неба. Пользуясь кривыми, можно определять не только величину освещенности для любого часа дня и месяца, но и время использования естественного света в помещениях. Для этого надо знать критическую наружную освещенность $E_n^{кр}$, т. е. освещенность в момент включения (вечером) или выключения (утром) искусственного света.

Если обозначить нормированную для данного помещения освещенность при искусственном освещении E_n , а нормированное значение к. е. о. в этом помещении e^n , то

$$E_n^{кр} = \frac{E_n}{e^n}. \quad (1.47)$$



Согласно нормам естественного освещения СНиП 1962 г. критическая наружная освещенность в СССР принята равной 5000 лк.

Если на кривые наружной освещенности нанести горизонталь, соответствующую $E_{кр} = 5000 \text{ лк}$, то по точкам пересечения горизонтали с кривыми можно определить для разных месяцев года продолжительность исполь-

зования естественного освещения. На л. V. рис. 2 приводятся графики, построенные на основании расчетов по кривым наружной освещенности для Москвы, Павловска, Иркутска и Ташкента. Количество клеточек в пределах кривых, соответствующих $E_{кр} = 5000$ или 2500 лк, умноженное на 30, определяет продол-

Лист V
СВЕТОВОЙ КЛИМАТ СОЮЗА

Рис. 1. Кривые наружной диффузной освещенности для
а — Павловска (под Ленинградом); б — Москвы; в —
Иркутска; г — Ташкента

Рис. 2. Кривые для определения времени использования
естественного освещения при различных величинах кри-
тической наружной освещенности для:
а — Павловска (под Ленинградом); б — Москвы (приближен-
ные); в — Иркутска; г — Ташкента

Таблица 1.7

**Зависимость времени использования естественного
освещения от географической широты при соблюдении
нормированного к. с. о.**

Географическая широта местности в град	65	60	55	50	45	40	35
Процент времени использо- вания от общего годового количества часов ес- тественного освещения	43	77	81	83	85	86	87

жительность использования естественного ос-
вещения в течение года.

Зависимость годового количества освеще-
ния и времени использования естественного
освещения при критической наружной осве-
щенности 5000 лк от географической широты
местности приводится на л. IV, рис. 2 и в
табл. 1.7.

На величину диффузной освещенности су-
щественное влияние оказывают прозрачность
воздуха и состояние земного покрова. Про-
зрачность воздуха оценивается коэффициентом
прозрачности, значения которого, оценивае-
мые степенью видимости, принимаются равны-
ми: при отличной видимости — 0,9, при хоро-
шей — 0,8 и при плохой — 0,7. В больших горо-
дах и промышленных районах прозрачность
воздуха оценивается коэффициентом 0,7.

О значительном влиянии прозрачности воз-
духа на наружную освещенность свидетельст-
вуют результаты синхронных измерений, про-
веденных в Ленинграде и Павловске (л. IV,
рис. 6).

В ряде районов Союза значительное влия-
ние на наружную диффузную освещенность
оказывает подстилающий слой. Такое положе-
ние имеет место в северном и центральном

районах в период зимних месяцев. По данным
Актинометрического института в Павловске
снеговой покров увеличивает суммарную осве-
щенность на 2—8%, рассеянную при ясном
небе на 10—25%, а при сплошной облачности
на 100% и более.

Яркость облачного неба неравномерна.
Она уменьшается от зенита к горизонту. Ко-
эффициент, учитывающий относительную яр-
кость неба q , определяется по формуле

$$q = \frac{B_0}{B_z} = \frac{3}{7} (1 + 2 \sin \theta), \quad (1.48)$$

где B_0 — яркость неба под углом θ к гори-
зонту;

B_z — яркость неба в зените.

В существующих нормах естественного ос-
вещения распределение яркости облачного не-
ба учитывается коэффициентом q , значения ко-
торого приводятся в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Значения коэффициента q

Угол θ в град	15	30	45	50	60	75	90
Значения q	0,65	0,85	1	1,1	1,15	1,2	1,25

Яркость неба существенно изменяется и в
направлении по горизонту. Исследования, про-
веденные в этом направлении, позволили полу-
чить следующие значения коэффициента q_1 ,
учитывающего неравномерную яркость неба
по горизонту (табл. 1.8а); эти значения коэф-
фициента можно вводить в формулу (1.51).

Таблица 1.8а
Приближенные значения коэффициента q_1

Ориентация светопроема по сторонам света на:	При облачном небе	При ясном небе
север	1	1
северо-восток	0,9	0,9
северо-запад	0,7	0,7
восток	0,85	0,65
запад	0,8	0,6
юго-восток		
юго-запад		
юг		

НОРМИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

1. Нормирование естественного освещения зданий

К числу констант, которые должен знать архитектор для полноценного решения задачи естественного освещения, относятся:

- уровень освещенности;
- требования к качеству освещения.

Необходимый уровень освещенности учитывает характер производимой работы или гигиенические требования к помещению и регламентируется нормами естественного освещения СНиП II-A.8-62. Нормы естественного освещения устанавливаются в виде минимальных к. е. о. — в помещениях с боковым освещением (через окна) и в виде средних значений к. е. о. в помещениях с верхним (через фонари) и комбинированным освещением (через окна и фонари). При этом минимальное значение к. е. о. относится к наиболее удаленным от окон точкам по среднему разрезу помещения в пределах рабочей зоны. Среднее значение к. е. о. в пределах рабочей зоны определяется по формуле

$$e_{\text{ср}} = \frac{\frac{e_1}{2} + e_2 + e_3 + \dots + \frac{e_n}{2}}{n-1}, \quad (1.49)$$

где $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$ — значения к. е. о. в отдельных точках помещения, находящихся на равных расстояниях друг от друга;

n — количество точек, в которых определяется к. е. о. (обычно таких точек берется не менее 5).

Нормированные значения к. е. о. в помещениях производственных, сельскохозяйствен-

ных, общественных и жилых зданий даются в Строительных нормах и правилах (СНиП II-A.8-62).

2. Расчет естественного освещения

Расчет естественного освещения при наметенных в проекте системе освещения, форме, размерах и расположении световых проемов производится путем определения к. е. о. в ряде точек, находящихся на рабочей плоскости по характерному разрезу помещения. Рабочей плоскостью для большинства помещений служит горизонтальная плоскость. Однако для некоторых помещений (например, в залах музеев и картинных галерей, в производственных цехах с однотипным оборудованием) к. е. о. рассчитываются на рабочих поверхностях. Характерным разрезом помещения обычно служит разрез, проходящий посередине помещения (по оси светопроемов или между ними).

Значение e в какой-либо точке помещения определяется по формуле (л. VI, рис. 1):

$$e = e_n + e_o + e_a + e_n, \quad (1.50)$$

где e_n — к. е. о., создаваемый прямым диф-

Лист VI

Рис. 1. Схема для определения к. е. о. с учетом отраженного света

e_n — к. е. о., создаваемый прямым светом неба; e_a — к. е. о., создаваемый отраженным светом от противостоящих зданий; e_o — к. е. о., создаваемый отраженным светом от внутренних поверхностей помещения; e_n — к. е. о., создаваемый отраженным светом от земли

Рис. 2. Схема к определению значения q в зависимости от угла θ

Рис. 3. Графики Данилюка для расчета к. е. о.

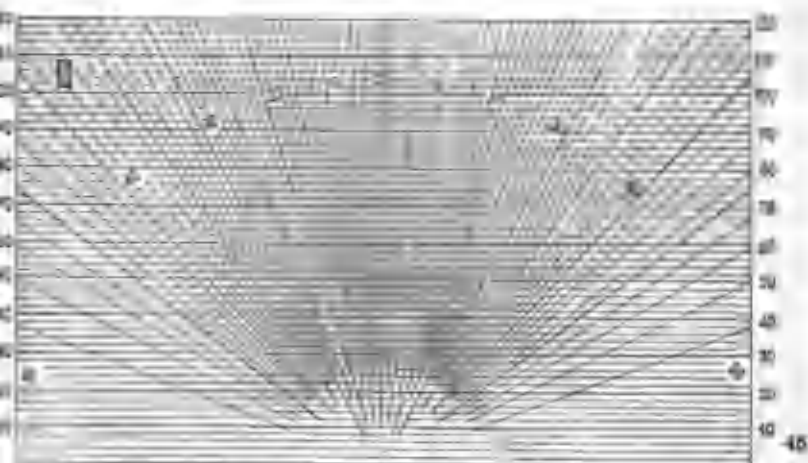
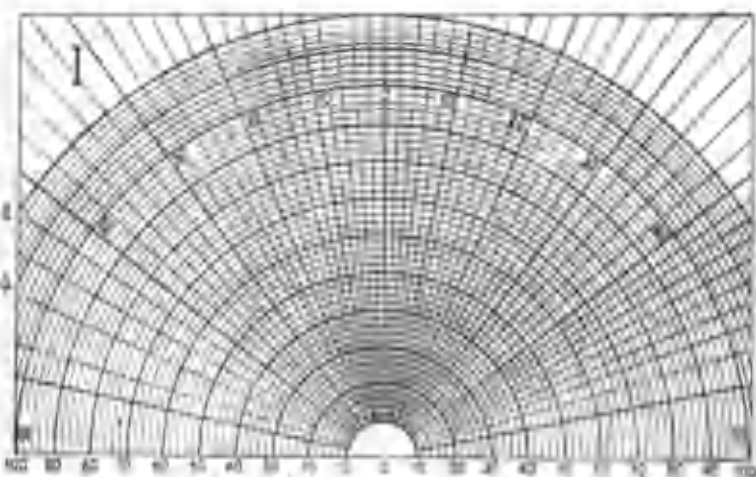
Рис. 4. Применение графиков для расчета к. е. о.
а — при боковом освещении; б — при верхнем освещении

фузным светом участка неба, видимого из данной точки через проемы с учетом светопотерь при прохождении светового потока через остекленный проем;

e_0 — к. е. о., создаваемый отраженным светом от внутренних поверхностей помещения: потолка, стен, пола;

e_3 — к. е. о., создаваемый отраженным светом от противостоящих зданий;
 e_n — к. е. о., создаваемый отраженным светом от подстилающего слоя земли¹.

¹ Подстилающий слой: обнаженная земля, земля, покрытая травой, снегом и т. д.



34



Значение e_n определяется по формуле

$$e_n = e_n^p \tau_0 q, \quad (1.51)$$

где e_n^p — коэффициент неба, который определяется при условии равномерного неба и без учета светопотерь и отраженного света; определяется при помощи графиков Данилюка;

τ_0 — общий коэффициент светопропускания светового проема с учетом затенения его несущими конструкциями; определяется по табл. 1.9;

четному значению к. е. о. в наиболее удаленной по среднему разрезу точке рабочей зоны помещения; в помещениях с верхним и комбинированным освещением — к среднему значению к. е. о. в помещении или пролете;

r — коэффициент, учитывающий повышение к. е. о. за счет света, отраженного от внутренних поверхностей помещения; значения r для разных видов освещения (бокового r_1 и верхнего r_2) в зависимости от средневзве-

Таблица 1.9

Усредненные значения общего коэффициента светопропускания τ_0

Характеристика помещений по условиям загрязнения воздуха	Примеры помещений	Положение остекления	Значение коэффициента τ_0						
			при деревянных и железобетонных переплетах			при стальных и алюминиевых переплетах			При стекле изобогатном запылением проема
			одинарных	двойных	сдвоенных	одинарных	двойных	сдвоенных	
Группа А Помещения со значительными выделениями пыли, дыма и копоти	Сталелитейные мартеновские, кузнечные, литейные цехи; цехи цементных заводов и т. п.; помещения для переработки кормов и обработки зерна в сельскохозяйственных зданиях	Вертикальное	0,4	0,25	0,3	0,5	0,3	0,4	0,3
		Наклонное	0,3	0,2	0,25	0,4	0,25	0,3	0,2
Группа Б Помещения с незначительными выделениями пыли, дыма и копоти	а) Цехи холодного проката, инструментальные цехи; ротационный цех; машинный зал ГЭС и т. п.	Вертикальное	0,5	0,35	0,4	0,6	0,4	0,5	0,35
		Наклонное	0,4	0,25	0,3	0,5	0,3	0,4	0,25
	б) Помещения жилых и общественных зданий	Вертикальное	0,5	0,35	0,4	0,6	0,4	0,5	0,35
		Наклонное	0,4	0,25	0,3	0,5	0,3	0,4	0,25

q — коэффициент, учитывающий неравномерную яркость неба; значения q в зависимости от угла θ , образуемого горизонтальной линией и прямой, соединяющей данную точку M с центром светопроема C , принимают по табл. 1.8.

Значение e_0 в общем виде определяется по формуле

$$e_0 = e_n (r - 1) \tau_0, \quad (1.52)$$

где e_n — определяется по формуле (1.51) и относится: в помещениях с боковым освещением — к минимальному рас-

шенного коэффициента отражения внутренних поверхностей приводятся в табл. 1.10 и 1.11.

Таблица 1.10
Значения коэффициента r_1 , учитывающего отраженный свет при боковом освещении

Средневзвешенный коэффициент отражения стен, потолка и пола помещения	Значение коэффициента r_1	
	при одностороннем освещении	при двухстороннем освещении
	а	б
0,5	4	2,2
0,4	3	1,7
0,3	2	1,2

Примечания: 1. В производственных помещениях с односторонним освещением при отсутствии внутренних стен значения коэффициента, приведенные в графе «а», умножаются на 0,75.

2. Средневзвешенный коэффициент отражения внутренних поверхностей помещения определяется по формуле

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2 + \rho_3 S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (1.53)$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 — коэффициенты отражения соответственно стен, потолка и пола;

S_1, S_2, S_3 — площади соответственно стен, потолка и пола.

3. Коэффициенты отражения стен, потолка и пола принимаются в зависимости от проектируемой отделки интерьера.

Таблица 1.11

Значения коэффициента r_2 , учитывающего отраженный свет при верхнем освещении

Количество пролетов в помещении	Средневзвешенный коэффициент отражения стен, потолка и пола помещения $\rho_{\text{ср}}$	Значение коэффициента r_2 при отношении высоты h помещения к его ширине L			
		0,16	0,36	0,66	1
1	0,5	1,5	1,6	1,7	1,9
	0,4	1,4	1,5	1,6	1,7
	0,3	1,2	1,3	1,4	1,5
2	0,5	1,4	1,5	1,6	1,7
	0,4	1,3	1,4	1,5	1,6
	0,3	1,2	1,3	1,4	1,5
3 и более	0,5	1,3	1,3	1,3	1,3
	0,4	1,2	1,2	1,2	1,2
	0,3	1,1	1,1	1,1	1,1

Примечания: 1. Значения коэффициента r_2 при фонарях пилообразной формы (шедах) увеличиваются умножением на 1,2.

2. Высотой h помещения считается расстояние от горизонтальной рабочей плоскости до нижней грани остекления фонаря.

3. Коэффициент $\rho_{\text{ср}}$ определяется по формуле (1.53).

Значение e_3 коэффициента естественной освещенности, создаваемой отраженным светом от противостоящих зданий, определяется по формуле

$$e_3 = 0,1 e_3^p \tau_0 \quad (1.54)^*$$

где e_3^p — расчетное значение к. е. о. в данной точке помещения от участка неба, закрываемого противостоящими зданиями без учета светопотерь.

Значения e_3 учитываются в случаях, когда противостоящие здания закрывают большую часть видимого через окна небосвода.

* При светлой облицовке ($\rho > 0,5$) фасадов противостоящих зданий вместо коэффициента 0,1 допускается применять 0,15.

При боковом освещении в случаях, когда противостоящие здания отсутствуют или находятся на большом расстоянии, целесообразно при расчетах к. е. о. учитывать отраженный свет от земли по формуле

$$e_n = e_n^{\text{мин}} (r_3 - 1) \tau_0 \quad (1.55)$$

где $e_n^{\text{мин}}$ — расчетное минимальное значение к. е. о. на рабочей поверхности;

r_3 — коэффициент, учитывающий повышение к. е. о. за счет света, отраженного от земли; значения r_3 приводятся в табл. 1.12.

Таблица 1.12

Значения коэффициента r_3 , учитывающего отраженный свет от земли

Коэффициент отражения земли	Коэффициент отражения потолка помещения	Значения
0,2	0,7	1,1
0,3	0,7	1,2
0,4	0,7	1,3
0,6	0,7	1,5

Примечание. Значения r_3 даны для помещений, в которых глубина в 2,5—4 раза превышает высоту окна.

В помещениях с комбинированным освещением расчетные значения к. е. о. определяются суммированием в каждой точке по разрезу значений к. е. о. от верхнего и бокового освещения.

При проектировании зданий бывает необходимо определить требуемую площадь светопроемов в помещениях того или иного назначения. В этих случаях удобно пользоваться следующей формулой:

$$\frac{S_0}{S_n} 100 = \frac{e_n \tau}{\tau_0 r} \kappa \quad (1.56)$$

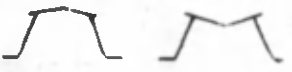
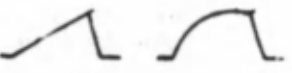
Таблица 1.13

Значения световой характеристики окна τ_0

Отношение длины L вдоль стены с окнами к глубине B помещения	Значения τ_0 при отношении глубины помещения B к возвышению верхнего края окна над горизонтальной рабочей плоскостью h_1 , равном						
	0,5	1	1,5	2	3	4	5
4 и более	—	—	7	9	12	15	17
3	9,5	8,5	9,5	11,5	16	19	23
2	11,5	10	11	13	18	22	26
1,5	13	11,5	12,5	15	20	25	30
1	16	15	17	19	25	35	42
0,5	—	—	22	27	43	—	—

Примечание. Таблица составлена для высоты подоконника не более 1,2 м.

Значение световой характеристики фонарей η_f

Типы фонарей	Количество пролетов	Значения световой характеристики при отношении длины вдоль оси фонаря к высоте помещения, равном,								
		1			2			3		
		при отношении высоты помещения к ширине пролета, равным								
		0,4	0,7	1	0,4	0,7	1	0,4	0,7	1
	Один Два Три и более	5,2 5,2 4,7	8 6,1 4,7	9,9 7,5 4,7	4,7 4,7 4,3	7,3 5,6 4,3	8,9 6,9 4,3	3,9 3,9 3,5	6 4,6 3,5	7,3 5,6 3,5
	Один Два Три и более	4,6 4,6 4,2	7,1 5,4 4,2	8,8 6,7 4,2	4 4 3,6	6,3 4,7 3,6	7,6 5,8 3,6	3,3 3,3 3	5,1 3,9 3	6,3 4,8 3
	Один Два Три и более	3,7 3,1 3	4,3 3,7 3	5,3 4,3 3	3,2 2,7 2,7	3,8 3,2 2,7	4,6 3,8 2,7	2,7 2,2 2,2	3,1 2,7 2,2	3,8 3,1 2,2
	Один Два Три и более	3 2,5 2,5	3,5 3 2,5	4,2 3,5 2,5	2,7 2,3 2,3	3,2 2,7 2,3	3,9 3,2 2,3	2,3 1,9 1,9	2,7 2,3 1,9	3,3 2,7 1,9
	Один Два Три и более	3,5 3,5 3,5	4,2 3,8 3,5	5,2 4,2 3,5	3,2 3,2 3,2	3,8 3,5 3,2	4,7 3,8 3,2	2,5 2,5 2,5	3 2,8 2,5	3,8 3 2,5

где S_o — площадь в помещении светопроемов;
 S_n — то же, пола;
 e^n — нормированный к. е. о. берется по СНиП II-A.8-62;
 η — световая характеристика светового

проема; значения световой характеристики берутся: η_1 для бокового освещения по табл. 1.13, а η_f для верхнего — по табл. 1.14.

τ_0 — общий коэффициент светопропускания берется по табл. 1.9;

r — коэффициент, учитывающий отраженный свет от внутренних поверхностей помещения; берется в зависимости от системы освещения по табл. 1.10 и 1.11;

k — коэффициент, учитывающий затенение противостоящими зданиями (учитывается только при боковом освещении); в этом случае берется по табл. 1.15.

Таблица 1.15

Значения коэффициента k , учитывающего затенение противостоящими зданиями

L/H	0,5	1	1,5	2	3 и более
k	1,7	1,4	1,2	1,1	1

Примечание. L — расстояние между рассматриваемыми и противостоящими зданиями; H — высота расположения карниза противостоящего здания над подоконником рассматриваемого помещения.

При применении в помещениях зенитных фонарей в виде отдельных светопроемов в покрытии, перекрытых прозрачными штампованными оболочками из органического стекла или стеклопластика, необходимое их количество в помещении определяется по формуле

$$N = \frac{e'' S_{\text{п}} \tau_{\text{ф}}}{100 S_0 r_2 \tau_0}$$

где e'' — нормированное значение среднего к. е. о. в ‰;

$S_{\text{п}}$ — площадь пола помещения;

S_0 — то же, одного светопроема;

$\tau_{\text{ф}}$ — световая характеристика фонаря (численные значения см. в табл. 1.14);

τ_0 — общий коэффициент светопропускания фонаря;

r_2 — коэффициент, учитывающий отраженный свет от потолка и пола.

Одним из распространенных методов расчета естественного освещения является графический метод А. М. Данилюка, основанный на законе проекции телесного угла. Общий вид графиков приводится на л. IV, рис. 3. Порядок расчета к. е. о. графиками Данилюка приводится ниже. Расчет сводится к определению площади участка неба, видимого через световой проем из данной точки помещения; его площадь определяется произведением количества лучей (e_1), проходящих через вертикальный разрез светового проема, на количество лучей (e_{11}), проходящих через горизонталь-

ный разрез светового проема; поэтому значение коэффициента естественной освещенности в данной точке будет $e = e_1 e_{11}$.

Для расчета к. е. о. необходимо иметь поперечный разрез и план помещения для окон или продольный разрез помещения для фонарей. Расчет несколько упрощается, если оба чертежа выполнены в одном масштабе. Масштаб чертежей безразличен. Порядок пользования графиком следующий. График первый накладывается на поперечный разрез помещения (разрез обычно берется посередине помещения) л. VI, рис. 4. Полюс графика O совмещается с точкой, в которой определяется к. е. о., а нижняя линия графика совмещается со следом рабочей плоскости. Количество лучей, проходящих через световой проем и отсчитываемых по графику, определяет значение e_1 . На примере, приведенном на л. VI, рис. 4, $e_1 = 0,06$ (6 лучей из 100 на графике). Заметим, что через центр окна (точка C) проходит окружность № 35.

График II накладывается на план (или продольный разрез при верхнем освещении). Нижняя линия графика располагается параллельно плоскости светопроема на расстоянии d , равном длине среднего луча CM ; это — расстояние на поперечном разрезе от центра светопроема C до точки M , в которой определяется к. е. о. При наложении графика II на план (или продольный разрез) полюс графика O совмещается с точкой в месте пересечения поперечного разреза с линией, параллельной плоскости светового проема на расстоянии d от его центра.

Затем отсчитывается количество лучей, падающих через световой проем в плане (или продольном разрезе) помещения; в примере на л. VI, рис. 4, $e_{11} = 0,60$ (60 лучей из 100 на графике).

Таким образом, значение к. е. о. в точке M без учета светопотерь будет $e = e_1 e_{11} = 0,06 \times 0,60 = 0,036 = 3,6\%$.

Найденное таким образом по графикам Данилюка значение e определяет коэффициент неба e_n^p . Для определения расчетного значения e_n от прямого света неба с учетом светопотерь и неравномерной яркости неба пользуются формулой

$$e_n = e_n^p \tau_0 q$$

где τ_0 — общий коэффициент светопропускания (берется по табл. 1.9);

q — коэффициент, учитывающий неравномерную яркость неба (табл. 1.8).

Результаты расчета значений к. е. о. в отдельных точках характерного разреза записывают в следующем порядке:

Точки по раз- резу	e_1	q	e_{II}	$100 e_1 \cdot e_{II} \cdot q$	τ_0	$e_n = 100 e_1 e_{II} q \tau_0$
М	0,06	0,8	0,60	2,88%	0,4	1,15%

Затем вычисленные таким образом значения e_n откладывают на поперечном разрезе в произвольном масштабе (например, $1^0/0 = 1 \text{ см}$) и, соединяя полученные точки, получают кривую, характеризующую освещение помещения прямым светом неба.

После этого по формулам 1.52, 1.54 и 1.55 определяют составляющие отраженного света e_0 , e_2 и e_n . Вычисленные значения e_0 , e_2 и e_n откладывают от кривой, характеризующей освещение помещения прямым светом неба; получают окончательную кривую значений к. е. о. Эту кривую сравнивают с допускаемым (нормированным) значением к. е. о. и определяют зону, в которой требование норм удовлетворяется.

Значение e_{II} можно определять также следующим образом. На графике II (рис. 3,б) находим параллель № 35; затем центральная линия светопроема в плане для окон (или продольном разрезе — для фонарей) совмещается с параллелью № 35, а центр графика II—О с точкой пересечения поперечного разреза и параллели № 35; после этого отсчитывается количество лучей, проходящих через световой проем.

В случае, если поперечный разрез выполнен в масштабе 1/100, а план (или продольный разрез) в масштабе 1/200, необходимо при применении графика II брать номер параллели не 35, а $35 \frac{100}{200} \approx 17$, т. е. № 17.

Если рабочая плоскость является наклонной, то график I накладывается на поперечный разрез так, что основание графика совмещается со следом рабочей плоскости; в остальном расчет проводится так же, как и в случае горизонтальной рабочей плоскости.

При расчете к. е. о. от светопроемов круглой, полукруглой или эллиптической формы такие светопроемы следует заменять светопроемами прямоугольной формы одинаковой площади, для чего светопроем описывают прямоугольником и затем стороны этого прямоугольника уменьшают, умножая на 0,885.

3. Проектирование естественного освещения

Основная задача проектирования естественного освещения зданий заключается в выборе формы, размеров и расположения световых проемов, обеспечивающих световой комфорт в помещении. Наряду с надлежащим уровнем освещенности решающую роль в соз-

дании рационального освещения помещения играет качество освещения.

Под качеством естественного освещения помещений понимают совокупность мер, способствующих созданию в помещениях комфортных условий зрительной работы. Комфортные условия зрительной работы характеризуются не только хорошей видимостью и быстротой различения рассматриваемых предметов, но и наименьшим утомлением глаза. К требованиям, обеспечивающим высокое качество естественного освещения в помещениях, относятся:

- а) равномерность освещения;
- б) направление световых потоков, падающих на рабочие поверхности;
- в) устранение из поля зрения работающих слепящего действия прямых и отраженных лучей солнца, проникающих в помещение через окна и фонари;
- г) яркость окружающего пространства, определяемая уровнем освещенности и цветовой отделкой интерьера, технологического оборудования и инвентаря.

В помещениях с высокими требованиями к равномерности освещения (например, в цехах с поточным и конвейерным производством, в конструкторских бюро) при верхнем или комбинированном их освещении регламентируется отношение минимального к. е. о. к максимальному (в пределах помещения или пролета); численное значение этого отношения должно быть не менее 0,3.

В других помещениях (например, в спортивных, демонстрационных, музейных) наилучшая видимость рассматриваемых предметов обеспечивается, наоборот, при неравномерном освещении помещения: максимальном на арене (или в выставочной зоне) и минимальном в зоне нахождения зрителей. В этом случае отношение к. е. о. в зоне нахождения зрителя к к. е. о. на арене или в выставочной зоне должно быть менее единицы.

В ряде помещений (например, в производственных цехах) качество условий зрительной работы определяется направленностью света, падающего на рабочие поверхности; в этих случаях предпочтение следует отдавать одностороннему освещению (боковому или верхнему). При этом надо выбирать такое расположение светопроемов, при котором рабочие поверхности не будут затеняться частями оборудования и корпусом работающих.

Для создания комфортных условий зрительной работы в помещениях архитектору необходимо внимательно проверять соотношения яркостей между поверхностями, попадающими в поле зрения работающего. Высокая яркость светопроема (особенно не защищенного от прямых лучей солнца), оборудования, стен нередко является причиной так называемого зрительного дискомфорта. Практика показывает, что рабочие поверхности, на которых сосредоточивается внимание наблюдателей, должны быть светлее, чем поверхности, окружающие их. Количественные соотношения между яркостью рабочих поверхностей и яркостью окружающих человека стен, потолка и оборудования различны для разных помещений.

По данным американских норм освещения, распределение яркости в рабочих помещениях характеризуется следующими соотношениями между ними:

Соотношение яркости поверхностей	$\frac{B_{\text{п}}}{B_{\text{р}}}$	$\frac{B_{\text{ст}}}{B_{\text{р}}}$	$\frac{B_{\text{ст}}}{B_{\text{о}}}$	$\frac{B_{\text{пт}}}{B_{\text{о}}}$	$\frac{B_{\text{об}}}{B_{\text{р}}}$
Численное значение отношений	< 40 или $> \frac{1}{40}$	$> \frac{1}{5}$	$> \frac{1}{5}$	$> \frac{1}{20}$	$> \frac{1}{20}$

где $B_{\text{о}}$ — яркость светового проема;
 $B_{\text{р}}$ — то же, рабочей поверхности;
 $B_{\text{п}}$ — » пола;
 $B_{\text{ст}}$ — » стен;
 $B_{\text{пт}}$ — » потолка;
 $B_{\text{об}}$ — » оборудования.

Зная освещенности поверхностей и их коэффициенты отражения, нетрудно по формуле 1.25 найти и их яркости. При выборе светопроема обычно исходят из яркости видимого через него неба, яркость которого при наличии облачности колеблется в пределах 1500—1000 нт.

Яркость интерьера создается светом, отраженным от внутренних поверхностей, а также от оборудования и инвентаря; поэтому светлая отделка стен, потолка, пола представляет первое условие создания светового комфорта в помещении; второе условие — отсутствие резкого контраста между яркостью световых проемов и глухих частей ограждения (простенков, покрытия); третье — защита рабочей зоны помещения от прямых лучей солнца.

Первые два условия создания светового комфорта в помещениях обеспечиваются рациональным освещением и цветовой отделкой интерьера, оборудования, инвентаря. Наряду с достаточно высокой отражательной способностью цветовой отделка интерьера должна способствовать меньшей напряженности

зрения, повышению жизненного тонуса человека. Цветовую отделку интерьеров выбирают с учетом действительных условий зрительной работы (в частности, цвета рабочей поверхности), а также климата местности, микроклимата помещения, архитектурных требований.

Защита помещений от прямых лучей солнца обеспечивается совокупностью архитектурно-планировочных и конструктивных мер.

А. Производственные здания

Современные производственные здания блокированного типа характеризуются большой протяженностью и универсальностью использования помещений. Естественное освещение таких зданий может быть обеспечено применением систем верхнего или комбинированного освещения. Для верхнего освещения обычно применяются фонари разного типа.

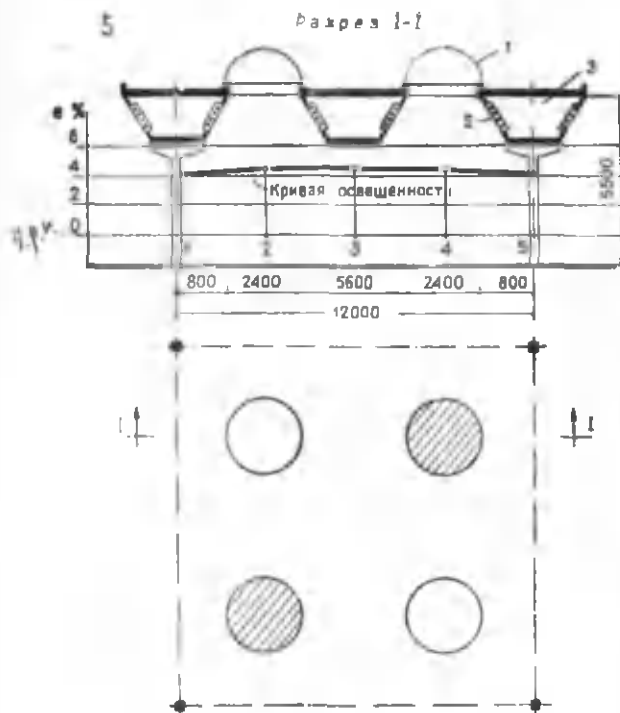
Схемы некоторых фонарей приводятся на л. VII, рис. 1—5.

Опыт эксплуатации производственных зданий с фонарями в разных климатических районах показал, что условия их эксплуатации во многом зависят от надлежащего учета архитектором особенностей климата местности, в которой строится здание. Практически целесообразно:

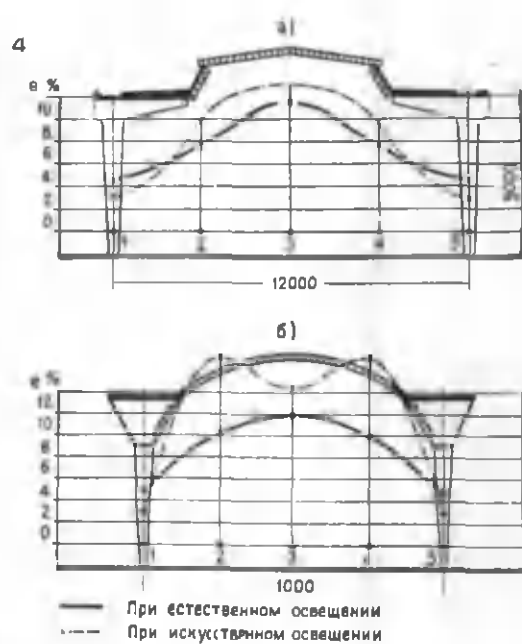
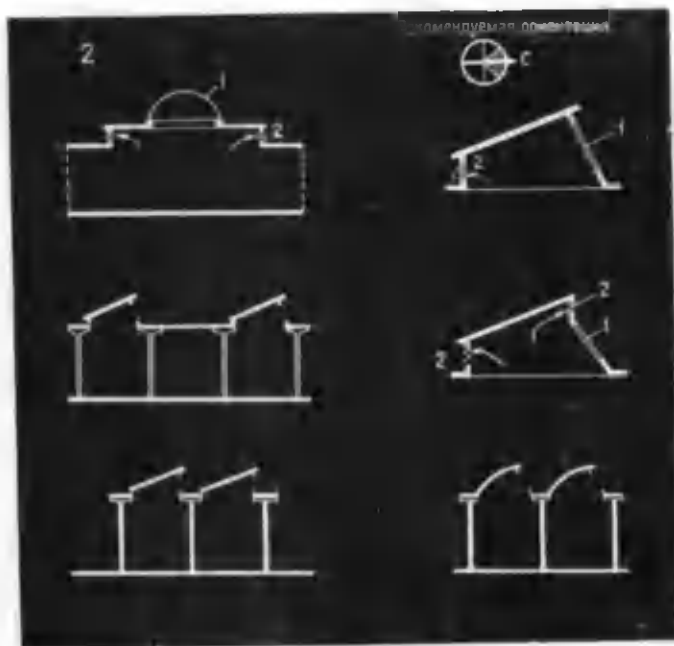
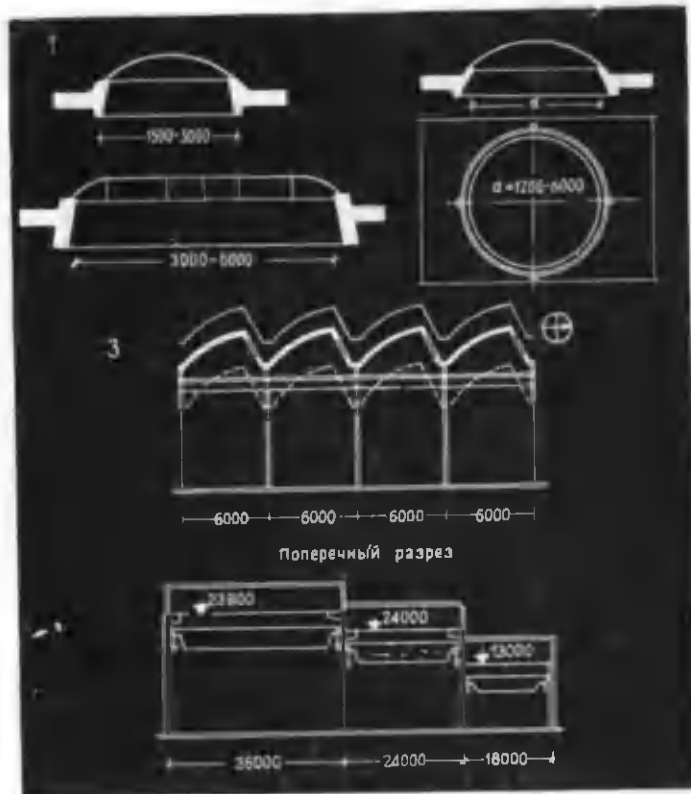
в северных районах Союза, отличающихся большими осадками, сильными ветрами и малыми уровнями наружной освещенности, применять наиболее спокойный профиль покрытий, который не создает препятствий передвижению переносимого ветром снега. В этих условиях предпочтение следует отдавать штучным фонарям зенитного типа, перекрытым светопрозрачными оболочками; эти фонари обладают высокой световой активностью¹, малой воздухопроницаемостью, хорошими теплозащитными свойствами и аэродинамическими характеристиками, не способствующими заносу фонарей снегом. Схемы таких фонарей приводятся на л. VII, рис. 1.

В центральных районах Союза могут применяться фонари различных типов в зависимости от требований производства. Однако в

¹ Световая активность фонарей характеризуется необходимой площадью для обеспечения среднего к. е. о., равного 1%.
 31



- 1 Штампованное органическое стекло полусферической или иной формы
- 2 Светящиеся панели с люминесцентными лампами
- 3 железобетонный короб (вентиляционный)



Лист VII СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ВЕРХНЕГО ОСВЕЩЕНИЯ

Рис. 1. Зенитные фонари из органического стекла и стеклопластика прямоугольной и круглой в плане формы. Изготавливаются с учетом строительного модуля и могут быть взаимозаменяемыми с глухими плитами покрытия

Рис. 2. Различные виды фонарей и шедов, применяемых в разных странах с учетом особенностей климата
1 — глухое остекление; 2 — створное остекление или жалюзи

Рис. 3. Использование пространственной жесткости шедов для перекрытия больших пролетов (завод электрооборудования в Швейцарии)

Рис. 4. Приемы применения стекложелезобетонных покрытий в виде

а — крупных панелей, укладываемых между железобетонными ребрами; б — сводчатых покрытий. Осветительные приборы встроенного типа дополняют и продолжают естественное освещение с наступлением сумерек

Рис. 5. Схема возможного расположения зенитных фонарей в типовой секции. Заштрихованные фонари могут быть заменены осветительными плафонами встроенного типа

районах с небольшими снегообразованиями предпочтение надо отдавать фонарям с наклонным остеклением и штучным зенитным фонарям, перекрытым легкими светопрозрачными ограждениями из органического стекла и стеклопластиков. Форма прозрачных колпаков в зенитных фонарях может быть конусообразной, полусферической, овальной и др. Световая активность штучных фонарей зенитного типа (размеры которых увязываются со строительным модулем) в большой степени зависит от пропорций фонаря, высоты и отделки его боковых стенок и сорта прозрачного материала.

В южных районах предпочтение следует отдавать фонарям шедового типа, хорошо защищающим помещение от теплового и светового действия инсоляции (л. VII, рис. 2). При этом пространственно жесткую форму шедов целесообразно использовать для перекрытия больших пролетов (л. VII, рис. 3).

В этих условиях целесообразно применять также светопроемы в покрытиях, заполняемые стекложелезобетонными панелями, волнистым стеклопластиком.

В тропических и субтропических районах предпочтение надо отдавать шедовым фонарям с устройством в верхней части светопроемов жалюзийных решеток для проветривания помещения.

При расположении светопроемов в покрытии следует учитывать наиболее благоприятное для зрительной работы направление света, не сопровождающееся затенением рабочих поверхностей оборудованием и корпусом рабочего. Выбранное направление светового потока целесообразно сохранять и при искусственном освещении (л. VII, рис. 4).

Световая активность фонарей зависит в основном от наклона и конструкции остекления. В табл. I.16 приводятся показатели световой активности различных фонарей, которая оценивается необходимой площадью светопроема для обеспечения среднего к. е. о., равного 10%.

Для обеспечения нормируемой равномерности освещения необходимо, чтобы отношение расстояния между фонарями к высоте помещения при всех типах фонарей (кроме зенитного) было не более 4; при зенитных фонарях это отношение должно быть не более 2,5.

Расположение световых проемов в цехах диктуется технологическим процессом: так, в

Таблица I.16
Световая активность фонарей

Типы фонарей	Коэффициент, учитывающий световую активность фонаря
Двусторонние фонари:	
с вертикальным остеклением	3,5
с наклонным под $\angle 60^\circ$ остеклением	2,2
Односторонние фонари (шеды):	
с вертикальным остеклением	3,0
с наклонным под $\angle 60^\circ$ остеклением	1,8
Зенитные светопроемы протяженного вида	1,5

помещениях с поточным производством или конвейером световой проем целесообразно располагать соответственно движению потоков или конвейера: в помещениях с однотипным оборудованием, расположенным в ряд (например, в прядильных и ткацких цехах), светопроемы целесообразно располагать в направлении, перпендикулярном к рядам станков для лучшего освещения проходов. В производственных помещениях универсального вида при свободном расположении оборудования целесообразно применять штучные фонари, размеры которых согласуются с типовыми размерами крупных панелей, из которых монтируется покрытие (л. VII, рис. 5).

При проектировании светопроемов необходимо предусматривать подходы к остеклению для его регулярной очистки при помощи передвижных тележек, подвесных люлек, а также передвижных консольного типа подъемников.

При выборе типов и расположении окон следует иметь в виду, что их световая активность зависит от формы окон и расположения по высоте помещения. Наибольшей световой активностью обладают горизонтальные окна, расположенные в верхней части стены; эта форма окон обеспечивает наряду с повышением к. е. о. в наиболее удаленных точках поме-

Допустимая глубина заложения $l = B/h_1$

Отношение ширины простенков b к ширине окна a	Разряды работ																	
	при однократных переплетах						при двойных переплетах и стеклоблоках						при двойном переплете					
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
$b/a=0$ (ленточное окно)	3	4	4,5	5,5	7	9	2	2,5	3,5	4	5,5	7	2,5	3	4	5	6,5	8
0,25	2,5	3,5	4	5	6,5	8,5	1,5	2	3	3,5	5	6,5	2	2,5	3,5	4,5	6	7,5
0,5	2,1	3,1	3,6	4,6	6,1	8,1	1,1	1,6	2,6	3,1	2,6	6,1	1,6	2,1	3,1	4,1	5,6	7,1
0,75	1,7	2,7	3,2	4,2	5,7	7,7	0,7	1,2	2,2	2,7	2,2	5,7	1,2	1,7	2,7	3,7	5,2	6,7
1	1,3	2,3	2,8	3,8	5,3	7,3	—	0,8	1,8	2,3	1,8	5,3	0,8	1,3	2,3	3,3	4,8	6,3

Примечание. Разбивка помещения по условиям зрительной работы взята согласно СНиП II-A.8-62.

щения более равномерное распределение светового потока в помещении. Расположением окон по высоте помещения определяется допускаемая глубина заложения¹, значения которой для помещений с разными разрядами работ приводятся в табл. 1.17.

¹ Глубина заложения представляет отношение глубины помещения B , считая от наружного края стены, к высоте верхнего края окна над уровнем рабочей плоскости (h_1).

Б. Общественные здания

Приемы естественного освещения помещений определяются их назначением. Классификация помещений общественных зданий в зависимости от требований к освещению приводится в табл. 1.18.

Таблица 1.18

к освещению
Классификация общественных зданий по требованию

Группы зданий	Требования к освещению основных помещений	Примеры
I	Требования к освещению интерьера определяются в основном идейным и художественным замыслом зодчего	Здания мемориальной архитектуры
II	Требования высокого уровня освещения в отдельных зонах помещения сочетаются с требуемой неравномерностью освещения	Выставочные залы, крытые стадионы, картинные галереи
III	Требования достаточного уровня освещения сочетаются с требуемой равномерностью освещения	Школы, техникумы, вузы, конструкторские бюро
IV	Требования к уровню освещения определяются в основном гигиеническими соображениями	Лечебные здания, детские сады и ясли, санатории, жилые дома

Естественное освещение общественных зданий, относимых к первой группе, неразрывно связано с архитектурно-художественным решением интерьера. Разнообразие приемов естественного освещения в зданиях, относимых к этой группе, можно проследить на архитектурных памятниках прошлого. Используя свет для акцентирования идейного и художественного замыслов, зодчие прошлого достигали большого эффекта восприятия интерьеров. Так, в древнеегипетском храме в Карнаке беспредельность восприятия внутреннего пространства создавалась резким падением освещенности от центрального нефа к боковым и от входа в гипостильный зал к святилищу.

В римском Пантеоне свет, попадающий через отверстие в вершине купола (л. VIII, рис. 1), создает полусумрачное равномерное освещение, усиливающее впечатление сосредоточенности и вечного покоя. Глубокая пластическая обработка внутренней поверхности купола, слабо читаемая благодаря мягкому светотеневому контрасту, усиливает впечатление грандиозности внутреннего пространства. Скользящие по поверхности купола лучи солнца, проникающие через зенитное отверстие, подчеркивают царящий в помещении полумрак и покой. Не менее интересным является акцентирование светом центрального нефа и алтарной части собора св. Петра в Риме. Расположенные в нижней части вытянутого купола окна хорошо освещают алтарь, придавая куполу необыкновенную пространственность (л. VIII, рис. 2).

Много примеров умелого использования света для создания определенной иллюзии можно найти в древней и классической русской архитектуре.

К числу общественных зданий второй группы (табл. 1.18) относятся картинные галереи, музеи, выставочные павильоны и др. Каждое из этих зданий имеет свои специфические тре-

бования к освещению. Однако для большинства помещений в этих зданиях характерно стремление лучшим образом выявить светом художественные и другие качества экспонатов. Это может быть достигнуто при неравномерном распределении светового потока в помещении.

Хорошая видимость экспонатов обеспечивается в том случае, когда выставочная зона экспонатов будет обладать наибольшей яркостью. Поэтому максимальная освещенность в экспозиционных залах должна быть в зоне нахождения экспонатов, а минимальная — в местах расположения посетителей.

Количественно соотношение между освещенностью экспонатов и освещенностью помещений удобно оценивать следующими критериями:

а) отношением освещенности на плоскости экспоната E_p к освещенности на вертикальной плоскости, проходящей через глаз наблюдателя E_a ; это отношение должно быть больше единицы;

б) отношением освещенности на горизонтальной поверхности в зале E_r к освещенности на поверхности экспоната E_p ; это отношение должно быть меньше единицы.

Для обеспечения хорошей видимости объемных экспонатов следует отдавать предпочтение направленному свету, в наилучшей степени выявляющему форму и пластические свойства экспонатов. Для этой цели целесообразно применять верхнее освещение (через фонари), имитирующее по контрасту и распределению светотени условия естественного освещения под открытым небом.

Поэтому для залов с объемными экспонатами целесообразно использовать наряду с диффузным прямое солнечное освещение.

Для освещения залов с плоскими экспонатами следует отдавать предпочтение системам верхнего, скрытого от посетителей, освещения. Рекомендуемые схемы верхнего освещения картинных галерей приводятся на л. VIII, рис. 3.

Благоприятных условий видимости плоских экспонатов можно достичь в залах с боковым освещением при кабинетной планировке здания. Такие кабинеты площадью 70—150 м² создают хорошие условия для обозрения экспонатов при наличии скошенных стен (л. VIII, рис. 4). Достоинство такой планировки экспозиционных помещений — в возможности сосредоточенного обозрения их при наличии небольшого числа посетителей, а также в том, что произведения искусства можно экспонировать в отдельных кабинетах, архитектура которых соответствует эпохе

создания этих произведений. Рекомендуемые пропорции кабинетов, размеры и расположение в нем окна приводятся на л. VIII, рис. 5.

При проектировании естественного освещения экспозиционных залов различного назначения можно пользоваться нормами, приведенными в табл. I.19.

Таблица I.19

Рекомендуемые нормы естественного освещения в зоне расположения экспонатов

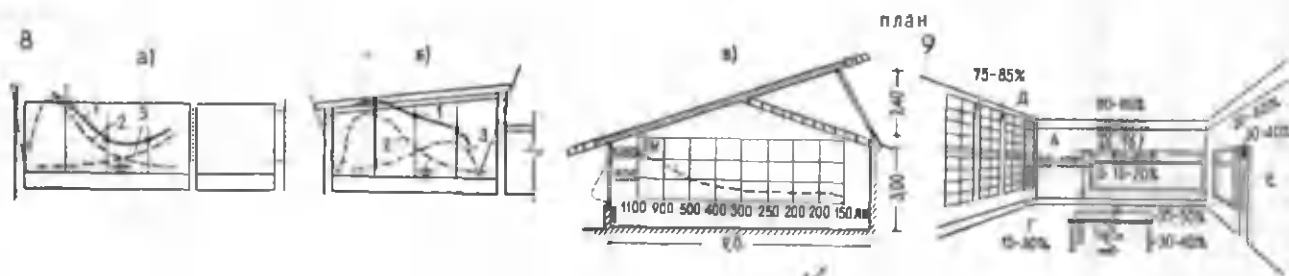
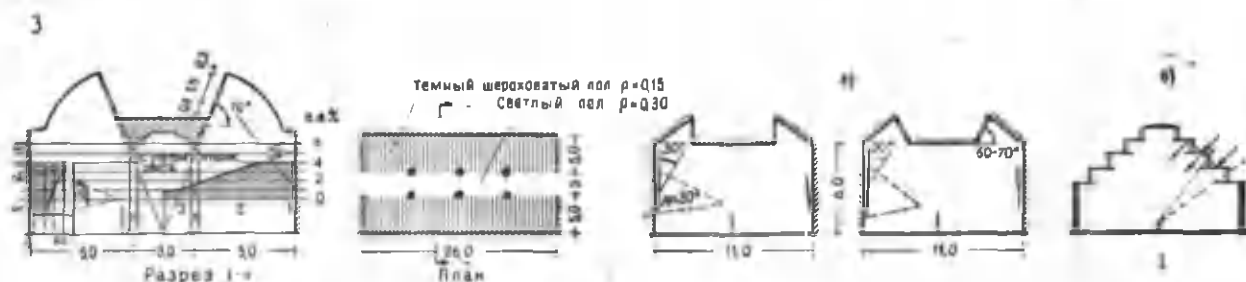
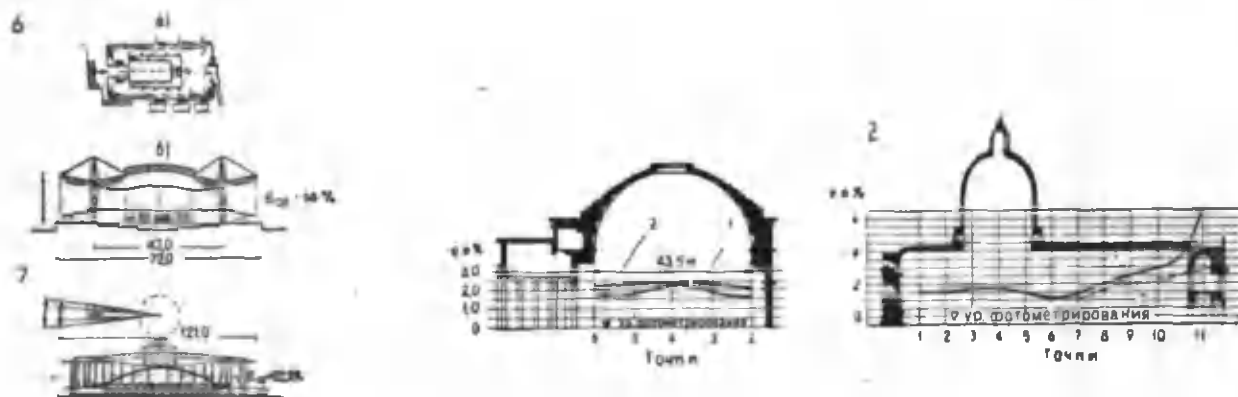
Демонстрационные залы	Рекомендуемые значения к.е.о. в %	
	среднее значение к.е.о. в зоне расположения экспонатов E_{cp}	на поверхности экспонатов $E_{мин}$
Панорамы	5	2
Картинные галереи и музеи		
Залы:		
с монументальной и станковой живописью, графиками, тканями и т. п.	5	1,5
скульптуры, архитектуры, мебели	3	—
демонстрационные залы машин, оборудования и т. п.	5	—

Особую группу общественных зданий представляют выставочные павильоны на международных выставках, в которых демонстрируются достижения различных государств в области культуры, науки и техники. Из построенных за последние годы наибольший интерес представляют павильоны СССР и США на Всемирной выставке в Брюсселе в 1958 г.

Павильон СССР выделялся лаконичностью и простотой архитектурного решения (л. VIII, рис. 6). Ограниченный сплошь остекленными стенами из чередующегося зеркального и светорассеивающего стекла интерьер павильона впечатлял посетителей единством пространства и легкостью несущих металлических конструкций, подвешенных к колоннам. Естественное освещение павильона осуществлялось через сплошное остекление стен и через фонари, расположенные в средней части помещения. Принятая комбинированная система освещения создавала в помещении равномерное, интенсивное освещение. Однако такое освещение не обеспечивало хорошей видимости объемных экспонатов.

Вместе с тем однозначное решение задачи естественного освещения не акцентирует архитектурную композицию интерьера.

Павильон США на той же выставке был решен в виде круга диаметром 102 м (л. VIII, рис. 7). Естественное освещение павильона



осуществлялось через наружные стены из листов органического стекла, расположенных за бронзовой решеткой, через полупрозрачное светорассеивающее покрытие из пористого пенопласта и, наконец, через открытое круглое отверстие в зенитной части покрытия. Выбранное решение светопроемов создавало в

помещении неравномерное освещение с максимумом освещенности в центре павильона. Высокий уровень освещенности в центре помещения подчеркивал центрическую композицию павильона. Вместе с этим мощный световой поток, проникающий через открытый к небу барабан диаметром 20 м, четко выделял

ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Рис. 1. Сопоставление расчетной и измеренной (на модели) кривых, характеризующих интенсивность и распределение света в интерьере пантеона в Риме
1 — расчетная кривая значений к. е. о.; 2 — измеренные значения к. е. о.

Рис. 2. Кривые, характеризующие распределение света внутри помещения собора св. Петра в Риме по продольному разрезу

1 — при открытой двери; 2 — при закрытой двери

Рис. 3. Рекомендуемые приемы освещения демонстрационных залов (картинных галерей, музеев и др.)
а — картинные галереи; б — музей для объемных экспонатов и выставок в южных, богатых солнцем районах

Рис. 4. Схемы плана кабинетного типа планировки музеев и картинных галерей

Рис. 5. Определение и построение выставочной зоны с благоприятными условиями видимости

Рис. 6. План и поперечный разрез павильона СССР на Всемирной выставке в Брюсселе (1958 г.).

Кривая на разрезе характеризует весьма интенсивное и равномерное освещение павильона

Рис. 7. Поперечный разрез павильона США на Всемирной выставке в Брюсселе (1958 г.).

Кривая характеризует весьма неравномерное освещение зала, подчеркивая его композиционную ось и создавая иллюзию большой пространственности

Рис. 8. Приемы создания в классах равномерного освещения на всей его площади

а — в многостажных зданиях школ: 1 — суммарная; 2 — от окна в наружной стене; 3 — от окна второго света; б — а — в одноэтажных: 1 — суммарная; 2 — от окна в наружной стене; 3 — от окна в перепаде высот

Рис. 9. Рекомендуемые коэффициенты отражения внутренних поверхностей в классах

А — торцовая стена; Б — доска; В — стол; Г — пол; Д — потолок; Е — продольная стена

светом часть водного бассейна с площадкой для демонстрации мод.

Убывающая к периферии павильона освещенность создавала у посетителей иллюзию очень большого внутреннего пространства. Вместе с этим создавалась направленность света, способствовавшая лучшему выявлению качества объемных экспонатов.

В. Школы и аудитории

К освещению школ и учебных заведений предъявляются весьма высокие требования. Это объясняется условиями напряженной зрительной работы учащихся и необходимостью обеспечить высокую гигиену помещений. Опыт показывает, что недостаточное освещение классов и аудиторий наносит серьезный ущерб зрению учащихся.

Стремление создавать в основных помещениях наиболее интенсивное и равномерное освещение находит выражение в поисках новых предложений у нас и за рубежом; некоторые примеры таких решений приводятся на л. VIII, рис. 8.

Проектирование освещения учебных помещений имеет в виду создание в них прежде всего комфортных условий зрительной работы, характеризующихся наименьшим напряжением, а следовательно, и утомлением глаз учащихся. Наряду с хорошим решением функциональной стороны освещение и цветовая отделка помещений должны отвечать эстетическим и гигиеническим требованиям, оказывающим на учащихся большое психологическое действие.

Комфортные условия зрительной работы в классах и аудиториях создаются совокупностью следующих мер:

а) высоким уровнем освещенности парт и столов;

б) равномерностью освещения помещения;

в) правильным соотношением яркости между тетрадью и столом, а также между доской и стеной, на которой она находится;

г) надлежащим отношением яркости тетради и доски к яркости окружающих учащегося стен и потолка.

Высокий уровень освещения парт и столов обеспечивается формой, размерами и расположением светопроемов, а также светлотой внутренней отделки и конструкцией остекления. При выборе формы окон следует отдавать предпочтение горизонтальным окнам при повышенном подоконнике (1,2—1,5 м). Такие окна обеспечивают равномерное освещение по длине помещения и улучшают равномерность по его глубине.

В ряде стран (Франция, Бельгия, Канада, Италия, Румыния) существует обязательное правило обеспечения естественного освещения с левой стороны от учащегося. В этом случае максимальная глубина помещений составляет 7 м.

Более радикальным средством создания в учебных помещениях равномерного освещения является применение комбинированного или двустороннего освещения, схемы которых приводятся на л. VIII, рис. А, а—б.

Большое влияние на самочувствие учащихся оказывает яркость попадающих в поле зрения поверхностей. Рядом исследователей рекомендуются следующие соотношения яркостей поверхностей, находящихся в поле зрения учащихся:

а) между тетрадью и партой, а также между доской и стеной 3 : 1;

б) между тетрадью и поверхностью стен и потолка 10 : 1;

в) между окном и простенками 20 : 1.

Такие соотношения можно обеспечить при светлой отделке потолка, стен, пола и при светлой мебели. Рекомендуемые рядом исследователей

дователей коэффициенты отражения внутренних поверхностей и мебели в классах приводятся на л. VIII, рис. 9.

Яркость поверхностей потолка и стен в классах зависит от их освещенности и коэффициента отражения. Поэтому наряду со светлой отделкой целесообразно применять конструкции остекления, обладающие не только высоким коэффициентом светопропускания, но и светонаправляющим действием. Такими свойствами — рассеивать и преломлять свет в направлении к потолку и к противоположной стене помещения — обладают, например, пустотелые стеклянные блоки и призматическое стекло и в меньшей степени стекло-термолюкс.

Для предупреждения в учебных помещениях зрительного дискомфорта, возникающего при проникании в учебные часы прямых лучей солнца, необходимо при проектировании зданий предусматривать мобильные или стационарные солнцезащитные устройства. Эти устройства в ряде случаев можно использовать и как средство регулирования освещения и яркости внутренних поверхностей. К ним относятся жалюзи (из дерева, пластмассы, алюминия), шторы, пустотелые стеклянные блоки и др. В южных и тропических районах необходимы более радикальные меры борьбы с прямой солнечной радиацией в виде стационарных козырьков, вертикальных экранов, соотобразных конструкций и т. д. (см. главу четвертую).

Г. Жилые здания

В жилых зданиях требования к освещению определяются в основном гигиеническими соображениями. Проведенные исследования показали, что уровень освещения жилых помещений зависит от следующих факторов:

- а) от ширины разрыва между зданиями;
- б) от формы и пропорций жилых комнат;
- в) от формы и конструкции окон;
- г) от расположения и пропорций балконов и лоджий.

Наименее благоприятной в световом отношении является периметральная застройка кварталов, при которой образующие улицу здания взаимно затеняют друг друга. Расчеты показывают, что освещение в глубине жилых помещений резко уменьшается при ширине улиц меньшей, чем тройная высота зданий.

Наметившийся за последние годы переход к свободной застройке микрорайонов и, в частности, расположение зданий торцами к улице позволяют осуществить требование увеличения расстояния между зданиями и уменьшить затеняющее действие противостоящих зданий.

Весьма неблагоприятными в светотехническом отношении являются комнаты с соотношением сторон 1:2, характеризующиеся большой глубиной (до 6 м). Опыты показывают, что в таких помещениях практически невозможно обеспечить нормируемое значение к. е. о. даже при сплошном остеклении стены. Особенно неблагоприятные условия в таких помещениях создаются при пониженной их высоте (2,5 м).

Наиболее благоприятной в световом отношении являются горизонтальная и квадратная формы окон с двоянными переплетами шведского типа и большими размерами стекол.

Балконы, веранды и лоджии в жилых зданиях могут существенно уменьшать освещение жилых помещений; поэтому при выборе вариантов этих деталей надо отдавать предпочтение тем из них, которые не ухудшают условий освещения жилых комнат.

Для освещения вспомогательных помещений в жилых зданиях целесообразно использовать второй свет, осуществляемый через прозрачные стены лестничной клетки и перегородки. Для этого целесообразно применять стены из пустотелых стеклянных блоков, линз, а также из стеклянных швеллеров.

Для улучшения естественного освещения жилых помещений необходимо:

применять новые конструкции переплетов, а именно: спаренные деревянные, алюминиевые, одинарные со стеклопакетами, переплеты без горбылей с цельным толстым стеклом и др.;

не допускать в жилых помещениях темной отделки стен; средневзвешенный коэффициент отражения внутренних поверхностей (стен и потолка) должен быть не менее 0,5;

применять встроенную мебель, обеспечивающую доступ света в каждый участок жилой комнаты;

применять свободную застройку микрорайонов и разрывы между длинными фасадами зданий не менее трехкратной их высоты.

ИНСОЛЯЦИЯ¹ ЗДАНИЙ

При разработке проектов жилой застройки промышленных предприятий и общественных зданий перед архитектором в области инсоляции возникают двоякого рода задачи:

первая связана с использованием солнечного света для освещения и оздоровительного действия ультрафиолетовых излучений (бактерицидного и эритемного²), повышающего гигиенический уровень помещений;

вторая связана с отрицательным действием солнечного света, проявляющегося в разрушительном действии солнца на некоторые материалы (ткани, бумагу, печать и др.), перегреве помещений в летние месяцы, слепящем действии при попадании солнечных лучей в глаз человека.

Продолжительность инсоляции какой-либо точки на территории или в помещении зависит от затенения, создаваемого окружающими зданиями.

Стремление наших архитекторов наилучшим образом использовать драгоценные дары солнца находит свое выражение в регламентировании продолжительности инсоляции в помещениях разного назначения, которая является основным критерием оценки достаточности инсоляции. В частности, для жилых помещений рекомендуемая фактическая продолжительность инсоляции составляет не менее 3 ч в сутки (весной, летом, осенью).

Необходимая продолжительность инсоляции обеспечивается обычно архитектурно-пла-

нировочными средствами на основе нормативных требований, изложенных в «Строительных нормах и правилах» (СНиП). В этих нормах для различных климатических районов приведены секторы горизонта, неблагоприятные по ориентации, и применительно к жилым зданиям указывается, сколько комнат в квартирах разных типов допускается ориентировать на эти секторы; наряду с этим в нормах регламентируются минимально допускаемые разрывы между зданиями. Однако эти нормы в ряде практических случаев не обеспечивают необходимой продолжительности инсоляции жилых зданий; это особенно нетерпимо в средних и северных районах, где жилые помещения должны получать возможно большее количество инсоляции.

Основные требования к инсоляции зданий (жилых, лечебных, детских учреждений) заключаются в том, чтобы солнце проникало в помещение в любое время года.

Для оценки продолжительности инсоляции пользуются горизонтальной системой координат:

высотой солнца или возвышением над горизонтом ($h_{\odot}$);

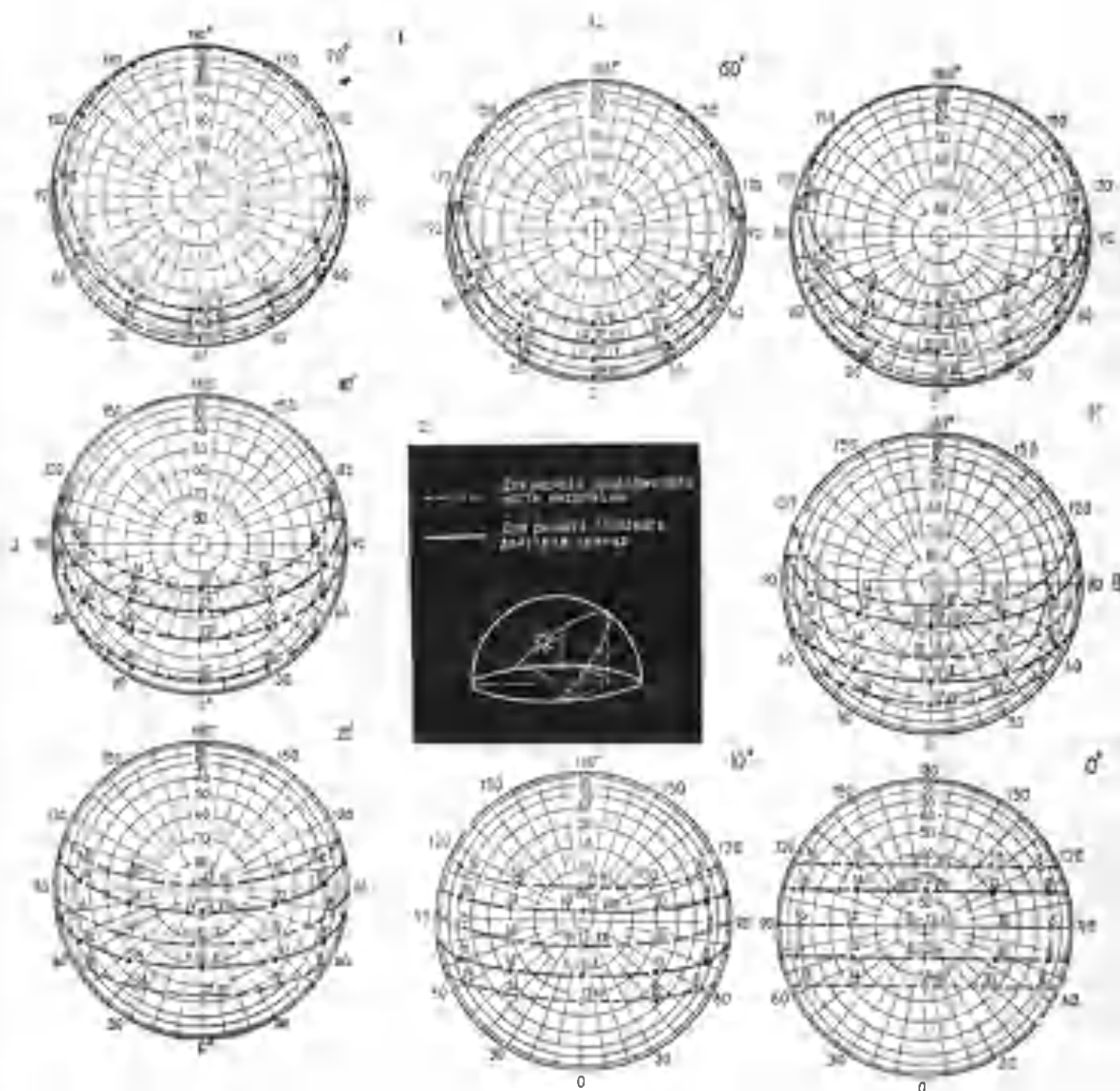
азимутом солнца ($A_{\odot}$), отсчитываемым на круге горизонта по ходу часовой стрелки от точки севера или от точки юга. В этом случае азимут изменяется в пределах от 0 до 180°.

Координаты солнца для различных географической широты местности, месяца и часа дня определяют по графикам на л. IX, рис. 1. Пользование координатами солнца позволяет представить небо в виде полусферы, опирающейся на горизонт с координатной сеткой, в виде:

концентрических окружностей, описанных

¹ Инсоляция — облучение поверхности прямыми лучами солнца.

² Бактерицидные излучения спектра ультрафиолетовой радиации обладают свойством убивать бактерии. Эритемные излучения обладают оздоровительными свойствами.



Ю

из точки зенита; они служат для отсчета высоты солнца ($h_{\odot}$);

системы дуг, радиально исходящих из точки зенита к горизонту; они отсчитывают азимут солнца ($A_{\odot}$).

Образованная таким образом координатная сетка проектируется на горизонтальную

плоскость (л. IX, рис. 2); при этом оказалось практически удобным принять равные расстояния между кругами высот.

На спроектированную сетку нанесены траектории солнца в характерные дни года: день летнего солнцестояния (22 июня), характеризующего летний период;

Лист IX
СОЛНЕЧНЫЕ КАРТЫ ДЛЯ РАЗНОЙ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ
ШИРОТЫ

Рис. 1. Траектория движения солнца в характерные дни года (день летнего солнцестояния, дни весеннего и осеннего равноденствия и день зимнего солнцестояния), нанесенная на координатную сетку, позволяющую определять координаты солнца в любые часы дня. Солнечные карты построены для широт от 70° (Заполярье) до экватора (по данным Б. А. Дунаева)

Рис. 2. Схема, поясняющая построение траектории движения солнца

дней весеннего и осеннего равноденствия (22 марта и 21 сентября), характеризующих весенний и осенний периоды;

день зимнего солнцестояния (22 декабря), характеризующего зимний период.

Положение солнца в различные часы дня по солнечному времени показаны пунктирными линиями и цифрами, соответствующими часам.

Построенная таким образом солнечная карта позволяет определять продолжительность инсоляции при условии, что исследуемая точка располагается на фасаде здания, при отсутствии затенения от окружающих зданий.

Для определения фактической продолжительности инсоляции в условиях городской застройки приходится учитывать затенение, создаваемое окружающими зданиями, деревьями, а для помещений дополнительно архитектурным решением окон (форма, размеры, толщина стены).

Для определения фактической продолжительности инсоляции пользуются вспомогательной сеткой, схема которой приводится на л. X, рис. 1. Сетка состоит из системы радиальных линий, которые в натуре соответствуют вертикальным линиям, и системы кривых, представляющих в натуре горизонтальные линии. Обе системы линий располагаются в интервале 10° .

При пользовании этим методом для определения фактической продолжительности инсоляции надо знать углы, под которыми видны затеняющие объекты из заданной точки.

На л. X, рис. 2 приводится картограмма, построенная для окна с размерами: высотой 110 см, шириной 140 см, толщиной стены 40 см. Конкретные размеры окон нужны только при построении плана и разреза окна данного типа для определения вертикального и горизонтального углов (л. X, рис. 2). В данном случае эти углы соответственно равны 72° и 152° .

На основе этих углов строится контур затенения от окна на кальке на основе контурной сетки. На л. X, рис. 3 значение вертикального угла окна отложено от круга горизонта

по оси $O-O$. Через полученную точку M проведена кривая, соответствующая верхней грани окна.

Горизонтальный угол окна определяется боковыми гранями окна и будет тем больше, чем шире окно.

Заштрихованная часть картограммы представляет, таким образом, контур затенения, создаваемого формой и размерами окна и толщиной стены.

На л. X, рис. 3 приводятся картограммы с контурами, построенными для двух окон, обращенных в противоположные стороны. На одной половине ее построены контуры затенения, создаваемого сплошной застройкой, находящейся от исследуемой точки на расстоянии, равном $1H$, $2H$, $3H$ и $4H$ (где H — высота застройки); на другой половине показаны контуры балкона и веранд. Одна из веранд имеет неограниченную длину, а другая ограничена боковыми стенами на расстоянии 3 м друг от друга.

Для построения контура застройки надо отложить по оси $O-O$ вертикальный угол видимости зданий и через полученную точку провести при помощи контурной сетки линию карниза противостоящего здания.

На л. X, рис. 4 показано совмещение картограммы, выполненной на кальке, с солнечной картой, позволяющее определять фактическую продолжительность инсоляции исследуемой точки при различном удалении противостоящих зданий, а также при наличии балкона и веранд.

Пример. Требуется определить фактическую продолжительность инсоляции в день летнего солнцестояния для помещений с окнами, обращенными на северо-запад и юго-восток, при следующих исходных данных (л. X, рис. 4):

здание располагается на географической широте 50° ;
угол инсоляции окна в плане — 140° ;
северо-западный фасад затеняется зданиями высотой H , находящимися на расстоянии $2H$;
на юго-восточном фасаде имеется веранда с выносом 1 м.

1) Выбираем солнечную карту, соответствующую широте 50° .

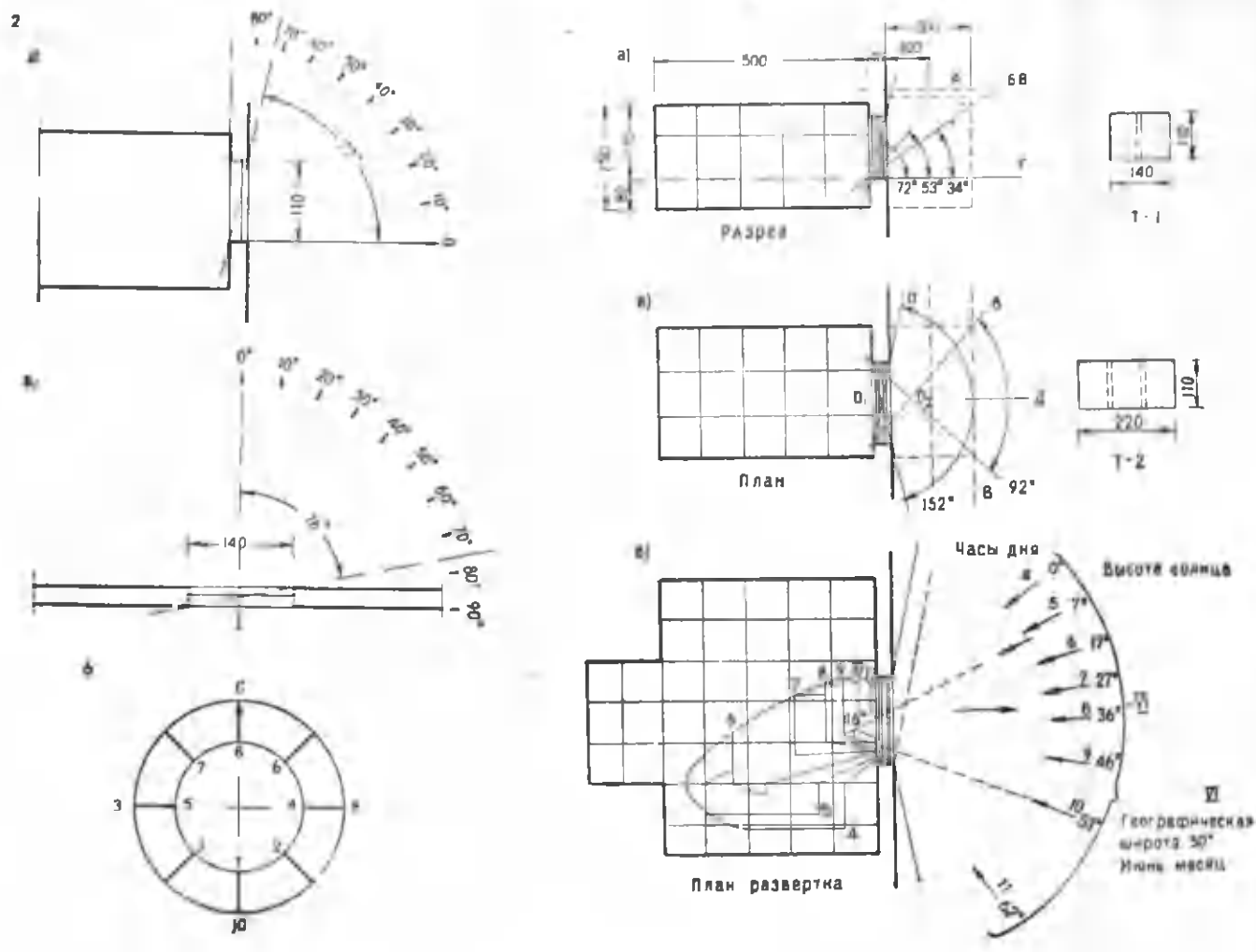
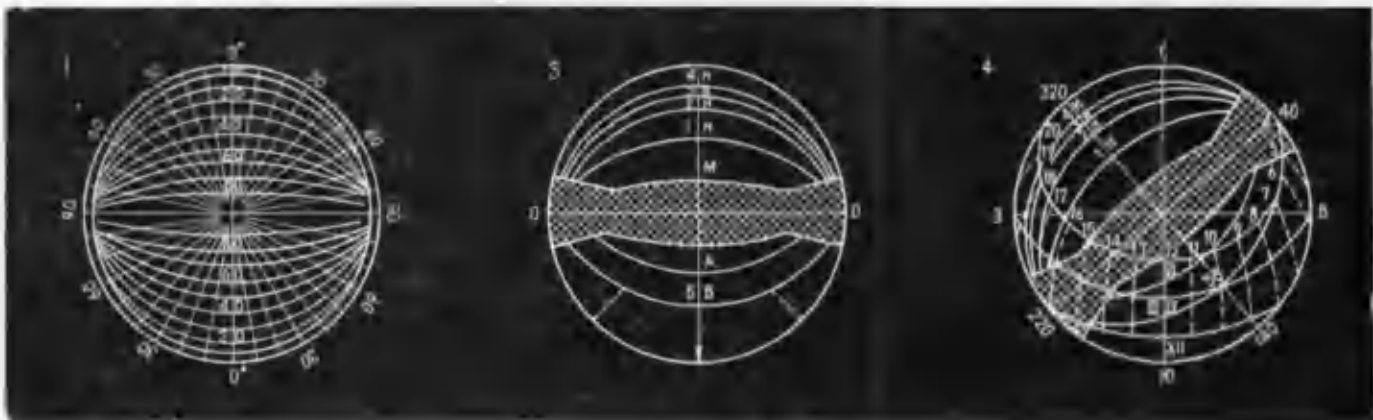
2) Накладываем на солнечную карту картограмму (выполненную на кальке) и придаем ей заданную ориентацию окон на юго-восток ($A\odot = 140^\circ$) и северо-запад ($A\odot = 320^\circ$).

3) Определяем участки траектории солнца, а следовательно, общую продолжительность инсоляции комнат (в отдельности и в общем).

Из сопоставления картограммы с солнечной картой устанавливаем, что:

прямые лучи солнца будут проникать в помещение в течение всего года: в день летнего солнцестояния инсоляция начинается в 5 ч 10 мин по солнечному времени и заканчивается в 12 ч 10 мин. Таким образом, продолжительность инсоляции составляет 7 ч;

балкон A уменьшает продолжительность инсоляции



главным образом летом: так, в июне продолжительность инсоляции уменьшается балконом более чем на 2 ч; еще более сокращает время инсоляции веранда Б. Через окно, ориентированное на северо-запад, в июне солнце попадает начиная с 15 ч 20 мин. Наличие противостоящих зданий на расстоянии 2Н

уменьшает продолжительность инсоляции, ограничивая ее на 2 ч 30 мин в июне.

Для построения контура инсолируемых в течение дня внутренних поверхностей помещения пользуются известными из начертательной геометрии правилами построения теней.

Лист X продолжительность инсоляции зданий

Рис. 1. Вспомогательная контурная сетка, состоящая из радиальных линий, соответствующих в натуре вертикальным линиям, и кривых, представляющих в натуре горизонтальные линии карнизов зданий. Обе системы линий расположены с интервалом, равным 10°

Рис. 2. Разрез (а) и план (б) окна, для которого определяются вертикальные и горизонтальные углы

Рис. 3. Постоянная вспомогательная сетка для конкретных размеров окна и условий затенения, создаваемого толщиной стены, а также противостоящими зданиями

На рисунке приводятся кривые
а — в верхней половине — при ширине улицы, равной $1H$, $2H$, $3H$ и $4H$ (H — высота противостоящих зданий); б — в нижней части кривые линии, соответствующие балкону (А) и веранде (Б, В)

Рис. 4. Совмещение вспомогательной сетки, сделанной из кальки, с солнечной картограммой — при заданной ориентации окон по сторонам света. При наложении можно определить фактическую продолжительность инсоляции при учете затенения зданиями, балконом и верандой
Рис. 5. Схемы разреза и плана комнаты с показом метода построения контуров инсолируемых поверхностей интерьера

а — разрез комнаты; б — план комнаты; в — развертка комнаты
Рис. 6. Шкала для относительной оценки инсоляции при разной ориентации окон по сторонам света (по данным Б. А. Дунаева)

Пример построения контура инсолируемых поверхностей в течение дня приводится на плане-развертке комнаты на л. X, рис. 5. Построение сделано для комнаты размером $3,5 \times 5 \times 2,5$ м, расположенной на географической широте 50° , в день легкого солнцестояния при ориентации окон на восток ($A_\odot = 90^\circ$). Координаты солнца с интервалами в 1° приведены справа от окна. Общий контур инсолируемых поверхностей за день определяется на основе частных контуров, построенных за отдельные часы.

Создание наиболее благоприятных условий инсоляции зданий (жилых, учебных, лечебных, детских учреждений и др.) достигается прежде всего архитектурно-планировочными средствами. При ориентации очень важно хотя бы приблизительно оценивать различные архитектурно-планировочные решения жилой застройки и зданий с точки зрения требования инсоляции.

Для этого удобно пользоваться шкалой, отражающей качественную оценку круга горизонта по признаку инсоляции (л. X, рис. 6). Шкала состоит из восьми кругов, построенных для широт от 70° до 40° , охватывающих почти всю территорию Советского Союза.

Каждый круг шкалы разбивается на восемь секторов; каждому из них дается относительная оценка: наилучший сектор 1; хорошие 2—3; удовлетворительные 4—5; плохие 6—7; наихудший 8.

Попарное построение шкалы (1—8; 2—7; 4—5; 6—3) позволяет проектировщикам пра-

вильно оценивать и выбирать архитектурно-планировочные решения зданий (л. XI, рис. 1).

Современные жилые здания разбиваются на две группы:

первая характеризуется односторонним расположением квартир (секции меридионального типа) (л. XI, рис. 2);

вторая характеризуется двусторонним расположением комнат в квартире (секции широтные со сквозным проветриванием).

Наиболее широкое распространение в нашей практике получили здания с односторонним расположением квартир; это объясняется конструктивными и экономическими их преимуществами.

Такого типа здания целесообразно применять в центральных районах Союза при ориентации окон на восточный ($A_\odot = 60^\circ - 120^\circ$) и соответственно западный ($A_\odot = 240^\circ - 300^\circ$) секторы. Этого типа секции не рекомендуются для южных районов вследствие возможного перегрева комнат, ориентированных на западный сектор, из-за отсутствия сквозного проветривания.

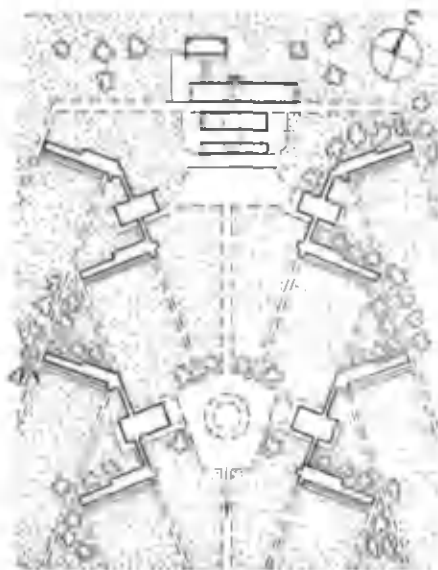
Секции широтного типа имеют значительные преимущества перед меридиональными: они допускают свободную ориентацию зданий и обеспечивают сквозное проветривание; наиболее предпочтительна ориентация зданий с этими секциями на секторах 1, 2 и 4.

Зависимость между продолжительностью инсоляции и шириной улицы, найденная в результате исследований, приводится в л. XI, рис. 3. Из семейства кривых можно видеть, что для обеспечения продолжительности инсоляции, равной 3 ч (гигиеническое требование), необходимо выбирать ширину улицы:

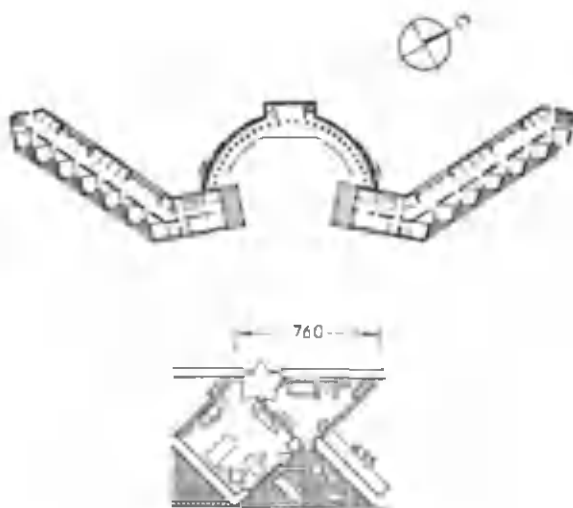
при ориентации окон на восток или запад $A_\odot = 90^\circ - 270^\circ$ — $3H$; юг—север ($A_\odot = 0^\circ - 180^\circ$) — $1,8H$, где H — возвышение карниза противостоящего здания над уровнем подоконника помещения.

В лечебных зданиях (больницах, санаториях), а также в зданиях детских садов и яслей инсоляция является важным лечебным фактором. Основные помещения этих зданий должны инсолироваться и в зимние месяцы; рекомендуемая продолжительность зимней инсоляции не менее 1 ч.

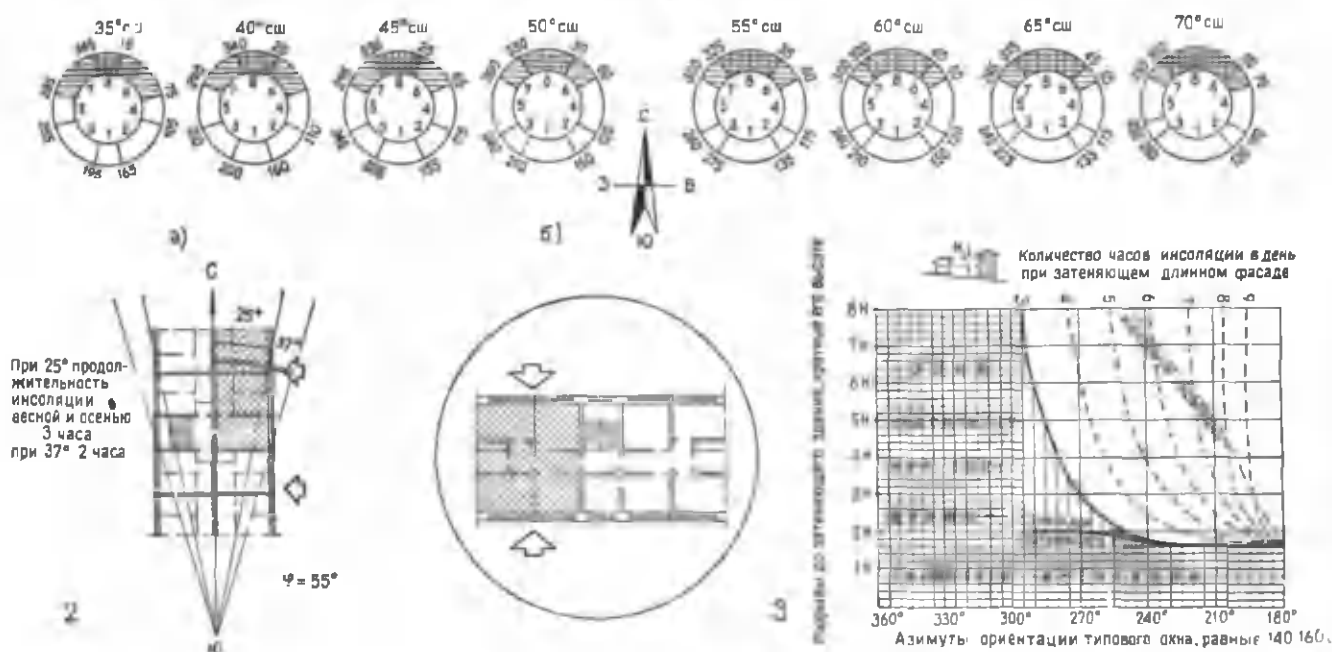
Продолжительная инсоляция основных лечебных помещений в течение всего года обеспечивается совокупностью архитектурно-планировочных и конструктивных мер. К ним относятся свободная планировка зданий на участке для устранения затенения, ориентация окон, устройство эркеров, террас, аэросолариев и др.



4а



4б



Хорошими примерами планировки, удовлетворяющей высоким требованиям инсоляции, могут служить санаторий «Горное солнце» и санаторий в Абастумани. Ориентация окон жилых комнат на юг и юго-восток в этих санаториях оказала решающее влияние на планировку и архитектуру зданий (л. XI, рис. 4).

Стремление обеспечить наиболее продолжительную инсоляцию в жилых, лечебных и других зданиях надо умело сочетать с мерами

защиты их от перегрева, создаваемого солнечной радиацией в летние месяцы.

В ряде зданий (школьных, производственных и др.) прямые лучи солнца являются причиной зрительного дискомфорта, сопровождающегося резким нарушением функций зрения. В этих случаях необходимо предусматривать защиту помещений от прямых лучей солнца в течение всего рабочего времени.

Наиболее дешевыми для защиты зданий от инсоляции являются архитектурно-планиро-

Лист XI инсоляция зданий

Рис. 1. Рекомендуемая (без штриховки), допускаемая и недопускаемая (штриховка в клетку) ориентация окон жилых зданий, составленная на основе восьмибальной шкалы для относительной оценки инсоляции при различной ориентации окон по странам света (по данным Б. А. Дунаева)

Рис. 2. Основные типы секций жилых зданий: а — меридиональная при ориентации окон на восток и запад (или близко к этому); б — широтная — при ориентации окон на юг или север (или близко к этому)

Рис. 3. График (предложенный арх. Д. С. Масленниковым), позволяющий определять рекомендуемую ширину улицы в зависимости от ориентации окон по сторонам света. График разработан для широты 55° и типового размера окна 140×160 см

Рис. 4. Примеры планировки зданий санаториев, выбранной архитектором исходя из стремления обеспечить наилучшую в течение года инсоляцию палат

а — генплан санатория «Горное солнце»; б — план и фрагмент санатория в Абастумани

вочные средства, связанные с расположением зданий на генеральном плане. Опыт показывает, что при одностороннем освещении наименьшая инсоляция помещений обеспечивается при ориентации на северную четверть неба (северо-запад, север, северо-восток). Однако в тропических районах (широта $\leq 20^\circ$) ориентация светопроемов на север не защищает помещения от инсоляции в летние месяцы; в этих условиях архитектор при выборе ориентации зданий на участке должен руководствоваться так называемой гелиотермической осью. Расположение зданий вдоль этой оси обеспечивает наименьшее тепловое воздействие солнечной радиации на наружные стены зданий в течение года.

Защита от инсоляции в летние месяцы территории отдыха и детских игровых площадок в микрорайонах осуществляется совокупностью зеленых насаждений, тентов, аэросоляриев. Выбор деревьев с густой кроной, их расположение, а также архитектурное решение тентов, аэросоляриев, учитывающих траекторию движения солнца в летние месяцы, использование водоемов позволяют экономичными средствами улучшить микроклимат микрорайона.

Архитектурно-конструктивные средства защиты от солнца могут быть:

- а) постоянными, являющимися органической частью здания;
- б) временными, представляющими собой предмет оборудования.

К постоянным солнцезащитным средствам относятся: козырьки, навесы над световыми проемами, вертикальные экраны, сотообразные устройства, лоджии, веранды, галерей и др.

К временным средствам относятся: жалюзи, шторы, маркизы; эти предметы оборудова-

ния осуществляются обычно в процессе эксплуатации зданий.

По своему типу солнцезащитные устройства делятся на:

- а) горизонтальные (козырьки, навесы, веранды, жалюзи и др.);
- б) вертикальные (экраны, жалюзи и т. д.);
- в) смешанные (сотообразные, лоджии, маркизы и т. п.).

По условиям эксплуатации солнцезащитные устройства могут быть:

- а) регулируемые (жалюзи, ставни, зонты и др.);
- б) постоянными, нерегулируемыми (лоджии, веранды, козырьки и др.).

Выбор типа солнцезащитного устройства зависит в основном от ориентации светопроемов по странам света.

На л. XII, рис. 1, а приводятся данные, позволяющие архитектору ориентироваться при выборе типа солнцезащитных устройств в зависимости от ориентации светопроемов по странам света.

Различные виды горизонтальных солнцезащитных устройств приводятся на л. XII, рис. 2, а—е, вертикальных на рис. 3 и сотообразных на рис. 4.

Необходимый вынос горизонтальных козырьков (л. XII, рис. 5) определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{ctg} h_{\odot} \cos \alpha, \quad (1.57)$$

где β — угол между стеной и линией, проведенной через край горизонтального экрана (козырька, экрана) параллельно направлению проекции солнечного луча на вертикальную плоскость, перпендикулярную стене;

α — угол между направлением солнечного луча в плане и нормалью к поверхности фасада;

$h_{\odot}$ — высота стояния солнца.

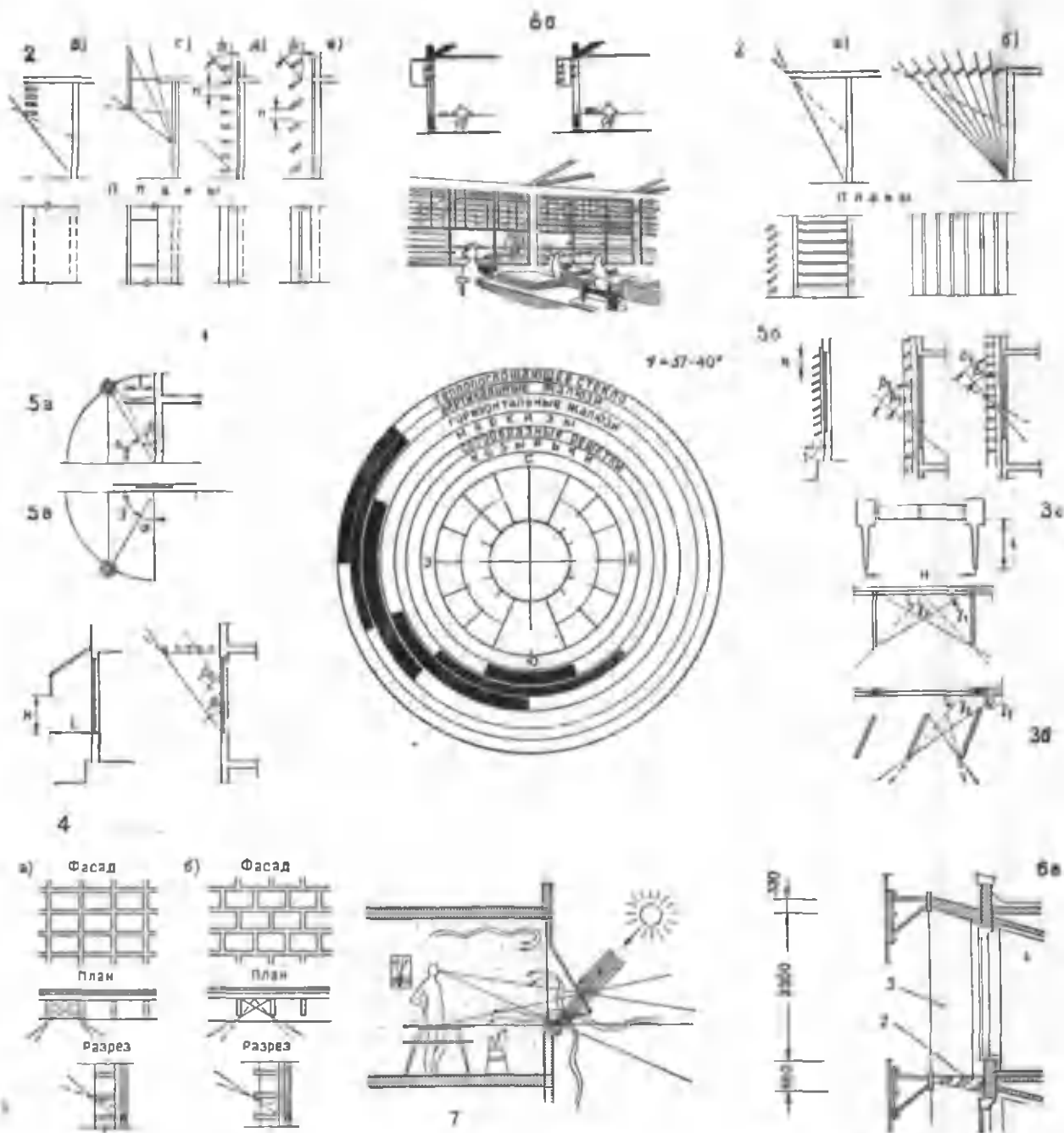
Вынос вертикальных экранов определяется из выражения

$$\gamma = 90^\circ - \alpha,$$

где γ — угол между направлением солнечного луча, определяемого азимутом солнца ($A_{\odot}$) и направлением линии фасада здания в плане.

При определении выноса солнцезащитных устройств рекомендуется исходить из координат солнца, соответствующих апрелю — августу (л. IX, рис. 1).

Примеры осуществленных солнцезащитных устройств комбинированного типа приводятся на л. XII, рис. 6 и 7.



При проектировании аэросоляриев (в больницах и санаториях) целесообразно применять сотообразные решетчатые конструкции. Расчет их размеров производится по формуле:

$$D = \frac{H}{\operatorname{tg} h_{\odot}}, \quad (1.58)$$

где D — расстояние между стенками конструкции;

H — высота стенок;

$h_{\odot}$ — высота солнца в день летнего солнцестояния.

Надежным средством для защиты помещений от светового и теплового действия солнца являются специальные сорта стекол (телопоглощающее, светорассеивающее стекло), а также пустотелые стеклянные блоки, цементные швы между которыми служат солнцеза-

Лист XII
ЗАЩИТА ПОМЕЩЕНИЯ ОТ СОЛНЦА

Рис. 1. График для ориентировочного выбора типа солнцезащитных устройств при разной ориентации окон по странам света

График составлен для географической широты 37—40°

Рис. 2. Виды солнцезащитных горизонтальных устройств, применяемые в современной практике строительства зданий разного назначения

а — козырек с планками, расположенными перпендикулярно стене; защищает от косых лучей высокого солнца при наклонном или вертикальном расположении планок; б — козырек с планками параллельно стене; в — комбинация глухого козырька с горизонтальными жалюзи; г — вертикальный экран, защищающий главным образом от низких лучей солнца; д — е — жалюзи наружные, защищающие помещение от инсоляции в течение целого дня

Рис. 3. Виды вертикальных экранов

а — стационарных; б — регулируемых в виде жалюзи

Рис. 4. Устройства сотообразного типа

а — с одинаковыми выносами горизонтальных и вертикальных элементов; б — то же, с разными

Рис. 5. Схема для определения углов β и γ , позволяющих выбрать выносы солнцезащитных устройств, а также соотношения размеров жалюзи (расстояния между планками, ширина планок и др.)

а — для горизонтальных козырьков; б — для жалюзи; в — для вертикальных устройств

Рис. 6. Примеры осуществленных солнцезащитных устройств в зданиях

а — комбинированного типа (горизонтальных (2) и вертикальных (3)); б — в виде комбинации горизонтального козырька с вертикальным экраном и жалюзи

Рис. 7. Схема жесткого устройства типа маркизы

$A_{\odot}$ в град.	135	180	225	260
α	90	45	0	35

4) Определяем значения углов β :

$\lg \beta$	0	0,43	0,84	0,41
β в град.	0	24	40	45

5) Определяем значения углов γ :

α в град.	90	45	0	35
γ	0	45	90	55

Результаты расчета позволяют выбрать сотообразную конструкцию при выносе горизонтальных элементов под углом $\beta = 45^\circ$; вертикальных — под углом $\gamma = 55^\circ$.

При применении солнцезащитных устройств архитектору важно знать, насколько изменяются условия освещения в помещении. Результаты исследований¹, проведенных в этом направлении, позволили установить показатели освещения при применении различного вида устройств. Результаты этих исследований приводятся в табл. 1.20.

Таблица 1.20

Значения минимального к. е. о. в помещении при различных солнцезащитных устройствах

Виды солнцезащитных устройств	Условия наружного освещения	
	при диффузном освещении	при облучении солнцезащитного устройства солнцем
Жалюзи с планками, расположенными под углами к горизонту:		
0°	0,75	1,6—2
45°	0,3	0,7—1
Глухой козырек при $\beta = 30^\circ$	0,80	1,5—1,6
Решетчатый козырек при $\beta = 30^\circ$	0,8	1,6—1,7
Вертикальные экраны при $\gamma = 30^\circ$	0,85	1,5—1,6
Сотообразные конструкции при размерах сот 50×50×40 см	0,6	1—1,3

Солнцезащитные устройства оказывают положительное влияние на равномерность освещения; поэтому их применение в южных районах оправдывается и требованиями улучшения качества освещения.

¹ Исследования проведены в Научно-исследовательском институте строительной физики Госстроя СССР научным сотрудником Н. В. Оболенским.

щитной решеткой. Применение в стеклянных блоках специального рифля при соответствующем расположении блоков по отношению к солнцу значительно уменьшает интенсивность теплового потока, проходящего в помещение через стекложелезобетонное покрытие.

Пример. Требуется выбрать тип и определить необходимый вынос солнцезащитного устройства при следующих исходных данных:

а) здание строится на широте 45°;

б) фасад ориентирован на юго-запад ($A_{\odot} = 135^\circ$).

1) Для полной защиты помещения от инсоляции выбираем сотообразную конструкцию;

2) Определяем координаты солнца для апреля—августа:

Часы дня	10	12	14	16	18
Координаты солнца в град.:					
высота	50	58	50	30	10
азимут	135	180	225	260	275

3) Определяем углы α , образуемые направлением солнечных лучей с перпендикуляром к линии фасада на плане:

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СВЕТА

1. Краткие исторические данные

В истории развития электрических источников света почетное место принадлежит русским ученым. В 1802 г. профессор медико-хирургической академии (в Петербурге) В. В. Петров открыл явление электрической дуги; через значительный промежуток времени А. И. Шпаковский и В. Н. Чиколев изобрели электрический регулятор длины дуги. После этого вполне закономерным можно считать создание П. Н. Яблочковым (1876 г.) электрической свечи. Свеча Яблочкова состояла из двух параллельно расположенных углей, между которыми находилась прослойка из каолина с магнезией. При прохождении через угли электрического тока между концами углей возникал дуговой разряд. Свечи Яблочкова, осветившие улицы столиц многих стран Европы, были известны под названием «русского света».

Параллельно усовершенствованию дуговых электрических ламп в России велись исследования по разработке нового способа получения света — ламп накаливания. Приоритет создания и первых испытаний ламп накаливания с угольными стержнями принадлежит также русскому ученому А. Н. Ладыгину. После практических испытаний новые источники электрического света осветили ряд улиц и зданий Петербурга (1875—1876 гг.).

Поиски наиболее пригодного материала для тела накала, а также изоляция тела накала от воздуха закончились предложением современного типа лампы накаливания с телом накала в виде тянутой вольфрамовой нити (Лангмюр — 1913 г.) при заполнении колбы лампы инертным газом. Это позволило значительно повысить экономичность ламп накали-

вания. Работы в этом направлении ведутся до настоящего времени; за последние годы в конструкцию лампы накаливания был введен ряд усовершенствований (биспиральная нить, заполнение колбы смесью редких малотеплопроводных газов). Последним достижением в области развития ламп накаливания являются кварцевые лампы с иодным циклом. Органический недостаток ламп накаливания — их малая экономичность как преобразователей электрической энергии в световую: коэффициент полезного действия ламп накаливания всего 20%.

Поиски более экономичных источников электрического света в тридцатых годах XX в. увенчались открытием люминесцентных ламп, в развитии производства которых в СССР ведущая роль принадлежит академику С. И. Вавилову. Люминесцентные лампы отличаются от ламп накаливания не только более высокой экономичностью излучения, но возможностью создавать разнообразные спектры излучений.

Наряду с развитием люминесцентных ламп большие успехи за последние годы были достигнуты в создании новых газоразрядных источников света (ксеноновых ламп высокой интенсивности, дуговых ртутно-люминесцентных ламп), характеризующихся высокими световыми качествами.

Основными характеристиками электрических ламп являются: напряжение сети, электрическая мощность лампы, излучаемый ею световой поток, экономичность и срок службы лампы.

4. Лампы накаливания

Лампы накаливания являются источниками света теплового излучения. Количество применяемых типов ламп накаливания очень ве-

лико. Ниже приводятся типы ламп, получившие наиболее широкое распространение. Устройство современной лампы накаливания приводится на л. XIII, рис. 1.

Экономичность электрических ламп обычно характеризуют световой отдачей, т. е. количеством люменов, приходящихся на 1 *вт* потребляемой лампой мощности:

$$\gamma = \frac{\Phi}{P}, \quad (1.59)$$

где Φ — световой поток, излучаемый лампой, в *лм*;

P — мощность лампы в *вт*.

Величина световой отдачи зависит от температуры тела накаливания лампы, а также от ее мощности. Обычно температура тела накала вакуумных ламп не превышает 2400°K, а газополных — 2200°K. Зависимость световой отдачи от мощности ламп для разного напряжения в сети приводится на л. XIII, рис. 2.

Световые характеристики некоторых нормальных ламп накаливания приводятся в табл. I.20a.

Таблица I.20a

Световые и геометрические характеристики нормальных ламп накаливания

Напряжение в в	Мощность в вт	Световой поток в лм	Световая отдача в лм/вт	Наибольший диаметр в мм	Полная длина в мм
127	25	235	9,1	61	104
	100	1400	13,2	66	121
	1000	19 500	19,5	152	335
220	25	205	7,9	61	104
	100	1240	10,5	66	121
	1000	18 200	18	152	335

Не менее важной характеристикой лампы накаливания является срок ее службы. Для большинства типов ламп накаливания средняя продолжительность горения установлена 1000 ч; для кварцевой лампы с иодным циклом — 3000 ч*.

Цветность излучения ламп накаливания зависит от температуры тела накала. При номинальном напряжении в спектре излучения нормальных ламп накаливания преобладают видимые излучения желтого и красного цвета. Поэтому спектральный состав ламп накалива-

* Кварцевая лампа с иодным циклом представляет собой трубчатого вида лампу накаливания (диаметром 15—20 мм) с протяженным телом накала; колба лампы заполняется парами йода.

ния существенно отличается от спектра естественного света. На л. XIII, рис. 3 приводятся относительные спектральные характеристики светового потока от различных источников света.

Среди ламп накаливания, появившихся в последние годы, большой практический интерес для архитектурных целей имеют криптоновые лампы (НБК), имеющие своеобразную форму колбы из молочного стекла (л. XIII, рис. 4). Полость колбы заполняется криптоно-ксеноновой смесью.

Световые и геометрические характеристики криптоновых биспиральных ламп приводятся в табл. I.21.

Таблица I.21

Световые и геометрические характеристики криптоновых биспиральных ламп

Тип лампы	Напряжение в в	Мощность в вт	Световой поток в лм	Размеры в мм	
				диаметр наибольший	длина полная
НБК	127	40	490	46	87
		60	820	56	93
		75	950	61	97
	220	40	430	46	87
		60	950	51	97
		100	1380	61	102

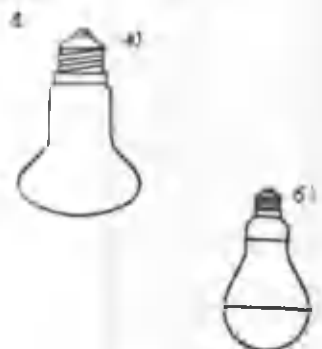
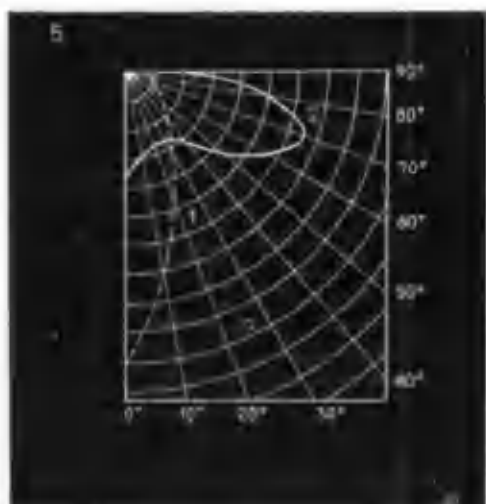
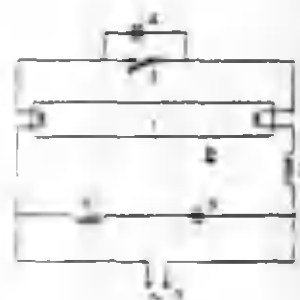
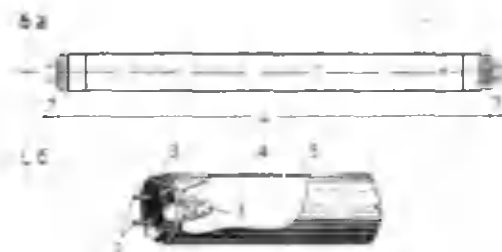
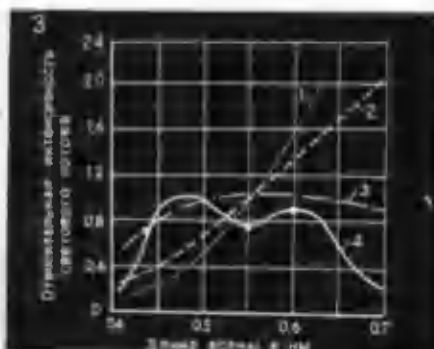
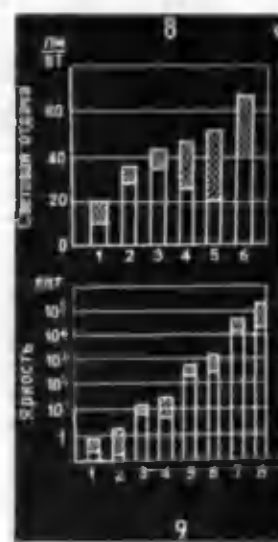
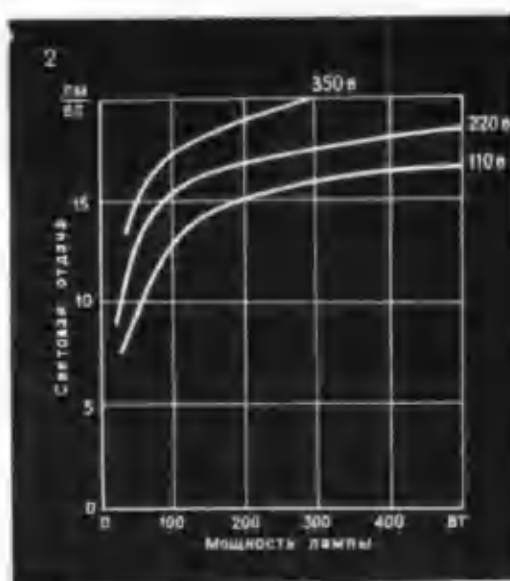
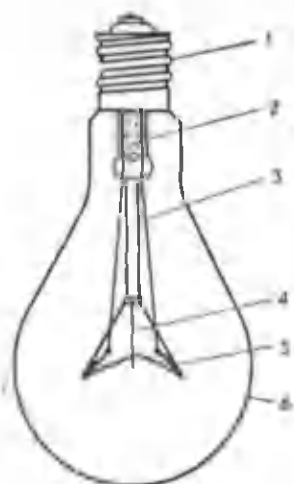
Зеркальные лампы (ЗН) имеют колбу специальной формы, верхняя часть которой изнутри покрывается слоем серебра или алюминия. Широкое распространение получили зеркальные лампы глубокого излучения, образующие концентрированный световой поток (л. XIII, рис. 4,б), и лампы широкого светораспределения (л. XIII, рис. 4,в)

Зеркальные лампы первого типа мощностью 100, 300 и 500 *вт* широко применяются

Таблица I.22

Световые электрические и геометрические характеристики зеркальных ламп

Тип лампы	Характер светораспределения	Мощность в вт	Напряжение в в	Световой поток в лм	Размеры в мм	
					диаметр	длина
ЗН-5	Глубокое	300	127	4300	187	260
ЗН-6		500		7500	177	260
ЗН-7	Широкое	300	220	3600	177	260
ЗН-8		500		6400	177	260
ЗН-27		300		4000	134	250
ЗН-28		500		7560	134	250
ЗН-29		750		12 230	162	300



Лист XIII ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Рис. 1. Устройство современной лампы накаливания
1 — цоколь с нарезкой; 2 — вводная трубка; 3 — электроды;
4 — держатель; 5 — тело накала; 6 — колба

Рис. 2. Зависимость световой отдачи лампы накаливания от напряжения и мощности

Рис. 3. Спектральные характеристики излучения различными источниками

1 — пустотная лампа накаливания; 2 — газополная лампа накаливания; 3 — рассеянный свет неба; 4 — люминесцентные лампы типа ДС

Рис. 4. Лампы накаливания:

а — криптоновая лампа; колба из молочного стекла; б — зеркальная лампа с глубоким светораспределением; в — зеркальная лампа с широким светораспределением

Рис. 5. Сопоставление кривых силы света зеркальных ламп

1 — (пунктир) с глубоким излучением; 2 — с широким излучением

Рис. 6. Люминесцентная лампа

а — общий вид; б — деталь: 1 — электрод; 2 — стержни, входящие в держатель; 3 — металлический колпачок; 4 — стеклянная трубка; 5 — слой люминофора

Рис. 7. Схема включения люминесцентной лампы в сеть
1 — колба лампы; 2 — индуктивный балласт; 3 — стартер-зажигатель; 4 — конденсатор для устранения радиопомех; 5 — дроссельная катушка; 6 — конденсатор для повышения коэффициента мощности; 7 — выключатель

Рис. 8. Световая отдача различных источников света
1 — лампа накаливания; 2 — ксеноновые лампы большой мощности; 3 — ртутные лампы мощностью 80–450 вт; 4 — дуговые ртутно-люминесцентные лампы мощностью 50–400 вт; 5 — люминесцентные лампы мощностью 15–80 вт; 6 — натриевые лампы мощностью 140 вт

Рис. 9. Яркость различных источников света

1 — люминесцентные лампы; 2 — свет луны, неба; 3 — натриевые лампы; 4 — лампы накаливания с матированной колбой; 5 — ртутные лампы; 6 — лампы накаливания нормальные; 7 — дуговые лампы; 8 — солнце, ксеноновые лампы

для архитектурного освещения фасадов и интерьеров; лампы второго типа используются главным образом для освещения улиц и площадей.

На л. XIII, рис. 5 приводятся кривые силы света зеркальных ламп глубокого и широкого излучения. Световые и геометрические характеристики зеркальных ламп приводятся в табл. I.22.

3. Газоразрядные лампы низкого давления

Некоторые тела обладают способностью светиться под воздействием причин, не связанных с их нагреванием. Это издавна известное явление люминесценции, под которым понимают избыток свечения вещества (люминофора) над температурным излучением тела, если это избыточное свечение обладает длительностью послесвечения более $20 \cdot 10^{-10}$ сек.

Имеется много разновидностей люминесценции: хемилюминесценция — свечение, создаваемое химическими реакциями; фотолюминесценция — свечение тел, создаваемое облучением вещества; электролюминесценция — свечение газа или паров металла, создаваемое проходящим через них электрическим током и т. д.

Большое значение для архитектурной практики имеет явление фотолюминесценции, основанное на свечении кристаллических порошков — люминофоров — под действием ультрафиолетовых излучений. Каждый люминофор обладает характерным спектром излучения, который определяет цветность его свечения. Разные люминофоры под действием ультрафиолетовых излучений излучают световой поток различных длин волн. Так, например, вольфрам магния, силикат цинка, кадмий и др. интенсивно светятся при облучении их ультрафиолетом с длиной волны 185 и 253,7 нм.

Смешение различных люминофоров в определенных пропорциях при их облучении ультрафиолетом позволяет получать световые потоки самых разнообразных спектров.

Явление электролюминесценции паров ртути широко используется в люминесцентных лампах при движении через них электронов под действием создаваемого напряжения электрического тока и фотолюминесценции люминофора, покрывающего тонким слоем внутренние стенки стеклянной трубки.

Люминесцентная лампа представляет световой трансформатор; ультрафиолетовые излучения, возникающие в трубке в результате электрического разряда в парах ртути, преобразуются в видимый свет. Общий вид и разрез люминесцентной лампы приводятся на л. XIII, рис. 6. Схемы включения в сеть люминесцентной лампы приводятся на л. XIII, рис. 7.

Из этих схем видно, что в комплект люминесцентной лампы входит пускорегулирующий аппарат (ПРА): стартер 3 для облегчения зажигания лампы, балластное сопротивление (дроссель) 5 для стабилизации силы тока, конденсаторы 4, 6 для устранения радиопомех и повышения коэффициента мощности.

Существуют и другие схемы включения люминесцентных ламп, в которых стартеры отсутствуют; в этих схемах пускорегулирующие аппараты обеспечивают постоянное нагревание электродов и повышенное напряжение на лампе во время ее включения.

Люминесцентные лампы обладают более высокой световой отдачей и продолжительностью горения по сравнению с лампами накаливания. На л. XIII, рис. 8 приводятся данные о световой отдаче различных источников света.

Одной из важных характеристик люминесцентных ламп является их малая яркость по сравнению с другими электрическими источниками света. На л. XIII, рис. 9 приводятся данные о яркости различных источников света.

Таблица 1.23

Тип лампы	Наименование величин			Размеры лампы	
	электрическая мощность в <i>вт</i>	световой поток в <i>лм</i>	световая отдача в <i>лм/вт</i>	диаметр	длина в <i>мм</i>
ЛДЦ-30 ЛД-30 ЛТБ-30 ЛХБ-30 ЛБ	30	1110 1380 1500 1500 1740	37 46 50 50 58	25	894
ЛДЦ-40 ЛД-40 ЛТБ-40 ЛХБ-40 ЛБ-40	40	1520 1960 2200 2200 2480	38 49 55 55 62	38	1196
ЛДЦ-80 ЛД-80 ЛТБ-80 ЛХБ-80 ЛБ-80	80	2720 3440 3840 3840 4320	34 43 48 48 54	38	1481

Лист XIV

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ ДРУГИХ ТИПОВ

Рис. 1

а — общий вид лампы желобчатого типа; б — схемы, объясняющие более высокую световую отдачу ламп желобчатого типа
Рис. 2. Люминесцентные лампы с внутренним отражающим слоем

а — поперечный разрез лампы; б — кривые светораспределения: 1 — обычной лампы; 2 — лампы с внутренним отражающим слоем

Рис. 3. Трубчатые лампы черного света мощностью в 20 и 40 *вт*

а — общий вид лампы; б — разрез лампы; в — спектральная интенсивность излучаемого светового потока

Рис. 4. Лампы черного света с обычной колбой

а — общий вид; б — относительное распределение энергии в спектре

лампы белого света ЛБ с цветовой температурой 3500°K; лампы обладают относительно большей световой отдачей и обеспечивают удовлетворительное восприятие цветов;

Таблица 1.24

Световые и электрические характеристики цветных люминесцентных ламп

Цветность лампы	Синий			Зеленый			Золотистый			Розовый			Красный		
	Ф	Г	В	Ф	Г	В	Ф	Г	В	Ф	Г	В	Ф	Г	В
Мощность лампы в <i>вт</i>	в <i>лм</i>	в <i>лм/вт</i>	в <i>нт</i>	в <i>лм</i>	в <i>лм/вт</i>	в <i>нт</i>	в <i>лм</i>	в <i>лм/вт</i>	в <i>нт</i>	в <i>лм</i>	в <i>лм/вт</i>	в <i>нт</i>	в <i>лм</i>	в <i>лм/вт</i>	в <i>нт</i>
15	315	21	3900	900	60	11 000	375	25	5700	300	20	3600	45	3	500
20	460	23	12 900	1300	65	8300	510	27	3400	440	22	2300	60	3	400
30	780	26	4700	2250	75	13 500	930	75	5500	750	25	4500	120	4	700

Примечание. Размеры цветных люминесцентных ламп те же, что и в табл. 1.23.

Таблица 1.25

Световые, электрические и геометрические характеристики миниатюрных люминесцентных ламп

Мощность в <i>вт</i>	Напряжение в <i>в</i>	Световая отдача в <i>лм/вт</i>			Размеры в <i>мм</i>	
		ЛД	ЛХБ	ЛБ	диаметр	длина
4	127	17	—	17,5	150	16
8	127	37	38,5	35—40	300	16
12	127	—	—	26,5	30	25

В настоящее время нашей промышленностью выпускаются лампы следующих типов: лампы ЛДЦ с цветовой температурой 6500°K; эти лампы создают свет, успешно имитирующий дневной;

лампы дневного света ЛД с цветовой температурой 6500°K; они обеспечивают хорошее восприятие цветов, мало отличающееся от восприятия при естественном освещении;

лампы тепло-белого цвета ЛТБ с цветовой температурой около 2700°K; по своему спектральному составу эти лампы ближе подходят к лампам накаливания;

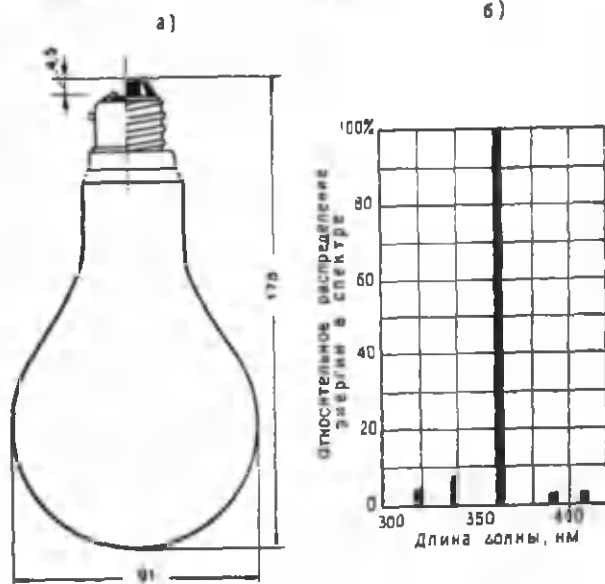
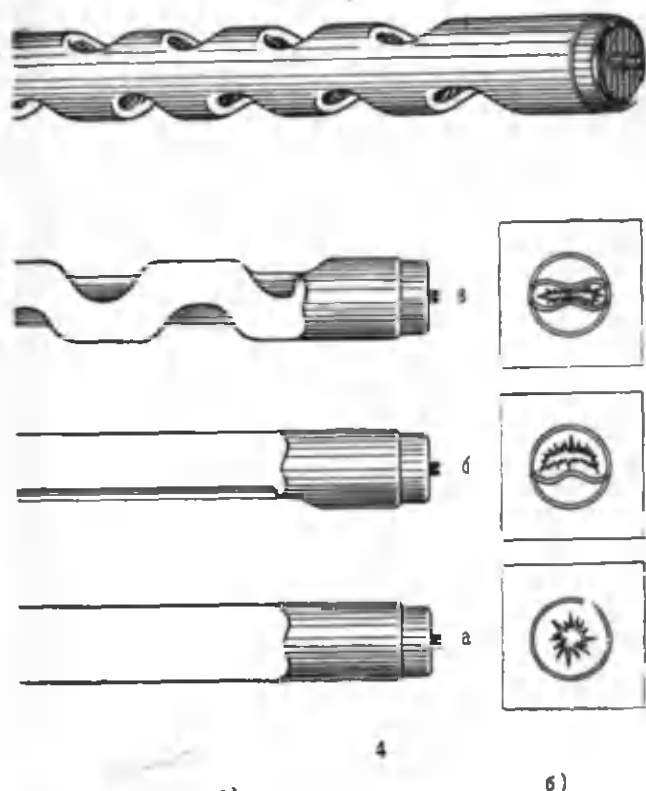
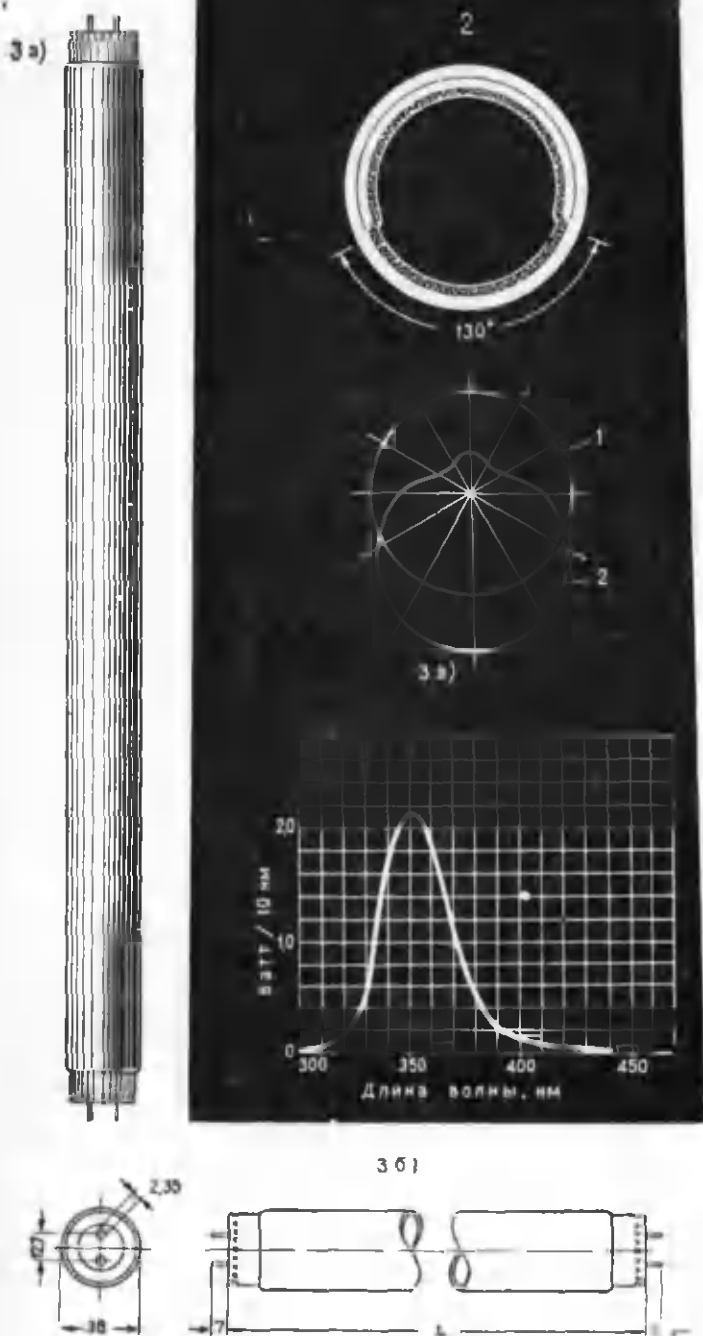
лампы холодно-белого цвета ЛХБ с цветовой температурой около 4850°K; по качеству светопередачи эти лампы занимают промежуточное место между лампами ЛД и ЛБ.

Световые, электрические и геометрические характеристики люминесцентных ламп различных типов приводятся в табл. 1.23.

Помимо этих типов ламп для архитектурного освещения (рекламного и др.) применяются цветные люминесцентные лампы. В табл. 1.24 приводятся характеристики цветных люминесцентных ламп.

Определенный интерес представляют миниатюрные люминесцентные лампы, световые, электрические и геометрические характеристики которых приводятся в табл. 1.25.

Эти лампы характеризуются достаточно высокой световой отдачей, малым выделением



тепла и незначительной яркостью. Благодаря этому они находят широкое применение для местного освещения в станках и агрегатах, а также для подсвечивания интерьеров (ниш, стеклянных шкафов, карнизов, аквариумов, цветов, входов и т. п.).

Помимо ламп, имеющих форму трубки, в

настоящее время производятся лампы круглой и U-образной формы¹, а также секционнo-кольцевые лампы, позволяющие образовать кольцо большого диаметра.

Для освещения промышленных зданий це-

¹ Эти лампы у нас пока не изготавливаются

лесообразно применять люминесцентные лампы большой мощности (80, 125 вт и более). К числу мощных ламп, обладающих высокой световой отдачей (до 60—70 лм/вт), относятся лампы желобчатого типа, выпускаемые в настоящее время иностранными фирмами. Схемы таких ламп приводятся на л. XIVа, рис. 1.

Весьма удобными для производственных помещений являются люминесцентные лампы с внутренним отражающим слоем. Слой порошка, диффузно отражающий световой поток, нанесен на верхнюю и боковые поверхности трубки; благодаря этому световой поток направляется в основном вниз (л. XIVа, рис. 2). Пыль оседает преимущественно на верхней половине колбы. Поэтому потери светового потока в этих лампах при загрязнении их значительно уменьшаются. Световая отдача таких ламп на 10—13% меньше, чем нормальных люминесцентных ламп одинаковой мощности.

Обладая высокой экономичностью и хорошими цветовыми качествами, люминесцентные лампы вместе с тем обладают следующими недостатками:

при освещении люминесцентными лампами движущихся предметов возникает так называемый стробоскопический эффект, а именно: движение предмета воспринимается прерывистым; для устранения этого неприятного эффекта лампы надо включать по двухламповой или трехфазной схеме; в этих случаях пульсации светового потока ламп взаимно компенсируются и становятся менее заметными;

для нормальной работы люминесцентных ламп необходима температура окружающей среды в пределах 10—35°. При иной температуре воздуха световая отдача люминесцентных ламп значительно уменьшается. Наряду с этим при низких температурах воздуха, а также при большом отклонении напряжения в сети от номинального (порядка 10%) весьма затрудняется процесс зажигания лампы, что приводит к сокращению срока ее службы.

К этому надо прибавить и более высокую стоимость люминесцентных ламп с пускорегулирующими аппаратами по сравнению с лампами накаливания.

Тем не менее высокие световые качества люминесцентных ламп, возможность подобрать спектральный состав искусственного света в соответствии с зрительными условиями работы, а также их долговечность заставляют во многих случаях отдавать им предпочтение перед лампами накаливания.

К ртутным лампам низкого давления относятся люминесцентные лампы с холодным ка-

Лист XIVБ

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ ДРУГИХ ТИПОВ

Рис. 5. Лампы типа ДРЛ

а — разрез лампы ДРЛ; 1 — патрон; 2 — ртутная кварцевая лампа высокого давления; 3 — стеклянная колба; 4 — люминофор; б — схемы включения лампы в сеть; в — кривая спектра распределения лампы ДРЛ; а — кривые силы света ламп ДРЛ мощностью 250 и 400 вт

Рис. 6. Зеркальная лампа типа ДРЛ

1 — патрон; 2 — ртутная кварцевая лампа высокого давления; 3 — стеклянная колба; 4 — зеркальная поверхность, на которую нанесен слой люминофора

Рис. 7

а — схема мощной ксеноновой лампы; б — относительная спектральная характеристика излучения

Рис. 8. Схема разреза натриевой лампы разной мощности
Рис. 9. Электролюминесцентные плитки фирмы «Филипс»
На левом рисунке дается зависимость между частотой (наклонные линии), напряжением (по оси абсцисс) и светностью (по оси ординат) при панели зеленого цвета. На правом рисунке дается относительное распределение энергии для напряжения 220 в при частоте 50 гц
А — синий цвет; В — зеленый; С — оранжевый (по оси абсцисс — длина волн в 10^{-7} мм)

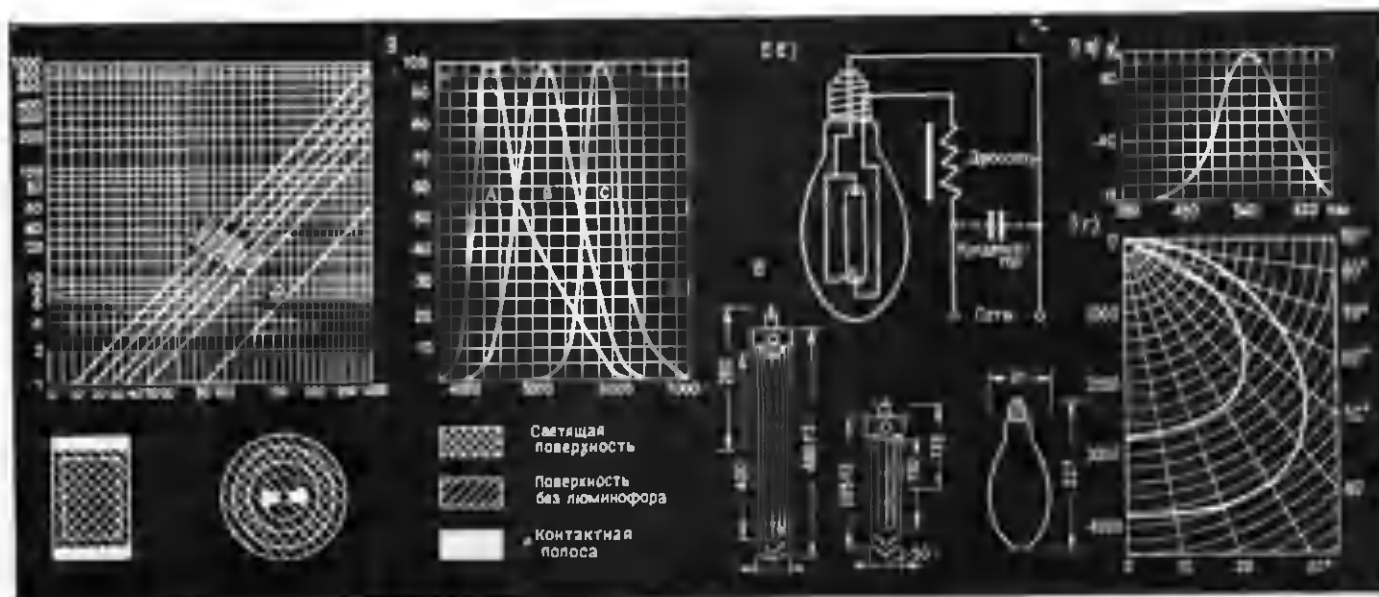
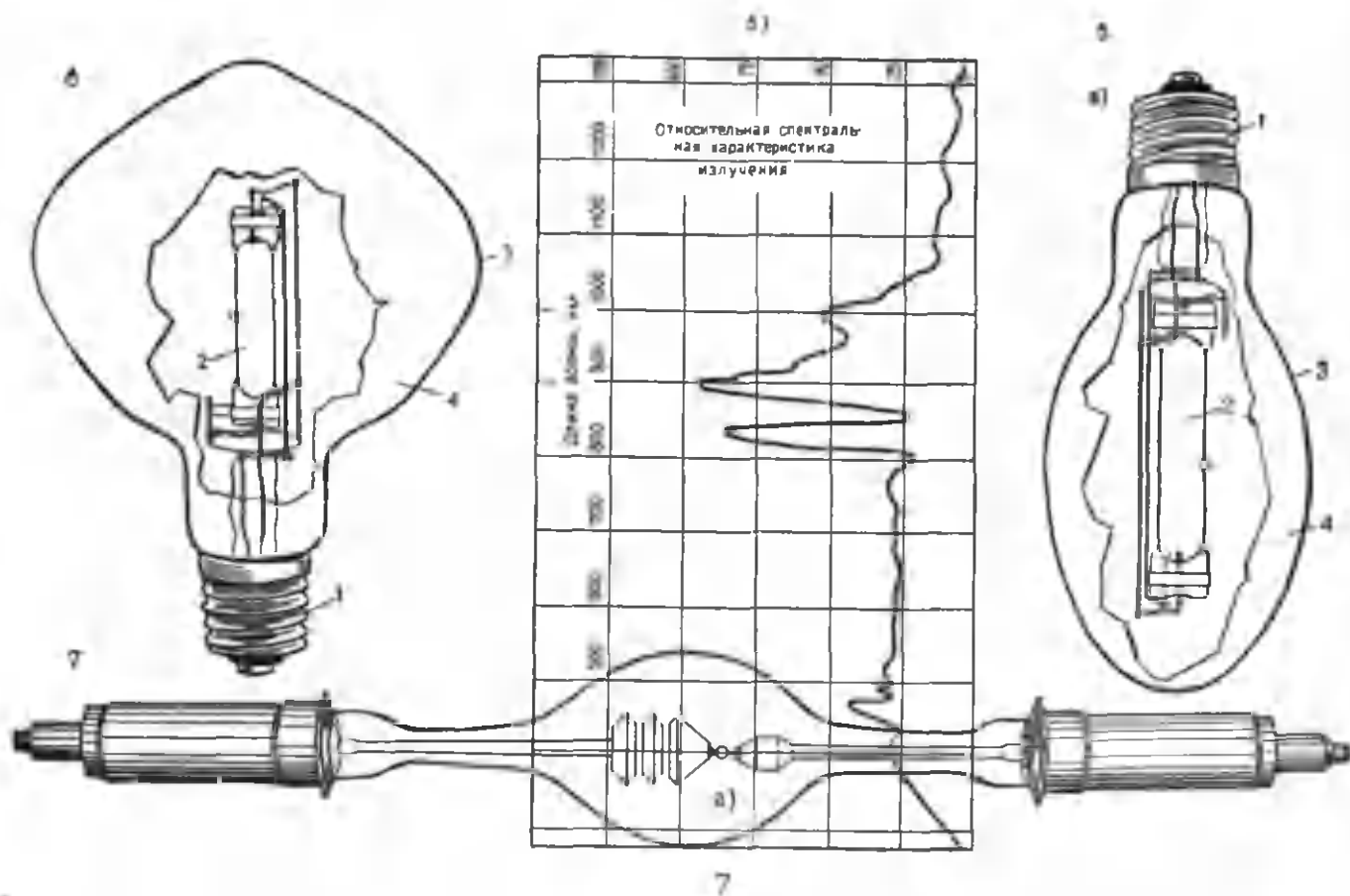
тодом, а также эритемные и бактерицидные лампы.

Люминесцентные лампы с холодными катодами работают на высоком напряжении. При использовании импульса высокого напряжения для зажигания лампы отпадает необходимость в стартере, основное назначение которого подогрев ламповых электродов. Эти лампы включаются в сеть через трансформатор, имеющий напряжение в несколько тысяч вольт.

Люминесцентные лампы с холодными катодами широко используются для рекламного освещения. Длина ламп с холодными катодами значительно увеличивается, что повышает их экономичность. В этих лампах применяются люминофоры, позволяющие получать многообразную цветность свечения. Наибольшее распространение получили лампы неоновые, дающие насыщенное оранжево-красное свечение, аргоновые голубовато-белое свечение и др.

Эритемные и бактерицидные лампы мощностью 15 и 30 вт являются источниками преимущественно ультрафиолетового излучения и используются как средство санации воздуха в помещениях.

Эритемные лампы излучают ультрафиолетовую радиацию в пределах длин волн от 280 до 440 нм. Излучения от этих ламп действуют на человека подобно природному ультрафиолету, закаливая организм и вызывая на коже человека загар (эритему). Применение эритемных ламп позволяет искусственным путем компенсировать недостаточность природного ультрафиолета в помещениях. При изготовлении этих ламп применяется так называемое увиолевое стекло, пропускающее ультрафиолетовые излучения в пределах до 280 нм.



Эритемные лампы широко применяются в лечебных учреждениях, школах, детских учреждениях, в спортивных залах и используются для периодического облучения рабочих, работающих в помещениях без естественного света.

Бактерицидные лампы излучают ультрафиолетовую радиацию, большая часть которой приходится на долю излучений с длиной волны 254 нм, обладающих способностью убивать бактерии. Лампы также изготавливаются из увиолевого стекла. Они широко используются для стерилизации воды, воздуха в помещениях и кондиционерах, в складах с продуктами питания, в сельском хозяйстве и т. п.

К этой же группе относятся лампы так называемого черного света. Длинноволновая ультрафиолетовая радиация, излучаемая такими лампами, невидима для глаз и безвредна. При облучении поверхностей невидимая радиация превращается в видимую с большей длиной волны. Цветность свечения вещества, облучаемого этими лампами, зависит от его физических свойств. Лампы черного света широко используются для люминесцентного анализа сырья и продукции, для оценки качества продуктов, для устройства автоматически открывающихся дверей в зданиях, при испытании строительных материалов и т. п.

Некоторые данные о лампах черного света приводятся на л. XIVА, рис. 3 и 4. Лампы черного света широко используются для архитектурного освещения.

Для архитектурного освещения применяются также люминесцирующие краски, штукатурки, графит, эн-каустика, стекла, эмали и т. п. Применение люминесцирующего фактурного слоя в облицовочных плитах фасадов и интерьеров создает многоцветный рисунок насыщенных тонов.

Люминесцентные лампы черного света изготавливаются мощностью 20 и 40 вт и применяются совместно с дросселем и стартером.

4. Газоразрядные лампы высокого давления

Среди ртутных ламп высокого давления наибольший интерес для архитекторов представляют дуговые ртутно-люминесцентные лампы (ДРЛ). Внутреннее устройство этой лампы приводится на л. XIVБ, рис. 5. Внутри овальной стеклянной колбы располагается ртутная лампа высокого давления в трубке из кварцевого стекла. Такие лампы обладают высокой экономичностью, в 2—2,5 раза большей, чем лампы накаливания одинаковой мощности. Однако использование этих ламп для ос-

вещения весьма ограничено вследствие плохой цветопередачи. Для устранения этого недостатка внутренняя поверхность колбы покрывается слоем термостойкого люминофора, излучающего в основном свет в области длин волн 610—770 нм. Ультрафиолетовые излучения, образующиеся при электрическом разряде в трубке, падая на слой люминофора, трансформируются в видимые излучения оранжево-красного цвета. Эти длинноволновые видимые излучения исправляют спектр излучаемого лампой света и приближают его к спектру естественного света. Световые, электрические и геометрические параметры ламп ДРЛ приводятся в табл. 1.26.

В противовес люминесцентным лампам ДРЛ мало чувствительны к изменению температуры окружающей среды и колебаниям на-

Таблица 1.26

Световые, электрические и геометрические параметры ламп ДРЛ

Типы ламп	Напряжение в сети в в	Мощность в вт	Световой поток в лм	Световая отдача в лм/вт	Яркость в кд/м²	Размеры в мм	
						диаметр	длина лампы
ДРЛ 250	220	250	9500	38	150 000	125	320
ДРЛ 500		500	21 000	42	150 000	145	360
ДРЛ 750		750	33 000	44	150 000	170	390
ДРЛ 1000		1000	46 000	46	150 000	200	440

пряжения; поэтому они широко используются для освещения улиц и площадей в городах. Весьма удобны они и для освещения высоких помещений. Включение этих ламп в сеть производится при помощи специального пускорегулирующего аппарата.

Разновидностью ламп типа ДРЛ являются зеркальные дуговые ртутные люминесцентные лампы. Верхняя часть этих ламп имеет параболическую форму и зеркальную отделку, на которую наносится слой люминофора. Световая отдача этих ламп на 14—18% ниже, чем ламп ДРЛ одинаковой мощности. Общий вид и разрез зеркальных ламп ДРЛ приводятся на л. XIVБ, рис. 6. Мощность их 250—400 вт.

К группе газоразрядных ламп относятся ксеноновые трубчатые лампы. Световая отдача их составляет 26—30 лм/вт. Ксеноновые лампы имеют обычно цилиндрическую форму (л. XIVБ, рис. 7).

Световые, электрические и геометрические параметры ксеноновой лампы приводятся в табл. 1. 27.

Ксеноновые лампы обладают весьма хорошей цветопередачей. Благодаря большой мощ-

Таблица 1.27

Световые, электрические и геометрические параметры ксеноновой лампы типа ДКСТ-20000

Мощность в вт	Напряжение в сети в в	Световой поток в лм	Сила света в св	Размеры в мм	
				диаметр	длина
20 000	380	580 000	56 000	27	1980

ности и высокой яркости ксеноновые лампы целесообразно использовать для освещения больших площадей в городах, на выставках и т. п. Эти лампы устанавливаются на высоких мачтах (высотой 30—40 м) и применяются в сочетании со специальными оптическими устройствами.

Несмотря на некоторые затруднения, возникающие при эксплуатации, ксеноновые лампы получают широкое распространение не только для уличного освещения, но и во всех случаях, когда необходимо обеспечить точную цветопередачу.

5. Некоторые другие источники света

Практический интерес для архитекторов имеют газоразрядные натриевые лампы, обладающие очень высокой световой отдачей (до 100 лм/вт). Эти лампы излучают монохроматический свет желто-оранжевого цвета (длина волны 598 нм). Поэтому они применяются для архитектурного освещения, а также для освещения автострад.

Лампы имеют длинную разрядную трубку обычно U-образной формы. Трубку помещают в цилиндрическую теплоизолирующую стеклянную рубашку с двойными или тройными стенками (л. XIVБ, рис. 8). Световые, электрические и геометрические параметры натриевых ламп приводятся в табл. 1.28.

Таблица 1.28

Световые, электрические и геометрические параметры натриевых ламп

Мощность в вт	Напряжение в сети в в	Световой поток в лм	Световая отдача в лм/вт	Размеры в мм	
				диаметр	длина
45	200	2500	55,5	50	260
60		4000	66,5	50	375
85		6500	76,5	50	610
140		10 000	71,5	65	810

Натриевые лампы включаются в сеть переменного тока 220 в через специальные повышающие автотрансформаторы. При хорошей теплоизоляции разрядной трубки внешняя среда не оказывает существенного влияния на световые характеристики лампы. Срок службы этих ламп до 3000 ч.

Особое место среди электрических ламп занимают электролюминесцентные источники света. В них для возбуждения люминофора непосредственно используется электрическое поле без предварительного свечения газа. Электролюминесцентные панели представляют собой плоский конденсатор с прозрачными токопроводящими обкладками и слоем люминофора, расположенными между ними (л. XIVБ, рис. 9).

Панели могут быть различной формы, размеров и цвета. Они представляют электрическую емкость, которая включается в сеть без дополнительного балласта. Под влиянием электрического поля люминесцирующий слой светится. Цветность свечения зависит от свойств люминофора и частоты, в то время как яркость свечения зависит от напряжения и частоты тока. Световые, электрические и геометрические параметры электролюминесцентных панелей приводятся в табл. 1.29.

Таблица 1.29

Световые, электрические и геометрические параметры электролюминесцентных панелей¹ (по данным фирмы «Филипс»)

Напряжение в в	Световая отдача в лм/вт	Формы панелей	Размеры в мм	
			светящейся части	общие
120 } 220 }	До 100 (теоретическая)	Квадратная Прямоугольная	До 280×280	До 300×300

Электролюминесцентные панели целесообразно применять в помещениях, где требуются низкие уровни освещения, создаваемого цветными источниками света (например, в некоторых цехах кино-и фотофабрик), а также для архитектурного освещения интерьеров.

¹ Электролюминесцентные панели у нас в массовых количествах пока не изготавливаются. Практическая световая отдача этих панелей во много раз меньше указанной в таблице.

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

1. Классификация осветительных приборов

Осветительные приборы разделяются на две группы: приборы ближнего действия — светильники и приборы дальнего действия — прожекторы.

Светильник представляет совокупность источника света и осветительной арматуры.

Осветительная арматура предназначается для: перераспределения светового потока, создаваемого источником света в требуемом направлении; защиты глаз от слепящей блескости источника света; крепления источников света и подводки электрического тока; защиты лампы от механических повреждений, пыли, влажности и т. п.; а также для специальных целей: изменения спектрального состава излучений и др.

Соответственно своему назначению светильники состоят из следующих основных частей:

отражателя (рефлектора), назначение которого отражать в помещение световые потоки, падающие на внутренние поверхности светильника; это увеличивает к.п.д. светильника;

рассеивателя, назначение которого уменьшить яркость источника света; нередко рассеиватель несет защитные функции от механических воздействий на источник света и от его запыления;

затенителя, назначение которого защитить глаз человека от слепящей яркости источника света;

преломителя, назначение которого распределить широко световой поток при выходе его из светильника.

Основой составляющей арматуры является оптическая часть осветительного прибора,

назначение которой — обеспечение требуемого светораспределения прибора и защита от чрезмерной яркости источника света.

Оптическая часть светильника в зависимости от принципа ее действия может быть отражающей, преломляющей и рассеивающей. На л. XV, рис. 1 приводятся схемы действия оптической части светильника, а также указания о светотехнических материалах, из которых выполняется оптическая часть прибора.

В практике часто применяются смешанные оптические части приборов в виде комбинации различных по действию оптических элементов (например, отражатель с рассеивателем, преломитель с отражателем и др.).

Основными светотехническими характеристиками светильников являются: кривая распределения силы света, коэффициент полезного действия (к.п.д.), защитный угол.

Большинство светильников можно характеризовать средней кривой распределения силы света в продольной вертикальной плоскости (обычно от 0 до 180°). Кривые распределения силы света приводятся для прибора с условной лампой, обладающей световым потоком в 1000 лм; это упрощает пользование кривыми при расчетах освещенности.

Лист XV

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Рис. 1. Виды отражателей (рефлекторов), рассеивателей и преломителей (рефракторов) в осветительных приборах

Рис. 2. Виды светильников для освещения помещений

Рис. 3. Схемы к определению защитного угла в различных типах осветительных приборов

По распределению силы света светильники разделяются на три класса: прямого, рассеянного и отраженного света. Светотехническая классификация светильников приводится на л. XV, рис. 3 и подробнее — в табл. I.30.

Экономичность светильника оценивается его коэффициентом полезного действия (к.п.д.),

под которым понимают отношение светового потока, излучаемого прибором Φ_n , к световому потоку лампы, установленной в этом приборе Φ_d , т. е.

$$\eta_{\text{п}} = \frac{\Phi_n}{\Phi_d} \quad (I.60)$$

Классы прибора	Типичная кривая силы света	Схема устройства	Доля светового потока в верхней полусфере%	Подклассы в зависимости от характера распределения силы света
прямого света			0—10%	концентрированного светораспределения среднего — широкого —
рассеянного света			10—45%	преимущественно прямого света
			45—55%	равномерно распределенного света
			55—90%	преимущественно отраженного света
отраженного света			90—100%	светораспределения среднего — широкого —

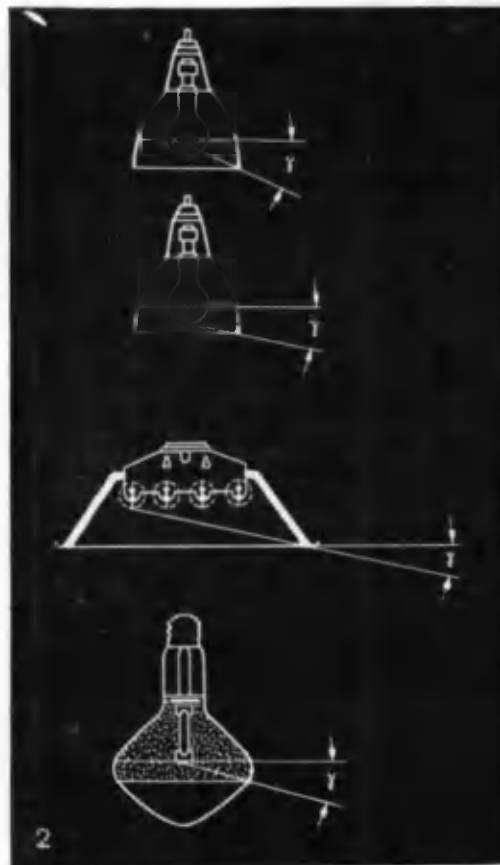


Схема действия оптической части	Оптическая часть прибора	Необходимые светотехнические материалы	Схема действия оптической части	Оптическая часть прибора	Необходимые светотехнические материалы
	А. ОТРАЖАТЕЛИ зеркальный отражатель	материалы с зеркальным отражением (зеркало, полированные металл и стекло и т.п.)		Б. РАССЕИВАТЕЛИ матированный отражатель рассеиватель	материалы с направленным-рассеивающим пропусканием (матированное стекло и пластмассы и т.п.)
	матированный отражатель	материалы с направленным-рассеивающим отражением (матированные металл и стекло, пластмасса, мрамор, светотехническая бумага, эмаль и т.п.)		диффузный рассеиватель	материалы с диффузно-рассеивающим пропусканием (молочное стекло, тонкий слой мрамора, гипса и т.п.)
	диффузный отражатель	материалы с диффузным отражением (гипс, фарфор, белый, алюминиевая краска, клеевая краска и т.п.)		В. ПРЕЛОМИТЕЛИ призматический преломитель	материалы с направленным пропусканием, на поверхности которых имеется система призматических элементов

Обычно светильники обладают к.п.д. в пределах от 0,6 до 0,9. Высокое значение к.п.д. обеспечивается при применении в светильниках отражателей с высоким коэффициентом отражения и рассеивателей или преломителей с высоким коэффициентом пропускания. Способствует также повышению к.п.д. увеличение отношения площади выходного отверстия S_v к площади отражателя S_o светильника.

Мерой защиты глаза от вредного действия высокой яркости лампы служит защитный угол. Это угол, образуемый горизонталью, проходящей через центр светящегося тела источника, и линией, соединяющей крайнюю точку светящегося тела с противоположным краем отражателя (л. XVI, рис. 2).

Светильники по архитектурно-конструктивному выполнению делятся на следующие группы:

открытые — в них лампа не изолируется от внешней среды; закрытые — в них лампа изолируется от внешней среды прозрачным или светорассеивающим стеклом или пластмассой;

влагозащищенные — в них корпус, патроны, отражатели делаются из влагостойких материалов или же покрываются антикоррозийными красками, которые обеспечивают надежную изоляцию токоведущих проводов;

пыленепроницаемые — в них предусматриваются меры по герметизации внутреннего пространства от пыли;

для химически активной среды; в них обеспечиваются надежные сопряжения из некорродируемых материалов (пластмасс, фарфора, алюминия);

взрывозащищенные — в них предусматриваются меры по устранению возможности образования искр.

По своему назначению светильники делятся на приборы общего и местного освещения. Приборы общего освещения предназначаются для освещения всего внутреннего пространства помещения; приборы местного освещения предназначаются для освещения рабочих мест.

В зависимости от места расположения и установки светильники бывают: подвесными (в частности, люстры), потолочными (плафоны), настенными (бра), напольными (торшеры).

2. Типы осветительных приборов для освещения помещений

Типы светильников в производственных зданиях выбираются с учетом главным образом технологических условий, в то время как в общественных зданиях решающими являют-

Лист XVI РАЦИОНАЛЬНЫЕ СВЕТИЛЬНИКИ С ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ ЛАМПАМИ

Рис. 1. Схема светильников типов ОД и ОДО, широко применяемых для освещения производственных помещений

Рис. 2. Светильник типа ТН с защитным стеклом или без него; применяются с 2—3 лампами

Рис. 3. Светильники типа АОД с боковыми стенками из молочного органического стекла

Рис. 4. Светильники типа ШОД обеспечивают хорошее рассеянное освещение помещения

Рис. 5—6. Светильники типов Л71Б и Л72Б; применяются преимущественно для освещения помещений общественного назначения

ся архитектурные соображения. Поэтому наряду с применением рациональных типов светильников, изготавливаемых промышленностью, архитекторы широко пользуются приемами встроенного освещения в виде световых потолков и панелей, световых карнизов, искусственных окон и т. п.

На л. XVI, рис. 1—6 приводятся рациональные установки с люминесцентными лампами, которые получили широкое применение у нас и за рубежом.

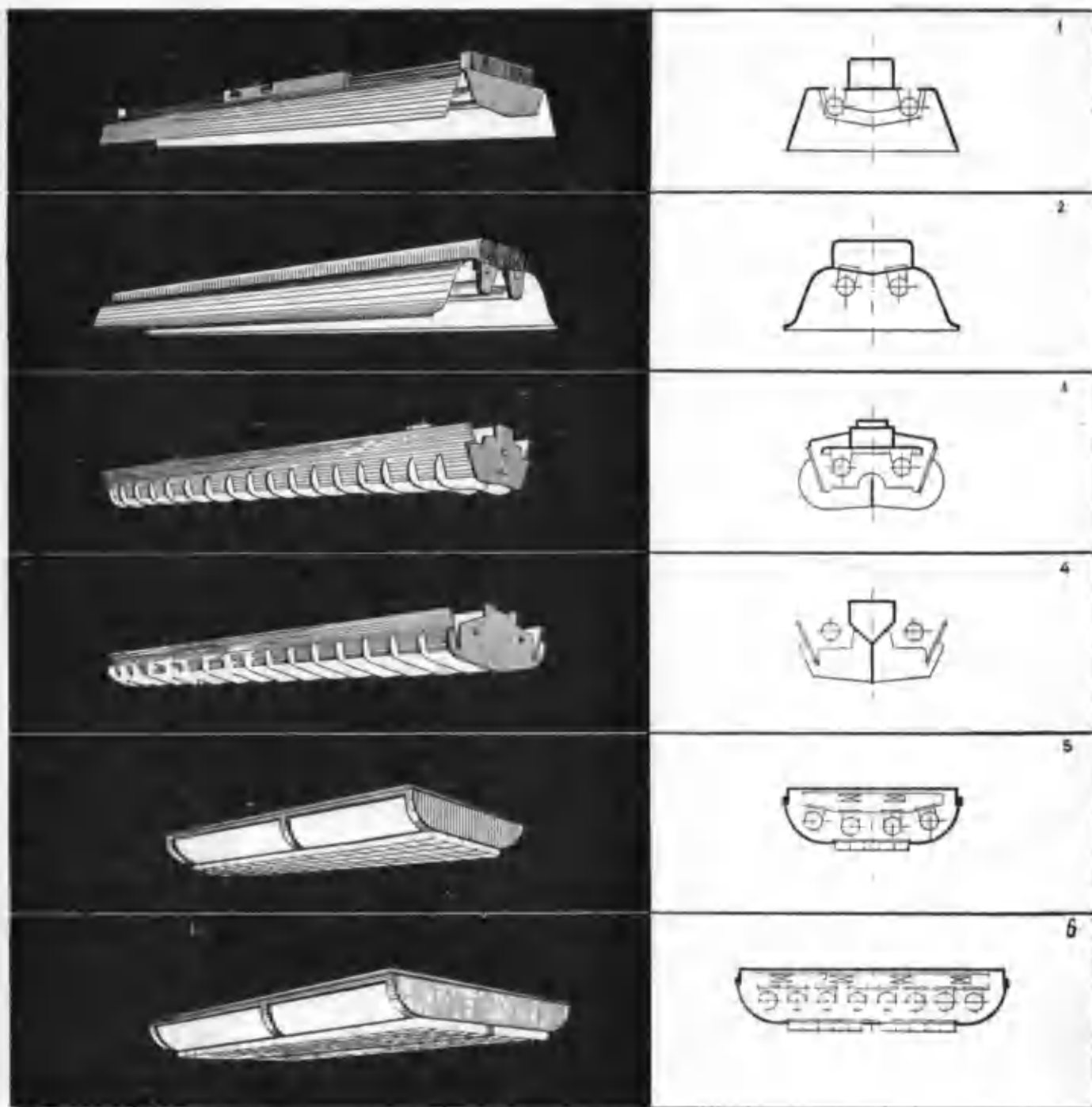
Светильники с люминесцентными лампами имеют обычно вытянутую в одном направлении форму и поэтому несимметричное распределение силы света. Однако, как показывают измерения, разница в характере распределения света в продольной и поперечной плоскостях этими осветительными приборами может быть незначительной при применении диффузных отражателей, рассеивателей или решеток-диффузоров.

В настоящее время осветительная арматура для люминесцентных ламп типизируется. Это позволяет из типовых деталей монтировать разнообразные светильники. Наибольшее применение для освещения больших помещений получили так называемые световые ряды (полосы); поэтому многие типы осветительных установок с люминесцентными лампами конструируются с учетом возможности как индивидуального их использования, так и соединения их в световые полосы.

Схемы светильников ОД и ОДО приводятся на л. XVI, рис. 1. Эти приборы применяются с затенителем или без него.

Светильники типа ТН в практике не отличаются от светильников типа ОД. Эти приборы изготавливаются с двумя-тремя лампами и не имеют затенителей. Снизу приборы защищаются стеклом. Схема прибора ТН приводится на л. XVI, рис. 2.

Светильники типа АОД с двумя лампами, применяемые в общественных зданиях, имеют



боковые стенки из светорассеивающего молочного органического стекла и решетчатый затенитель. Благодаря рассеянному распределению света эти приборы обеспечивают благоприятное распределение яркостей стен и потолка в помещении. Схема этого прибора приводится на л. XVI, рис. 3.

Открытые кверху приборы типа ШОД, выпускаемые Рижским светотехническим заводом, создают в помещении мягкое полуотраженное освещение (л. XVI, рис. 4).

Приборы указанных типов могут подвешиваться одиночно или сочленяться в световые полосы.

Осветительные приборы — плафоны типов Л71Б и Л72Б (л. XVI, рис. 5—6) предназначены для общественных зданий. Они изготовляются на 4—10 люминесцентных ламп мощностью 30—40 вт. Номенклатура некоторых светильников с люминесцентными лампами приводится в приложении.

Для освещения помещений общественного назначения широко используются осветительные установки отраженного освещения, в частности в виде световых карнизов. Применение световых карнизов требует от архитектора большого внимания в процессе работы над проектом интерьера. Нередки случаи, когда предусмотренные в рабочих проектах габариты карнизов не позволяют реализовать художественный замысел архитектора из-за невозможности расположить в карнизах необходимые источники света.

3. Светящие панели

Широкое распространение в настоящее время получили осветительные приборы встроенного вида — светящие панели и потолки. Габариты типовых элементов, из которых монтируется осветительная установка подобного характера, увязываются со строительным модулем.

Различают следующие виды светящих панелей:

панели с лампами, смонтированными в коробе, перекрытом светорассеивающим стеклом, располагающимся в плоскости потолка (л. XVII, рис. 1, 3) или выступающим из плоскости потолка (л. XVII, рис. 2);

панели с осветительными приборами, расположенными между несущими конструкциями (а) или в чердачном помещении (высотой более 1,5 м) над подвесным потолком и отделенными от помещения светорассеивающим стеклом (б) (л. XVII, рис. 4);

панели, соединенные с системой вентиляции и используемые для нагревания или охлаждения помещения (л. XVII, рис. 5).

Для обеспечения равномерной яркости световой панели необходимо, чтобы расстояние от стекла до лампы было не менее 100 мм, а расстояние между лампами не менее 200 мм.

В качестве рассеивателей для световых панелей могут применяться кроме стекол синтетические материалы: молочное органическое стекло, гофрированные рулонные материалы, пленки и т. д. Для обеспечения равномерной яркости световой панели необходимо соблюдать определенные соотношения расстояния от ламп до стекла и расстоянием между лам-

Лист XVII СВЕТЯЩИЕ ПАНЕЛИ

Рис. 1. Светящие панели типа ВНИСИ с защитным светораспределительным стеклом, расположенным в плоскости потолка. Осветительный прибор имеет откидной колпак для смены и очистки ламп. Пускорегулирующая аппаратура вынесена в отдельный ящик. Прибор рассчитан на 5 люминесцентных ламп мощностью 80 вт
а — поперечный разрез; б — продольный разрез; в — план

Рис. 2. Светящая панель типа ВНИСИ с светорассеивающим стеклом, выступающим из плоскости потолка. Применение такой панели позволяет подсвечивать потолок и устранять резкий контраст между светящейся и глухой поверхностями потолка

Рис. 3. Светящая панель, рассчитанная на три люминесцентные лампы. Имеет откидной колпак, позволяющий производить из помещения смену ламп и их очистку; снизу имеет светорассеивающее стекло

Рис. 4. Светящие панели в комбинации с звукопоглощающими плитами

а — светильники располагаются между выступающими ребрами несущих конструкций; б — панели встраиваются в подвесной потолок; 1 — люминесцентные лампы мощностью 80 вт и выше; 2 — светорассеивающее защитное стекло или экранирующая решетка из полимерных материалов; 3 — звукопоглощающая конструкция

Рис. 5. Светящие панели комбинированного типа; панель при помощи гибкого шланга соединяется с системой вентиляции. Это позволяет использовать тепло, образующееся в осветительном приборе, уменьшить загрязнение стекла, использовать прибор как вентиляционную решетку

а — разрез панели; б — детали сопряжений

пами. Для некоторых рассеивателей эти соотношения должны быть при люминесцентных лампах не менее 0,7 и при лампах накаливания — 0,5.

4. Типы осветительных приборов для освещения улиц и площадей

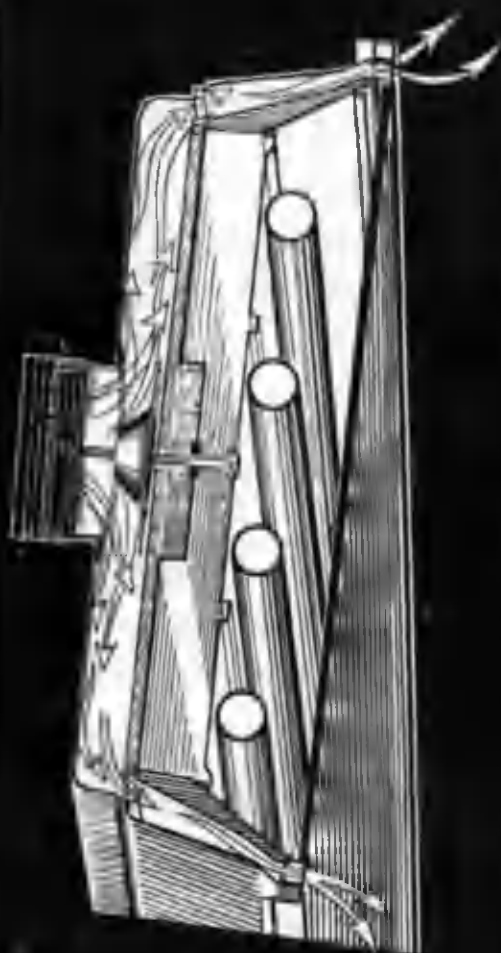
Для освещения улиц и площадей городов СССР преимущественно используются лампы накаливания мощностью от 100 до 1000 вт, установленные в осветительных приборах следующих типов:

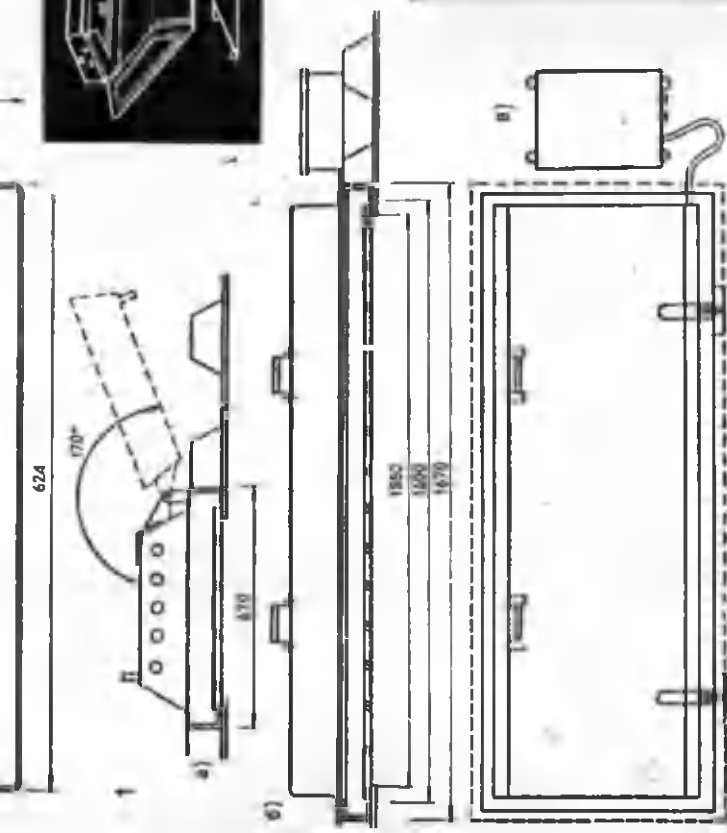
с несимметричным широким светораспределением; эти приборы дают максимальную силу света в зоне 67—75° от вертикали и характеризуются различным распределением света в разных вертикальных сечениях;

с симметричным широким светораспределением; эти приборы дают максимальную силу света в зоне 67—70° от вертикали и характеризуются равномерным распределением света в пространстве;

с симметричным прямым светораспределением; основная доля светового потока в этих приборах направлена в зону 0—90°;

с рассеянным светораспределением; в этих приборах световой поток распределяется равномерно по всем направлениям.





По способам установки осветительные приборы для освещения улиц и площадей подразделяются на подвесные, консольные, встроенные в здания.

Желательное распределение светового потока в пространстве осуществляется отражателем, а также рассеивающим или призматическим защитным стеклом.

За последнее время широкое распространение получили зеркально-призматические осветительные приборы, в которых концентрация светового потока в вертикальной плоскости обеспечивается верхним симметричным зеркалом, а распределение света в горизонтальной плоскости — применением рефрактора с вертикально расположенными призмами.

Лист XVIIIА

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ С ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ ЛАМПАМИ

Рис. 1. Фонари консольного типа с люминесцентными лампами, применяемые у нас и за рубежом. Двухконсольные опоры целесообразно применять для автомагистралей с односторонним движением

Рис. 2. Фонари подвесного типа осветительных установок; подвешиваются на тросах в поперечном или продольном направлении

Рис. 3. Фонари с люминесцентными лампами, рекомендуемые для освещения микрорайонов

Рис. 4. Профиль улицы, освещаемой подвесным осветительным прибором

Рис. 5. Опоры консольного типа с разным выносом консолей в сторону проезжей части и тротуара

Таблица 1.30

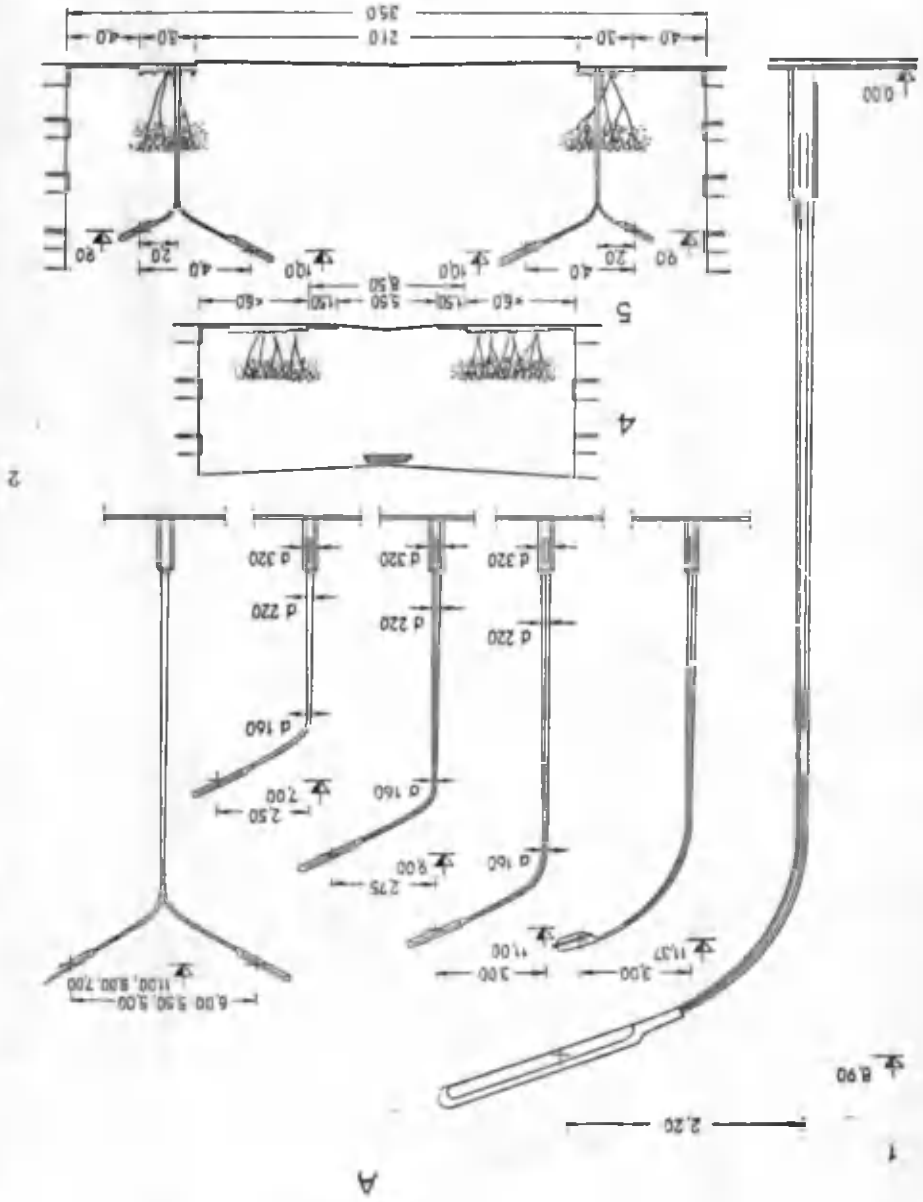
Светотехническая классификация симметричных светильников (по Белькинд)

Класс	Наименование	Характеристика	Подкласс	Характеристика
П	Прямого света	Не менее 90% всего светового потока излучается в нижнюю полусферу	P_k	Концентрированного светораспределения $\Phi_{0-40} > 0,5 \Phi_{св}$
			P_c	Среднего светораспределения $\Phi_{0-50} \geq 0,5 \Phi_{св} > \Phi_{0-40}$
			$P_{ш}$	Широкого светораспределения $\Phi_{0-50} < 0,5 \Phi_{св}$
О	Отраженного света	Не менее 90% всего светового потока излучается в верхнюю полусферу	O_k	Концентрированного светораспределения $\Phi_{140-180} \geq 0,5 \Phi_{св}$
			O_c	Среднего светораспределения $\Phi_{130-180} \geq 0,5 \Phi_{св} > \Phi_{140-180}$
			$O_{ш}$	Широкого светораспределения $\Phi_{130-180} < 0,5 \Phi_{св}$
Р	Рассеянного света	Световой поток распределяется по обеим полусферам так, что в одну из них излучается более 10%, а в другую менее 90%	P_n	Преимущественно прямого светораспределения $0,55 \Phi_{св} < \Phi_{\cap} < 0,9 \Phi_{св}$
			P_o	Преимущественно отраженного светораспределения $0,55 \Phi_{св} < \Phi_{\cup} < 0,9 \Phi_{св}$
			P_p	Равномерного светораспределения $0,45 \Phi_{св} < \frac{\Phi_{\cap} + \Phi_{\cup}}{2} < 0,55 \Phi_{св}$

Обозначения: Φ_{0-40} , Φ_{0-50} — световые потоки, заключенные в пределах угла $0-40^\circ$ и $0-50^\circ$ (от вертикали); $\Phi_{св}$ — световой поток светильника; $\Phi_{\cap}$ — световой поток, излучаемый в нижнюю полусферу; $\Phi_{\cup}$ — световой поток, излучаемый в верхнюю полусферу.

Принцип действия призматических осветительных приборов основывается на перераспределении световых излучений преломляющими призмами рефрактора (преломитель).

Применяя различные профили призм, можно добиться любого распределения светового потока в пространстве. Требуемое для уличного освещения распределение силы света



ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ НАРУЖНОГО
ОСВЕЩЕНИЯ С ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ ЛАМПАМИ

может быть обеспечено при помощи двух преломителей: внутреннего с горизонтально расположенными призмами и наружного — вертикальными призмами. Однако применение двух преломителей значительно удорожает прибор; поэтому в практике отдают предпочтение более простым приборам с одним рефрактором. Данные об области применения светильников приводятся в табл. I.31.

Наряду с лампами накаливания в последнее время для освещения улиц и площадей все шире применяются газоразрядные лампы: люминесцентные, дуговые ртутно-люминесцентные, натриевые.

Применение люминесцентных ламп для освещения улиц и площадей ограничивается из-за резкого уменьшения их светового потока при изменении температуры стенок колбы. Кроме того, понижение температуры весьма затрудняет работу пуско-регулирующего аппарата.

Таблица I.31

Данные об области применения светильников
наружного освещения

Типы светильников по каталогу	Рекомендуемая область их использования
Светильники с мощными люминесцентными лампами 80 <i>вт</i> и более типов: СПЛ-3×80, СРЛ-3×80 и др.	Главные площади городов, центральные улицы в общественных и торговых центрах и т. п. с высокими требованиями к архитектурной стороне освещения
Светильники с мощными лампами ДРЛ 250 <i>вт</i> и более типов: СЗПР-250, ШЗУ-1000 и др.	Главные транспортные площади города, скоростные городские дороги и др. с высокими требованиями к безопасности движения
Светильники с лампами накаливания мощностью от 100 до 500 <i>вт</i> типов: СПО-300, СПО-500, СПЗ-300, СПЗ-500 и др.	Улицы и дороги районного и местного значения

Примечание. Световые характеристики светильников наружного освещения приводятся в табл. I.40.

Примеры осветительных приборов с люминесцентными лампами для освещения улиц и площадей городов приводятся на л. XVIIIА, рис. 1—5.

Из газоразрядных ламп для уличного освещения особенно целесообразны ртутно-люминесцентные лампы (типа ДРЛ) мощностью от 250 до 1000 *вт*. Наряду с высокой световой

Рис. 6. Фонари консольного типа с лампами типа ДРЛ

Рис. 7. Мачты высотой 25—30 м для осветительной установки из мощных ламп типа ДРЛ

Рис. 8. Общий вид осветительных приборов для архитектурного освещения

отдачей (в 2,5—2 раза больше ламп накаливания) лампы ДРЛ обладают тем преимуществом, что их работа не зависит от температуры наружного воздуха.

На л. XVIIIБ, рис. 6 приводятся примеры осветительных приборов с лампами ДРЛ, применяемые у нас и за рубежом.

Для освещения автострад, перекрестков, а также для подсвечивания зданий нередко применяются осветительные приборы с натриевыми лампами.

Осветительные приборы для освещения улиц и площадей монтируются на опорах, а также на кронштейнах и тросах, прикрепляемых к стенам зданий. Совокупность опоры и осветительного прибора называют фонарем. Различают опоры свободно стоящие, несущие только осветительные приборы, и совмещенные, используемые для подвешивания контактной сети троллейбуса и сети уличного освещения.

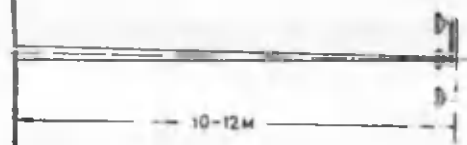
Опоры фонарей изготавливаются из дерева, железобетона, стальных и асбестоцементных труб и других материалов.

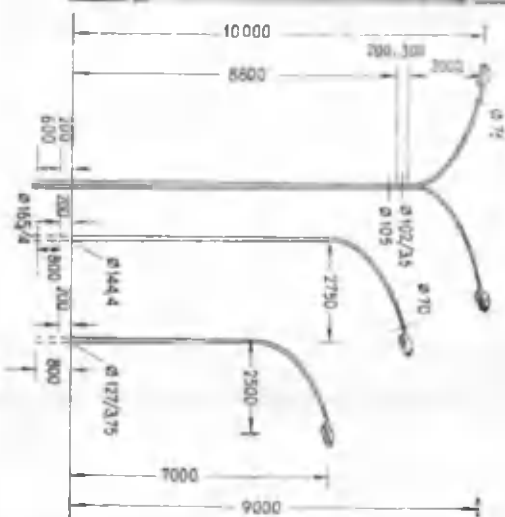
Примеры железобетонных опор, разработанных Главмосжелезобетоном, приводятся в табл. I.32.

Таблица I.32

Размеры железобетонных опор

Назначение опоры	Тип	Полная длина ствo- ля в м	Высота надземной части в м	Форма сечения
Свободно стоящие	М1	11	9,3	Восьмигранная
	М2	11,5	8,5	Треугольная
	М4	10,5	8,5	Круглая
	М5	9,5	7,5	
	МБ-4	11,5	9,5	Треугольная
Совме- щенные	МБ-6	11,5	9,5	
	МК-4	11,5	9,5	Круглая
	МК-6	11,5	9,5	
	МБ-6	11,5	9,5	Восьмигранная





107

On



Широкое распространение получили стальные и железобетонные опоры с развитой консолью; такие конструкции позволяют далеко выносить осветительные приборы в сторону проезжей части улицы.

Для освещения больших площадей применяются осветительные приборы с мощными дуговыми ртутно-люминесцентными и сверхмощными ксеноновыми лампами. Такие осветительные приборы монтируются на мачтах высотой 25—30 м (л. XVIIIБ, рис. 7).

Применение осветительных приборов с ксеноновыми лампами позволяет резко уменьшить количество опор и осветительных приборов, необходимых для освещения площади. Такие приборы установлены в настоящее время на Комсомольской площади в Москве и на одной из площадей в Тбилиси.

Некоторые виды осветительных приборов для подсвечивания зданий приводятся на листе XVIIIБ, рис. 8.

НОРМИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

1. Нормы освещенности

При нормировании освещенности помещений разного назначения исходят из видимости объекта различения, под которым понимают отдельную часть рассматриваемого человеком предмета (например, нить ткани в прядильном цехе, шрифт в книге и т. д.).

Исследованиями установлено, что для хорошей видимости рассматриваемого предмета необходимо обеспечить:

а) постоянство освещенности и достаточную яркость рабочей поверхности, на которой сосредоточивается внимание человека;

б) благоприятное распределение яркости в поле зрения;

в) отсутствие ослепленности, возникающей при попадании в поле зрения ярких источников света.

Необходимая яркость рабочей поверхности зависит от углового размера предмета, контраста между фоном и деталью и яркости фона. Уровень необходимой яркости повышается с уменьшением углового размера объекта различения и контраста между деталью и фоном, на котором деталь рассматривается.

Существующие нормы искусственного освещения нормируют минимальную освещенность, значения коэффициентов запаса, учитывающего старение и загрязнение источников света, а также допускаемое ограничение прямой блескости. Надо отметить, что такое нормирование справедливо только для поверхностей, обладающих диффузным (рассеянным) отражением.

Нормы освещенности производственных, жилых и общественных зданий приводятся в санитарных нормах СН 245-63. Нормы для

производственных помещений содержат семь разрядов, при этом первые пять из них установлены в зависимости от размера объекта различения, оцениваемого в долях миллиметра. Первые четыре разряда делятся на четыре подразряда, каждый из которых учитывает контраст объекта с фоном и отражающие свойства фона.

Контраст объекта различения с фоном принимается:

- а) малым — при контрасте меньшем 0,2;
- б) средним — при контрасте от 0,2 до 0,5;
- в) большим — при контрасте большем 0,5.

Фон считается:

а) темным — при коэффициенте отражения меньшем или равном 0,3;

б) светлым — при коэффициенте отражения большем 0,3.

Нормы даются отдельно для систем общего и комбинированного освещения. Система общего освещения предусматривает освещение всего объема помещения; система комбинированного создается совместным действием общего освещения с местным на рабочих поверхностях. Разница в нормируемых уровнях освещенности при системе общего и комбинированного освещения объясняется в основном экономическими соображениями; этим же объясняются и повышенные уровни освещенности при люминесцентном освещении.

Согласно требованиям норм светильники общего освещения должны создавать на рабочей поверхности освещенности не менее 10% от освещенности, нормированной для данного разряда работ при комбинированной системе освещения.

В помещениях с одним искусственным освещением нормируемые освещенности повы-

шают на одну ступень по сравнению с помещениями того же назначения с естественным освещением.

Освещенность рабочих мест при общем освещении, создаваемом люминесцентными лампами, должна быть не менее 100 лк.

Свойство светящихся поверхностей нарушать уровень видимости предмета называют блескостью, а состояние глаза при воздействии на него блескости — ослепленностью.

Ограничение ослепленности в нормах регулируется наименьшей допустимой высотой расположения светильника над полом; эта высота зависит от защитного угла светильника, характера рассеивателя и мощности источников света. При этом высота расположения светильника не ограничивается в следующих случаях:

если светильники не попадают в поле зрения в пределах угла 40° к горизонту;

при малой мощности ламп накаливания (до 60 Вт) или для ламп в матированной колбе;

при наличии в светильнике матового рассеивателя.

В жилых и общественных зданиях требуется, чтобы яркость светильников, попадающих в поле зрения в пределах угла 40° к горизонту, не превышала:

в жилых зданиях, конторах — 5000 нт;

в школах, больницах, детских учреждениях — 2000 нт.

2. Расчет искусственного освещения

Для приближенного расчета необходимого количества ламп в помещении с общим равномерным освещением пользуются удельной мощностью W_y , под которой подразумевают частное от деления общей мощности ламп P на освещенную площадь S . Удельная мощность является достаточно устойчивым показателем для помещений одинакового назначения.

Пользуясь зависимостью между удельной мощностью и величиной освещенности, можно просто определять необходимое количество ламп в помещении.

Пример. Требуется определить необходимое количество люминесцентных ламп для освещения помещения при следующих исходных данных:

площадь помещения $10 \times 20 = 200 \text{ м}^2$;

нормируемая освещенность 300 лк;

светильники прямого света с решетчатым затенителем.

По справочнику находим, что $W_y = 40 \text{ Вт}$ — для освещенности 300 лк.

Общая установленная мощность осветительной установки $W = 40 \cdot 200 = 8000 \text{ Вт}$.

Для освещения выбираем люминесцентные лампы мощностью 80 Вт. Необходимое количество ламп составит $8000 : 80 = 100$ шт.

Более точным является расчет освещения по методу коэффициента использования. Основное уравнение метода

$$N = \frac{E S k Z}{\Phi_{\text{л}} \eta} \quad (1.61)$$

где N — число светильников;

E — нормированная средняя освещенность в лк;

S — площадь помещения в м^2 ;

k — коэффициент запаса (равный обычно 1,5);

$\Phi_{\text{л}}$ — поток каждой лампы в лм;

η — коэффициент использования в долях единицы;

Z — коэффициент, учитывающий неравномерность освещения отношением средней освещенности к минимальной¹.

Коэффициент использования η представляет отношение потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп; он зависит от характеристик светильника, размеров и пропорций помещения (индекса) и средневзвешенного коэффициента отражения потолка и стен. Индекс помещения вычисляется по формуле:

$$i = \frac{S}{H_p (a + b)} \quad (1.62)$$

где S — площадь помещения в м^2 ;

H_p — расчетная высота от рабочей поверхности до светильника в м;

a, b — ширина и длина помещения в м.

Усредненные значения коэффициента использования приводятся в табл. 1.33.

Таблица 1.33

Усредненные значения коэффициента использования η

Индекс помещения	Средневзвешенный коэффициент отражения потолка и стен $\rho_{\text{ср}}$	Тип светильников		
		прямого света	рассеянного света	отраженного света
Меньше или равен 0,8	0,6	0,27	0,19	0,05
	0,4	0,36	0,26	0,18
Меньше 2	0,6	0,4	0,19	0,08
	0,4	0,47	0,37	0,26
Больше 2	0,6	0,5	0,3	0,12
	0,4	0,57	0,5	0,36

Примечание. Точные значения коэффициентов η даются в светотехнических справочниках.

Усредненные значения коэффициента использования для расчета карнизного освещения при зеркальных и люминесцентных лампах приводятся в табл. 1.34.

¹ Коэффициент Z не вводится при расчете на среднюю освещенность.

Таблица 1.34

Усредненные значения коэффициента использования для расчета карнизного освещения при люминесцентных и при зеркальных лампах

$S_n : S_p$		1,2—1,5				1,6—3			
r_n		50		70		50		70	
r_c		30	70	30	70	30	70	30	70
i	Коэффициент использования								
0,5		7 11	11 17	10 16	16 26	5 7	8 12	8 12	13 20
1		12 20	16 25	19 29	24 38	8 13	11 17	15 22	19 29
2		17 28	20 32	26 42	30 47	12 19	14 21	21 32	24 36
4		21 33	22 36	32 50	34 53	15 22	16 24	25 38	27 41

Обозначения: S_n — площадь потолка или свода над карнизом; S_p — площадь пола; r_n — коэффициент отражения потолка; r_c — то же, стен; i — индекс помещения.

Примечание. Над чертой приводятся значения η для люминесцентных, а под чертой — для зеркальных ламп.

Наряду с описанными приближенными методами существуют точные способы расчета искусственного освещения, описанные в специальных учебниках по светотехнике.

Пример. Требуется определить необходимое количество люминесцентных ламп для освещения помещения при следующих исходных данных:
размеры помещения $20 \times 10 = 200 \text{ м}^2$;
высота от рабочей плоскости до светильника 3 м;
нормируемая освещенность 200 лк;
светильники прямого света;
внутренняя отделка светлая ($r_{cp} = 0,6$);
лампы люминесцентные типа ЛБ мощностью 80 вт.
Коэффициент запаса — 1,5.

Определяем индекс помещения

$$i = \frac{200}{3(10+20)} = 2,2.$$

По табл. 1.33 находим, что $\eta = 0,5$.

Выбираем люминесцентные лампы типа ЛБ, для которых $\Phi_d = 3440 \text{ лм}$ (по справочнику).

По формуле 1.61 находим

$$N = \frac{200 \cdot 200 \cdot 1,5}{3440 \cdot 0,5} = 35 \text{ шт.}$$

3. Проектирование освещения интерьеров. Требования к архитектурному освещению

Освещение интерьеров тесно связано с архитектурой. Следующие два правила должны строго соблюдаться при выборе системы и способа освещения:

традиционные системы освещения должны изменяться в соответствии с новыми источниками света, обеспечивая хорошее качество освещения;

осветительные приборы являются частью интерьера и поэтому должны удовлетворять не только утилитарным, но и архитектурно-художественным требованиям.

Наиболее привычным и относительно лучшим для человека является естественное освещение. Поэтому при выборе системы и способов искусственного освещения рекомендуется стремиться к созданию в интерьере световой обстановки, приближающейся к природной.

Наиболее важными характеристиками дневного освещения на открытом месте являются: высокий уровень освещенности;

сочетание прямого солнечного света с рассеянным светом неба, смягчающего контраст светотени;

спектр рассеянного света, позволяющий в наилучшей степени различать цвета.

Эти особенности естественного освещения следует иметь в виду в тех случаях, когда архитектор задается целью создать единство интерьера в дневные и вечерние часы.

При проектировании искусственного освещения помещения архитектор решает следующие задачи:

выбирает систему освещения, тип светильников и их расположение в помещении соответственно утилитарному требованию создать комфортные условия зрительной работы на рабочих местах;

согласовывает выбранную систему освещения с художественным замыслом, используя свет для акцентирования пространственной композиции интерьеров;

увязывает спектральный состав света, излучаемого светильниками, с цветовой отделкой помещения.

В практике проектирования освещения зданий широко используется система общего освещения, которая характеризуется равномерным или локализованным расположением светильников. При равномерном освещении расстояния между светильниками (а также между светящимися панелями) обычно сохраняются постоянными, при локализованном — место расположения каждого светильника определяется стремлением архитектора создать наиболее благоприятное для данного случая распределение и направление светового потока, а следовательно, и тенеобразование.

Система комбинированного освещения находит широкое применение в помещениях, где

наряду с высоким уровнем освещенности для хорошей видимости необходимо варьировать направление светового потока, регулировать расположение теней, контраст светотени, а также спектральный состав света.

При выборе системы освещения и осветительных приборов архитектору полезно знать следующие положения, объясняющиеся физиологическими свойствами глаза:

плоская поверхность потолка или пола воспринимается плоской только при равномерном освещении; изменение яркости влечет за собой и изменение восприятия плоскости; так, например, плоский потолок с повышенной яркостью посередине воспринимается как сводчатая поверхность;

вогнутые и выпуклые поверхности в условиях естественного освещения имеют неравномерную яркость; поэтому равномерное освещение купола или свода вызывает ощущение плоскости; повышение яркости в центре купола создает иллюзию повышения купольного пространства и, наоборот, увеличение яркости по периметру купола вызывает ощущение уплощенного купола.

При определении требований к освещению интерьера архитектору следует учитывать, что его восприятие в большей степени определяет выбранный прием освещения.

Так, применение осветительных приборов прямого света создает неравномерное распределение яркостей в помещении: верхние части стен и потолок остаются темными; при этом между верхними и нижними частями помещения создается резкий контраст, сообщающий интерьеру отличный от дневного облика вид. Однако прием прямого освещения оказывается весьма удачным при дополнении его рассеянным светом, который смягчает контрасты светотени и придает интерьеру большую выразительность.

Изучение и анализ приемов архитектурного освещения интерьеров общественного назначения позволяет сформулировать ряд положений, которыми надлежит руководствоваться архитектору при решении этой задачи. Опыт показывает, что в тех случаях, когда архитектор самоустранился или передоверяет ее решение светотехникам или электрикам, неизбежно возникает искажение художественного замысла и обеднение интерьера.

А. Органическая связь интерьера с его архитектурной организацией

Усложненная архитектурная схема интерьера требует более сложного его освещения. Связь между архитектурой интерьера и его

Лист XIX

ОСВЕЩЕНИЕ СТАНЦИИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Рис. 1. Станция «Аэропорт». Выбранная система освещения усиливает архитектурную трактовку интерьера

Рис. 2. Выбранная система освещения на станции «Октябрьская» искажает восприятие интерьера вследствие неудачно выбранного места расположения светильников

Рис. 3. Сопоставление проекта с натурой станции «Электровозовская» свидетельствует о сохранении художественного замысла зодчего

Рис. 4. Акцентирование светом тесситики потолка станции «Комсомольская площадь»

Рис. 5. Сопоставление проекта с натурой на станции «Киевская» свидетельствует о резком искажении художественного замысла зодчего

освещением удобно раскрыть на некоторых примерах станций Московского метрополитена. Станции «Аэропорт» и «Библиотека имени Ленина» (л. XIX, рис. 1) перекрыты сводами эллиптической формы. Несмотря на одинаковое архитектурно-конструктивное решение, авторы этих решений по-разному использовали освещение. На станции «Аэропорт» освещение акцентирует и усиливает архитектурную трактовку интерьера; люстры подчеркивают композиционную ось зала и цельность внутреннего пространства.

Между тем цельность внутреннего пространства станций «Библиотека имени Ленина» разбита пилонами и арочными поясами. Дробность архитектурного решения интерьера усилена средствами освещения в виде плафонов, расположенных на внутренней поверхности арочных поясов. Это прием декоративного, а не тектонического членения внутреннего пространства интерьера светом.

Б. Увязка расположения осветительных приборов в интерьере с его архитектурным решением

Осветительный прибор является не только источником света, но и архитектурной деталью интерьера. Двойственная роль осветительного прибора требует со стороны архитектора большого внимания при выборе и расположении приборов в интерьере. Рассмотрим прием освещения станции «Октябрьская» (л. XIX, рис. 2). Для освещения использованы настенные осветительные приборы, расположенные на поверхностях пилонов. Эта система общего освещения приходит в противоречие с композиционной осью зала; кроме того, ярко освещенные верхние части пилонов зрительно разрушают тектоничность интерьера и искажают его восприятие. Такой прием освещения резко нарушил привычное нам распределение



2



3



4



4

светотени и придав интерьеру подчеркнутую декоративность.

Архитектурная роль осветительного прибора в определенной мере зависит от места его расположения; оно должно быть четко обоз-

начено, как это, например, сделано на своде боковых нефов на станции «Маяковская».

Случайное расположение светильников, допущенное на станции «Арбатская», свидетель-

ствуется о незавершенности архитектурной организации интерьера.

В. Согласование светового ритма с архитектурным ритмом интерьера

При расположении осветительных приборов в интерьере архитектор может создать непрерывную неизменную светотень, подобную природной (от солнца). Такая светотень создается в помещении, например, при протяженных световых панелях и светящем потолке. Однако при точечном расположении осветительных приборов в помещении создают дополнительно к архитектурному световой ритм, который иллюзорно расчленяет внутреннее пространство и протяженные архитектурные детали (например, карниз, архитрав и т. п.).

Умение согласовать архитектурный ритм со световым хорошо продемонстрировано на станции «Динамо» и др.

Г. Зависимость ощущения насыщенности светом интерьера от распределения яркостей в поле зрения человека

В общем случае впечатление насыщенности помещения светом определяется освещенностью и коэффициентом отражения отделочных материалов. Поэтому, чтобы интерьер воспринимался насыщенным светом, необходимо воздерживаться от применения большого количества темных отделочных материалов.

Насыщенность светом помещения следует увязывать с архитектурной задачей. Нарастание насыщенности в направлении от второстепенных помещений к главным, центральным, подчеркивает парадность и значение зала. Наоборот, нивелирование световой обстановки в разных помещениях обычно обедняет композиционную концепцию интерьеров.

Хорошим примером служит интерьер станции «Электрозаводская», где распределение яркостей подчеркивает доминирующую роль центрального зала в архитектуре интерьера (л. XIX, рис. 3).

Д. Зависимость выбора и расположения осветительных приборов в интерьере от его тектонической системы

Правдивость архитектуры в большей степени зависит от умения архитектора светом выявлять тектонику интерьера. Удачный при-

Рис. 1. Прием встроенного освещения люминесцентными лампами с защитным зеркальным стеклом и экранирующими решетками
1 — люминесцентная лампа; 2 — защитное стекло; 3 — затеняющая решетка

Рис. 2. Экранирующие решетки сложного профиля, позволяющие повышать коэффициент полезного светового действия установки

Рис. 3. Экранирующие решетки представляют часто поставленные ребристые конструкции (доски и др.), которые скрывают расположенные в их глубине люминесцентные лампы разной цветности

Рис. 4. Схемы устройства искусственных окон; яркость окон и цветность свечения тщательно подбираются для создания иллюзии естественного света

Рис. 5. Приемы карнизного освещения помещений. Для обеспечения равномерного освещения потолка необходимы определенные соотношения между шириной помещения и высотой от ламп до потолка

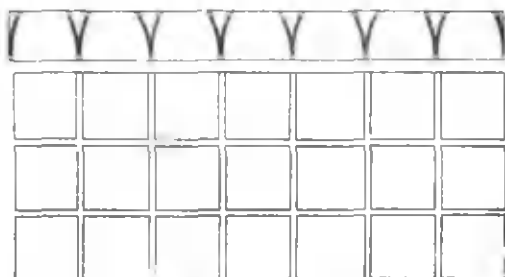
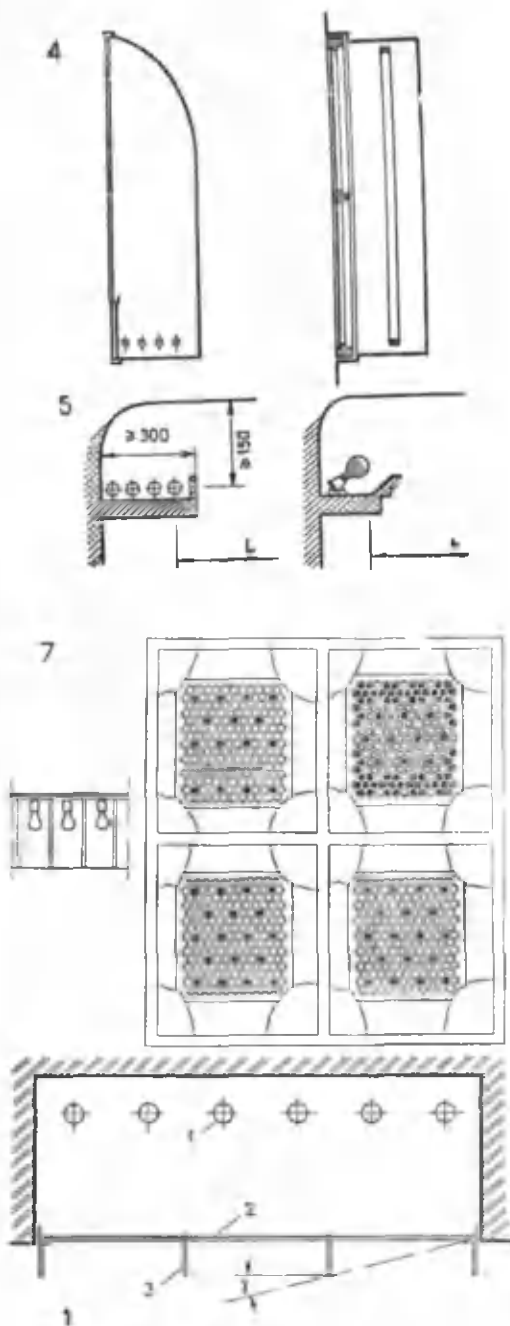
Рис. 6. Пример карнизного освещения концертного зала в Шарльруа (Бельгия)

Рис. 7. Фрагмент потолка в одном из залов в Дании

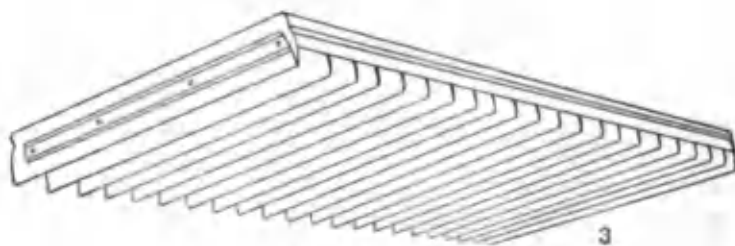
мер выявления светом тектоники потолка приводится на л. XIX, рис. 4. С этой точки зрения неудачным является освещение станции «Киевская». Подвешенные в куполах потолка осветительные приборы расположены выше его уровня. Созданная световая обстановка в интерьере резко отличается от задуманной в проекте (л. XIX, рис. 5). Резкий световой контраст, созданный темным потолком, разрушает тектонику и цельность конструкции интерьера. Освещенные купола в перспективе воспринимаются огромными рефлекторами, масштабно не согласующимися со слабыми приборами освещения. Неестественное распределение яркостей в поле зрения посетителя (пол светлее потолка) усугубляет декоративность освещения.

Е. Устранение резких контрастов между яркостью деталей и фона

Отрицательная роль сильных яркостных контрастов между деталью и фоном проявляется не только в быстром утомлении или раздражении глаза наблюдателя, но и в утрате отчетливой видимости архитектурной формы и цвета. Нередко расположенные рядом яркие и темные грани предмета при адаптации зрителя на невысокую яркость окружающего пространства лишают предмет его цельности и тектоничности. Так, например, повышенная яркость верхней части колонн (вблизи от зер-



2



3

кальных ламп) на станции «Кропоткинская» привела к «дематериализации» утонченной части колонн.

Ж. Согласование общего освещения с архитектурой интерьера

Зрительное восприятие формы, как известно, определяется распределением на ней яркостей. Обычная плоская поверхность в за-

висимости от освещения может выглядеть волнистой, вогнутой. Искажение восприятия поверхности при различном ее освещении обусловливается расположением и световыми качествами осветительных приборов, а также физическими свойствами самих поверхностей.

Постепенное автоматическое погрупповое включение световых панелей по мере угасания естественного света позволяет в помещениях создать незаметный переход от дневного

освещения к вечернему. При этом внешний облик интерьера сохраняется.

При устройстве световых панелей и светящихся потолков обычно исходят из яркости, близкой к яркости облачного неба у горизонта (1500—1000 нт).

Светящиеся потолки, используемые для создания в помещениях искусственного дневного света, условно можно отнести к осветительным установкам прямого освещения. При устройстве подвесного потолка лампы обычно устанавливаются без арматуры; отражателем в этом случае служит белая поверхность перекрытия.

Для остекления светящегося потолка можно применять стекло, обладающее высокой прочностью: волнистое стекло, армированное-матированное, сталинит, а также различные виды органического стекла и стеклопластиков (плоского-матированного, рифленого и др.).

Весьма целесообразно в качестве органического рассеивателя использовать тонкие винилитовые пленки, натягиваемые на металлический каркас конструкции потолка.

Для уменьшения яркости светящихся потолков часто применяют решетчатые затенители, которые нередко используются и для акустических целей.

Схема устройства светящегося потолка с затенителями приводится на л. XX, рис. 1.

В конструктивном отношении затенители делятся на:

сотообразные решетки, монтируемые из штампованных элементов из полистирола, стеклопластика, металла и др.;

ребристые затенители, собираемые из тонких ребер из дерева, металла, пластмассы.

Световое действие затеняющих решеток зависит от их коэффициента отражения; обычно им придают светлую окраску. Нередко затеняющие решетки делают из материалов (например, полистирола), обладающих способностью в незначительной степени пропускать свет.

Обычно для общественных зданий применяют затенители с защитным углом 30—45°.

Примеры применения решетчатых затенителей в светящихся потолках приводятся на л. XX, рис. 2, 3, 7.

Для равномерного освещения затеняющей решетки надо лампы располагать как можно выше над ней; однако при этом снижается их яркость, а следовательно, и экономичность осветительной установки.

Наиболее распространенными в современной архитектуре интерьеров являются осветительные приборы рассеивающего света. Их

Лист XXI

ОСВЕЩЕНИЕ ДВОРЦА СЪЕЗДОВ В КРЕМЛЕ

Рис. 1. Схема плана зрительного зала; на плане схематически показаны падуго и кессоны потолка

Рис. 2. Внутренний вид зрительного зала.

Видны падуго с карнизным освещением и скошенная часть потолка над эстрадой со скрытыми в кессонах потолка зеркальными люминесцентными лампами

Рис. 3. Деталь карнизного освещения зрительного зала

Рис. 4. Общий вид банкетного зала.

Средняя часть зала освещается скрытыми в кессонах подвесного потолка люминесцентными лампами; боковые части зала освещаются встроенными приборами с лампами накаливания

Рис. 5. Осветительные приборы с лампами накаливания (а), люминесцентными лампами (б) и зеркальными лампами (в)

Рис. 6. Общий вид светящегося потолка Гербового зала

Рис. 7. Приемы освещения фойе при помощи светящихся полос, чередуемых с встроенными приборами с лампами накаливания

применение позволяет приблизить внешний облик интерьера к восприятию его в условиях естественного освещения.

Для того чтобы верхняя часть стен и потолка воспринималась светлой, необходимо применять осветительные приборы, которые посылали бы в верхнюю полусферу не менее 30% создаваемого ими светового потока.

К осветительным приборам рассеянного света относятся искусственные окна, ниши и т. д. При использовании этих видов осветительных установок необходимо:

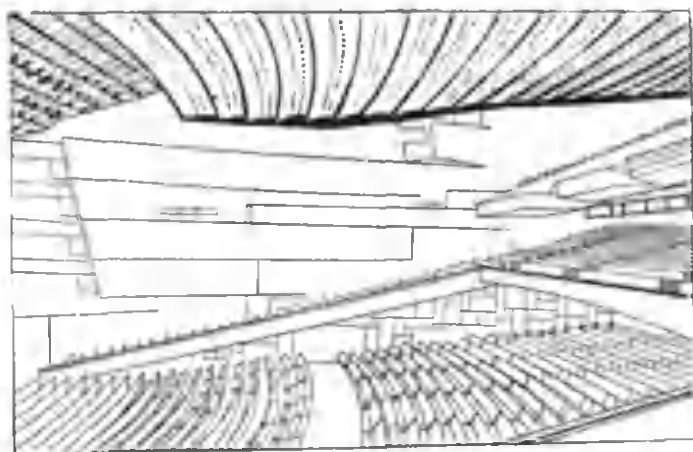
не допускать в поле зрения яркость окон (ниш) более 500 нт;

обеспечивать равномерное распределение яркости на его поверхности; это достигается удалением ламп от стекла, уменьшением расстояния между лампами и применением светорассеивающих стекол (матовых, опаловых, рифленых и др.).

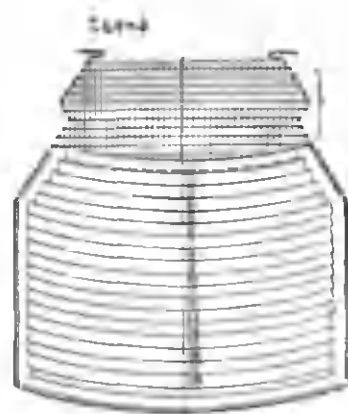
Схема такого вида осветительных установок приводится на л. XX, рис. 4.

Рекомендуемое отношение расстояния между лампами к расстоянию от лампы до остекления при применении молочного или опалового стекла составляет соответственно 1,5—2.

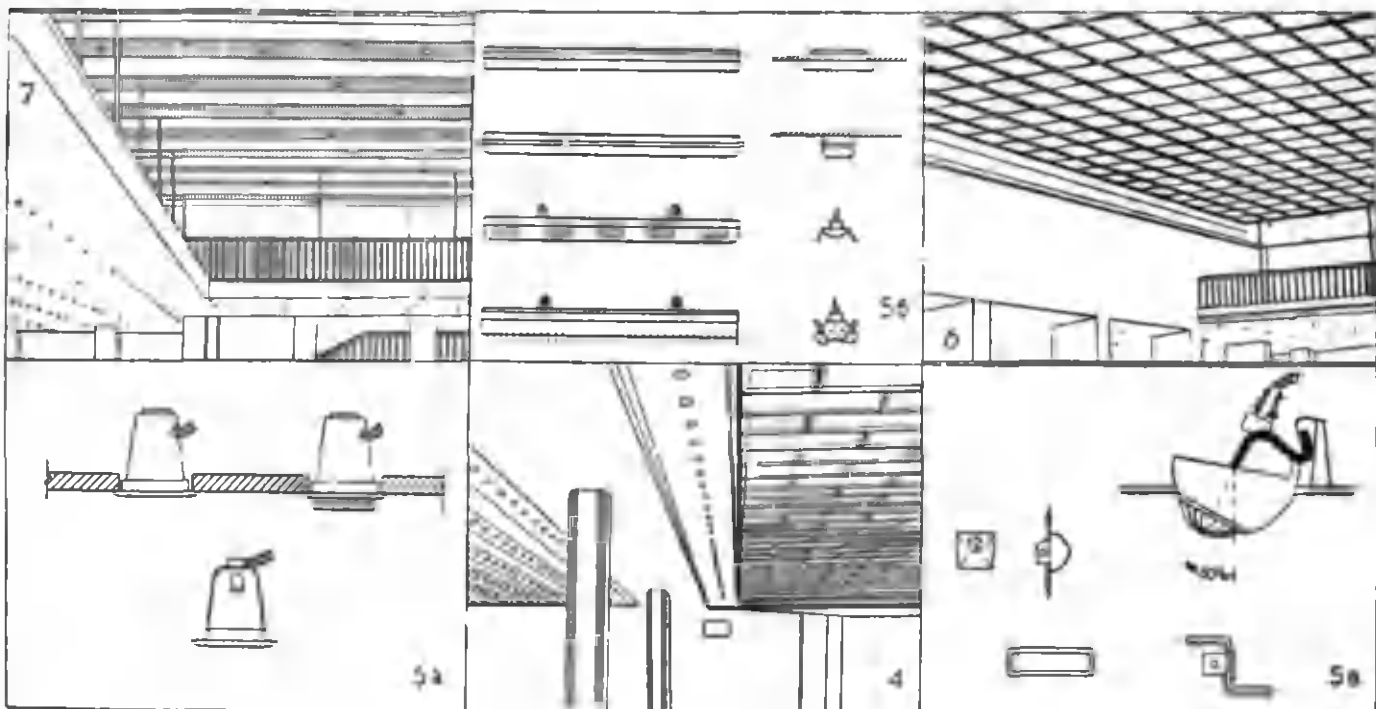
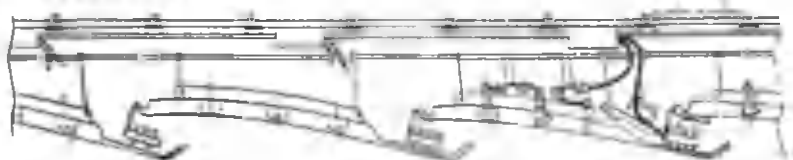
Осветительные приборы отраженного света создают наиболее спокойную световую обстановку в интерьере благодаря отсутствию блескости и светотени. Однако в экономическом отношении установки отраженного света требуют в 2—3 раза больше затраты электроэнергии по сравнению с приборами прямого света. Благоприятное архитектурное освещение создается при сочетании мягкого отраженного освещения с направленным светом дополнительных приборов.



2



3



Большая роль при применении отраженного света принадлежит потолку, который служит отражающим экраном; поэтому высокая отражающая способность потолка ($\rho=0,7—0,8$) является необходимой предпосылкой для применения установок отраженного света.

Равномерность освещения потолка зависит от расстояния источников света до потолка: чем это расстояние больше, тем равномернее освещенность потолка.

При решении карнизного освещения рекомендуются следующие соотношения:

расстояние ламп от потолка должно быть при обычных лампах не менее $\frac{1}{6}$, а при зеркальных, наклонно расположенных лампах накаливания — не менее $\frac{1}{15}$ ширины помещения; расстояния между лампами накаливания вдоль карниза — в пределах 25—50 см.

Карниз не следует делать глубоким, с большим защитным углом, значительно снижающим коэффициент полезного действия установки.

Для карнизного освещения целесообразно применять люминесцентные лампы, которые обычно устанавливаются не менее чем в 2 ряда.

Рекомендуемые схемы светящихся карнизов с различными лампами приводятся на л. XX, рис. 5. Пример использования карнизного освещения приводится на л. XX, рис. 6.

Для обеспечения равномерности освещения потолка необходимо соблюдать определенные соотношения между L и h (где h — расстояние от ламп до потолка); при диффузно-отражающей поверхности потолка эти соотношения выбираются следующими (л. XX, рис. 5): при одностороннем расположении ламп L/h равно 2,5, при двустороннем — 6, при периметральном — 9.

Прекрасный пример гармоничного решения утилитарной и художественной сторон освещения представляет Кремлевский Дворец съездов, в состав которого входят зрительный зал на 6000 человек (л. XXI, рис. 1—3), банкетный зал на 2500 человек (рис. 4), многочисленные фойе и кулуары.

Для освещения большинства помещений дворца применены люминесцентные лампы с разной цветностью свечения. Широко использованы для освещения также зеркальные лампы накаливания глубокого светораспределения, а также лампы с криптоновым наполнением.

Архитектурное освещение дворца характеризуется разнообразием приемов и широкой номенклатурой осветительных приборов.

Схемы осветительных приборов с люминесцентными лампами и лампами накаливания приводятся на л. XXI, рис. 5. Наряду с одиночными светильниками в залах дворца широко использованы светящиеся полосы, панели, потолки, образующие в единстве с внутренней отделкой своеобразную световую архитектуру интерьера. Световая архитектура зрительного зала дворца (площадь партера 1500 м²; высота 17—21 м) создается системой световых карнизов, предусмотренных в местах сопряжения 18 падуг двойной кривизны (л. XXI, рис. 2, 3). В световых карнизах установлены в три ряда люминесцентные лампы типа теп-

ло-белого света мощностью 40 вт. Поверхность падуг имеет перфорацию (9% от их площади), необходимую для акустических целей. В падугах сделаны отверстия диаметром 12 см, расположенные в три ряда. Отверстия закрыты металлической сеткой и экранирующими кольцевыми решетками, защищающими зеркальную лампу мощностью 150 вт.

Примыкающая к сцене часть потолка решена в виде наклонной в сторону зала поверхности, выполненной в виде сотообразной конструкции. В сотах расположены люминесцентные и зеркальные лампы.

Пользуясь установленными осветительными приборами в зрительном зале, можно осуществлять несколько программ освещения в зависимости от характера выступлений в нем. Удельная установленная мощность осветительных приборов в зрительном зале — 330 вт/м².

Гербовый зал дворца площадью 960 м² и высотой 8 м (л. XXI, рис. 6) имеет светящийся потолок, образованный из 612 ячеек размерами 1,2×0,8 м. Каждая ячейка закрыта снизу листом молочного органического стекла, опирающегося по контуру на алюминиевый переплет. По периметру переплета сделана экранирующая решетка из алюминия, окрашенного белой эмалью.

На расстоянии 0,4 м от стекла находится рефлектор, сделанный из листового перфорированного алюминия, на котором укреплены две люминесцентные лампы. Горизонтальная освещенность в зале на уровне пола 700—800 лк. Удельная мощность (без учета ламп в карнизе) составляет 51 вт/м².

Банкетный зал площадью 3900 м² и высотой в центральной части 7,5 м, по бокам — 5 м имеет подвесной потолок из перфорированных панелей размерами 0,64×0,64 м (л. XXI, рис. 4). Панели окрашены белой эмалью. Перфорация составляет 20% площади панелей.

Центральная часть зала освещается отраженным светом от сводчатого подвесного потолка, создаваемым люминесцентными лампами, расположенными в коробах прямоугольной формы размерами 1,92×1,28 м. Горизонтальная освещенность на уровне пола составляет от 800 до 1100 лк. Удельная мощность 88 вт/м².

Интересный прием продемонстрирован в фойе, где применено сочетание светящихся полос с встроенными в подвесной потолок лампами накаливания. Образующийся вдоль длинного зала световой ритм весьма выгодно выявляет пространство зала (л. XXI, рис. 7).

АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ГОРОДОВ

1. Требования к освещению городов

Освещение — один из важнейших элементов благоустройства города. Прежде всего оно обеспечивает безопасность движения транспорта и пешеходов.

Наряду с этим освещение улиц и площадей, рекламное освещение, подсвеченные фасады и малые архитектурные формы, витрины образуют своеобразный световой облик города с наступлением темноты.

Светом можно выделять архитектурные ансамбли и отдельные здания, имеющие большое общественно-историческое значение и художественную ценность.

Различают следующие виды постоянных осветительных установок в городах:

для наружного освещения дорог с основным назначением — обеспечить на улицах и площадях достаточную освещенность для безопасности движения транспорта и пешеходов;

для архитектурно-художественного освещения с созданием выразительного вечернего облика площадей, улиц, парков;

для рекламного освещения с основным назначением — информации населения о различных товарах, о новых постановках в театрах и кинотеатрах и т. п.; сюда относится также освещение магазинных витрин и киосков;

для световых сигналов, указателей остановок транспорта, места нахождения театров и кинотеатров, «островков безопасности» в средней части улиц, светящихся дорожных знаков, входов в здания и т. д.

Совокупность всех этих осветительных установок, отличающихся по своему назначению

и архитектурным приемам светового оформления, образует световое хозяйство города, которое должно планироваться и управляться из одного центра. Отсутствие координации и взаимной увязки в решении разных осветительных установок неизбежно приводит не только к нарушению правил рационального освещения, но и к снижению художественного уровня светового оформления города.

Для безопасности уличного движения необходимо создать хорошие условия видимости для водителей экипажей и пешеходов, обеспечивающие быструю ориентировку и своевременное обнаружение препятствий.

Водителем автомашины предметы и люди рассматриваются преимущественно на фоне более яркой поверхности дорожного покрытия. Таким образом, видимость на улицах в основном зависит от яркости дорожного покрытия, которая в свою очередь зависит от уровня освещенности и от коэффициента отражения покрытия.

В СССР уличное освещение регламентируется строительными нормами и правилами, согласно которым населенные места городского и сельского типов в отношении устройства уличного освещения разделяются на пять групп.

I. Крупные города с населением в 250 тыс. жителей и более.

II. Большие города с населением от 100 до 250 тыс. жителей.

III. Средние города с населением от 50 до 100 тыс. жителей.

IV. Малые города с населением до 50 тыс. жителей.

Улицы, площади, проезды и дороги в городах и поселках в отношении устройства

уличного освещения разделяются на следующие категории:

А) магистральные улицы общегородского значения, транспортные площади, скоростные городские дороги, главные площади городов, площади перед вокзалами;

Б) магистральные улицы районного значения, главные улицы городов, площади перед театрами, клубами, рынками, стадионами и др. дороги общегородского значения;

В) улицы и дороги местного значения в районах многоэтажной застройки, площади в жилых районах;

Г) проезды и пешеходные дороги в микрорайонах, жилые улицы местного значения в районах малоэтажной застройки.

Устройства уличного освещения нормируются:

а) для улиц, проездов, дорог и площадей, имеющих усовершенствованные покрытия,— по значениям средней яркости (в *нт*) и равномерности ее распределения на сухих покрытиях в направлении наблюдателя, находящегося на оси движения транспорта;

б) для улиц, проездов и дорог, имеющих переходные покрытия, а также для транспортных и пешеходных тоннелей, придомовых участков и аллей скверов и бульваров, примыкающих к проезжей части улиц и площадей — по значениям минимальной горизонтальной освещенности (в *лк*) на уровне земли и равномерности ее распределения.

Яркость дорожных усовершенствованных покрытий проезжей части улиц, дорог, проездов и площадей должна быть не ниже величин, указанных в табл. 1.35, независимо от типа применяемых источников света.

Таблица 1.35

Средняя яркость (в *нт*) усовершенствованных покрытий улиц и площадей в полосе движения транспорта

Категории улиц	Группы городов		
	I	II	III
А	0,7	0,4	0,2
Б	0,4	0,2	0,1
В	0,1	0,1	0,1

Примечание. Средняя яркость покрытий определяется для прямолинейного участка проезжей части длиной 150 м и шириной 6 м.

На улицах, площадях и дорогах с интенсивным движением транспорта средняя яркость усовершенствованных покрытий в полосе движения должна быть (независимо от категории улиц и группы городов) не менее величин, указанных в табл. 1.36.

На улицах, проездах, дорогах и площадях

Таблица 1.36

Средняя яркость усовершенствованных покрытий улиц, проездов, дорог и площадей в зависимости от интенсивности движения

Наибольшее число транспортных единиц, проходящих по улице за 1 ч в обоих направлениях	Средняя яркость поверхности полосы движения в <i>нт</i>
Более 2000	1
От 1000 до 2000	0,7
• 500 • 1000	0,4
• 200 • 500	0,2
• 50 • 100	0,1

отношение максимальной яркости к минимальной не должно превышать 3:1 — при нормированном значении средней яркости 0,4—1 *нт* и 5:1 — при нормированном значении средней яркости 0,1—0,2 *нт*.

Средняя яркость непроезжих участков улиц (тротуары, стоянки автомашин и др.) должна быть не ниже 0,5 значений средней яркости, нормированной для проезжей части этих улиц.

Минимальная горизонтальная освещенность на уровне земли улиц, проездов и дорог, имеющих переходные покрытия, а также аллей, скверов и бульваров должна быть не ниже величин, указанных в табл. 1.37.

Таблица 1.37

Минимальная горизонтальная освещенность улиц, а также аллей и тротуаров

Группа городов	I	II	III
Категории улиц, проездов, дорог и аллей			
Улицы категории Г	0,5	0,2	0,2
Пешеходные дорожки бульваров, тротуары на улицах категории:			
А	2	1	0,5
Б	1	0,5	0,2

Минимальная горизонтальная освещенность проезжей части на уровне земли в придомовых дворах в районе многоэтажной застройки (4 этажа и больше) жилых и общественных зданий должна быть не менее 0,5 *лк* для городов I группы и не менее 0,2 *лк* для городов II—IV групп.

Дворовые участки при школах и детских учреждениях должны иметь наружное освещение, обеспечивающее на уровне земли минимальную освещенность не менее 0,2 *лк*.

На улицах, проездах, а также в придомовых участках отношение максимальной гори-

горизонтальной освещенности к минимальной не должно превышать 15:1. На аллеях скверов и бульваров это отношение не должно превышать 25:1.

На улицах, проездах и дорогах отношение расстояния между опорами по линии их расположения (шаг) к высоте подвеса светильников не должно превышать 5 при нормированном значении средней яркости 0,4—1 нт и 6 при нормированном значении средней яркости 0,1—0,2 нт, или минимальной освещенности 0,2—1 лк.

На улицах, площадях и дорогах с интенсивным движением транспорта при нормированном значении яркости 0,4—1 нт для получения контраста, обеспечивающего необходимую видимость, высота подвеса светильников должна быть не ниже значений, определяемых выражением:

$$H = 1,6 \sqrt{\frac{\Phi_{\text{л}} \cdot 10^{-3}}{B}} \quad (1.63)$$

где H — высота подвеса светильников;

B — нормированное значение яркости;

$\Phi_{\text{л}}$ — световой поток ламп одного фонаря.

При проектировании осветительных установок следует вводить коэффициент запаса, учитывающий снижение яркости и освещенности в процессе эксплуатации установки. Коэффициенты запаса и соответствующие им сроки чистки осветительных приборов приведены в табл. 1.38.

Таблица 1.38
Коэффициенты запаса

Характеристика объекта	Коэффициент запаса		Сроки чистки светильников не реже
	при газоразрядных лампах	при лампах накаливания	
Улицы, дороги, площади и проезды	1,5	1,3	3 раза в год

2. Типы осветительных приборов для наружного освещения и их расположение

В качестве источников света для освещения улиц и площадей применяются лампы накаливания и газоразрядные: люминесцентные типа ДРЛ, натриевые, ксеноновые.

Укрупненная номенклатура осветительных приборов для наружного освещения и их характеристики приводятся в табл. 1.39 и 1.40.

Рациональное освещение улиц обеспечивается не только применением эффективных осветительных приборов, но и соответствующим

Таблица 1.39
Номенклатура осветительных приборов для наружного освещения

Источники света	Мощность в вт	Светораспределение	Оптическая система	Коэффициент полезного действия
Лампы накаливания	100—1000	Прямое, равномерное, широкое, симметричное и несимметричное	Призматическая и комбинированная	0,7
ДРЛ	80—1000	То же	То же	0,7
Лампы: люминесцентные	40—80	Прямое и широкое несимметричное	Призматическая	0,7
натриевые	140—280	Широкое несимметричное	То же	0,7
ксеноновые дуговые	6000—20 000	Широкое симметричное	Зеркальная	0,75

Таблица 1.40
Характеристики осветительных приборов для наружного освещения

Виды осветительных приборов	Тип прибора	Характеристики	
		Мощность в вт	светораспределение
Осветительные приборы с лампами накаливания	СПО-300	300	Симметричное и несимметричное
	СПО-500	500	
	СПО-200	200	
	СЗП-500С	500	
	СЗП-500Б	500	
	СЗП-500В	500	
Зеркально-призматический прибор с лампами ДРЛ	ШЗУ-1000	1000	Широкое несимметричное
	СЗПР-250	250	
	СЗПР-500	500	
Зеркальный прибор с люминесцентными лампами	СКЗПЛ 3×80	80	То же
	СКЛ 2×125	125	
Прибор с натриевыми лампами	СНУ-140	140	
	СКН-140	140	

им их расположением на улице. Возможные схемы расположения фонарей на улицах и площадях приводятся на л. XXII, рис. 1—12. При выборе наивыгоднейшего расположения осветительных приборов можно пользоваться данными табл. 1.41.

Таблица 1.41

Рекомендуемые расстояния между осветительными приборами и высота подвеса при разных схемах их расположения

Типы приборов	Ширина улицы в м	Высота подвеса в м	Расстояние между приборами в м	Мощность на 1 пл. км улицы в квт
А. При осевом расположении вдоль улицы				
Прямого света	10	6—7,5	20—23	4—18
	15	7,5	25	12—20
	20	8	25—20	8—25
	25	8,5	27—26	11—29
Симметричного светораспределения	15	7,5	28—22	5—14
	20	8	33—27	6—16
	25	8,5	27	7—19
Б. При шахматном расположении приборов вдоль улицы				
Рассеянного света	15	7—8	25—23	53—12
	20	7—8	28—25	14—76
	25	7—9	20—25	29—117
	35	8—9	21—26	93—154
	45	9—10	20	200
Прямого света	15	7—8	33—30	9—40
	20	7—8	29—26	10—46
	25	7—9	30—26	20—75
	35	8—9	35—26	62—154
	45	9—10	36—24	83—176
Симметричного широкого светораспределения	15	7—8	45—40	67—30
	20	7—8	40—30	8—13
	25	7—9	40—38	30—53
Несимметричного широкого светораспределения	15	7—9	45—50	13—40
	20	7—8	43—40	28—50
	25	7—9	37—36	32—55

3. Архитектурное освещение города

Современный город нельзя себе представить без вечернего искусственного освещения. Оно не только обеспечивает нормальные жизненные функции города (движение, транспорт и др.), но и используется для архитектурно-художественных и рекламных целей.

Широкое распространение в последние годы различных осветительных средств для освещения городов содействовало развитию новой области архитектурного искусства, получившей за рубежом название «световой архитектуры» города.

Развитию световой архитектуры городов способствовали международные выставки, и в частности, Всемирная выставка 1958 г. в Брюсселе. Эта выставка продемонстрировала новые архитектурно-художественные возможности, открывающиеся перед современными зодчими на основе рационального использования последних достижений осветительной техники.

Лист XXII

Фонари для освещения улиц и площадей

- Рис. 1. Прием осевого освещения улицы шириной до 18 м подвешенными осветительными приборами
- Рис. 2. То же, осевого двухрядного освещения улицы шириной до 24 м
- Рис. 3. То же, диагонального освещения улицы шириной до 18 м
- Рис. 4. То же, шахматного освещения улицы шириной до 18 м
- Рис. 5. То же, одностороннего освещения осветительными приборами на опорах улицы шириной до 12 м
- Рис. 6. Прием двустороннего освещения фонарями, расположенными на двух сторонах улицы шириной до 24 м
- Рис. 7. Одностороннее освещение при помощи фонарей консольного типа улицы шириной до 18 м
- Рис. 8. Прием освещения при помощи фонарей консольного типа, расположенных по двум сторонам улицы шириной до 30 м
- Рис. 9. Прием освещения при помощи фонарей, расположенных в шахматном порядке с двух сторон улицы шириной до 36 м
- Рис. 10. Прием освещения улицы системой фонарей и встроенного в здания освещения
- Рис. 11. Прием освещения улиц в жилой части микрорайона
- Рис. 12. Прием освещения больших площадей осветительными приборами с мощными лампами ДРЛ и ксеноновыми, установленными на высоких опорах

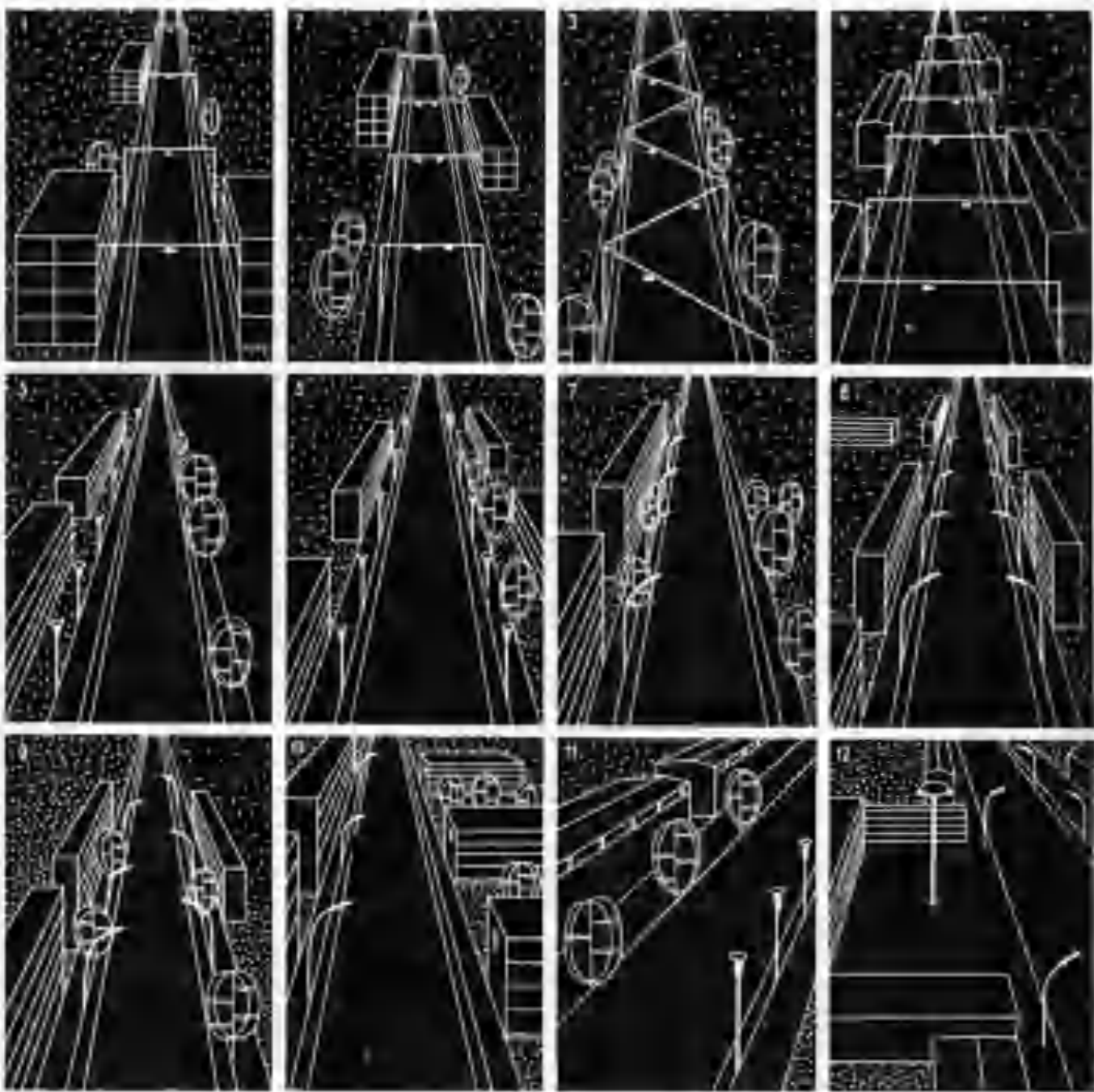
Каждый город имеет центральные площади, а также ценные в архитектурном, историческом или общественном отношении ансамбли и здания. В условиях наступившей темноты они скрываются в общей застройке города, обедняя его архитектурный облик.

Между тем, используя современную осветительную технику, архитектор, подобно режиссеру в театре, может акцентировать светом ценные в архитектурном отношении здания и, наоборот, скрывать от зрителя все то, что нарушает архитектурный ансамбль площади или улицы города.

Было бы неправильно полагать, что световая архитектура должна воспроизводить полностью дневной облик площади, улицы, здания. Это привело бы не только к чрезмерным затратам электроэнергии, но и не дало бы хорошего эффекта ввиду большого различия в структуре естественного и искусственного света, в контрастности освещения, направлении световых потоков и т. п.

Световая архитектура, подобно сценическому освещению, выделяет отдельные участки города или здания из общего темного фона, освещая тем или иным способом пространство площади или улицы, а также контуры и фрагменты объема и фасадов зданий.

Световая архитектура города или комплекта зданий создается столь же целеустремленно и гармонично, как и дневная архитектура.



тура,— на основе соблюдения принципа ансамбля, т. е. соразмерного расположения светящихся пятен и создания гармонии света и цвета.

Это обуславливает необходимость индивидуального подхода к световому оформлению различных участков города на основе предварительного изучения общественного значения и

архитектурного облика зданий, характера застройки и топографических особенностей местности. Только после такого анализа можно разрабатывать проект архитектурного освещения проспектов, площадей и зданий.

Задача архитектора состоит в том, чтобы при проектировании придать наибольшую выразительность художественным произведени-

ям архитектуры и, наоборот, скрыть все ненужное, второстепенное.

В этом различие нашего понимания задач световой архитектуры, которая за рубежом обычно служит рекламным целям, не имеющим ничего общего с истинно художественными устремлениями.

Качественно новая архитектура и планировка кварталов и улиц наших городов требуют принципиально иного подхода к их освещению. Обычное освещение улиц длинным рядом однотипных фонарей с однообразным по спектру светом, применяемое при периметральной застройке, оказывается нерациональным в системе микрорайонов. Четко выраженная изоляция жилой застройки от автомагистралей, использование внутриквартального пространства для отдыха населения, создание общественных и торговых центров требуют новых приемов наружного освещения площадей, улиц, проездов, зданий.

Архитектурное освещение городских зданий, образующих световые ансамбли, создается одним из следующих способов:

а) светом, заливающим фасад здания при помощи зеркальных ламп и прожекторов с лампами: накаливания, кварцево-иодными, натриевыми и ксеноновыми;

б) светом, проходящим через окна, витрины;

в) световой графикой и контурным освещением, т. е. подсвечиванием архитектурных членений при помощи светящихся линий, создаваемых лампами: накаливания, люминесцентными с холодными катодами, кварцево-иодными;

г) использованием эффекта «перетекающего пространства», т. е. применением единого приема архитектурного решения освещения интерьера и экстерьера;

д) рекламным освещением;

е) люминесцирующей облицовкой фасадов светящимися штукатурками, энкаустиком, эмалью, пластмассами.

Выбор приема освещения зависит от следующих факторов:

характера архитектуры освещаемого ансамбля или здания;

архитектурной роли здания в вечернем облике площади или улицы;

возможного расположения осветительных приборов.

Здания, характеризующиеся сложной пластикой и небольшими размерами окон, целесообразно освещать заливающим светом в сочетании со светом, проходящим через окна; выявлять их разнообразные объемы при по-

Лист XXIII

ПРИЕМЫ АРХИТЕКТУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ЗДАНИЯ

Рис. 1

а — при двустороннем расположении прожекторов при равенстве Φ_1 и Φ_2 восприятие объема здания искажается; резкие двусторонние тени зрительно деформируют боковые части здания; б — при двустороннем расположении прожекторов при соотношении $\Phi_1: \Phi_2 = 1:3-1:4$ восприятие объема приближается к дневным условиям

Рис. 2

а — при концентрированном расположении прожекторов наблюдается резкая тень, искажающая восприятие правой стороны здания; б — при одностороннем рассредоточенном расположении прожекторов падающая на боковую часть здания тень смягчается и приобретает градиент, улучшающий восприятие объема

Рис. 3

а, б — при равномерном освещении объема последний теряет свою пластичность

Рис. 4. Восприятие цилиндра при разных способах его освещения.

Наилучшее восприятие обеспечивается при двустороннем освещении при соотношении световых потоков $\Phi_1: \Phi_2 = 1:3-1:4$

мощи световой графики или контурного освещения.

В современных зданиях целесообразно использовать прежде всего свет, проходящий через окна и витражи и объединяющий внутреннее и внешнее пространство в единое архитектурное решение.

Для выявления архитектурного ритма отдельных частей здания (например, окон, входов и др.) целесообразно применять локальное подсвечивание фрагментов здания при помощи цветных источников света.

Невыразительные по архитектуре здания и сооружения надо или скрывать в темноте или обогащать их рекламными установками, тщательно продуманными по масштабности, рисунку и цвету.

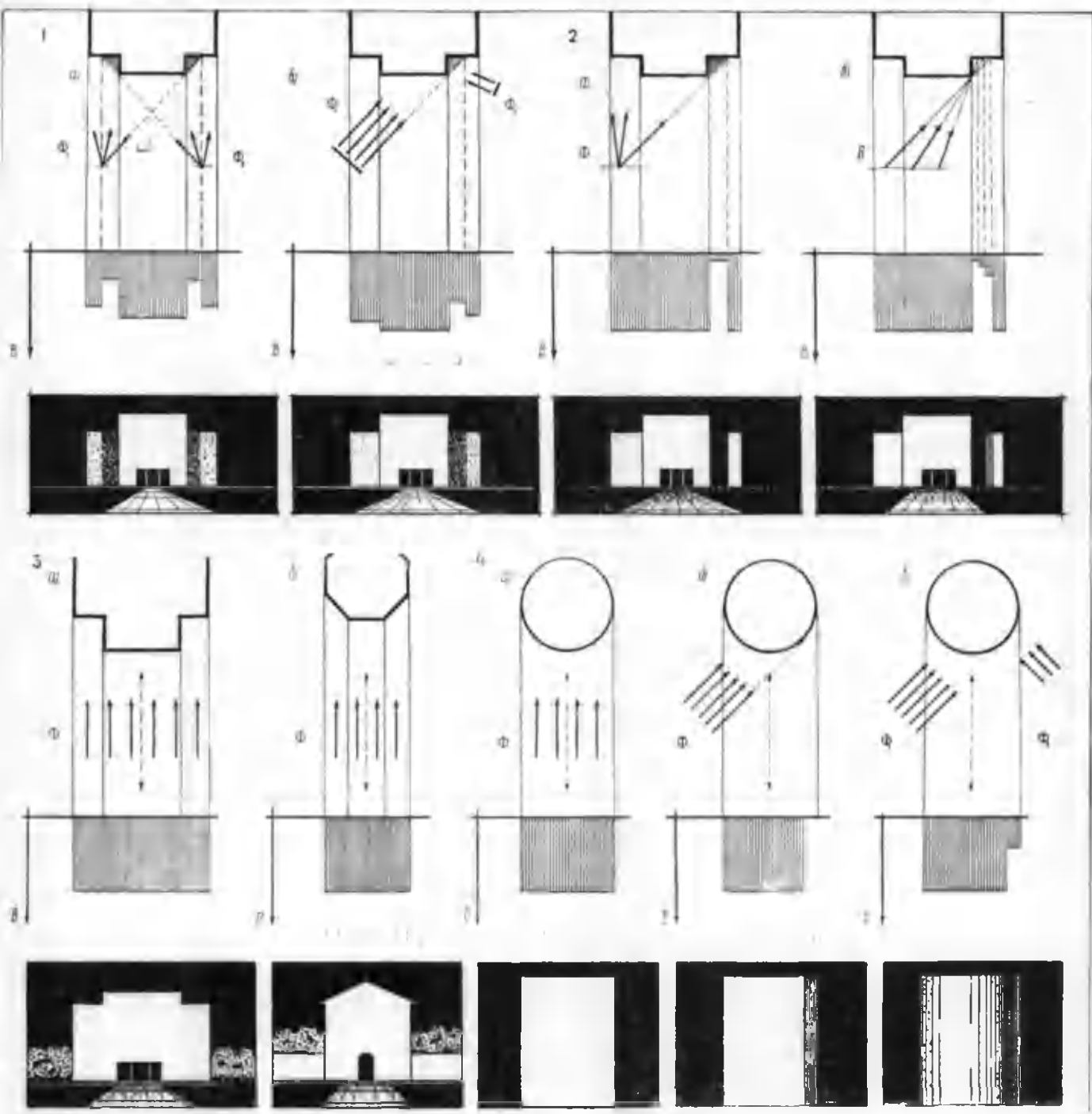
Особенностью вечернего освещения является его повышенная контрастность, которая может сильно исказить восприятие зданий. Поэтому при расположении осветительных приборов надо стремиться к устранению: однозначной, резко контрастной светотени, искажающей архитектуру зданий;

наложения теней друг на друга, что неизбежно приводит к потере тектоничности здания и ухудшению его восприятия;

двусторонних теней, уничтожающих пластичность здания.

На л. XXIII, рис. 1—4 приводятся некоторые схемы, характеризующие восприятие зданий при различном расположении осветительных приборов.

Установленные вдоль улицы фонари, часто не увязанные по масштабу с застройкой, создают однозначный световой ритм, вырывающий из темноты случайные участки фасадов зданий, ограничивающих улицу. Сочета-



ние тщательно прорисованных фонарей со световыми указателями на перекрестках улиц, с подсвеченными входами в здания общественного назначения (в гостиницы, магазины и т. д.), с рекламными установками и витринами магазинов, а также с малыми архитектурными формами (киосками, павильонами

и т. п.) обогащает вечерний облик площадей, проспектов и улиц.

Однако лаконичность и однообразие светового решения улиц оправдываются в тех случаях, когда архитектор использует его для создания светового контраста между улицей и прилегающей или замыкающей ее пло-

щадь, с хорошо подсвеченными зданиями, ограничивающими площадь.

Различают следующие приемы архитектурного освещения ансамблей и зданий: контурное, заливающим светом, проходящим светом через окна, местное — локализованное.

Контурное освещение ансамбля или здания создается при помощи ламп (люминесцентных с холодными катодами, ламп накаливания, газосветными), расположенными по абрису зданий. Этот прием дает хороший зрительный эффект при подсвечивании зданий и сооружений особенно с разнообразной объемной композицией. Прекрасный пример контурного подсвечивания был неоднократно продемонстрирован в дни празднеств в честь 800-летия Москвы и 30-летия Советской власти — при освещении стен и башен Кремля. Этот прием был широко использован для освещения некоторых павильонов на Всемирной выставке в Брюсселе.

Освещение объемов и фасадов зданий заливающим светом получило наиболее широкое распространение благодаря возможности приблизиться к дневному облику зданий. Однако этот прием освещения дорог и, кроме того, связан с затруднениями при стремлении архитектора выдержать направление света и контраст, приближающийся к контрасту природной светотени.

Для получения хорошего эффекта освещения фасадов заливающим светом необходимо иметь в виду следующее:

расположение осветительных приборов (прожектора, зеркальные лампы и др.) надо выбирать так, чтобы устранять слепящее действие на прохожих и водителей автомашин как от прямых излучений, так и от отраженного от стен здания света;

расположение осветительных приборов надо увязывать с характером архитектурной отделки фасадов; направленное освещение фасадов должно отчетливо выделять пластику объемов и отделки, создавать градации светотени и избегать резкой контрастности освещения.

При освещении фасадов с рельефной архитектурной отделкой расположение осветительных приборов необходимо выбирать так, чтобы по возможности не искажать восприятия пластики архитектурных форм фасада по сравнению с дневным обликом здания. Это достигается расположением осветительных приборов на высоких мачтах или на противоположных зданиях.

Примеры подсвечивания фасадов зданий приводятся на л. XXIV, рис. 1—2.

Лист XXIV ПРИЕМЫ АРХИТЕКТУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Рис. 1. Прием комбинированного освещения фасада Дворца съездов в Кремле

Сочетание проходящего изнутри света, открывающего красочность интерьера, хорошо согласуется с подсвечиванием снаружи прожекторами
Вид Дворца: а — вечером; б — днем

Рис. 2. Приемы встроенного архитектурного освещения фасадов

а — зеркальные лампы скрыты от наблюдателя на балконе и под балконом; б — люминесцентные лампы скрыты в конструкции подвешенного потолка; при цветных люминесцентных лампах на фасаде здания возникает световой ритм по высоте, создаваемый различным по цветности светом, проникающим через окна, и светом, создаваемым люминесцентными лампами, а — зеркальные лампы или прожектора устанавливаются на террасах здания; б — люминесцентные лампы скрыты под выступающими поясами здания; в — кососветы с лампами (натриевыми или накаливания) крепятся на карнизах к стене

Рис. 3. Типы осветительных приборов для архитектурного освещения зданий и деревьев

Рис. 4. Приемы использования для архитектурных целей света, проходящего через остекление на примере высотного административного здания в Милане (Италия)

Устранение отраженной блескости от стен подсвеченного здания достигается соблюдением определенного уровня яркости светящихся поверхностей архитектурных деталей. По данным В. В. Мешкова, рекомендуемые величины яркости освещенных поверхностей фасада приводятся в табл. 1.42.

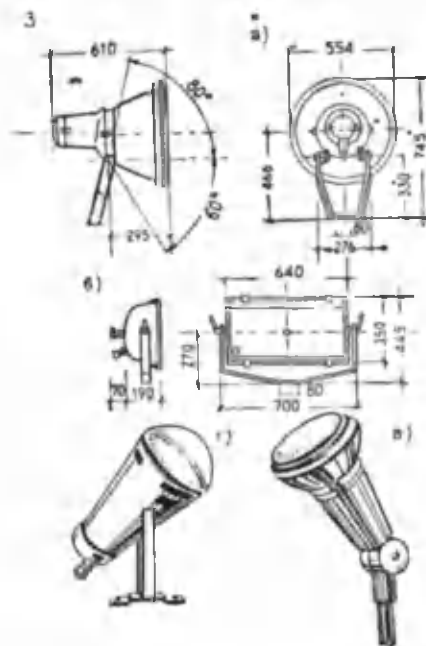
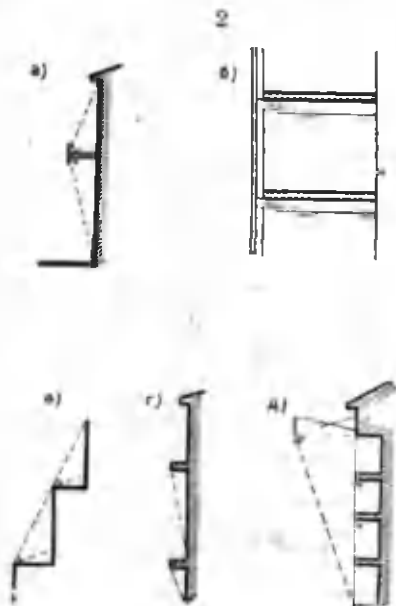
Таблица 1.42

Рекомендуемые величины яркостей светящихся поверхностей

Светящие детали	Величина яркости при различных уровнях освещенности улицы или площади, где располагается установка, в нт		
	низкий	средний	высокий
Панели	1—3,5	1,75—5	3,5—10
Картины, знаки, буквы	5—7	7—15	10—20
Входы в общественные здания	2,5—5	4—9	7—15

Хороший результат дает применение цветного освещения заливающим светом архитектурных ансамблей; в этом случае здания, находящиеся в глубине площади, подсвечиваются натриевыми лампами, а здания, монументы или обелиски, находящиеся на переднем плане, — зеркальными лампами.

Для большинства современных зданий и сооружений в противовес приему освещения зданий заливающим светом решают задачу световой архитектуры более экономичными и прогрессивными средствами, использующими свет, проходящий через световые проемы и витражи. Этот прием связывает внутреннее пространство с наружным, четко выявляет конструктивную структуру (тектонику) зда-



ний, акцентирует художественный замысел зодчего.

Этот прием освещения широко использовался на Всемирной выставке в Брюсселе (1958 г.). Особенно удачным было световое оформление павильона США. Прозрачные стены этого павильона, осуществленные из органического стекла, расчлененного металлической решеткой золотистого оттенка, позволили хорошо видеть внутреннее пространство,

залитое светом от многочисленных ламп, развешенных по поверхности открытого барабана или скрытых за подвешенной к потолку сеткой.

Удачный пример использования проходящего света для светового оформления площади приводится на л. XXIV, рис. 4.

На рис. 3, а и б приводятся некоторые типы осветительных приборов для подсвечивания зданий и деревьев.

4. Освещение витрин

Большая роль в освещении улиц принадлежит витринам магазинов. Витрины предназначены для выставки образцов товаров, хорошая видимость которых зависит от выбранной системы освещения. Основными требованиями к освещению витрин являются:

а) экранирование источников света, которые оказывают слепящее действие на прохожих;

б) хорошая видимость образцов, которая зависит от уровня освещенности и распределения света;

в) контрастность освещения, зависящая от соотношения между направленным и рассеянным светом;

г) правильная цветопередача, которая зависит от спектральной характеристики применяемых источников света.

В современной практике применяются в основном три приема освещения витрин: зеркальными лампами, софитами и светящим потолком.

Зеркальные лампы концентрированного светораспределения обычно располагаются в верхней части витрины; они создают направленный свет, светотень от которого отчетливо выявляет объемные свойства выставленных образцов. Наряду с этой составляющей в вит-

рине предусматриваются осветительные устройства, создающие рассеянный свет, смягчающий светотени. Рассеянное освещение обычно создается светящим потолком. Светящийся потолок состоит из нескольких люминесцентных ламп, скрытых решетчатым затенителем или светорассеивающим стеклом. Применение софитов, расположенных по периметру окна, обеспечивает хорошее освещение горизонтальных и вертикальных поверхностей. При проектировании необходимо в верхних софитах применять более мощные лампы, поскольку убывание яркости сверху вниз по витрине наиболее привычно для глаза.

Кроме общего освещения в витринах применяется световое оформление рекламного характера в виде динамического освещения. включаемого периодически с помощью коммутатора или других устройств.

Система освещения и светового оформления витрин в значительной степени зависит от распределения яркостей на прилегающих к витрине фасаде и тротуаре. Резкий контраст между яркостью фасада и витрины производит на проходящих слепящее действие. Для хорошей видимости образцов витрина должна иметь более высокую яркость, чем яркость стен противостоящих зданий и прилегающей дороги.

СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

1. Светотехнические материалы

Среди многообразия применяемых в современном строительстве материалов особое место занимают светотехнические материалы.

Благодаря ценным свойствам отражать, пропускать, рассеивать и преломлять падающие потоки световой энергии светопрозрачные материалы широко используются не только для заполнения световых проемов, но и как отде-

Таблица 1.43

Номенклатура листового стекла

Наименование стекла	ГОСТ или ТУ	Область применения	Основные размеры в мм		
			длина	ширина	толщина
Оконное	ГОСТ 111—54	Для заполнения светопроемов, перегородок, фрамуг	До 2200	До 1600	2; 2, 5; 3; 4; 5; 6
Матово-узорчатое	ТУ 97—54	Для заполнения светопроемов, дверей, перегородок	2200	1600	2; 2,5; 3; 4; 5; 6
Узорчатое	ГОСТ 5533—50	Для дверей, перегородок, лифтовых шахт, балконных ограждений	400—800	400—1200	3—6,5
Витринное неполированное	ГОСТ 7380—55	Для заполнения витрин	2300—4500	1700—3500	6—10
Полированное крупно-размерное	ВТУ 5—59 Саратовского совнархоза	То же	До 2700	До 1200	До 16
Армированное	ГОСТ 7481—55	Для заполнения светопроемов, перегородок, лифтовых шахт, лестничных ограждений	500—1800	300—1400	5,5
Закаленное	ГОСТ 5727—57	Для перегородок, ограждений, лестничных клеток, дверей	До 1200	До 600	4—6,5
Закаленное крупно-размерное	То же	Для перегородок, дверей	2700	1200	До 16
Волнистое	—	Для заполнения светопроемов, перегородок	1200—3600	До 1200	5—6
Цветное	—	Для витражей	До 500	500	3
Теплопоглощающее	—	Для заполнения светопроемов с целью защиты от теплового действия солнца	2200	1600	2,6
Контрастное	—	То же	2200	1600	3—4,5
Увиолетовое	—	Для заполнения светопроемов в лечебных зданиях, детских садах и яслях	250—600	250—1200	1,5—2

лочные материалы, обогащающие архитектуру зданий и интерьеров.

Ассортимент стекла, выпускаемого нашими заводами, с каждым годом расширяется. Изменяются его физические свойства и художественные качества. Рациональное использование стекла в современном строительстве и архитектуре позволяет снижать стоимость строительства и улучшать эксплуатационное и художественное качество зданий.

В зависимости от характера производства стекла, области его применения и физических особенностей многообразия видов стекла можно свести в две группы; к первой относятся все виды листового стекла, используемого в светопрозрачных ограждениях разного вида; ко второй относятся стеклянные изделия, изготавливаемые на заводах и полигонах.

Номенклатура листового стекла, выпускаемого заводами, приводится в табл. 1.43.

Номенклатура стеклянных изделий наших заводов приводится в табл. 1.44.

Листовое и оконное прозрачное бесцветное стекло получило наиболее широкое распространение в современном строительстве жилых, общественных и промышленных зданий.

Лист XXV

РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ СОВРЕМЕННОГО СТЕКЛА

Рис. 1. Оконное стекло и его сопряжение с переплетами

а — деревянными; б — металлическими; в — пластмассовыми

Рис. 2. Сопряжение витринного стекла с переплетами
а — алюминиевыми; б — деревянными

Рис. 3. Схема конструкции остекления витрины

Рис. 4. Детали устройства двери из органического или минерального стекла

Рис. 5. Волнистое армированное стекло и его сопряжение с кровлей из волнистых асбоцементных листов

а — детали сопряжений; б — вид изнутри на кровлю

Рис. 6. Схема, показывающая трансформацию теплового потока, падающего на теплопоглощающее стекло

Физико-технические свойства

Удельный вес — 2,42—2,59 г/см³

Коэффициент светопропускания — 0,84—0,87

Теплопроводность — 0,83 ккал/м ч град

Способы крепления листового стекла к переплетам приводятся на л. XXV, рис. 1. В железобетонных и пластмассовых переплетах стекло крепится на замазке (обычно суриковой) или при помощи упругих прокладок из резины и пластмасс.

Таблица 1.44

Номенклатура стеклянных изделий

Наименование изделий	ГОСТ или ТУ	Область применения	Основные размеры в мм		
			длина	ширина	толщина
Стеклопакеты (двухслойные, трехслойные)	—	Для заполнения светопроемов	Соответственно размерам переплетов		23—36
Стеклянные пустотелые блоки типов: обыкновенные БК-98 БК-60 БУ-98 БП-98 цветные двухкамерные светонаправляющие	ГОСТ 9272—59	Для изготовления стекложелезобетонных ограждений (вертикальных, наклонных, горизонтальных)	194	194	98
			194	194	60
			209	194	98
			194	94	98
Электронагреваемое стекло	—	Для заполнения светопроемов в специальных помещениях	До 1200	До 800	4—5
Плитки стеклянные	—	Для заполнения светопроемов в горизонтальных и наклонных покрытиях	226	226	55
			170	170	22
			150	150	50
Призмы стеклянные	—	То же	100	75	75
			145	60	105
Линзы стеклянные круглые	—		Диаметр 100—200		60; 80

Физико-технические свойства

Удельный вес	— 2,45 г/см ³
Коэффициент светопропускания	— 0,5—0,7
Теплопроводность	— 0,83 ккал/м ч град

Крепление узорчатого стекла к переплетам производится так же, как и при применении оконного стекла.

Витринное стекло изготавливается полированным и неполированным; оно может быть плоским и гнутым. Это стекло применяется для остекления витрин в магазинах, а также для заполнения оконных проемов в зданиях общественного назначения. Наряду с обычным изготавливают закаленное полированное витринное стекло, обладающее повышенной прочностью и термостойкостью.

Физико-технические свойства

Удельный вес	— 2,42—2,49 г/см ³
Коэффициент светопропускания	— 0,84—0,9
Теплопроводность	— 0,54 — 0,83 ккал/м ч град

Способы крепления витринного стекла к переплетам приводятся на л. XXV, рис. 2. При применении двух переплетов внутренний следует тщательно герметизировать от теплового увлажненного воздуха помещения. В наружном переплете целесообразно предусматривать отверстия диаметром 1,5—2 см или продухи для сообщения с наружным воздухом. В зимние холодные дни это предохраняет окна витрин от обледенения.

С целью удешевления строительства целесообразно применять одинарный переплет со стеклопакетным витринным стеклом.

Для хорошей видимости витрин целесообразно наружный переплет располагать под углом 8—12° к вертикали (л. XXV, рис. 3).

Армированное плоское стекло характеризуется наличием в его толще металлической сетки (хромированной или никелированной) разного рисунка, которая служит арматурой, удерживающей осколки стекла при его повреждении или при пожаре и усиливающей огнестойкость и безопасность здания. Благодаря этому качеству армированное стекло широко используется для заполнения вертикальных и наклонных светопроемов, а также для ограждения лифтов и перегородок в помещениях. Для повышения светорассеивающих свойств армированное стекло матируется.

Физико-технические свойства

Удельный вес	— 2,5 г/см ³
Коэффициент светопропускания	— 0,6—0,65
Теплопроводность	— 0,72 ккал/м ч град
Предел прочности	
при изгибе	— 3—4 кг/мм ²
растяжении	— 5
сжатии	— 60
Предел огнестойкости	— 1,3 ч

Лист XXVI

ПАКЕТНОЕ И ПРОФИЛЬНОЕ СТЕКЛО

Рис. 1. Ассортимент изделий из пакетного стекла и детали сопряжения его с переплетом

а — сварное пакетное стекло; б—д — склеенное пакетное стекло; с—ж — детали сопряжения пакетного стекла с металлическим и деревянным переплетами

Рис. 2. Оконный деревянный переплет с пакетным стеклом

а — общий вид окна; б — разрез переплета; в — деталь сопряжения створной части с импостом; г — разрез пакетного стекла

Рис. 3. Профильное стекло в виде швеллера

а — схема укладки профильного стекла в перегородке; б — вид покрытия из профильного стекла сверху

Способы крепления армированного стекла к переплетам те же, что и при обычном утолщенном оконном стекле.

Закаленное плоское стекло обладает высокой механической прочностью и термостойкостью благодаря специальной термической обработке при его изготовлении. Наряду с заполнением окон, перегородок, дверей, барьеров на балконах и т. д. стекло используется при изготовлении стеклопакетов, а также незамерзающего электронагреваемого стекла.

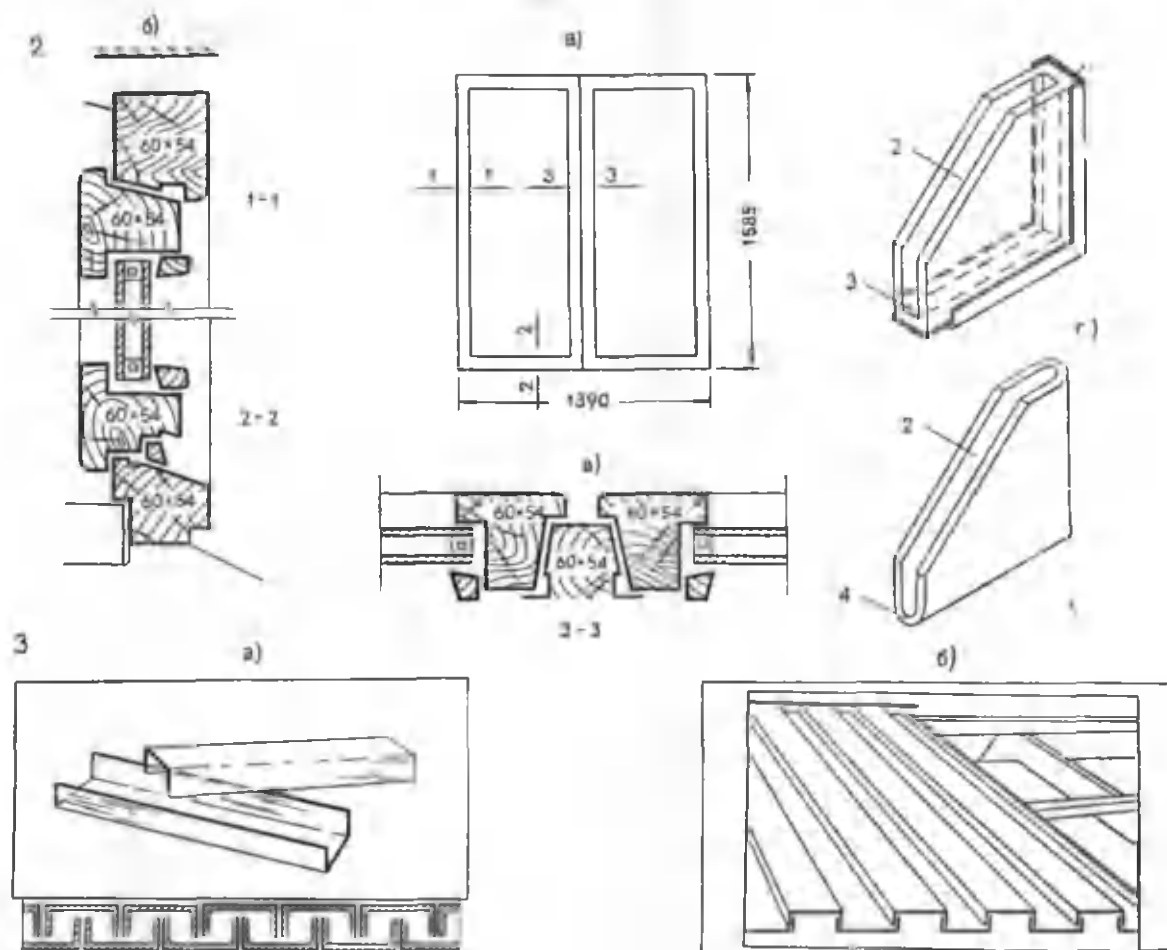
Физико-технические свойства

Удельный вес	— 2,45—2,47 г/см ³
Коэффициент светопропускания	— 0,84—0,9
Теплопроводность	— 0,54 ккал/м ч град

Это стекло выдерживает перепад температуры 80—90°. Упругость закаленного стекла почти в 10 раз выше, чем у обычного оконного стекла.

В местах сопряжения закаленного стекла с металлическими деталями ограждений следует применять упругие прокладки из резины или пластмассы. На л. XXV, рис. 4 показана дверь из закаленного стекла.

Волнистое стекло изготавливается неармированным и армированным металлической сеткой и применяется для заполнения наклонных светопроемов в покрытиях промышленных, общественных и сельскохозяйственных зданий, а также для устройства перегородок, ограждений в лестничных клетках и т. д. Особенно хороший эффект получают при сочетании волнистого стекла с волнистыми асбестоцементными или металлическими листами (л. XXV, рис. 5). С этой целью шаг и высота волны стекла строго соответствуют шагу и высоте волны асбестоцементных и металлических листов. Способы сопряжения листов волнистого стекла осуществляются при помощи профильной детали из пластмассы. В местах сопряжения волнистого стекла с металлическими конструкциями покрытия применяются компенсационные упругие прокладки



(из гидроизола, пенополиуретана, минерального или стеклянного волокна, резины и т. п.).

Теплопоглощающее стекло обладает свойством поглощать значительную часть излучений в инфракрасной области спектра (л. XXV, рис. 6). Оно изготавливается тех же размеров, что и оконное стекло. Теплопоглощающее стекло имеет зеленовато-голубоватый оттенок. Его разновидностью является

контрастное стекло нейтрально-серого оттенка, отличающееся химическим составом.

Физико-технические свойства

Удельный вес	— 2,5 г/см ³
Коэффициент светопропускания:	
теплопоглощающего	— 0,7
контрастного	— 0,75
Коэффициент поглощения инфракрасных излучений:	
теплопоглощающего	— 0,75
контрастного	0,65
Предел прочности стекла в кг/мм ² :	

теплопоглощающее	3—4	5,5—7	60—120
контрастное	4	6,6	67

Теплопоглощающее и контрастное стекло, обладая высоким поглощением инфракрасных излучений, претерпевает в конструкциях значительные температурные деформации. Поэтому в местах сопряжения этих стекол с переплетами необходимо предусматривать упругие прокладки, обеспечивающие возможность свободных деформаций стекла при нагревании и охлаждении. Эти стекла целесообразно применять для заполнения наружных переплетов остекления. Для хорошей вентиляции междурамного пространства в верхней и нижней частях наружного переплета целесообразно предусматривать щели.

Увиолевое стекло обладает свойством пропускать ультрафиолетовые излучения в достаточно широком диапазоне спектра природной ультрафиолетовой радиации. В этом отношении оно выгодно отличается от обычного оконного стекла, которое является непрозрачным экраном для большей части диапазона ультрафиолетовых излучений. Высокие санитарные свойства ультрафиолетовой радиации, проникающей в помещения, позволяют рекомендовать увиолевое стекло в первую очередь для заполнения переплетов окон в лечебных зданиях, детских учреждениях, в некоторых сельскохозяйственных постройках и т. д.

Физико-технические свойства увиолевого стекла не отличаются от свойств оконного стекла, за исключением коэффициента пропускания ультрафиолетовых излучений в диапазоне 280—320 мк, который равен в среднем 0,25.

Призматическое стекло обладает способностью изменять направление падающего на него светового потока и улучшать освещение в удаленных от окон зонах помещения. Это стекло целесообразно применять в комбинации с обычным стеклом в виде стеклопакета.

2. Стекланные изделия

Индустриализация строительства настоятельно требует удешевления светопрозрачных ограждений, что может быть достигнуто при замене кустарных способов их осуществления индустриальными, при которых светопрозрачные ограждения монтируются из крупноразмерных панелей, изготавливаемых на домостроительных и стекольных заводах.

К числу сборных светопрозрачных ограждений, массовое изготовление которых должно осуществляться заводским путем, относятся:

ОГРАЖДЕНИЯ ИЗ ПУСТОТЕЛЫХ СТЕКЛЯННЫХ БЛОКОВ

Рис. 1. Ассортимент пустотелых стеклянных блоков, выпускаемых нашими заводами

Рис. 2. Кривые, характеризующие распределение света после прохождения через блоки с различными рифлями

Рис. 3. Схема преломления светового потока, падающего на пустотелый стеклянный блок с призматическим рифлем

Рис. 4. Стекложелезобетонные панели
а — общий вид на панель; б — горизонтальный разрез панели;
в — вертикальный разрез панели

Рис. 5. Сопряжения стекложелезобетонных панелей и конструкций
а — схема и деталь сопряжения в кирпичной стене; б — деталь сопряжения в бетонной стене

стклопакеты, стеклянные швеллеры, стеклянные пустотелые блоки.

Стеклопакеты изготавливаются из двух или трех слоев стекла, укладываемых в металлическую, деревянную или пластмассовую обойму (л. XXVI, рис. 1). Сопряжение между стеклами производится или при помощи сварки листов по периметру или склеивания их на специальных прокладках. Между слоями стекла образуется герметически замкнутая воздушная прослойка, повышающая теплотехнические качества стеклопакета. В зависимости от необходимости стеклопакеты изготавливаются из листового, витринного, закаленного, теплопоглощающего стекла или при их различной комбинации.

При склеивании стекол обычно применяют бутафольную пленку или другие эластичные материалы с высокими адгезионными свойствами. Назначение упругих прокладок в сопряжениях с переплетом — уменьшить внутренние напряжения в стеклах, работающих при эксплуатации зданий в разных температурных условиях.

Стеклопакеты обладают высокими светотехническими и теплоизоляционными свойствами: общий коэффициент светопропускания составляет при двухслойных пакетах — 0,65, при трехслойных — 0,55; сопротивление теплопередаче двухслойного пакета 0,35—0,4 м² ч/град/ккал. К стеклопакетам относится стекло термолюкс, в котором воздушные прослойки между стеклами заполняются стеклянным войлоком или стеклотканью.

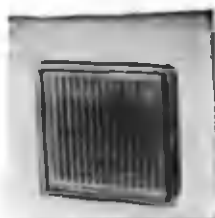
Стекла термолюкс обладают прекрасными солнцезащитными свойствами благодаря их способности рассеивать солнечные лучи и высокому термическому сопротивлению.

Опыты показали, что пакетное стекло и стекло термолюкс обладают достаточно высокой звукоизолирующей способностью. Пример переплета с пакетным стеклом приводится на л. XXVI, рис. 2.

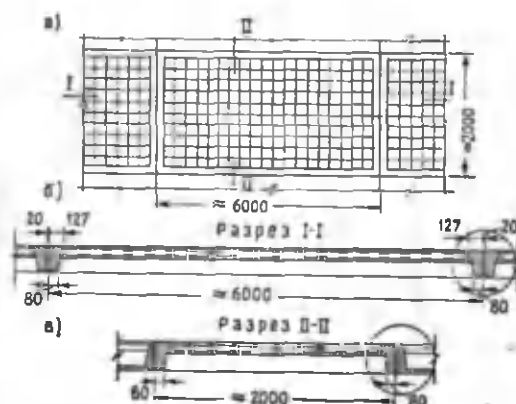
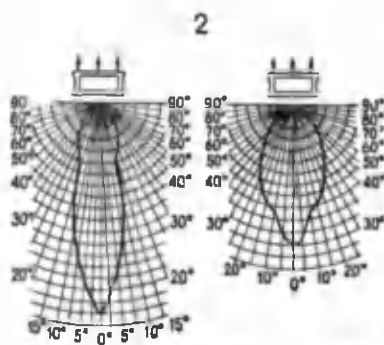
Угловые БУ-98



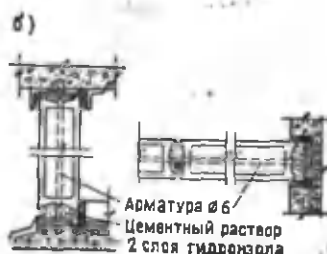
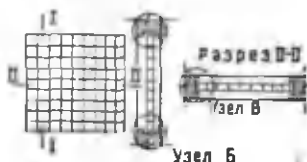
Квадратные БК-60



Квадратные БК-98



Разрез I-I



Стеклянные швеллеры широко применяются в ГДР при устройстве светопрозрачных покрытий и перегородок. Конструктивное решение перегородок из швеллеров приводится на л. XXVI, рис. 3.

Ограждения из стеклянных швеллеров обладают хорошей светорассеивающей способ-

ностью. Коэффициент светопропускания их около 0,2. Светопрозрачные перегородки из швеллеров позволяют обеспечить естественное освещение в вспомогательных помещениях жилых и общественных зданий (школах, больницах и др.).

Стеклянные пустотелые блоки

(XXVII, рис. 1) изготавливаются из двух опресованных половинок, сваренных по периметру. Лицевые поверхности блоков обычно делают гладкими; внутренние, обращенные в воздушную полость, имеют рифль, определяющий световые характеристики блоков. По световым свойствам блоки делятся на прозрачные, светорассеивающие и светонаправляющие. Видимость через прозрачные блоки мало отличается от видимости через оконное стекло. Поэтому их целесообразно применять в нижних частях остекления для связи интерьера с наружным пространством.

Светорассеивающие свойства блоков зависят от формы рифля и от характера обработки лицевых поверхностей блока. Индикаторы рассеяния выпускаемых у нас блоков приводятся на л. XXVII, рис. 2.

Хорошие светорассеивающие свойства блоков позволяют обеспечивать в помещениях мягкое рассеянное освещение при облучении светопроемов прямыми лучами солнца.

Светонаправляющие свойства блоков определяются формой призматической обработки поверхностей, обращенных внутрь воздушной полости блоков. На л. XXVII, рис. 3 приводится пример преломления светового потока, падающего на стеклянный блок с призматическим рифлем.

Использование светонаправляющих свойств стеклянных блоков позволяет улучшать условия освещения в удаленных от светопроемов зонах помещения.

Физико-технические характеристики вертикальных ограждений из стеклянных блоков

Вес	—81 кг/м ²
Светопропускание	—0,3—0,2
Пропускание инфракрасной радиации	—0,35
Сопrotивление теплопередаче	—0,48 м ² ч град/ккал
Воздухопроницаемость	—0,009 м ³ /м ² ч мм вод. ст.
Звукоизолирующая способность от воздушного шума	—38—40 дБ
Огнестойкость	—2,4 ч

Сопряжение стекложелезобетонных панелей с несущими конструкциями зданий необходимо осуществлять при помощи упругих прокладок (из просмоленной пакли, стеклянного волокна, гидроизолы и др.), укладываемых по периметру панели.

Площадь стекложелезобетонных панелей не должна превышать 15 м².

Детали стекложелезобетонных панелей и их сопряжения с несущими конструкциями зданий приводятся на л. XXVII, рис. 4, 5.

Примеры зданий со стекложелезобетонны-

Лист XXVIII

СТЕКЛОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ

Рис. 1. Вид изнутри стекложелезобетонных покрытий а — стекложелезобетонный свод из стеклянных линз в г. Брюсселе (Бельгия); б — стекложелезобетонные покрытия из панелей в цехе экспедиции Киевского полиграфического комбината; в — стекложелезобетонный свод в бассейне плавания санатория «Металлург» в Сочи

Рис. 2. Стекложелезобетонное ограждение комбинированного типа

Рис. 3. Ассортимент плиток, линз и иллюминаторов из стекла

Рис. 4. Схема пакета с призматическим стеклом с данными для определения угла призм стекла (по Матулевичу)

L — расстояние от окна, на котором сказывается светопреломляющее действие призматического рифля;
φ — угол, под которым падает световой луч;
α — угол, образуемый наклоном рифленой части призмы с вертикалью;
h — высота от уровня рабочей плоскости до первой призмы;
1 — призматическое стекло; 2 — обычное листовое стекло; 3 — обвязка (из пластмассы, металлическая); 4 — клеящее вещество

ми ограждениями приводятся на л. XXVIII, рис. 1.

При необходимости обеспечить проветривание помещения или зрительно связать его с внешним пространством целесообразно применять панели комбинированного типа со створными фрамугами из металлического одинарного переплета с пакетным стеклом (л. XXVIII, рис. 2).

Весьма интересные архитектурные возможности дает применение блоков из цветного стекла или при окраске торцовых стенок блоков цветными мастиками, обеспечивающими хорошее сцепление между блоками и вяжущим.

Ограждения из стеклянных блоков устраиваются или на месте укладкой блоков в проемах стен и покрытий, или из изготовленных (на заводе или полигоне) стекложелезобетонных панелей. Такие ограждения являются самонесущими и не допускают посторонних нагрузок. Расчет на прочность стекложелезобетонных конструкций производится по предельному состоянию с коэффициентом запаса 2—2,2.

Толщина швов между блоками составляет в вертикальных ограждениях 3—8 мм; в горизонтальных и наклонных 10—30 мм. Армирование швов в вертикальных ограждениях определяется в основном в зависимости от размеров ограждения и условий его эксплуатации. В горизонтальных и наклонных стекложелезобетонных ограждениях арматура укладывается в каждом шве. Диаметр прутковой арматуры: в вертикальных ограждениях 4—8 мм; в горизонтальных и наклонных 6—10 мм.

Железобетонные обвязки в панелях рассчитываются с учетом монтажных, транспортных и конструктивных нагрузок.

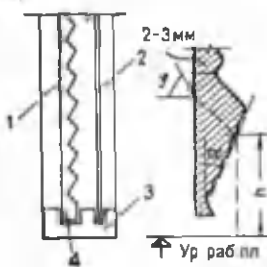


1



3

4



$$L = f(\varphi, h, \alpha)$$

при $\varphi = 45^\circ$			
α	17°	25°	31°
L/h	1,5	1,75	2,0



№	Эскиз	Размеры в мм	Назначение
1		226 × 226 × 55	Для горизонтальных и сводчатых покрытий, для освещения подвальных помещений, приставок и т.д.
2		170 × 170 × 22	
3		150 × 150 × 50	
4		200 × 200 × 50	
5		100 × 75 × 75	Для горизонтальных светорассеивающих перекрытий
6		135 × 60 × 105	
7		Ø 100 и 120 толщ 60 и 80	Для плоских, сводчатых и купольных покрытий

Если не нужна хорошая теплоизоляция, стекложелезобетонные ограждения могут выполняться из стеклянных плиток, призм и линз. Ассортимент, форма и размеры их приводятся на л. XXVIII, рис. 3.

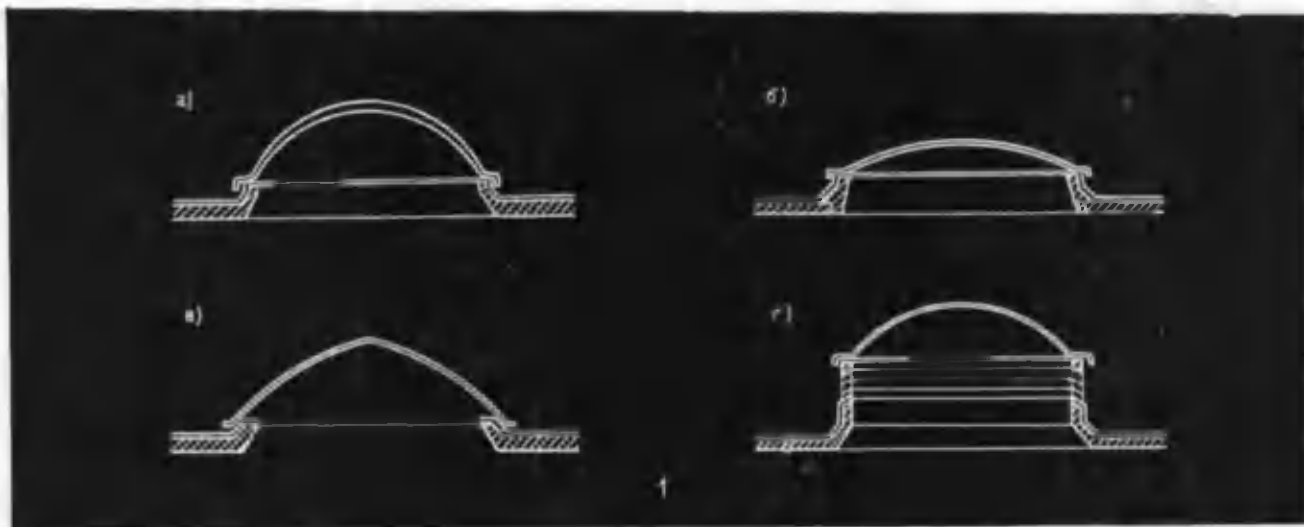
Такие ограждения осуществляются в лестничных клетках, в крытых рынках, промышленных зданиях; они обладают высокими светорассеивающими свойствами и хорошо защищают помещения от слепящего действия прямых лучей солнца. Однако эти ограждения мало защищают помещения от перегрева в жаркие летние месяцы. Поэтому их приме-

нение в покрытиях должно сопровождаться интенсивным проветриванием помещений.

Большой интерес представляет призматическое стекло. Его целесообразно применять в виде стеклопакета в сочетании с обычным стеклом. Схема такого стеклопакета и построения его призм приводится на л. XXVIII, рис. 4.

3. Изделия из органического стекла и стеклопластика

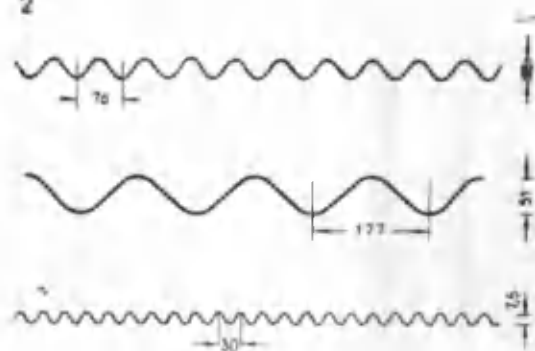
Бурное развитие химической промышленности расширяет область использования в строительстве и архитектуре пластических материалов и, в частности, органического стекла и стеклопластиков.



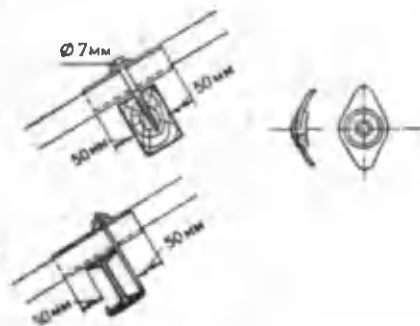
3



2



4



5



ИЗДЕЛИЯ ИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА И СТЕКЛОПЛАСТИКА

Рис. 1. Ассортимент штампованных прозрачных колпаков из органического стекла

а — двухслойный с воздушной прослойкой; б — однослойный из стеклопластика; в — однослойный из органического стекла; г — однослойный с вентиляционной решеткой в нижней части

Рис. 2. Волнистый стеклопластик с разной длиной волны

Рис. 3. Сопряжения волнистого стеклопластика с волнистыми асбоцементными листами

Рис. 4. Детали сопряжения волнистого стеклопластика с асбоцементными листами

Рис. 5. Момент монтажа фонаря из листов стеклопластика

Органическое стекло, или полиметилметакрилат, выпускается или в чистом виде или армированным. Органические красители, введенные в состав стекла, образуют ассортимент цветных прозрачных или рассеивающих свет разновидностей органического стекла.

Обширную группу образуют полимерные материалы, содержащие в составе различные синтетические смолы и наполнитель обычно в виде стеклянного войлока. Такие материалы называются стеклопластками.

Органическое стекло и стеклопластики выпускаются в виде плоских и рифленых листов толщиной 1—4 мм и размером от 500×400 до 800×1000 мм, а также в виде штампованных изделий (полусферической, цилиндрической и других форм) и рулонных материалов (л. XXIX, рис. 1—5).

Таблица 1.46

Основные характеристики светопропускающих материалов

Наименование материалов	Толщина в мм	Цвет	Коэффициенты			Вес в кг/м²
			τ	ρ	α	
Органическое стекло	2—3,9	Белый	0,9	0,04	0,06	2,4—4,6
Поливинилхлоридная светорассеивающая пленка (мягкая)	0,17—0,22	Белый Желтый Голубой Розовый	0,3—0,41	0,46—0,52	0,24—0,07	0,29
Светорассеивающая пленка жесткая „Астролит“	0,13	Белый Кремовый	0,44—0,41	0,54—0,44	0,7—0,29	—
Светорассеивающая пленка для светящихся потолков	0,19	Белый	0,45	0,47	0,08	—
Светорассеивающая гофрированная пленка для потолков „Люмивент“	0,18	Белый	0,5	0,42	0,08	—
Полиэтиленовая пленка рельефная	—	Желтый Розовый Белый	0,51—0,4	0,41—0,26	0,08—0,23	0,51
Стеклоткань светорассеивающая	—	Белый Желтый	0,3—0,22	0,67—0,63	—	0,14
Стеклопластик светорассеивающий	—	Белый Желтый	0,5—0,42	0,37—0,4	0,13—0,18	0,85
Светотехническая бумага светорассеивающая	—	Зеленый Желтый Голубой	0,07—0,21	0,68	0,11	0,26

Примечание. Часть из приведенных в таблице материалов в настоящее время находится в стадии внедрения.

**Физико-технические свойства органического стекла
и стеклопластиков**

Вес:	
органического стекла	-1,18 г/см ³
стеклопластиков	-1,4
Коэффициент светопропускания:	
органического стекла	-0,9
стеклопластиков	-0,4—0,6
Теплопроводность	-0,11 ккал/м ч град

Большим достоинством органического стекла является достаточно высокий коэффициент пропускания ими ультрафиолетовой радиации (0,7).

Сравнение некоторых показателей физико-

Таблица 1.45
Сравнение некоторых показателей стекла
и стеклопластика

Материал	Толщина в мм	Вес в кг/м ²	Коэффициенты	
			светопро- пускания	теплопро- водности в ккал/м ч град
Волнистое стекло	5—6	14	0,75	0,72
Волнистый стекло- пластик	2	2,8	0,4—0,6	0,11

технических свойств волнистого стекла и волнистого стеклопластика приводится в табл. 1.45.

Огромным преимуществом светопрозрачных ограждений из органического стекла и стеклопластиков является возможность их обработки механическими, слесарными и столярными инструментами. Они допускают не только распиливание, но также сверление и простружку. В нагретом размягченном состоянии органическое стекло поддается штампованию. Однако пластической деформации стеклопластики не поддаются. Для склеивания листов стеклопластика применяются синтетические смолы холодного твердения. При применении волнистых листов органического стекла или стеклопластиков в покрытиях необходимо применять такие же приемы крепления, как и для асбестоцементной кровли.

Некоторые примеры использования изделий из органического стекла и стеклопластиков приводятся на л. XXIX, рис. 1—5.

При проектировании осветительных установок архитектору необходимо правильно оценивать возможное соотношение между яркостями глухих и прозрачных частей потолка и стен. В табл. 1.46 приводятся основные характеристики светопропускающих материалов.

АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА



ВВЕДЕНИЕ

Многообразные задачи акустики можно отнести к одной из двух основных проблем, отличающихся конечной целью решений.

Задачи, относящиеся к первой проблеме, ставят целью создать условия для полноценного восприятия звука слушателями; сохранение, а иногда и усиление звука являются необходимым условием для этого. Звук в таких случаях является носителем полезной информации — сигналом.

Задачи, относимые ко второй проблеме, ставят целью ослабление или подавление звуков, которые мешают слуховому восприятию, нормальной работе и отдыху человека. Такие звуки называются шумами.

В соответствии с дифференциацией звуков на сигналы и шумы удобно разделить курс прикладной акустики в области строительства

и архитектуры на следующие две взаимно связанные части, различающиеся конечными целями и техническими приемами решений:

архитектурная акустика, имеющая целью обеспечить оптимальные условия восприятия речи, пения, музыки в помещениях и на открытом воздухе;

строительная акустика, основной задачей которой является разработка архитектурно-конструктивных мер для подавления или ослабления шума.

Несмотря на некоторую условность принятой дифференциации курса прикладной акустики, такое разделение позволяет более систематично изложить содержание курса акустики в области строительства и архитектуры.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ВЕЛИЧИНЫ, ЕДИНИЦЫ

1. Звуковое давление и скорость колебания

Звуковые колебания распространяются в виде продольных волн, характеризуясь объемными деформациями сжатия и разрежения среды. Область распространения звуковых волн называется звуковым полем.

Физическое состояние среды в звуковом поле характеризуется звуковым давлением и колебательной скоростью.

Под звуковым давлением p имеют в виду разность между мгновенным значением полного давления и средним давлением среды при отсутствии звуковых волн. Единица звукового давления дин/см^2 , или бар^* .

В фазе сжатия давление положительно, в фазе разрежения — отрицательно.

Колебательная скорость v оценивается мгновенным значением скорости движения частиц среды при распространении в ней звуковых волн. Единица измерения колебательной скорости — см/сек . Если частица среды движется в направлении распространения фронта волны, то колебательная скорость положительна, в обратном случае отрицательна.

В случаях, когда изменения полного давления в среде и ее плотности прямо пропорциональны друг другу, звуковое давление и колебательная скорость связаны между собой линейной зависимостью, а именно:

$$p = \rho C v. \quad (\text{II.1})$$

где ρ — плотность среды;

C — скорость распространения звука в ней.

Величина ρC называется удельным акустическим сопротивлением; она определяется физическими свойствами среды.

В условиях нормального атмосферного давления 760 мм рт. ст. и температуры воздуха 20° величина $\rho C = 41,5 \text{ г/см}^2\text{сек}$.

* Звуковое давление измеряется микрофоном с усилителем по показанию измерительного прибора на выходе, проградуированного в барах .

Распространение волнового процесса характеризуется переносом звуковой энергии. Поток энергии в бегущей звуковой волне определяется вектором Умова и выражается формулой

$$U = pv.$$

Среднее во времени значение вектора Умова называется силой звука. Сила звука I представляет среднее количество звуковой энергии, проходящей в 1 сек через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению распространения звуковых волн. Сила звука измеряется в $\text{эрг/см}^2\text{сек}$. Силу звука удобно выражать через звуковое давление p , которое оценивается показанием измерительного прибора, соединенного в цепи с усилителем микрофона

$$I = pv = \frac{p^2}{\rho C}. \quad (\text{II.2})$$

Переходя от физического значения p к эффективному, имеем

$$I = \frac{p_{\text{эф}}^2}{\rho C}.$$

Учитывая огромный диапазон звуковых давлений, с которыми приходится иметь дело на практике, а также вследствие способности человеческого уха оценивать не абсолютное, а относительное изменение звукового давления, в прикладной акустике принято оценивать силу звука и звуковое давление в относительных логарифмических единицах — децибелах.

Измеряемые таким образом величины называются уровнями силы звука.

Понятие уровень силы звука связано с сравнением силы звука какого-либо источника I с силой звука на пороге слышимости I_0 для тона частотой 1000 гц. Согласно Международному соглашению $I_0 = 10^{-9} \text{ эрг/см}^2\text{сек} = 10^{-16} \text{ вт/см}^2$. Согласно формуле (II.2)

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho C}. \quad \text{Отсюда звуковое давление на пороге}$$

ге слышимости будет

$$p_0 = \sqrt{I_0 \rho C} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ бар.}$$

Уровень силы L выражается формулой

$$L = 10 \lg \frac{I_f}{I_0} \text{ дБ,}$$

где I_f — сила звука, уровень которого определяется на данной частоте;

I_0 — сила звука на пороге слышимости.

Уровень звукового давления

$$L = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (II.3)$$

где p — эффективное давление звукового сигнала;

p_0 — эффективное давление, соответствующее I_0 .

Уровень силы звука и уровень звукового давления — физические величины, характеризующие интенсивность звукового поля.

Увеличение силы звука в 1,26 раза создает практически заметный прирост ощущения его громкости. Для оценки прироста громкости звуков целесообразно пользоваться логарифмической шкалой, в которой каждая последующая ступень в определенное количество раз больше предыдущей.

Натуральный ряд цифр (1, 2, 3, 4, ...) в логарифмической шкале соответствует увеличению каждой ступени шкалы в 10 раз: $\lg 10=1$; $\lg 100=2$; $\lg 1000=3$ и т. д. Если какая-либо величина больше другой в 10 раз,

где E — объемная плотность энергии в бегущей звуковой волне, равная $\frac{I}{c}$;

E_0 — объемная плотность энергии в бегущей звуковой волне, равная $\frac{I_0}{c} \approx 3 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/см}^3$.

Приведенные значения p_0 , I_0 , и E_0 соответствуют минимальным значениям, к которым чувствительно ухо человека. Эти значения дают представление о высокой чувствительности уха человека, которое фиксирует столь малые звуковые колебания.

Согласно теореме Фурье сложный звук можно представить в виде суммы простых синусоидальных составляющих, отличающихся частотой и амплитудами колебаний. Зависимость амплитуд отдельных синусоидальных составляющих шума от частоты колебаний называют спектром шума.

Среднее человеческое ухо способно воспринимать звуки частотой от 16 до 20 000 гц. Спектр звука может быть линейчатым и сплошным. При сплошном спектре вводят понятие уровня спектра B , который представляет уровень силы звука в полосе частот 1 гц. Звуки, в которых уровень спектра B постоянен при всех частотах, называют белым шумом.

Таблица II.1

Принятый ряд октавных полос звука

Граничные частоты полосы в гц	38—75	75—150	150—300	300—600	600—1200	1200—2400	2400—4800	4800—9600
Средняя частота в гц	50	100	200	400	800	1600	3200	6400

то принято считать, что она по уровню больше на один бел. Бел — единица уровня силы звука; практической единицей служит децибел, равный $1/10$ бела.

В условиях преобладания в закрытых помещениях диффузного звукового поля, создаваемого многократными отражениями звука от внутренних поверхностей, его характеризуют средней во времени плотностью звуковой энергии, т. е. содержанием звуковой энергии в единице объема. Единица измерения плотности звуковой энергии — эрг/см^3 .

Уровень плотности звуковой энергии выражается формулой

$$N = 10 \lg \frac{E}{E_0}, \quad (II.4)$$

Полоса звука характеризуется граничными частотами: f_1 — нижней и f_2 — верхней; шириной $\Delta f = f_2 - f_1$ и средней частотой $f_{cp} = \sqrt{f_1 f_2}$.

Полоса, у которой отношение $\frac{f_2}{f_1} = 2$, называется октавой; если $\frac{f_2}{f_1} = 1.26$, то ширина полосы равна $1/3$ октавы.

В табл. II.1 приводятся общепринятые октавные полосы звука.

2. Физиологические характеристики

Ухо человека обладает разной чувствительностью к звукам разной частоты и уровня. Субъективное качество ощущения называ-

ют громкостью. Громкость зависит от силы звука, его спектрального состава, условий восприятия звука, а также от длительности его воздействия. Приближенная зависимость, связывающая ощущение громкости с силой звука, воздействующего на человека, определяется психологическим законом Вебера-Фехнера. Согласно этому закону ухо человека оценивает не абсолютные, а относительные изменения интенсивности внешнего раздражения. Это значит, что приращение ΔL некоторой громкости определяется относительным изменением силы звука I , т. е.

$$\Delta L = \text{const} \frac{\Delta I}{I}.$$

Это отношение удовлетворяется при $L = \text{const} \ln I$.

Для количественной оценки громкости применяется метод субъективного сравнения измеряемого звука с эталонным звуком. Изменяя уровень эталонного звука, можно добиться того, что измеряемый и эталонный звуки будут восприниматься равногромкими. Согласно Международному соглашению за эталонный звук принят синусоидальный тон с частотой 1000 гц в форме плоской звуковой волны; при этом слушатель обращен лицом к источнику эталонного тона.

Измеряемая этим способом величина L называется уровнем громкости. Единицей громкости служит фон (ϕ). Число фонов, оценивающее уровень громкости какого-либо звука, одинаково с числом децибел, измеряющим уровень звукового давления равногромкого эталонного тона

$$L = 20 \lg \frac{p_{\text{эт}}}{2 \cdot 10^{-4}} \phi,$$

где $p_{\text{эт}}$ — звуковое давление, создаваемое в точке измерения источником эталонного тона после достижения одинаковой громкости.

На основе многих измерений уровней громкости чистых тонов различных частот в зависимости от уровней звукового давления Д. Робинсоном и Р. Дадсоном были построены кривые равной громкости (изофоны) (л. XXX, рис. 1). Каждая из этих кривых представляет геометрическое место точек, изображающих тоны различных частот, но с одинаковой громкостью.

Из характера кривых равной громкости видно следующее:

- 1) чувствительность уха человека с увеличением частоты повышается;
- 2) уровень звукового давления и уровень громкости практически численно равны в области частот от 500 до 2000 гц.

Лист XXX ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО АКУСТИКЕ

Рис. 1. Кривые равной громкости (по данным Д. Робинсона и Р. Дадсона). Нижняя пунктирная линия представляет частотную характеристику слухового порога

Рис. 2. Шкалы уровня громкости звука (в фонах) и громкости (в сонах)

Рис. 3. Построение отраженных звуковых лучей от плоской поверхности (по закону зеркального отражения)

Рис. 4. Схема к определению места нахождения фокуса при отражении звука от вогнутой поверхности

Рис. 5. Схема к построению отраженных звуковых лучей при падении звуков на выпуклые поверхности, обладающие свойством рассеивать звуковые волны

Рис. 6. Схема к случаю, когда вогнутая поверхность рассеивает падающие на нее звуки

Рис. 7. Схема, объясняющая образование и устранение в помещениях круглой формы фокусов и ползущих вдоль стены звуков

а — образование фокусов и ползущих звуков; б — способ устранения фокусов и ползущих звуков

Рис. 8. Схема, объясняющая условия образования эха в помещении с большой высотой и шириной

Рис. 9. Схемы устройства и расположения звукоотражательных экранов в помещениях для создания равномерного звукового поля

Рис. 10. Построение профиля звукоотражающего экрана над эстрадой и на потолке над балконом

Рис. 11

а — график для определения размеров архитектурных членений, обеспечивающих рассеивание звуковых волн в помещении; б — схема к графику, показывающая зависимость между глубиной, шириной и периодом членений

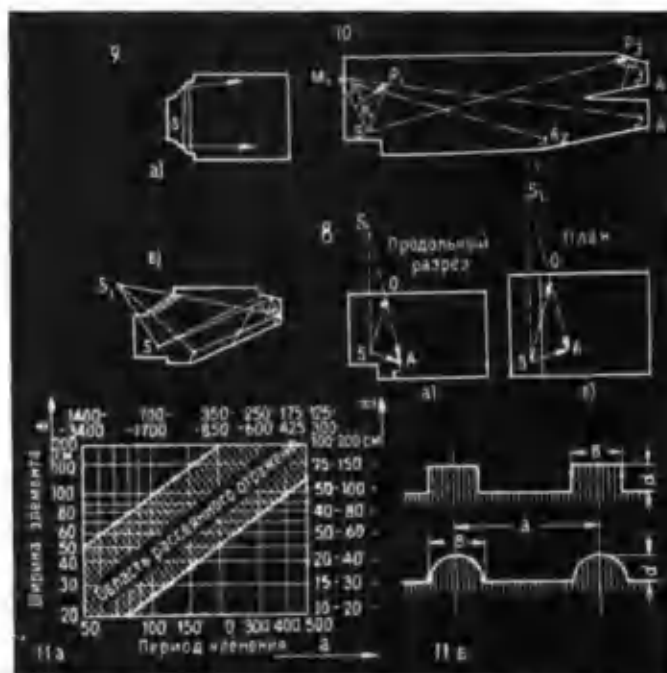
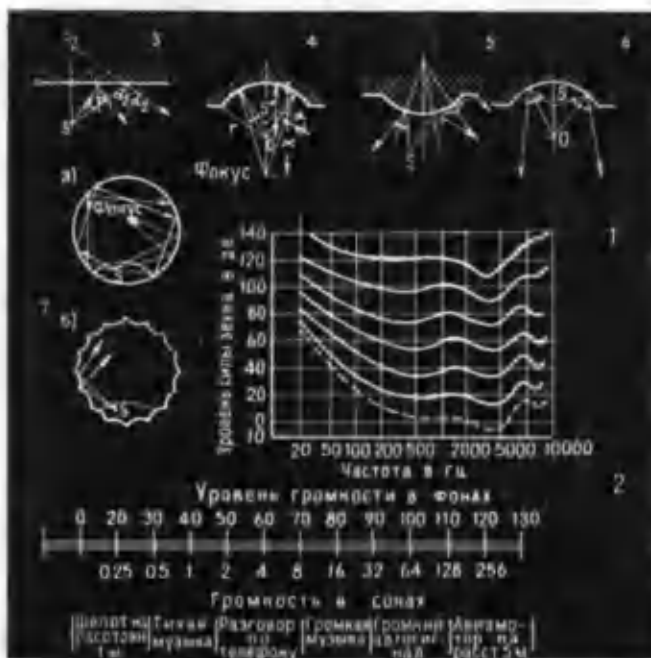
Наряду с оценкой звука уровнем громкости в практике имеется потребность в способе оценки, позволяющий определять отношения громкостей с небольшой кратностью. Это, в частности, следует из того факта, что при изменении уровня громкости на 10 ϕ в ту или иную сторону громкость увеличивается или уменьшается вдвое. Величиной, позволяющей судить о соотношении громкостей различных звуков по Международному соглашению, выбрана громкость, определяемая по формуле

$$S = 2^{\frac{L-40}{10}}. \quad (II.5)$$

Единица громкости — сон. Громкостью, равной 1 сону, обладает звук с уровнем громкости L , равным 40 ϕ . По формуле (II.5) нетрудно определить, что громкость изменяется в 2 раза при увеличении уровня громкости на 10 фон (с 40 до 50 фон).

На л. XXX, рис. 2 приводятся шкалы громкости и уровня громкости, а также примеры некоторых звуков и шумов.

Повседневный опыт показывает, что слышимость речи и музыки в помещениях обычно затрудняется при наличии посторонних звуков. Посторонние звуки изменяют порог слышимости, определяемый минимальным уровнем звукового давления, при котором звук данной частоты слышим.



Если маскируемый сигнал имеет достаточно узкий спектр, то количественной мерой эффекта маскировки принято считать величину, показывающую, на сколько децибелов повышается порог слышимости маскируемого тона над порогом его восприятия в тишине. Эта величина называется маскировкой и выражается в децибелах. Многочисленные наблюдения по изучению эффекта маскировки одно-

го синусоидального тона определенной частоты другим показали, что наибольшим маскирующим эффектом обладают звуки низкой частоты и наименьшим звуки высокой частоты.

Эффект маскировки сложных сигналов (например, речи) оценивается снижением разборчивости речи при наличии шума по отношению к разборчивости речи в условиях тишины.

ОСНОВЫ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ

1. Основы геометрической акустики

Отражение и рассеивание звуковых волн внутренними поверхностями играет большую роль в формировании звукового режима в помещении.

При рассмотрении вопросов отражения и рассеивания звуковых волн от внутренних поверхностей помещения удобно пользоваться понятием фронта распространяющейся звуковой волны. Фронт движущейся волны в пространстве представляет непрерывную поверхность, все точки которой в данный момент времени имеют одинаковую фазу колебания. Направление распространения звуковой волны перпендикулярно фронту волны во всех его точках.

Практически при решении акустических задач фронт волны в данный момент времени удобно определять при помощи построения звуковых лучей.

Звуковые отражения могут быть направленными и рассеянными. Характер отражения зависит от размеров и фактуры отражающей поверхности, а именно: при малой глубине фактурного слоя и больших размерах архитектурного членения поверхностей (по сравнению с длиной волны) звуковые волны отражаются направленно. Для направленных звуков действуют известные оптические законы, согласно которым:

- а) угол падения равен углу отражения;
- б) падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости, перпендикулярной к отражающей поверхности.

Эти законы позволяют архитектору соответствующим расположением отражающих поверхностей в зале придавать отраженным звуковым лучам желательное направление. Рассеянные отражения наблюдаются в тех

случаях, когда размеры архитектурных членений поверхностей приблизительно совпадают с длиной звуковых волн, а также при неравномерном распределении в помещении поверхностей, обладающих способностью поглощать звуки различных частот.

Для построения отраженных звуковых лучей от вогнутых поверхностей пользуются способом, приведенным на л. XXX, рис. 3. Звуковые лучи, исходящие от источника звука S , падают на поверхность стены под углами α_1 ; α_2 ; α_3 ; отражаются от нее под теми же углами и представляются наблюдателю исходящими из точки S_1 , которая является зеркальным изображением точки S .

Пользуясь этим методом, находят отражения звуковых лучей от вогнутых и выпуклых поверхностей. На л. XXX, рис. 4 приводятся построения отраженных звуковых волн от вогнутой поверхности. Нетрудно заметить, что после отражения звуковые лучи сходятся в точке, образуя так называемый фокус.

При проектировании помещений с вогнутыми поверхностями, например со сводчатым потолком, криволинейной торцовой стеной и т. д., архитектор должен выбрать радиус кривизны поверхности, при которой устраняется образование фокусов в зоне мест зрителей.

Место нахождения фокуса, образуемого отраженными звуковыми лучами от вогнутой поверхности (л. XXX, рис. 4), определяется по формуле

$$x = \frac{dr}{2(d-r)} \quad (II.6)$$

где x — расстояние фокуса до вогнутой поверхности;

d — расстояние источника звука до вогнутой поверхности;

r — радиус кривизны поверхности.

Однако в ряде случаев вогнутые поверхности служат средством рассеивания звуковых лучей. Это наблюдается, например, при расположении источника звука вблизи поверхности на расстоянии меньшем чем $0,5 r$ (табл. XXX, рис. 6), а также в случаях, когда расстояние между отражающей поверхностью и слушателем во много раз превышает радиус кривизны. Такие условия характерны в старинных соборах (готических и др.).

Для устранения фокусов в зоне расположения зрителей в помещениях со сводчатыми или купольными перекрытиями необходимо радиус кривизны перекрытия выбрать в пределах $1,5-2H$ (где H — высота помещения).

Звукорассеивающий эффект вогнутых поверхностей в виде ниш по периметру стен или куполов на поверхности потолка обеспечивается при малых радиусах кривизны ($r \leq 0,5H$).

Построение отраженных звуковых волн от выпуклых поверхностей свидетельствует о рассеивающих свойствах этого вида поверхностей (л. XXX, рис. 5). Поэтому в практике эти поверхности широко используются для получения диффузного звукового поля в помещении.

Применение выпуклых поверхностей особенно желательно в помещениях с круглой и эллиптической формой плана. В таких помещениях наряду с образованием фокусов (л. XXX, рис. 7) возникают ползущие звуки; последние при гладкой облицовке стен могут передаваться по периметру помещения на большие расстояния.

Ухо наше способно четко различать импульсы прямого и отраженного звуков только при определенном (критическом) интервале по времени между их приходом к слушателю. В зависимости от интервала во времени отраженных звуков они могут:

а) или усиливать звуки и улучшать слышимость;

б) или создавать эхо и помехи, ухудшающие слышимость.

Величина критического интервала зависит от вида звучания; так, например, для речи его можно принять равным 50 миллисекундам ($1/20$ сек). Для музыкальных произведений предельное запаздывание достигает 100 миллисекунд и больше в зависимости от характера и ритма музыки. На величину критического интервала влияние оказывает также сила отраженного звука, его направление и тембр звука. Опытами установлено, что время реверберации не оказывает существенного влияния на величину предельного интервала. Если сила отраженного звука существенно отличается от силы прямого звука, величина кри-

тического интервала возрастет; так, при ослаблении отраженного звука по сравнению с прямым на 10 дБ отраженные звуки практически уже не воспринимаются.

Заглушение звуков низких и высоких частот отделкой помещения приводит к значительному возрастанию критического интервала.

Отраженные от внутренних поверхностей звуки должны по возможности сохранять спектр падающих на них звуков.

При превышении критического интервала времени отраженный звук воспринимается слушателем как эхо; в этом случае между восприятием прямого и отраженного звука образуется пауза. При этом эхо от коротких ударных шумов образуется при незначительном превышении критического интервала времени, а при повторении слогов требуется интервал около 100 миллисекунд.

При скорости распространения звука в помещении с нормальной температурой воздуха, равной 340 м/сек, путь, проходимый за интервал времени 50 миллисекунд, составляет 17 м.

Это позволяет проверку на образование эха в помещении производить геометрическим путем.

На плане или на продольном разрезе помещения наносятся пути прямого SA и отраженного $SO+OA$ звуков (л. XXX, рис. 8).

Затем вычисленные в масштабе чертежей значения SA и $SO+OA$ сравниваются между собой. Для устранения возможности образования эха необходимо, чтобы

$$SA + D \geq SO + OA, \quad (II.7)$$

где D — путь, проходимый звуком за критический интервал времени, выраженный в м.

При критическом интервале, равном 50 миллисекунд, формула принимает вид

$$SA + 17 \geq SO + OA. \quad (II.8)$$

В закрытых помещениях эхо часто образуется при отражении звуковых волн потолком, задней стеной, а в широких помещениях также прилегающими к сцене (эстраде) участками боковых стен. Эхо создает помехи для слушателей, сидящих в первых рядах, и для исполнителей.

Устранение эха в помещениях достигается применением:

звукопоглощающей или звукорассеивающей отделки задней стены;

скошенных участков боковых стен, прилегающих к сцене (эстраде);

скошенного потолка и звукоотражающих экранов, расположенных над сценой (эстрадой) или вблизи нее;

круто поднимающимся амфитеатром зрительных мест.

Особый вид эха, так называемое порхающее эхо, образуется в помещениях с параллельными стенами. Резкий отрывистый сигнал в какой-либо точке помещения порождает последовательную серию отзвуков, приходящих в ту же точку помещения через определенный интервал времени. «Порхающее эхо» обычно возникает в помещениях с параллельными стенами, отделанными гладкой облицовкой, обладающей высоким коэффициентом звукового отражения (мрамором и т. п.).

С целью повышения уровня силы звука в удаленных от сцены (или эстрады) местах зрительного зала устанавливаются скошенные части потолка и стен, а также специальные звукоотражательные экраны. Эффективность таких отражений звуковой энергии зависит от выбранного соотношения между размерами отражателя и длиной звуковых волн, излучаемых источником. Для обеспечения хорошего эффекта действия отражателя необходимо, чтобы длина падающих на него звуковых волн была достаточно малой по сравнению с линейными размерами отражателя. В некоторых залах (например, в зале конгрессов Дворца культуры и науки в Варшаве) применен звукоотражательный железобетонный экран площадью около 100 м².

На л. XXX, рис. 9 приводится ряд примеров использования отражателей звуков в залах различного назначения.

Метод проектирования отражательных экранов полезно освоить на примере зрительного зала, продольный разрез которого приподан на л. XXX, рис. 10.

В пространстве, прилегающем к эстраде, произвольно выбирают точку P_1 (обычно на вертикали, проходящей через край эстрады или сцены). Затем через точку P_1 проводят линию P_1S (S — источник звука) и A_1P_1 (точка A_1 соответствует положению головы зрителя, сидящего в последнем ряду амфитеатра). По направлению A_1P_1 откладываем $P_1M_1 = P_1S$. Соединяем точки M_1 и S и из точки P_1 опускаем перпендикуляр на основание треугольника M_1SP_1 . Направление линии P_1K_1 (биссектрисы угла) определяет положение плоскости, отражающей звуки от источника S в точку A_1 помещения.

Необходимый размер плоскости, отражающей звуки от источника к местам амфитеатра (P_1P_2), определится построением линии P_1A_2 (A_2 — точка, соответствующая положению го-

ловы зрителя, сидящего в первом ряду амфитеатра).

Полученный таким образом размер плоскости обычно увеличивают на 0,5 м с каждой стороны.

Затем тем же способом определяют положение и размеры плоскости, отражающей звуки по направлению к местам, расположенным на балконе. При этом построение приводится для точки P_2 .

Построение отражателей, расположенных в местах сопряжения стен с потолком (под балконами и над ними), проводится следующим образом: в пространстве произвольно выбирается точка P_3 , которая затем соединяется с источником звука S и с точкой A_3 , к которой предполагается направить отраженный звуковой луч. Полученный угол делят пополам биссектрисой. Перпендикуляр к биссектрисе определяет положение поверхности, отражающей звуки по направлению к ряду A_3 . Размер поверхности не рекомендуется выбирать менее 2 м. Подобным образом определяют поверхности, отражающие звуки к другим рядам амфитеатра или балкона.

2. Критерии количественной оценки акустического качества помещений

Условия восприятия в помещениях звукового сигнала зависят от размеров, формы помещения, а также от характера, конструктивного решения и расположения отделки внутренних поверхностей (потолка, стен и др.). Все эти факторы органически связаны с архитектурным и конструктивным решением помещений.

Современная архитектура зданий, применяющая протяженные гладкие поверхности, легкие пространственные жесткие конструкции, новые формы и материалы, выдвинула перед проектировщиками новые задачи и в области акустики.

Неумение правильно оценивать эти особенности современного строительства объясняет неудовлетворительную акустику многих зрительных залов, выстроенных за последние годы.

Одна из причин неудовлетворительного положения с акустикой зрительных залов связана с выбором критериев оценки акустического качества помещений.

До настоящего времени таким критерием служит время реверберации. Этот глобальный критерий характеризует акустические свойства помещения в целом; поэтому дополнительно к нему необходимы локальные критерии качества, оценивающие условия слухового восприятия в той или иной точке помещений.

К числу локальных критериев относятся четкость ревербирующего сигнала и степень фузности звукового поля в помещении.

Четкость сигнала определяется отношением действия ревербирующего звука в полезной части процесса реверберации к полному его действию в течение процесса затухания звуковой энергии от момента прекращения действия источника звука до порога слышимости.

Под полезной частью процесса реверберации подразумевается энергия прямого звука и первых его отражений, приходящих в какую-либо точку помещения с запозданием до 50 миллисекунд, по сравнению с прямым звуком.

Опытным путем установлено, что четкость сигналов при запаздывании первых отражений на 50 миллисекунд соответствует хорошей разборчивости речи. Эта закономерность учитывается при акустическом проектировании зрительных залов, драматических театров, аудиторий, лекториев и т. п.

Второй критерий оценивает однородность звукового поля и рассеивание звуков. Чем единообразнее звуковое давление в разных точках помещения и равномернее повышение и затухание в нем звуковой энергии, тем лучше акустическое качество помещения.

В настоящее время выдвинуто несколько критериев оценки звукового поля в помещении (колебания звукового давления, интенсивность звуков, приходящих в точку из различных направлений, и др.). Однако эти критерии еще нуждаются в дополнительном изучении.

Для лучшего рассеяния звуков поверхностей интерьера должны соответствовать требованию, чтобы к слушателю приходило возможно большее количество отражений, быстро следующих одно за другим. Это достигается, с одной стороны, архитектурным членением внутренних поверхностей и, с другой, — равномерным распределением в помещении участков с звукопоглощающей отделкой.

Наиболее эффективными являются членения призматической и цилиндрической формы, хорошо рассеивающие звуки в диапазоне средних и высоких частот; прямоугольная форма членения относительно лучше рассеивает звуки низкой частоты.

Эффективное рассеяние звуковой энергии в диапазоне всех частот обеспечивает крупно-размерные членения стен и потолка размерами не менее 2 м в ширину и несколько дециметров в глубину.

Рекомендуемые размеры архитектурной пластической обработки внутренних поверхностей, обеспечивающих диффузное отраже-

ние падающей звуковой энергии, приводятся на л. XXX, рис. 11. На рисунке даются границы диффузного (рассеянного) отражения звука.

В помещениях аудиторных наряду с временем реверберации критерием качества звучания служит артикуляция, характеризующая разборчивость слов и речи.

3. О процессе реверберации

Процесс реверберации можно понять только на основе современной волновой теории акустики помещения. С волновой точки зрения реверберация является процессом затухания собственных колебаний воздушного объема помещений, возникающего после прекращения действия источника звука. Этот процесс складывается из множества собственных звуковых колебаний воздуха в помещении, каждое из которых представляет собой одно из возможных перемещений частиц воздуха, выведенных из равновесия каким-либо источником звука. При этом частота собственных колебаний зависит только от свойств самого помещения.

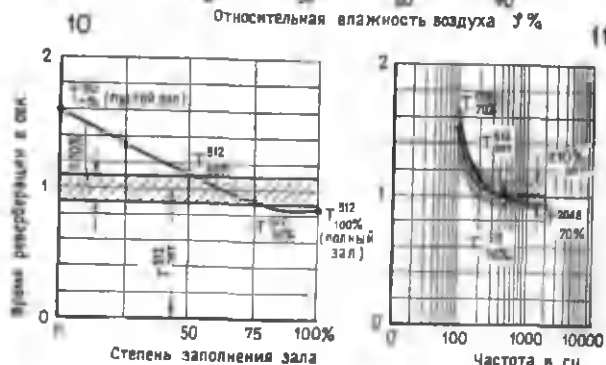
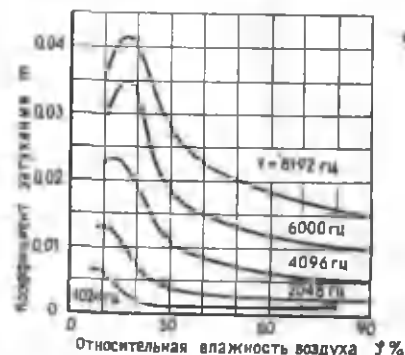
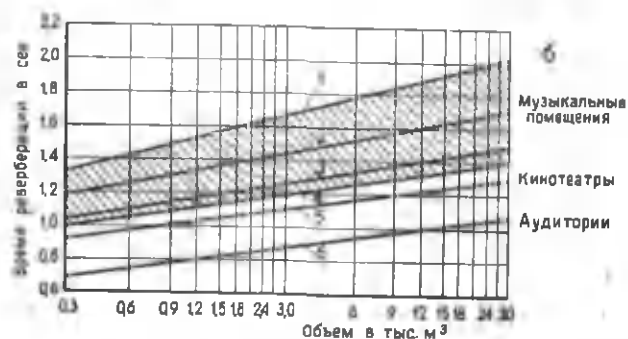
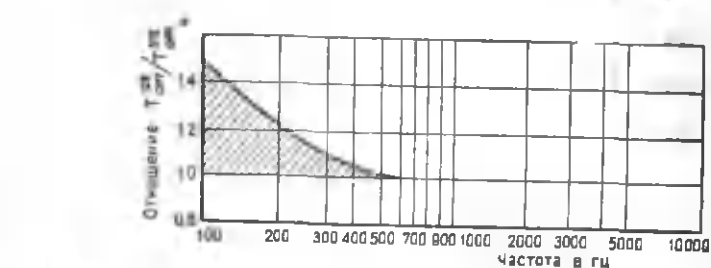
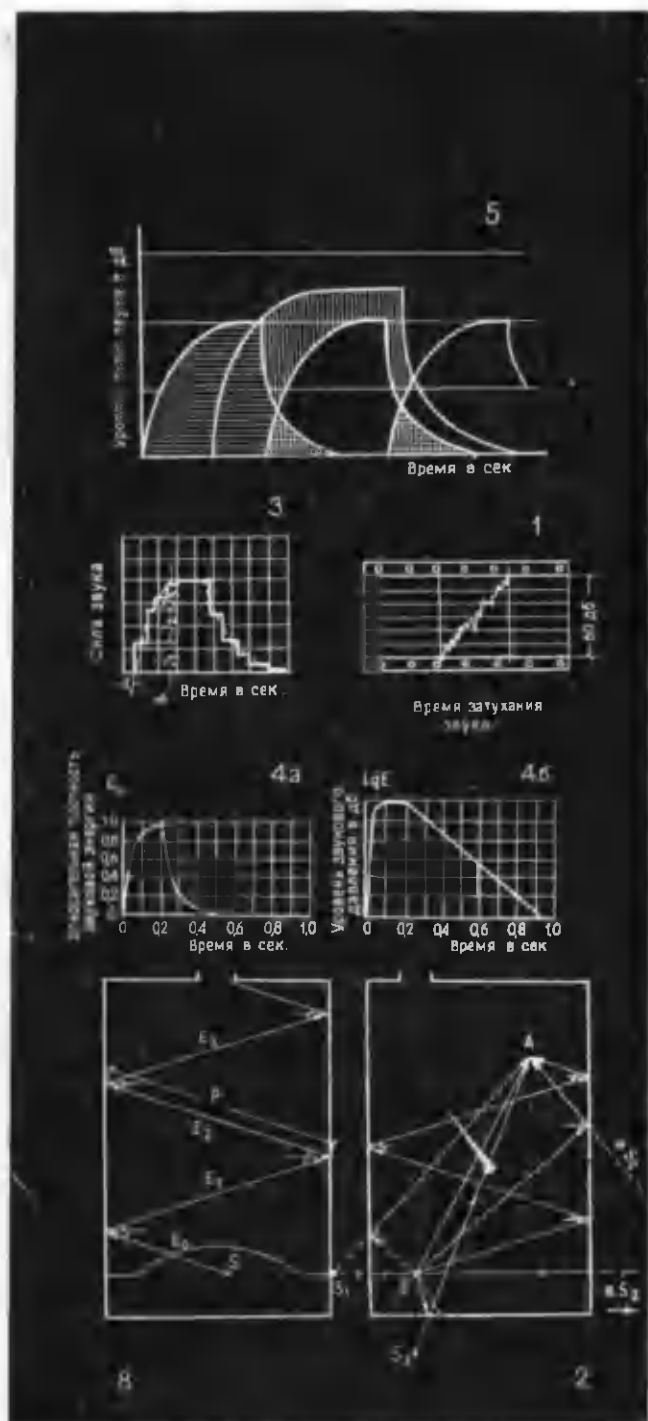
Процесс реверберации характеризуется различной скоростью затухания звука в зависимости от вида собственных звуковых колебаний (аксиальных, тангенциальных, косых). Это различие в показателях затуханий уменьшается при неправильной несимметричной форме помещений, равномерном распределении звукопоглощающих материалов на внутренних поверхностях интерьера, а также при их глубокой пластической архитектурной отделке.

Однако даже при соблюдении этих условий в помещении не создается идеального звукового поля¹; это свидетельствует о том, что действительный процесс реверберации несколько отличается от происходящего в идеальном звуковом поле. Этим объясняется, что процесс затухания колебаний, записанный на ленту самописца, имеет значительные флюктуации, которые вызываются биениями (л. XXXI, рис. 1).

Несмотря на отмеченные особенности процесса реверберации, значение времени реверберации велико. Практически в настоящее время — это основной критерий, характеризующий акустические свойства помещения в целом.

Равномерное распределение звуковой

¹ Идеальное диффузное поле характеризуется тем, что в любой его точке усредненная во времени плотность звуковой энергии одинакова; через каждую точку поля проходят волны средней одинаковой во времени интенсивности для всех направлений и фаз.



энергии в помещении в большей степени зависит от формы помещения, которая строится таким образом, чтобы все места зрительного зала обеспечивались не только прямым звуком, идущим непосредственно от исполнителя к слушателю, но и первично отраженными зву-

ками от стен и потолка, идущими непосредственно от источника к слушателю. Естественно, что в наибольшей степени в отраженной звуковой энергии нуждаются наиболее удаленные от источника звука места зрительного зала. Прямые звуки приходят сюда значительно

Рис. 1. Затухание звука после прекращения действия источника, записанное на ленте при помощи самописца Неймана

Рис. 2. Схема, объясняющая последовательный приход к слушателю отраженных звуковых лучей от разных внутренних поверхностей

Рис. 3. Схема нарастания и затухания звука в помещении

Рис. 4. Схемы нарастания и затухания звука в помещении:

а — построенные в обычном масштабе; б — в логарифмическом

Рис. 5. Наложение звуков в помещениях с повышенной реверберацией

Рис. 6. Оптимальное время реверберации для помещений разного назначения

1 — в залах с органной музыкой; 2 — в концертных залах; 3 — в зрительных залах драматических театров; 4 — в залах камерной музыки; 5 — в кинотеатрах; 6 — в конференц-залах и аудиториях

Рис. 7. Оптимальное время реверберации для низкочастотных, среднечастотных и высокочастотных составляющих звукового спектра

Рис. 8. Схема к выводу формулы расчета времени реверберации

Рис. 9. Значения коэффициента затухания звука в воздухе μ в зависимости от относительной влажности воздуха для разных частот

Рис. 10. Построение характеристики реверберации в зависимости от степени заполнения зала

Рис. 11. Построение частотной характеристики реверберации в зависимости от частоты звука

ослабленными из-за большего удаления от источника звука и вследствие быстрого затухания при движении вдоль сильно поглощающей звуковую энергию поверхности пола, занятой публикой («скользящее» поглощение).

Применение в помещении балконов, колонн, пилястр, а также глубокой пластической отделки стен и потолка (ниши, кессоны и др.) способствует рассеянию звуковой энергии в помещении и созданию однородного звукового поля.

Рассмотрим процессы нарастания и затухания звука в помещении.

Пусть в точке S — помещения, план которого дан на л. XXXI, рис. 2, находится источник звука, а в точке A — слушатель. Рассмотрим подробно процесс передачи звука от источника к слушателю.

При действии источника звучания до слушателя через промежуток времени Δt кратчайшим путем SA дойдет прямой звук. Силу его обозначим через I_1 .

В следующий момент к слушателю в точку A придет отраженный звук от поверхности AB силой I_2 , как бы исходящий из мнимого источника, расположенного в точке S_1 . Этот звук обладает меньшей силой вследствие большей удаленности до слушателя источни-

ка звука S_1 и поглощения некоторой части звуковой энергии при соприкосновении звуковой волны со стеной.

Затем к слушателю придет отраженный от поверхности CD звук силой I_3 из мнимого источника, расположенного в точке S_2 , при этом I_3 будет меньше I_2 , так как расстояние мнимого источника звука S_2 до слушателя A , т. е. S_2A , будет больше, чем S_1A .

Позднее в точку A придут отражения от других более удаленных от слушателя поверхностей, а затем звуки, претерпевшие два отражения и более.

При этом сила приходящих в точку A отраженных звуков будет постепенно уменьшаться, а сила результирующего звука нарастать. Результирующий звук будет нарастать до момента динамического равновесия, который устанавливается между звуковой энергией, излучаемой в течение 1 сек (т. е. его акустической мощностью) и звуковой энергией, ежесекундно теряемой вследствие звукопоглощения внутренними поверхностями и воздухом помещения.

Установившаяся плотность звуковой энергии в помещении E_0 прямо пропорциональна акустической мощности M источника и обратно пропорциональна общему количеству звукового поглощения в помещении A , т. е.

$$E_0 = \frac{4M}{CA}, \quad (\text{II.9})$$

где C — скорость распространения звука.

Следовательно, к слушателю, находящемуся в помещении, в течение определенного промежутка времени звуки приходят с малыми интервалами, не воспринимаемыми ухом раздельно; ощущение этих звуков может характеризоваться плавной пунктирной линией, изображенной на л. XXXI, рис. 3. Аналогичным образом происходит в помещении спадание звука после прекращения действия его источника, а именно: сначала для слушателя исчезает прямой звук, затем затухают звуки, претерпевшие одно, два, три отражения и т. д. вплоть до достижения звуком порога слышимости.

Чем выше порядок отражений, тем меньше доля энергии, которую данное отражение вносит в полную звуковую энергию, устанавливающуюся в конечном итоге в помещении. Объясняется это, с одной стороны, потерями при каждом отражении вследствие поглощения звуковой энергии внутренними поверхностями помещения, с другой, — увеличением общего пути, проходимого звуковой волной от источника до слушателя. Известную роль играет при этом явление интерференции звуко-

вых волн, поскольку от состояния фаз колебания зависит результирующая плотность звуковой энергии в помещении.

Приведенная на л. XXXI, рис. 3 кривая дает идеальную картину нарастания и затухания энергии звука в помещениях. Действительная кривая, как уже указывалось, является более сложной вследствие неизбежных флуктуаций звуковой энергии.

На л. XXXI, рис. 4,а плотность звуковой энергии отложена в линейном масштабе, а на рис. 4,б зависимость между плотностью звуковой энергии и временем дается в логарифмическом масштабе; при этом за исходный уровень (стандарт) принята величина установившейся плотности звуковой энергии. Это графическое изображение нарастания и затухания звуковой энергии лучше отражает действительное слуховое ощущение звукового процесса. Из характера этой кривой видно, что нарастание звука, ощущаемое нашим ухом, происходит очень быстро в течение долей секунды. Процесс же затухания звука протекает более медленно.

Практически удобно, что при пользовании логарифмической шкалой в децибелах кривая затухания звука имеет характер спадающей прямой линии. Этот участок кривой, изображающий звуковой процесс после прекращения действия источника звука, характеризует остаточное звучание (отзвук) или реверберацию помещения.

4. Время реверберации

Чрезмерная реверберация является весьма распространенным недостатком акустики современных зданий. При продолжительной реверберации в зале последовательно издаваемые источником звуки перекрывают друг друга (л. XXXI, рис. 5) и создают неблагоприятные условия для восприятия не только речи, вследствие ухудшения разборчивости слогов и слов, но и музыки.

С другой стороны, малая реверберация помещения также является неблагоприятной для музыки: звуки в таких помещениях воспринимаются неестественными.

Поэтому количественный выбор времени реверберации представляется весьма важным при расчетах акустики помещений.

Время реверберации в помещении не является постоянным для звуков различной частоты. Это объясняется разной звукопоглощающей способностью отделочных материалов. В архитектурной практике время реверберации определяется обычно для частот 128, 512 и 2048 гц, поскольку эти частоты характерны

для диапазона звуков, наиболее часто встречающихся в речи и музыке.

В ряде помещений, в которых качество акустики ограничивается требованием слышимости и разборчивости речи (например, в аудиториях), время реверберации обычно определяется для одной частоты — 512 гц.

Средний уровень звуковых полей по отношению к порогу слышимости составляет около 60 дб. Поэтому оказалось удобным установить стандартное время реверберации и помещения, под которым имеют в виду время, необходимое для того, чтобы плотность звуковой энергии стандартного тона частотой 512 гц уменьшилась в процессе ее свободного затухания до одной миллионной доли начального значения.

Так как при изменении плотности звуковой энергии в 1 000 000 раз уровень звукового давления изменяется на 60 дб, то время стандартной реверберации можно определить и как время, в течение которого уровень звукового давления стандартного тона с частотой колебания 512 гц уменьшится на 60 дб.

Сэбин доказал, что для каждого помещения в зависимости от его назначения и объема существует оптимальная средняя скорость затухания звуковых волн, соответствующая оптимальному для данных условий времени реверберации.

Оптимальное время реверберации устанавливается на основании сопоставления численных значений этого критерия с субъективной оценкой качества звучания в условиях соответствующих измеренным значениям критерия.

Необходимо подчеркнуть, что концепция оптимального времени реверберации предполагает возможность разделения общей длительности остаточного звучания (отзвука) на две качественно неравноценные части, из которых:

первая — начальная (от момента прекращения звука до некоторого момента t_1) играет положительную роль, повышая уровень громкости звука и обогащая его звучание;

вторая — более поздняя часть (от момента t_1 до конца процесса звучания) либо бесполезна, либо даже вредна, если ее уровни сравнимы с уровнем прямого звука.

В самом деле, если время реверберации превышает оптимальную величину, то уровни во второй части остаточного звучания весьма велики и создают ощутимую помеху восприятию звука, создаваемого источником. Если же время реверберации меньше оптимального, то уровни звука в начальной части процесса очень малы; это приводит к снижению уровня громкости и к обеднению качества звучания.

При оптимальном времени реверберации достигается наиболее полное использование начальной части отзвука и вместе с этим уровни во второй поздней части остаточного звучания настолько малы, что не создают реверберационных помех.

Оптимальное время реверберации зависит от назначения и объема помещения, а также от частоты колебания.

При одинаковом объеме помещения аудиторий, конференц-залов и т. п. должны обладать наименьшим оптимумом реверберации; помещения же, предназначенные для музыкальных исполнений, должны обладать более длительным временем реверберации.

Приближенно оптимальное время реверберации для больших залов различного назначения можно определить по формуле:

$$T_{\text{опт}}^{512} = k \lg V, \quad (\text{II.10})$$

где $T_{\text{опт}}^{512}$ — оптимальное время реверберации для частоты 512 гц;

V — объем помещения в м^3 ;

k — коэффициент, который зависит от назначения помещения: для оперных театров и концертных залов 0,41; для драматических театров 0,36; для кинотеатров и аудиторий 0,29.

Оптимальное время реверберации при частоте 512 гц для помещений различного назначения приводится в л. XXXI, рис. 6. В помещениях с высокими требованиями к естественности звучания оптимальное время реверберации для звуков с частотой менее 512 гц $T_{\text{оп}}^{51}$ увеличивается (л. XXXI, рис. 7) и для частоты 128 гц составляет

$$T_{\text{опт}}^{128} = 1,57 T_{\text{опт}}^{512}.$$

5. Уравнение реверберации

Время реверберации в помещении с равномерным распределением звукопоглощающих материалов можно определить делением пути L_1 , проходимого звуком за время с момента прекращения действия источника звучания до момента, когда энергия звука уменьшится в миллион раз (10^6) на скорость распространения звука в воздухе помещения.

Путь, пройденный звуком, в этом случае можно представить в виде произведения средней длины свободного пробега звука P_c между последовательными отражениями на количество отражений n от внутренних поверхностей помещения, которое претерпевает звук прежде, чем его энергия уменьшится в 10^6 раз. Таким образом, $P_c n = L_1$, но

$$L_1 = CT.$$

Поэтому $P_c n = CT$, откуда

$$T = \frac{P_c n}{C}. \quad (\text{II.11})$$

Схематический ход отраженных звуковых лучей от источника показан на л. XXXI, рис. 8. Как видно из рисунка, расстояния между последовательными отражениями 1, 2, 3 и т. д. не равны друг другу. Поэтому для определения средней длины свободного пробега звука P_c приходится прибегать к статистике. Математическая статистика дает следующую формулу свободного пробега:

$$P_c = \frac{4V}{S}, \quad (\text{II.12})$$

где V — объем помещения в м^3 ;

S — суммарная площадь всех внутренних поверхностей в м^2 .

Подставляя это значение P_c в формулу (II.11), имеем:

$$T = \frac{4Vn}{CS}. \quad (\text{II.13})$$

Но для помещений с нормальной температурой воздуха ($15-20^\circ$) $C=340$ м/сек; поэтому

$$T = \frac{4Vn}{340S}. \quad (\text{II.14})$$

Из формулы (II.14) видно, что время реверберации для данного помещения при известном объеме V и суммарной площади внутренних поверхностей S зависит только от величины n , т. е. от количества отражений, после которых плотность энергии отзвука уменьшится в 10^6 раз.

Для нахождения n воспользуемся следующей зависимостью.

Обозначим звуковую энергию, излучаемую источником в помещении, через E_0 . Если предположить теперь, что все внутренние поверхности имеют одинаковый коэффициент звукового поглощения α , то энергия звука составляет:

после первого отражения

$$E_1 = E_0 - \alpha E_0 = E_0(1 - \alpha);$$

после второго отражения

$$E_2 = E_0(1 - \alpha) - E_0(1 - \alpha) = E_0(1 - \alpha)^2;$$

после третьего отражения

$$E_3 = E_0(1 - \alpha)^3;$$

после n отражений

$$E_n = E_0(1 - \alpha)^n. \quad (\text{II.15})$$

Преобразуем уравнение (II.15):

$$\frac{1}{(1-\alpha)^n} = \frac{E_0}{E_n};$$

$$(1-\alpha)^{-n} = \frac{E_0}{E_n}.$$

Но $\frac{E_0}{E_n} = 10^6$, следовательно:

$$(1-\alpha)^{-n} = 10^6. \quad (\text{II.16})$$

Прологарифмируем уравнение (II.16), пользуясь натуральными логарифмами:

$$-\ln(1-\alpha)^n = \ln 10^6.$$

откуда

$$n = \frac{\ln 10^6}{-\ln(1-\alpha)}.$$

Переходя от натурального логарифма к десятичному, получим:

$$n = \frac{2,3 \lg 10^6}{-\ln(1-\alpha)} = \frac{2,3 \cdot 6}{-\ln(1-\alpha)} = \frac{13,8}{-\ln(1-\alpha)}.$$

Подставляем найденное значение n в уравнение (II.14):

$$T = \frac{4V13,8}{-340S \ln(1-\alpha)}.$$

откуда

$$T = \frac{0,162V}{-S \ln(1-\alpha)}. \quad (\text{II.17})$$

Числовой коэффициент в этой формуле, выведенной Эйрингом, зависит от длины свободного пробега звука (P_c), который зависит от формы помещения. Таким образом, формула дает зависимость от трех факторов: объема помещения, его формы и от выбранных отделочных материалов, звукопоглощающие свойства которых учитываются в формуле коэффициентом α . При этом α представляет среднее значение коэффициента звукового поглощения, определяемое по формуле:

$$\alpha = \frac{A}{S}. \quad (\text{II.18})$$

где A — полное звуковое поглощение в помещении;

S — суммарная площадь звукопоглощающих поверхностей в помещении.

Формула Эйринга II.17 является универсальной и поэтому может применяться при любых значениях α .

Для помещений, в которых среднее значение α меньше 0,2, значение $\ln(1-\alpha)$ приближается к значению α . В этом случае более удобной для практических целей будет формула Сэбина:

$$T = \frac{0,164V}{\Sigma \alpha S}.$$

(II.19)

Величина $\Sigma \alpha S$, входящая в формулу Сэбина, представляет полное звуковое поглощение в помещении A , которое состоит из двух составляющих: постоянного поглощения $A_{\text{пост}}$ и переменного $A_{\text{пер}}$.

$$A = A_{\text{пост}} + A_{\text{пер}}.$$

Постоянное звуковое поглощение внутренними поверхностями помещения определяется по формуле

$$A_{\text{пост}} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots, \quad (\text{II.20})$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коэффициенты звукового поглощения стен, потолка, панелей и т. д.;

S_1, S_2, S_3 — соответственно площади этих поверхностей.

Переменное звуковое поглощение $A_{\text{пер}}$ определяется по формуле

$$A_{\text{пер}} = A_1 N_1 + A_2 N_2, \quad (\text{II.21})$$

где A_1 — звуковое поглощение одним посетителем;

N_1 — количество посетителей в помещении;

A_2 — звуковое поглощение одним креслом;

N_2 — количество свободных, не занятых посетителями кресел в помещении.

Необходимо отметить, что вывод уравнения реверберации основывается на предположении диффузного (однородного) звукового поля в помещении и одинаковой вероятности хода звуковых отражений во всех направлениях.

Кроме того, при выводе уравнения реверберации использовались законы прямолинейного распространения звуковых лучей вместо звуковых волн. Введение этих положений, упрощающих вывод уравнения реверберации, допустимо лишь в определенных пределах. Так, при малых размерах помещения, когда длина звуковой волны становится сравнимой с размерами препятствий, встречаемых на пути распространения волн, проявляются основные свойства волнового движения — дифракция; в этих случаях пользование геометрической акустикой не дает достоверных результатов.

Аналогично этому в помещениях с высоким звуковым поглощением (например, в ателье звукозаписи и пр.) звуковая энергия поглощается скачкообразно. Это приводит к неравномерному звуковому полю. Поэтому для таких помещений пользование формулами Эйринга и Сэбина приводит к неверным результатам.

В помещениях с большими размерами дополнительно к факторам объема, формы и отделочных материалов необходимо учитывать поглощение звуковых волн воздухом. Влияние поглощения звука воздухом помещения учитывается введением в знаменатель уравнения (II.17) и (II.19) слагаемого $4mV$, где m — коэффициент, зависящий от влажности и температуры воздуха, а также от частоты звуковых колебаний. Числовое значение коэффициента m при нормальной температуре воздуха (20°) приводится на л. XXXI, рис. 9 в виде семейства кривых для звуков разной частоты.

При учете звукопоглощения воздуха расчетные формулы имеют следующий вид:

$$T = \frac{0,162V}{-S \ln(1-\alpha) + 4mV}; \quad (\text{II.22})$$

$$T = \frac{0,164V}{\Sigma \alpha S + 4mV}. \quad (\text{II.23})$$

Для звуков с частотой ниже 1000 гц значения m малы и в расчетах не учитываются. Однако при звуках с высокой частотой потери звуковой энергии в воздухе весьма значительны. Так, например, в больших помещениях для звуков с частотой выше 4000 гц поглощение звуковой энергии воздухом может достигать величины, равной постоянному поглощению $A_{\text{пост}}$.

6. Расчет времени реверберации

Для определения времени реверберации помещения необходимо найти полное звуковое поглощение A , равное

$$A = A_{\text{пост}} + A_{\text{пер}}.$$

Полное звуковое поглощение A определяется для частот 128, 512 и 2048 гц по формулам (II.17) или (II.19), в которое вместо T подставляется соответственно $T_{\text{опт}}^{128}$, $T_{\text{опт}}^{512}$, $T_{\text{опт}}^{2048}$.

Зрительный зал в зависимости от степени заполнения имеет различное количество звукового поглощения, что оказывает существенное влияние на качество акустики. Для сохранения акустического качества при любой степени заполнения зала необходимо применять мягкие кресла, звуковое поглощение которых приближалось бы к звуковому поглощению, создаваемому отсутствующими зрителями.

Однако на практике достигнуть этого невозможно. Поэтому целесообразно расчетным путем предвидеть, как может измениться время реверберации в зависимости от степени заполнения зала. Для этого используются характеристики реверберации в виде графика,

представленного на л. XXXI, рис. 10. Для получения кривой, характеризующей изменение времени реверберации для тона частотой 512 гц, вычисляют время реверберации для пустого зала и при заполнении его на 50, 70 и 100%. Полученную кривую сравнивают с оптимальным временем $T_{\text{опт}}^{512}$, которое на рис. 10 приводится в виде заштрихованной полосы, показывающей допускаемое отклонение от $T_{\text{опт}}^{512}$ в пределах ($\pm 10\%$).

Расчетное время реверберации должно совпадать с оптимальным при 70% заполнении зала.

В помещениях с высокими требованиями к качеству звучания (концертные залы, оперные и драматические театры и др.) дополнительно необходимо определять частотную характеристику реверберации. Эта характеристика приводится на л. XXXI, рис. 11. Для ее построения вычисляется время реверберации для частот 128, 512 и 2048 гц при заполнении зала на 70%.

Расчетная частотная характеристика реверберации сравнивается с оптимальной, которая для низких частот определяется из соотношения: $T_{\text{опт}}^{128} : T_{\text{опт}}^{512} : T_{\text{опт}}^{2048} = 1,5 : 1 : 1$.

При сравнении необходимо, чтобы расчетная частотная характеристика располагалась в зоне допускаемого отклонения от оптимальной $\pm 10\%$ (заштрихованная зона).

Необходимое постоянное поглощение $A_{\text{пост}}$ находится как разность между

$$A_{\text{пост}} = A - A_{\text{пер}}.$$

Поэтому вначале определяется переменное звуковое поглощение, которое удобно записывать по форме, приведенной в табл. II.2.

Таблица II.2

Расчет переменного звукового поглощения $A_{\text{пер}}$ для тона частотой 512 гц

Объекты поглощения	Поглощение в м²	Звуковое поглощение при заполнении зала в %			
		0	50	70	100
Зрители					
Кресла					
Итого					

Переменное звуковое поглощение для частот 128 и 2048 гц определяется при заполнении зала на 70%. Результаты подсчета количества звукового поглощения записываются в табл. II.3.

Таблица II.3

Подсчет переменного звукового поглощения $A_{\text{пер}}$
для частот 128 и 2048 гц

Объекты поглощения звука	Количество объектов поглощения	Частота колебания в гц					
		128			2048		
		поглоще- ние одним объектом	общее зву- ковое пог- лощение	поглоще- ние одним объектом	общее звуковое пог- лощение		
в м²							
Зрители	N_1	A_1	$N_1 A_1$	A_1'	$N_1 A_1'$		
Кресла свободные	N_2	A_2	$N_2 A_2$	A_2'	$N_2 A_2'$		
Всего							

Подсчет постоянного звукового поглощения $A_{\text{пост}}$ производится по форме, приводимой в табл. II.4.

Таблица II.4

Подсчет постоянного звукового поглощения $A_{\text{пост}}$

Наименование ограждений	Материал или конструкция отделки	Площадь поверхности в м ²	Частота колебаний в гц					
			128			2048		
			α	αS	α	αS	α	αS
Потолок	Штукатурка по железобетону	1000	0,01	10	0,15	150	0,02	20
Стена, нижняя панель	Деревянная панель из листов фанеры толщиной 8 мм	100	0,18	18	0,24	24	0,1	10

При подборе материалов и конструкций для отделки интерьеров нужно иметь в виду, что сумма $A_{\text{пост}} + A_{\text{пер}}$ для каждой из частот (128, 512 и 2048 гц) должна отклоняться от общего поглощения не более чем на $\pm 10\%$; только в этом случае расчетное время реверберации T_p совпадает с оптимальным $T_{\text{опт}}$.

Результаты подсчетов переменного и постоянного звукового поглощения и вычисленное по ним расчетное время реверберации вносятся в табл. II.5.

По данным этой таблицы строятся характеристики реверберации.

7. Артикуляция речи

Хорошие акустические качества аудиторий характеризуются высокой степенью разборчи-

Таблица II.5

Расчетное время реверберации в сек

Частота в гц	512				128	2048
Заполнение зала в %	0	50	70	100	70	70
Полное звуковое поглощение в м ²						
Время реверберации в сек						

вости на всех местах зала. На разборчивость речи большое влияние оказывает время реверберации и первые звуковые отражения.

Отношение плотности полезной части звуковой энергии $E_n + E_{50}$ к бесполезной E_c характеризует разборчивость речи и называется коэффициентом разборчивости речи K_p , т. е.

$$K_p = \frac{E_n + E_{50}}{E_c}, \quad (\text{II.24})$$

где E_n — плотность прямого звука, равная

$$E_n = \frac{P}{4\pi Cr_0^2};$$

E_{50} — плотность звуковой энергии первых отражений, приходящих в данную точку в течение 50 миллисекунд после прекращения действия источника звука

$$E_{50} = \frac{P(1-\bar{\alpha})}{4\pi C} \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{r_3^2} + \dots + \frac{1}{r_n^2} \right);$$

E_c — плотность звуковой энергии всех последующих отражений, исключая первое, равное

$$E_c = \frac{4P(1-\bar{\alpha})^2}{\bar{\alpha} SC}, \quad (\text{II.25})$$

P — акустическая мощность источника звука;

C — скорость распространения звука;

r_0 — расстояние от данной точки до источника звука;

r_1, r_2, r_n — свободный пробег или путь первых отражений от источника звука до данной точки, приходящих в течение 50 миллисекунд после прекращения действия источника звука;

α_n — коэффициент поглощения поверхности, от которой приходит первое отражение;

$\bar{\alpha}$ — средний коэффициент звукопоглощения в помещении при 100% заполнении зала;

S — общая площадь всех поверхностей в зале.

После преобразований численное значение K_p выражается так:

$$K_p = \frac{\bar{\alpha} S}{16\pi(1-\bar{\alpha})^2} \left[\frac{1}{r_0^2} + \frac{1-\alpha_1}{r_1^2} + \frac{1-\alpha_2}{r_2^2} + \dots + \frac{1-\alpha_n}{r_n^2} \right]; \quad (II.26)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$ — коэффициенты звукового поглощения поверхностей, от которых звук приходит в данную точку помещения в течение 50 миллисекунд после прекращения действия источника звука.

Уравнение (II.26) дает приближенный способ определения K_p , поскольку он учитывает только первые звуковые отражения и пренебрегает скользящим звуковым поглощением прямого звука, распространяющегося от источника к местам расположения слушателей.

Сравнение расчетных значений коэффициентов разборчивости речи с результатами субъективной оценки слышимости, проведенной во многих аудиториях, показывают, что хорошая слышимость и разборчивость речи наблюдалась в помещениях, для которых значение K_p было равно или более 0,2*.

Критерием акустического качества речи и условий ее передачи служит слоговая артикуляция. Этот метод заимствован из телефонии и заключается в определении процента артикуляции, получаемой при испытаниях. Процедура этих испытаний состоит в том, что диктор читает таблицу односложных, не имеющих смысла слогов и слушатели, находящиеся в разных точках помещения, записывают слоги так, как они их слышат и понимают. Такой метод исключает восприятие плохой слышимости слогов догадкой слушателей. Процент правильно записанных слушателями слогов определяет слоговую артикуляцию.

Процент слоговой артикуляции удобно определять в зависимости от количества правильно понятых гласных V и согласных c звуков по номограмме, приводимой на л. XXXII, рис. 1. Если $V=0,97$ и $c=0,91$, то $Vc^2=80$, по

* Это примерно соответствует слоговой артикуляции, равной 80%.

номограмме этому значению $Vc^2=$ соответствует слоговая артикуляция $PA \approx 77\%$. Многочисленными опытами установлено, что хорошая разборчивость речи обеспечивается при 35% слоговой артикуляции, что соответствует 97%-ной артикуляции слов; удовлетворительная — при 75%-ной слоговой артикуляции (94% артикуляции слов) и неудовлетворительная при 65%-ной слоговой артикуляции (90% артикуляции слов).

Слоговая артикуляция в большой степени зависит от уровня громкости речи и времени реверберации помещения. В л. XXXII, рис. 2 приводится зависимость процента слоговой артикуляции от уровня силы звука речи.

Эта зависимость дается при нахождении слушателя на открытом пространстве (реверберация отсутствует) для двух случаев:

при полном отсутствии шума;

при уровне шума порядка 43 дБ*.

Кривые показывают, что артикуляция резко увеличивается с возрастанием уровня речи до 70 дБ; дальнейшее повышение уровня не повышает процента артикуляции. Другая кривая свидетельствует о большом влиянии на разборчивость шумового фона в помещении.

Другим фактором, оказывающим на слоговую артикуляцию большое влияние, является время реверберации помещения. Время реверберации может оказывать положительное и отрицательное действие. Повышение времени реверберации увеличивает уровень силы источника в помещении, а следовательно, улучшает разборчивость речи, особенно при низком уровне громкости голоса оратора (лектора). В л. XXXII, рис. 3 приводится зависимость между положительным действием реверберации и процентом артикуляции для помещений различного объема.

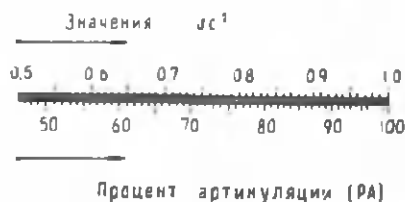
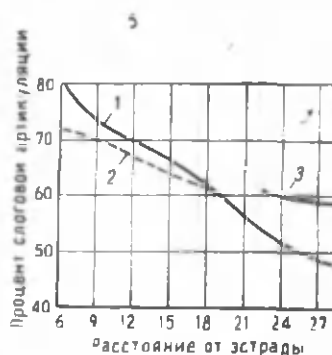
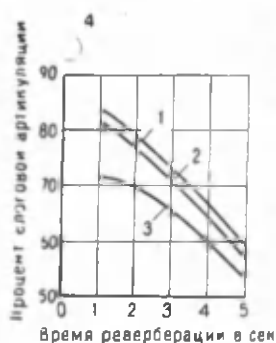
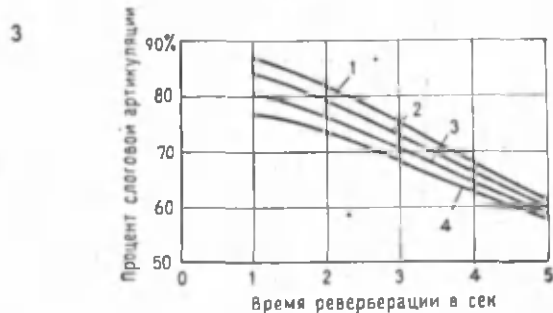
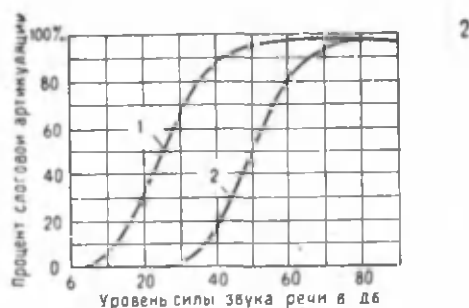
Эти данные являются достоверными для помещений, в которых отсутствуют такие недостатки как эхо, фокусирование и др., и при условии, что шумовой фон в помещении не превышает 30 дБ.

Кривые показывают максимально допустимое время реверберации для обеспечения удовлетворительной разборчивости речи (при слоговой артикуляции 75%).

Кривые свидетельствуют также о том, что слоговую артикуляцию 75%, обеспечивающую удовлетворительную разборчивость речи в аудиториях большого объема, практически невозможно обеспечить без звукового усиления речи.

Приведенные на л. XXXII, рис. 3 кривые

* Наиболее часто встречающийся уровень шума в помещениях общественного назначения.



построены для среднего оратора (лектора); естественно, что к ораторам (лекторам) со слабым голосом эти данные не подходят. На л. XXXII, рис. 4 приводится зависимость артикуляции от уровня голоса ораторов (лекторов), выступающих в аудитории объемом около 10 000 м³ при шумовом фоне 30 дБ и при времени реверберации на частоте 512 гц.

На л. XXXII, рис. 5 приводится зависи-

мость слоговой артикуляции от места расположения и удаленности слушателя от эстрады. Эти данные относятся к аудитории с временем реверберации 2,1 сек и к частоте колебания звука, равному 512 гц.

Практическая расчетная формула артикуляции имеет следующий вид:

$$PA = 0,96k_1k_2k_3k_4. \quad (II.27)$$

Л и с т Х Х Х И I I
А Р Т И К У Л Я Ц И Я Р Е Ч И

◀ **Рис. 1.** Номограмма для определения слоговой артикуляции в зависимости от количества правильно понятых гласных и согласных звуков

Рис. 2. Зависимость в % слоговой артикуляции от уровня силы звука

1 — в условиях тишины; 2 — при уровне шума 43 дБ

Рис. 3. Зависимость в % слоговой артикуляции от реверберации помещения при различном объеме помещения

1 — при объеме 1000 м³; 2 — при объеме 4000 м³; 3 — при объеме 16 000 м³; 4 — при объеме 32 000 м³

Рис. 4. Процент артикуляции при различных качествах голоса оратора

1 — оратор с громким голосом; 2 — с обычным голосом (профессор, читающий лекцию); 3 — оратор с негромким голосом

Рис. 5. Зависимость слоговой артикуляции от места расположения слушателя

1 — в центре помещения; 2 — в боковых зонах помещения; 3 — на балконе

где k_1 — коэффициент, учитывающий влияние на разборчивость уровня громкости звука;

k_2 — коэффициент, учитывающий влияние на разборчивость речи времени реверберации;

k_3 — коэффициент, учитывающий помехи вследствие шумового фона;

k_4 — коэффициент, учитывающий влияние на разборчивость формы помещения; численное значение k_4 в помещениях прямоугольной и секториальной формы равно единице; в больших поме-

щениях при наличии вогнутых поверхностей стен и потолка k_4 принимается равным 0,9; в малых помещениях при отделке их звукоотражающими облицовками значение k_4 принимается равным 1,06. Если теперь принять равным уровень громкости речи оратора 50 дБ, а уровень собственного шума в помещении 35 дБ, то для помещений с различным временем реверберации при обеспечении в них диффузного звукового поля значения коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 , а также процент артикуляции будут иметь значения, близкие к приведенным в табл. II.6.

Т а б л и ц а II.6
Значения коэффициентов k_1 , k_2 , k_3 , а также процента слоговой артикуляции

Время реверберации в сек	Значения коэффициентов			Процент артикуляции	
	k_1	k_2	k_3	при $k_4=1$	при $k_4=1,06$
1	0,95	0,96	0,83	72,5	77
1,5	0,95	0,94	0,83	71	75
2	0,95	0,9	0,83	68	72
2,5	0,95	0,86	0,83	65	69

АКУСТИКА ЗАЛОВ РАЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Архитектурное решение аудиторий, театров, концертных залов оказывает большое влияние на физические процессы отражения, поглощения и рассеивания звуковой энергии, которые определяют качество акустики помещения.

Высокое акустическое качество зрительных залов обеспечивается при выполнении следующих условий:

- 1) на всех местах зала должна быть обеспечена достаточная сила звука;
- 2) в помещении должно быть создано диффузное звуковое поле, исключаящее образование эха, фокусов и т. д.;
- 3) при заполнении зала зрителями время реверберации должно приближаться к оптимальному.

Выполнение этих условий обеспечивается архитектурными средствами: размерами, формой и отделкой помещений. Эти средства должны увязываться с назначением помещения, а в ряде случаев и с жанром выступлений и спектаклей.

Современная архитектура интерьеров в зрительных залах характеризуется разнообразием пространственных форм, большими размерами, отказом от ярусности, гладкими поверхностями и легкими ограждениями из новых строительных материалов.

Эти особенности архитектуры интерьеров вносят много нового в архитектурную акустику залов.

Акустическое качество зрительного зала нельзя оценивать исходя только из физических показателей; конечная оценка представляет результат субъективного ощущения. Решающая роль последнего особенно заметна в музыкальных помещениях.

Поэтому перед изложением основ проекти-

рования акустики залов целесообразно изложить психофизиологическую оценку их акустического качества.

Наиболее просто качество речевых передач в аудиториях и конференц-залах. Удовлетворительной считается акустика помещения, когда в нем без особого напряжения воспринимается каждое произнесенное оратором (лектором) слово, если, конечно, последний обладает хорошей дикцией.

Качество акустики в таких помещениях оценивается процентом артикуляции, т. е. выраженным в процентах количеством понятых слушателем слогов по отношению к произнесенным диктором.

Сложнее обстоит дело в музыкальных помещениях; при суждении о качестве музыкальных передач нельзя не считаться с субъективными представлениями о качестве воспринимаемого звука.

Поэтому при оценке качества звука в музыкальных помещениях пользуются следующими критериями:

1) естественностью (полнотой) звука, которая дает себя чувствовать при сопоставлении качества звучания концерта в помещении и на открытом воздухе;

2) ясностью звука, под которой понимается отчетливая последовательность чередования звуков, а также выразительность и постоянство их тембра.

Ясность звука находит свое выражение в том, что каждая группа инструментов в оркестре должна быть отчетливо различима слушателем без каких-либо потерь в восприятии звучания всего оркестра;

3) равновесие звучания всех групп инструментов оркестра, которое должно ощущаться на всех местах зрительного зала.

1. Акустика аудиторий и конференц-залов

Объективная оценка акустического качества аудиторий производится методом артикуляции (глава вторая). Этот метод исключает влияние таких факторов, как острота слуха слушателя, время слушания и др.

Для обеспечения удовлетворительной акустики аудиторий необходимо учитывать, что разборчивость речи в большой степени зависит от удаления слушателя от эстрады и от его расположения в помещении. Ухудшение разборчивости речи особенно заметно в боковых местах широких залов, а также в амфитеатрах, расположенных под балконами с большим выносом.

При проектировании аудиторий полезно для ориентировки пользоваться данными, приводимыми в табл. II.7 и примерами.

Таблица II.7

Характеристика некоторых аудиторий

Аудитории	Объем в м ³	Вместимость человек	Удельный объем в м ³ на 1 человека	Максимальное удаление от эстрады в м
Конференц-зал высотного дома на Смоленской площади	5000	520	9,5*	20
Лекционный зал в здании Высшей партийной школы	2400	435	5,5	19
Аудитория Московского государственного университета	3141	520	6	24
То же	1048	209	5	14
Лекционный зал Дворца культуры и науки (Варшава)	1800	400	4,5	17,5

* Завышенный удельный объем — признак неудовлетворительной акустики.

Наиболее интересными в акустическом отношении являются следующие аудитории.

Лекционная аудитория Московского государственного университета вместимостью 520 человек (л. XXXIII, рис. 1). Стены большой аудитории отделаны звукопоглощающими пензолитовыми плитами. Частотные характеристики плит толщиной 25 мм приводятся на л. XXXIII, рис. 2. Наклонный вогнутый потолок осуществлен из железобетонных оштукатуренных плит. Расчетная и измеренная частотная характеристика реверберации при 60% заполнении аудитории приводятся на л. XXXIII, рис. 3. Значительное расхождение между ними особенно в диапазоне низких ча-

стот объясняется неучтенным при расчете звуковым поглощением.

Исследования показали, что добавочное поглощение можно учитывать коэффициентом, равным 0,07 для частоты 125 гц и 0,04 для частоты 500—2000 гц.

Артикуляционные испытания показали, что средний процент разборчивости слов в аудитории составляет 75%, а вблизи кафедры 96%. Было также установлено, что в 12-м ряду амфитеатра разборчивость речи была неудовлетворительной; это объясняется зализыванием первых отражений от потолка. Недостатки акустики аудитории можно было бы устранить уменьшением высоты, отказом от вогнутости потолка и приданием ему большего наклона.

Лекционный зал Дворца культуры и науки в Варшаве предназначен для массовых лекций и бесед с показом кинодемонстраций. План и разрез зала приводятся на л. XXXIV, рис. 1. Для создания в зале равномерного звукового поля и уменьшения времени реверберации стены и потолок зала отделаны звукопоглощающими конструкциями, приведенными на л. XXXIV, рис. 2 и 3.

Сопоставление расчетного и измеренного времени реверберации приводится на л. XXXIV, рис. 4. Обращает внимание значительное расхождение между ними в области низких частот. Это свидетельствует о неучтенном звукопоглощении, вызываемом проникновением звуковых волн в щели и неплотности сопряжений между деревянными деталями и в паркетных полах.

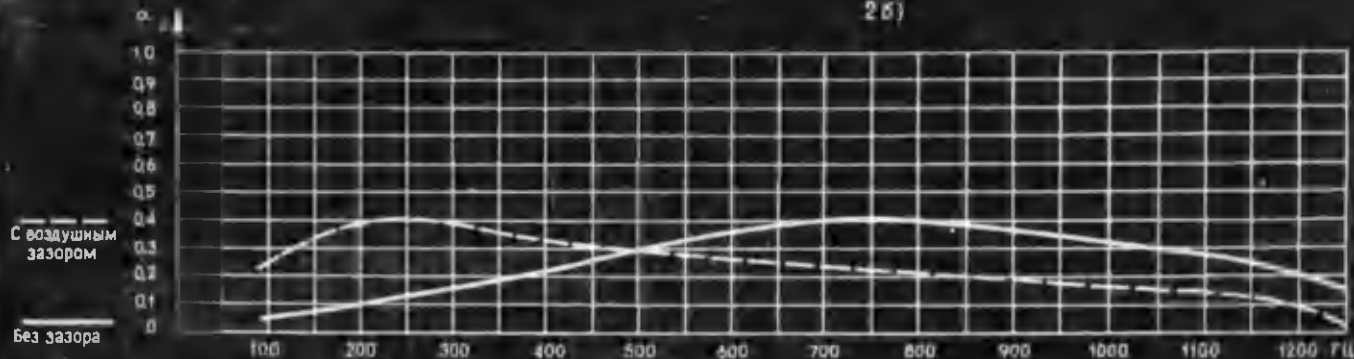
Хорошее акустическое качество аудитории — результат простой компактной формы и небольшого удельного объема аудитории.

На л. XXXIV, рис. 5 приводятся план *a* и поперечный разрез *b* обычной аудитории в Московском университете вместимостью на 150 человек. Обращает на себя внимание компактная форма и крутой уклон мест в аудитории, обеспечивающие хорошую видимость и слышимость на всех местах аудитории.

2. Акустика драматических театров

Акустика зрительных залов драматических театров характеризуется малой мощностью источника звука, которым служит голос человека, снижающийся в ряде случаев до шопота. Для обеспечения хорошей слышимости и разборчивости речи в этих условиях необходим небольшой удельный объем.

Геометрические характеристики зрительно-



го зала ЦТСА¹ резко отличаются от характеристики залов МХАТ и театра имени Вахтангова. Это обстоятельство в известной степени объясняет неудовлетворительную акустику

¹ Центрального театра Советской Армии в Москве.

зала, а также и видимость игровой площадки с боковых мест партера.

Удовлетворительное акустическое качество зрительного зала МХАТ (л. XXXV, рис. 1) в основном объясняется малым удельным объемом, а также широким использованием в от-

Лист XXXIII
АУДИТОРИИ И КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛЫ

Рис. 1. План (а) и продольный разрез (б) большой аудитории в Московском государственном университете

Рис. 2. Схемы крепления к стене пензольных плит а — схемы конструкции; б — частотные характеристики звукопоглощения: 1 — при креплении плит непосредственно к стене; 2 — при креплении плит по деревянному каркасу на расстоянии 50 мм от стены

Рис. 3. Сравнение расчетной и измеренной реверберации в помещении

делке зала деревянных панелей и звукоотражающей поверхности потолка.

Измеренная частотная характеристика реверберации в пустом зале и при заполнении на 100% приводится в табл. II.8.

Таблица II.8

**Частотные характеристики реверберации
зрительного зала МХАТ**

Время реверберации в сек	Полосы частот в гц				
	200—400	400—800	800—1600	1600—3200	3200—6400
А. Измеренное:					
а) в пустом зале	1,7	1,7	1,6	1,5	1,85
б) при заполнении зала на 100%	0,85	0,8	0,9	0,75	0,75
Б. Расчетное при заполнении на 70%	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Сопоставление измерительных показателей реверберации с расчетными позволяет видеть удовлетворительное их совпадение во всем диапазоне частот при заполнении зала.

Хорошая акустика зрительного зала театра имени Вахтангова объясняется его небольшим удельным объемом, формой и широким использованием в обделке деревянных панелей, звукорассеивающим действием лож, звукоотражающим потолком, а также деревянным круто поднимающимся полом, обеспечивающим хорошую видимость сцены. Большое внимание в этом зале уделено звукоизоляции зала от шума вентиляционной системы, работающей во время спектакля.

Форма зрительного зала, равно как и его отделка, должны способствовать наилучшему использованию первичных звуковых отражений для компенсации быстро убывающей с удалением от сцены прямой звуковой энергии. В этом отношении преимуществом обладают залы с расходящимися боковыми стенами, расположенными под углом не более 12° к плос-

кости портала. Положительная роль отраженных звуков особенно существенна в местах, расположенных под балконом (амфитеатр). Глубина амфитеатра не должна быть больше, чем удвоенная высота от пола до нижнего края балконного перекрытия.

Опыт показывает, что разборчивость речи в боковых местах зала зависит от соотношений;

а) ширины портала к ширине зала (в части, прилегающей к сцене);

б) площади зала к площади игровой части сцены.

Данные об этих соотношениях для некоторых театров приводятся в табл. II.9.

Таблица II.9

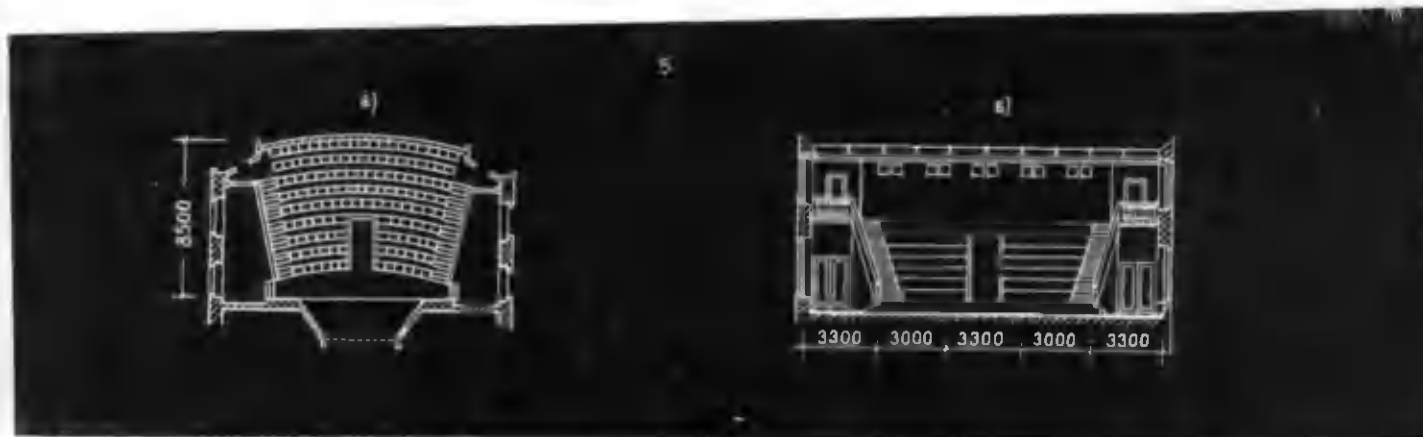
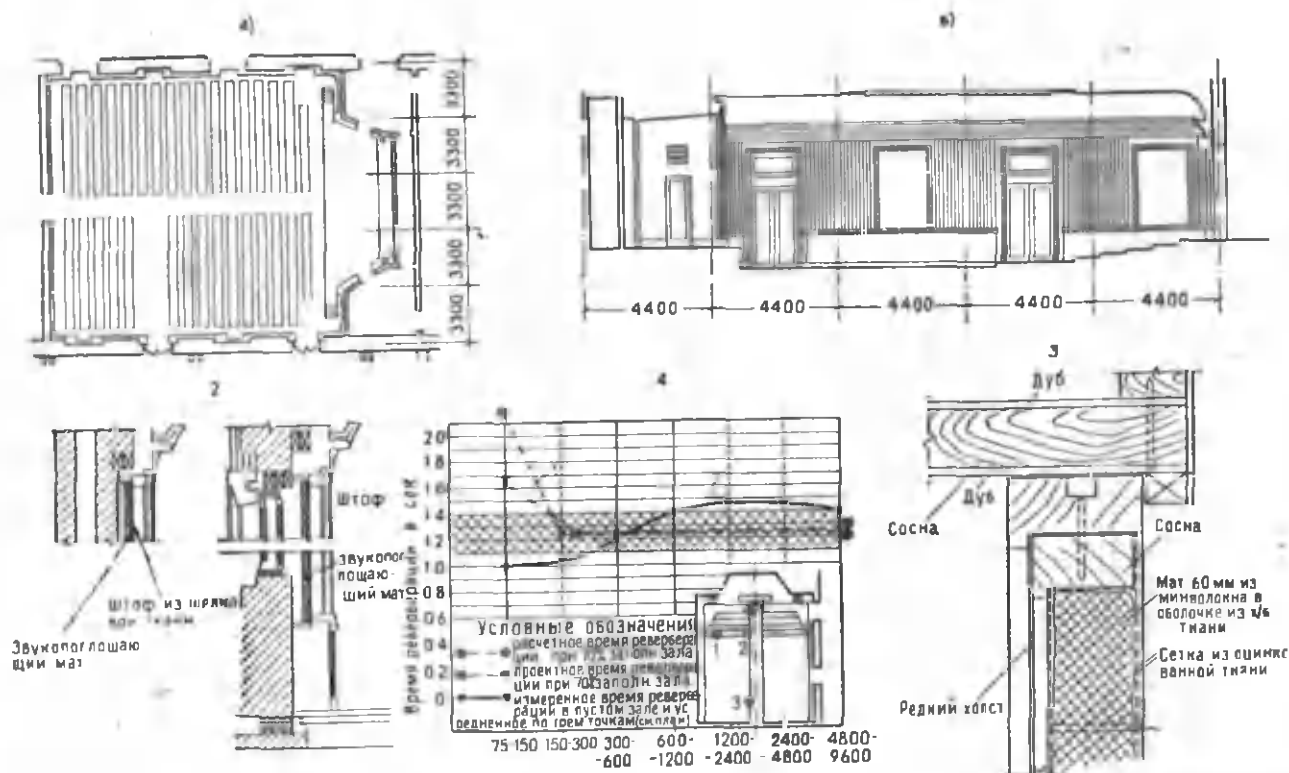
Характеристики некоторых драматических театров

Театры	Объем в м³	Вместимость человек	Удельный объем в м³ на 1 человека	Наименьшее удаление от сцены (по главной оси зала) в м	Отношение ширины портала сцены к ширине зала	Отношение площади зала к площади игровой части сцены
Московский художественный академический театр	4800	1160	4,2	23	0,85	3
Театр имени Вахтангова (Москва)	4600	1050	4	26	0,85	3
Центральный театр Советской Армии (ЦТСА) (Москва)	16500	1500	11	32	0,5	1,7
Драматический театр Дворца культуры и науки (Варшава)	3680	776	4,7	21	0,7	—
Театр имени Пушкина (Москва)	4400	950	4,6	—	—	—
Городской театр (Сочи)	9950	1160	9	—	—	—

Из таблицы видно, что зрительные залы, обладающие хорошей акустикой, имеют удельный объем в пределах 4—4,7 м³ на 1 человека; наоборот, театры с неудовлетворительной акустикой (к которым относятся ЦТСА в Москве и городской театр в Сочи) имеют завышенные объемы.

Важным показателем, обеспечивающим хорошую акустику зрительного зала и сцены, служит соотношение их объемов. Завышенные объемы сцены в театрах не только ухудшают слышимость и разборчивость речи в зале, но и весьма затрудняют работу актеров.

Зрительный зал драматического театра Дворца культуры и науки в Варшаве имеет в плане подковообразную форму. План и прс-



дольный разрез зала приводятся на л. XXXV, рис. 2. Зал характеризуется небольшим удельным объемом и компактной формой. Стены зала кирпичные, оштукатуренные; подвесной потолок решен в виде сетки Рабица. Отделка барьеров ярусов, а также пола деревянная.

Построение звуковых отражений (л. XXXV, рис. 3) свидетельствует о равномерном распределении отраженной от пола звуковой энергии.

Удовлетворительная акустика зала достиг-

нута малым удельным объемом зала, глубоким членением пространства ярусами, звукоотражающей поверхностью потолка, а также применением деревянных полов и барьеров. Сопоставление расчетной и измеренной характеристик реверберации зала (л. XXXV, рис. 4) свидетельствует о хорошем их совпадении.

Большую роль в акустике драматических театров удельного объема можно наблюдать на примере Центрального театра Советской Армии (л. XXXV, рис. 5). Завышенный объем

Удельный объем некоторых концертных залов

Зрительные залы	Объем в м ³	Вместимость человек	Удельный объем в м ³ на 1 человека
Большой зал Московской консерватории	17 000	2150	7,8
Концертный зал имени Чайковского в Москве	17 570	1560	11
Колонный зал Дома Союзов в Москве	12 500	1600	7,8
Концертный зал в Гельсингберге (Швеция)	7300	1000	7,3
Королевский концертный зал в Лондоне	23 000	3445	6,5

Рис. 1. Лектория во Дворце культуры и науки в Варшаве
а — план; б — продольный разрез

Рис. 2. Детали звукопоглощающей отделки внутренних поверхностей зала

Рис. 3. Деталь торцевой стены лектория

Рис. 4. Сравнение расчетного и измеренного времени реверберации при 70% заполнении зала

Рис. 5. Рядовая аудитория в Московском государственном университете
а — план; б — продольный разрез

зала, неправильно выбранное соотношение между объемами зала и сцены предопределили неудовлетворительную акустику зала. Исправить эту ошибку проектировщиков можно только при коренной его реконструкции.

Неудовлетворительная акустика городского театра в Сочи (л. XXXV, рис. 6) объясняется в основном завышенным объемом зала и выбранной его формой.

3. Акустика концертных залов

Высокие требования к качеству звучания в концертных залах обуславливают необходимость обеспечить хорошую звукоизоляцию зала от внешних шумов и вибраций, создаваемых транспортом, инженерным и санитарно-техническим оборудованием, а также посетителями (шорохи, шопот и т. д.).

Устранение шумовых помех в зале обеспечивается выбором места строительства, планировкой и архитектурно-конструктивным решением здания. Снижение уровня шума, создаваемого зрителями, обеспечивается звукопоглощающей одеждой пола и мягкими креслами.

Наряду с этой необходимой предпосылкой хорошая акустика концертных залов требует со стороны проектировщиков особого внимания к выбору объема, формы и отделочных материалов.

Удельный объем концертных залов не должен превышать 8 м³ на 1 человека. В табл. II.10 приводятся удельные объемы некоторых концертных залов.

Форма концертного зала должна способствовать созданию в нем равномерного диффузного звукового поля. Это облегчается при секторальной форме зала, а также при применении звукорассеивающего профиля и крупных членений стен и потолка выпуклыми криволинейными поверхностями и звукоотражающими экранами.

Если профиль потолка и стен в зоне, прилегающей к эстраде, решен акустически целесо-

образно, устройство специальных звукоотражающих экранов не является необходимым.

Профиль потолка надо выбирать с расчетом, чтобы часть отражений звуковой энергии направлялась на эстраду. Это необходимо для того, чтобы каждый музыкант мог следить за игрой остальных и согласовывать с ними свое собственное исполнение.

Обычно в больших концертных залах возникает необходимость в значительном звуковом поглощении. При этом возникает вопрос о целесообразном расположении звукоотражающих и звукопоглощающих материалов. Для равномерного распределения звуковой энергии в зале целесообразно потолок осуществлять звукоотражающим, а стены использовать для расположения на них звукопоглощающих материалов и конструкций. При этом в первую очередь целесообразно заглушать заднюю стену. В этом случае форма стены может иметь криволинейное очертание.

Повышение диффузности звукового поля может быть обеспечено также крупным членением поверхностей стен.

Членение поверхностей стен и потолка может осуществляться:

а) несущими конструкциями (например, кессонами, ребрами и т. д.); на л. XXX, рис. 11 приводится график для определения целесообразных форм с целью рассеивания звуковой энергии;

б) специальными акустическими элементами;

в) крупными архитектурными формами, создающими рассеяние звуковой энергии во всем диапазоне частот: к числу таких форм относятся ложи и т. п. Примеры такой отделки стен приводятся на л. XXXVI.

Лист XXXV
ДРАМАТИЧЕСКИЕ ТЕАТРЫ

- Рис. 1. План и продольный разрез Московского академического художественного театра
- Рис. 2. План и продольный разрез драматического театра в Дворце культуры и науки в Варшаве
- Рис. 3. Построение первичных отражений от потолка зала в драматическом театре в Дворце культуры и науки в Варшаве
- Рис. 4. Сравнение расчетной и измеренной частотных характеристик реверберации
1 — расчетная; 2 — измеренная
- Рис. 5. Схема плана и продольного разреза Центрального театра Советской Армии
- Рис. 6. Схема плана и продольного разреза Городского театра в г. Сочи

Форма зала с различным расположением мест в передней и задней половине зала выбрана с учетом благоприятных условий видимости эстрады. Задняя и боковые стены решены из деревянных панелей толщиной 42 мм. Дополнительно часть задней стены (под операторской) отделяется перфорированной фанерой. Пространство между фанерой и стеной заполнено мягкой тканью, которая или прилегает к фанере или находится от нее на некотором расстоянии. Участки боковых стен, прилегающих к потолку, обшиты перфорированной фанерой с проложенным позади нее слоем войлока.

Потолок осуществлен из штампованных древесно-волокнистых листов толщиной 15 мм.

Надежная изоляция зала от внешнего шума обеспечивается двойной конструкцией стен, а также массивными двойными деревянными дверями. Указанные меры снижают уровень шума в зрительном зале до 35 дБ, несмотря на то, что здание расположено у подножия холма, вблизи которого проходит электрифицированная железная дорога.

Измеренное время реверберации составило: в пустом зале—1,5 сек, при 100% заполнении—1,3 сек. Разница времени реверберации для высоких и низких частот составляла 0,1 сек.

Хорошими акустическими качествами славились Королевский зал для фестивальных выступлений в Лондоне. Вместимость зала—3445 человек. Генеральный план, план зала и разрез его приводятся на л. XXXVI, рис. 2, а, б, в. Размеры зала: длина 52 м, ширина 24—30 м, высота 20—12 м. Объем зала около 23 000 м³; удельный объем около 6,5 м³ на 1 человека.

Строгое назначение этого зала определило стремление проектировщиков обеспечить хорошую акустику на всех местах зала, не прибегая к искусственным приемам звукоусиления.

Поставленная задача была успешно решена совокупностью следующих мер:

небольшим удельным объемом зала;

созданием равномерного диффузного звукового поля в зале; это достигается применением звукоотражательного экрана над эстрадой, глубоким пластическим решением потолка, выполненного из профилированных звуко-рассеивающих плит, выступающих из плоскости боковых стен ложами (л. XXXVI, рис. 3);

крутым уклоном пола, обеспечивающим беспрепятственную видимость эстрады со всех мест зала;

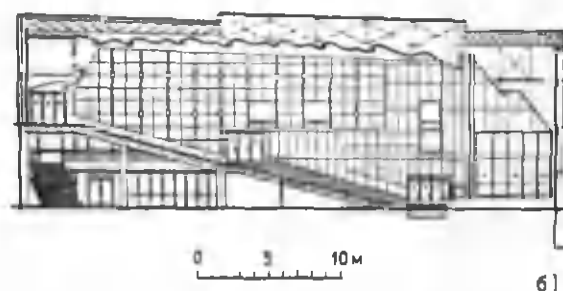
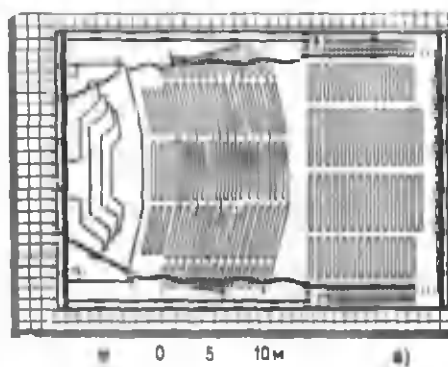
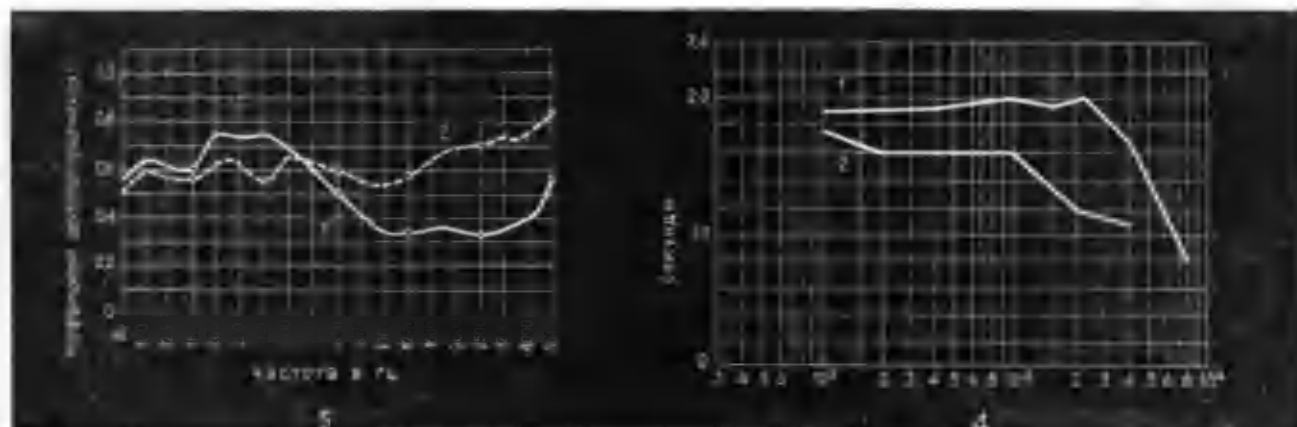
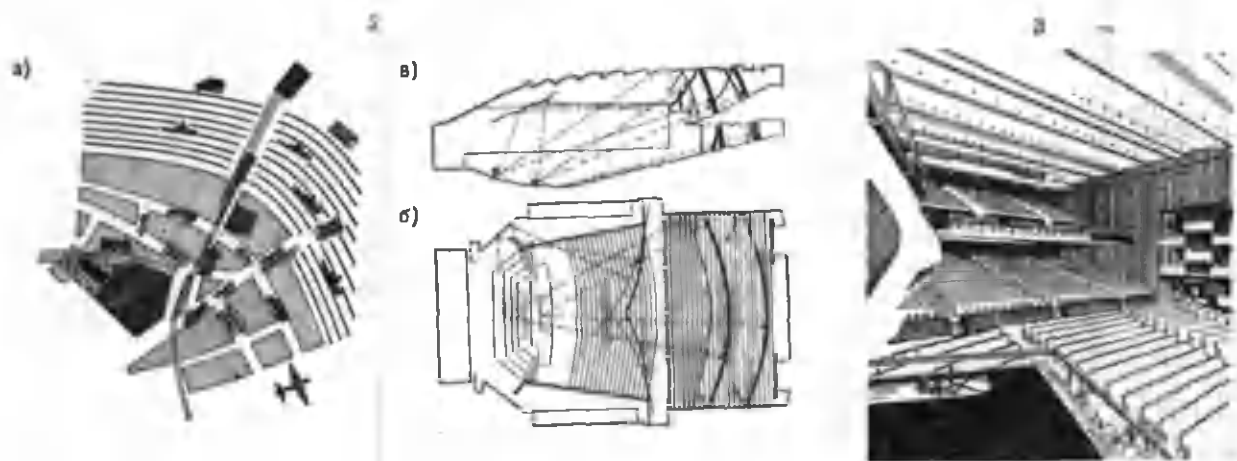
ступенчато расположенным полом эстрады, обеспечивающим свободное распределение в зале звуков различных инструментов оркестра.

Высокое качество звучания в этом зале обеспечивается также формой зала, звукопоглощающей отделкой и ее расположением в зале. Широко использованы для отделки боковых стен резонирующие деревянные панели, которые являются хорошим поглотителем звуков низкой частоты. Задняя стена зала отделана искусственной кожей, за которой располагается пористый поглотитель; такие поглотители обладают высоким избирательным поглощением в области средних частот. Поглощение высокочастотных составляющих звукового спектра обеспечивается воздухом помещения, пористыми поглотителями в виде цветных «одеял», навешенных на заднюю стенку лож, а также мягкой мебелью и коврами, устилающими пол помещения.

Большое внимание уделялось защите зрительного зала от внешнего шума и вибраций.

Здание расположено в очень шумной части города и подвергается интенсивному воздействию шума автомагистралей, теплоходов, электрической железной дороги и др. Эти затруднения были успешно преодолены расположением вокруг зрительного зала вспомогательных помещений, изоляцией конструкций зрительного зала от вибрации при помощи амортизаторов, а также специальными конструкциями стен и окон, обеспечивающих надежную защиту зала как от внешних шумов, так и от вибраций. Зал представлял висящее в воздухе «яйцо», изолированное упругими амортизаторами от остальных конструкций здания.

При полном заполнении измеренное время реверберации в зале составляет на средних частотах 1,5 сек (л. XXXVI, рис. 4). На л. XXXVI, рис. 5 приводится частотная характеристика звукового поглощения в зале.



4. Залы универсального назначения

Залы универсального назначения рассчитываются обычно на вместимость в несколько тысяч человек. Большие размеры таких залов, как показывает опыт, требуют искусственного усиления звука с помощью электроакустических систем. В этих случаях распределение

звуковой энергии в помещении и уровни звукового давления в разных местах зала зависят не только от его акустических свойств, но и от расположения, направленности и мощности системы звукоусиления.

При больших размерах таких залов весьма возрастает среднее время свободного пробега звука между двумя последовательными отра-

Лист XXXVI
КОНЦЕРТНЫЕ ЗАЛЫ

Рис. 1. Концертный зал в Канагове (Япония)

а — план; б — продольный разрез

Рис. 2. Концертный зал Фестивал-холл в Лондоне

а — генеральный план участка, на котором расположено здание; б — схема плана зрительного зала с нанесенными кривыми равной артикуляции; в — то же, продольный разрез зала

Рис. 3. Фрагмент зрительного зала. Видны: ложи, выступающие из плоскости стены, падуго потолка, круто поднимающийся амфитеатр мест

Рис. 4. Измеренное время реверберации в зале

1 — в пустом зале; 2 — при заполнении зала на 70% публикой

Рис. 5. Измеренное звуковое поглощение в зале

1 — в пустом зале; 2 — при заполнении зала на 70% слушателями

жениями. При этом первичные отражения звука с относительно высокими уровнями звукового давления могут приходить к зрителю с значительным запазданием, образуя эхо. В этих условиях качество восприятия речи и музыки определяется не временем реверберации, а структурой первичных отражений, их временем запаздывания и уровнем силы.

В больших залах универсального назначения усредненный оптимум реверберации не может служить критерием оценки акустического качества зала; оптимум реверберации и ее частотная характеристика в таких залах существенно изменяются как для речи, так и при исполнении музыкальных произведений различного характера (оперная, симфоническая или джазовая музыка и др.).

Поэтому при разработке проекта акустики залов универсального назначения необходимо выполнять следующие условия:

форма и акустическая отделка зала должны допускать возможность скрытого от зрителей расположения систем звукоусиления в местах, способствующих созданию в зале равномерного звукового поля;

для нормальной работы системы звукоусиления необходимо обеспечить в зале равномерное диффузное звуковое поле и достаточную заглушенность помещения применением отделки с высоким коэффициентом и равномерной частотной характеристикой звукопоглощения;

выбранные формы зала и расположение звукопоглощающих и звукоотражающих конструкций целесообразно проверять на моделях для оценки времени запаздывания и уровней звукового давления в разных местах зрительного зала и в зоне расположения микрофонов.

Решающее значение в таких залах приобретает выбор звукопоглощающей отделки, оцениваемой средним коэффициентом звукопоглощения. Подбор количества звукового поглощения производят исходя из оптимальных

условий восприятия речи. Однако в этом случае зал окажется чрезмерно заглушенным для восприятия музыки. Этот недостаток акустики устраняется применением электроакустических систем, позволяющих управлять акустическими процессами в зале. Такие системы называются амбиофоническими. Они дают возможность увеличивать продолжительность реверберации, управлять частотной характеристикой реверберации, изменять степень диффузности звукового поля с учетом особенностей исполняемых в зале программ.

Для усиления эффекта восприятия целесообразно скрывать от зрителей звукоусилительные системы.

Интересным примером архитектурного и акустического решения зала универсального назначения является Дворец съездов в Москве. Зрительный зал Дворца вмещает 6000 человек. Его объем составляет около 52 000 м³; таким образом, удельный объем составляет около 8,5 м³ на 1 человека.

Общий вид плана зала приводится в главе седьмой первого раздела (л. XXI). Прилегающая к сцене часть боковых стен скошена под углом 30°. Задняя часть имеет криволинейное очертание с радиусом кривизны 100 м. Нижняя часть боковых стен отделана искусственной кожей, натянутой по деревянному каркасу. Эта звукопоглощающая конструкция обладает высоким избирательным звукопоглощением. Основная часть боковых стен решена в виде щелевого поглотителя из вертикально расположенных деревянных реек криволинейного профиля. За рейками расположена металлическая сетка, а за ней слой пористого поглотителя (капроновое волокно).

Для акустической настройки зала звукопоглощающая конструкция стен решена в виде створных кассет. Это сделано для того, чтобы иметь возможность прикрыть пористый поглотитель листом фанеры, что значительно уменьшает звукопоглощающий эффект конструкции.

Превращая таким образом звукопоглощающие кассеты в звукоотражающие, можно регулировать количество звукового поглощения в зале.

Примыкающая к сцене часть потолка решена в виде наклонной под углом 26° к горизонту профилированной поверхности, в которую вмонтированы осветительные приборы. Часть скошенной части потолка шириной 6 м (считая от портала) представляет звукоотражающую поверхность; остальная часть скошенного потолка сделана перфорированной; на ней располагаются громкоговорители системы звукоусиления.

ЗАЛ КОНГРЕССОВ ДВОРЦА КУЛЬТУРЫ И НАУКИ
В ВАРШАВЕ

Рис. 1. Зал конгрессов

а — фрагмент зала; б — план; в — продольный разрез; виден звукоотражательный экран над эстрадой

Рис. 2. Частотная характеристика реверберации

1 — расчетное время реверберации в пустом зале; 2 — то же, при 70% заполнения зала; 3 — измеренное время реверберации в пустом зале; 4 — то же, при 70% заполнения зала, подсчитанное на основе кривой 3. Заштриховано — заданное при проектировании время реверберации зала

Основная часть потолка зрительного зала решена в виде 18 вогнутых падугов из перфорированных алюминиевых листов. Диаметр и шаг перфорации листов, равно как и слой пористого материала (асбестовое волокно толщиной 10 см), выбраны на основе расчета. Воздушная прослойка между пористым материалом и перекрытием используется для коррекции частотной характеристики в диапазоне низких частот.

Акустическое обследование зала позволило определить действительное время реверберации в пустом зале и при заполнении его публикой (около 6000 человек). Сопоставление измеренных в этих условиях показателей реверберации показывает, что разница во времени реверберации составляет не более 0,3 сек.

Различная работа звукоусилительных систем при усилении речи и музыки потребовала двух способов усиления: один для речи, другой для музыки.

Усиление речи осуществляется системой маломощных и малогабаритных громкоговорителей, вмонтированных в спинки кресел; эта распределительная система звукоусиления, характеризующаяся большой плотностью расположения излучателей, обеспечивает хорошую разборчивость речи на всех местах зала.

Усиление музыкальных программ осуществляется многоканальной стереофонической системой с громкоговорителями, расположенными в скошенной части потолка. Опыт показал, что высокое расположение громкоговорителей не нарушает требований зрительного и слухового восприятия.

Работой стереофонической системы управляет звукорежиссер, который располагает возможностью микширования и частотной коррекции звуковых сигналов.

Дополнительно к стереофонической системе во время концертных и оперных выступлений в зале используется амбиофоническая распределительная система звукоусиления, которая улучшает качество звука и степень однородности звукового поля в разных местах зала. Распределенные в зале многочисленные гром-

коговорители подключаются к тому или иному усилительному каналу для того, чтобы по мере удаления от сцены увеличивать количество громкоговорителей, питаемых от канала с большой задержкой начала процесса реверберации.

Громкоговорители амбиофонической системы расположены в верхней части боковых стен, на задних стенах балкона, амфитеатра, а также на потолке зала.

Оперативное управление режимом работы амбиофонической системы осуществляется с пульта в зале, который позволяет изменять в достаточно широких пределах время искусственной реверберации и регулировать уровень амбиофонических сигналов.

Другим примером универсального зала с хорошими акустическими качествами может служить зал конгрессов Дворца культуры и науки в Варшаве. Величественное здание Дворца, как известно, было сооружено силами и средствами СССР.

Зал конгрессов ДКН является одним из крупнейших в Европе и предназначен для проведения конгрессов и съездов, а также для концертных выступлений оркестров, ансамблей песни и танца и др.

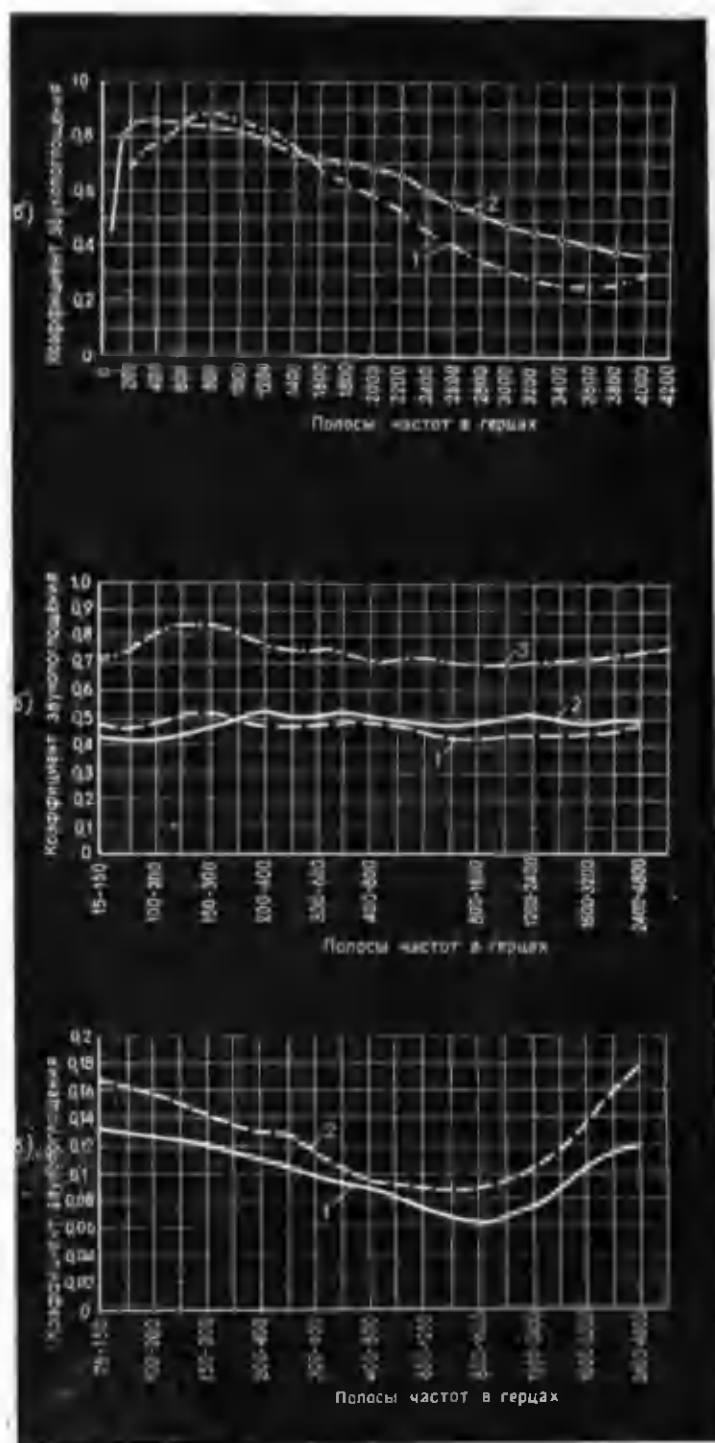
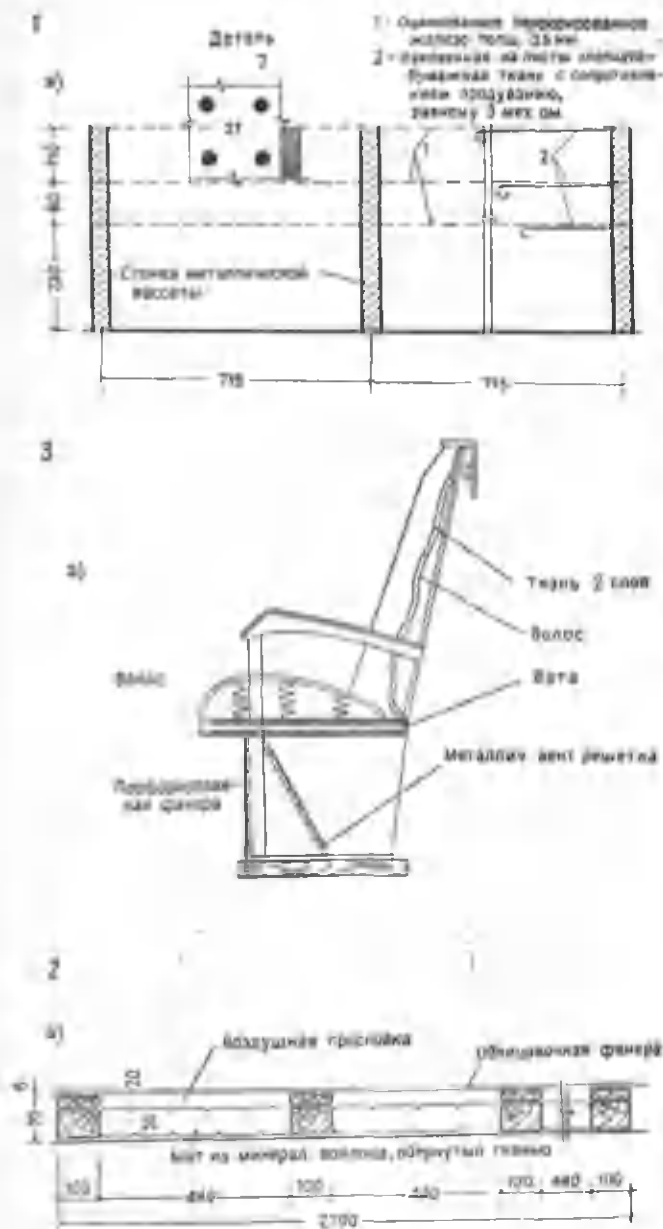
Общий вид, план и разрез зала приводятся на л. XXXVII, рис. 1 а, б, в. Вместимость зала — 3500 человек; объем — 27 650 м³; удельный объем 8 м³ на 1 человека. Размеры зала: длина 54,8, ширина 48,6, высота наибольшая 18,6 м.

Акустическое проектирование зала было связано с преодолением больших трудностей не только вследствие универсального его назначения, но и выбранной классической формы зала.

Особенно неблагоприятной в акустическом отношении являлась задняя стена зала полукруглой формы с радиусом 24,3 м, представляющая вогнутое зеркало, способствующее концентрации отраженных от нее звуков в определенных местах амфитеатра.

Для устранения этого дефекта в задней стене, а также в параллельных участках боковых стен были предусмотрены ниши больших размеров. Акустическая роль этих ниш рассеивать отраженные звуки и снижать их интенсивность за счет поглощения. Звукопоглощающая конструкция ниш решена в виде трех слоев перфорированных оцинкованных кровельных листов с наклеенной редкой тканью.

Частое расположение по периметру зала колонн (шаг 3,3 м), их большое сечение (диаметр 0,8 м), а также балкон с развитым карнизом в свою очередь способствуют рассеива-



нию отраженных от задней и боковых стен звуков.

Центральная часть потолка зала осуществлена в виде уплощенного купола; такое решение было связано с опасностью образования эха на местах амфитеатра. Для устранения

этого грубого акустического недостатка поверхность потолка была расчленена на отдельные зоны, перепад между которыми использован для карнизного освещения. Профиль поверхности каждой зоны выбирался на основе графического построения звуковых простран-

Рис. 1. Схема звукопоглощающей конструкции
 а — трехслойной резонансного типа; б — частотная характеристика звукового поглощения; 1 — расчетная; 2 — экспериментальная

Рис. 2

а — конструктивная схема колебательной деревянной панели; б — частотная характеристика звукового поглощения; 1 — щиты из панелей расположены на полу камеры реверберации; 2 — щиты на откосе 35 мм от пола камеры

Рис. 3

а — схема кресла; б — ее частотная характеристика поглощения; 1 — 10 пустых кресел; сиденья опущены; 2 — то же, сиденья подняты; 3 — то же, сиденья с зрителями

ственных отражений, обеспечивающих равномерное распределение отраженных звуков в зале (л. XXXVII, рис. 1, в).

Этой же цели служит и профилированный подвесной звукоотражательный экран, осуществленный из торкрет-бетона.

В результате предусмотренных мер для любого места зала было обеспечено запаздывание прихода отраженных звуков по сравнению с прямым звуком менее чем на 50 миллсекунд.

Хорошей акустике зала способствовал значительный подъем мест в амфитеатре, обеспечивающий свободный доступ прямых звуков и беспрепятственную видимость источника звука.

На л. XXXVII, рис. 2 приводится сопоставление расчетного и измеренного времени реверберации зала. Значительное расхождение между ними в диапазоне низких частот свидетельствует о неучтенном звуковом поглощении неплотностями и щелями (в конструкции пола, в местах доступа к осветительным приборам и т. д.).

В зале предусмотрены звукоусилительные установки в виде распределенной системы громкоговорителей (вделанных в спинки кресел) и центральной трехканальной стереофонической системы для усиления концертных выступлений и установки для перевода речи на пять звуков. Для нормальной работы систем звукоусиления в процессе проектирования была обусловлена необходимость обеспечить в

зале оптимальное время реверберации 1,2—1,4 сек (при 70% заполнении зала).

Реализация этих требований потребовала весьма большого количества звукопоглощения. Это могло быть обеспечено применением высокоэффективных трехслойных поглотителей резонансного типа. Каждый слой этой конструкции представляет лист перфорированной оцинкованной кровельной стали с наклеенной изнутри редкой тканью. Диаметр и шаг перфорации листов выбирались с расчетом создать высокий коэффициент звукопоглощения конструкции в диапазоне низких и средних частот, поскольку поглощение звуков высокой частоты обеспечивалось воздухом помещения.

Трехслойные конструкции изготовлялись в виде кассет; общая толщина поглотителя составляла от 420 до 820 мм. Коэффициент звукопоглощения составлял не менее 0,8 на низких частотах, снижаясь начиная с частоты 1000 гц до 0,3 на частотах порядка 4000 гц (л. XXXVIII, рис. 1, б).

Дополнительно нижняя часть стен зала отделана колебательными панелями из 8-мм фанеры по деревянному каркасу. За фанерой располагалась воздушная прослойка толщиной 60 мм и мат из минерального войлока толщиной 50 мм. Коэффициент звукопоглощения фанерных панелей на полосе частот 75—150 гц 0,13—0,17 (л. XXXVIII, рис. 2).

Для того чтобы качество акустики зала не изменялось при различной степени заполнения зала, мягкие кресла были отделаны бархатом с толстой набивкой конским волосом и ватой. Откидные сиденья кресел снизу, равно как и стенка кресла под сиденьем, имели перфорацию для улучшения звукопоглощения. Испытания в реверберационной камере показали, что звукопоглощение кресел с сидящими зрителями и пустых (с откинутым и опущенным сиденьем) отличается примерно на 20% (л. XXXVIII, рис. 3).

Подступеньки амфитеатра осуществлены также перфорированными листами; позади перфорированных листов располагался мат из минерального войлока.

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

1. Пористые материалы

Для создания в помещениях оптимального времени реверберации необходимо прибегать к дополнительному звуковому поглощению. Полное звуковое поглощение в помещениях суммируется из постоянного и переменного. Постоянное поглощение создается отделкой интерьера, переменное — людьми и креслами.

Для постоянного звукового поглощения используются материалы и конструкции, обладающие различной способностью поглощать звуки разной частоты.

В практике не существует универсальных звукопоглощающих материалов и конструкций. Поэтому в каждом случае необходимо выбирать материалы и конструкции с надлежащими характеристиками звукопоглощения. Однако при этом надо учитывать и другие свойства выбираемых звукопоглотителей (сгораемость, влагоемкость, стоимость и т. д.).

Для поглощения звука применяются: пористые материалы, резонирующие колебательные панели, конструкции с перфорированным слоем.

Коэффициент звукового поглощения пористых материалов зависит в первую очередь от характера его пористости.

Звук поглощается вследствие превращения звуковой энергии в другие формы энергии и в конечном счете в тепловую. При падении звуковой волны на пористый материал, заключенный в его порах, воздух приходит в колебание. При этом часть звуковой энергии превращается в тепло вследствие сопротивления трению и вязкости воздуха и колебанию стенок между порами, часть проходит сквозь слой материала. Степень поглощения звука зави-

сит от сопротивления пор постоянному потоку воздуха в порах материала. Если материал является достаточно пористым, то при соответствующей его толщине возможно обеспечить до 95% поглощения падающей на него звуковой энергии.

Пористые акустические материалы состоят из сквозных капилляров; стенки между ними образуют твердый или упругий скелет. Поглощение звуковой энергии пористыми материалами обусловлено внутренним трением при деформациях скелета, вязким трением при движении воздуха в капиллярах, а также теплообменом между воздухом в капиллярах и скелетом.

Пористость материала характеризуется отношением воздушного объема пор к полному объему пористого материала. Потери, вызываемые вязкостью воздуха, оцениваются сопротивлением продуванию через материал постоянного потока воздуха r .

Величина сопротивления зависит от разности давлений по одну и другую сторону продуваемого образца Δp , скорости потока воздуха v и толщины образца δ , т. е.

$$r = \frac{\Delta p}{v \delta}.$$

Если Δp измерять в дин/см^2 , v — в см/сек , а δ — в см , то r измеряется в $\text{дин/см}^4 = \text{рэл/см}$. Сопротивление продуванию различных пористых материалов колеблется в очень широких пределах (табл. II.10а). Полное сопротивление продуванию материала (r_1) относится ко всей толщине поглотителя; оно определяется соотношением $r_1 = \frac{\Delta p}{v}$. Следовательно, $r_1 = r \delta$.

Таблица II.10а
Сопротивление продуванию пористых материалов
и тканей

Наименование материалов	Удельное сопротивление продуванию r в рэл/см	Полное сопротивление продуванию r_1 в рэл/см
Маты из минерального и стеклянного волокна	10—300	—
Войлок	15—90	—
Древесно-волокнистые плиты объемным весом 200—250 кг/м^3	3500—26 000	—
Пористая звукопоглощающая штукатурка	8—60	—
Обычная штукатурка	8000—33 000	—
Бязь редкая	—	3
Ситец редкий	—	5—6
Стеклянная ткань разных сортов	—	3—100

Физически процесс поглощения звука в пористых материалах удобно проследить на схеме, приведенной на л. XXXIX, рис. 1. На поверхность пористого материала падает волна 1, обладающая плотностью звуковой энергии E_i . Часть этой волны отражается от материала, часть же проникает в его поры. По мере своего продвижения в толщу материала звуковая волна теряет энергию, затраченную на преодоление сопротивления трения и вязкости воздуха и колебания стенок между порами. После отражения от твердой стенки 4 волна, изменив направление на обратное, претерпевает дальнейшее затухание. Практически полное затухание звуковой волны наступит, когда при однократном движении к жесткой стенке и в обратном направлении амплитуда колебания волны уменьшится примерно на 95%.

Отношение плотности энергии звуковой волны 3 E_a к плотности падающей волны E представляет коэффициент звукового поглощения α , т. е.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (\text{II.28})$$

Затрачиваемая в пористом материале энергия звуковой волны 3 увеличивается с повышением пористости материала и уменьшается по мере увеличения сопротивления постоянному потоку, относимому к единице толщины материала.

Затрачиваемая в порах материала энергия звуковой волны зависит от пористости материала и от сопротивления постоянному пото-

ку, относимому обычно к 1 см толщины поглотителя. В практике нередко имеют место случаи, когда звуковая волна 3 недостаточно затухает в толще поглотителя вследствие несогласованности сопротивлений пористого материала и свободного звукового поля; в этих случаях часть энергии отражается материалом в окружающее воздушное пространство, дополняя звуковую волну 2.

Коэффициент поглощения (α) и отражения звука (β) связаны друг с другом соотношением $\alpha = 1 - \beta$.

Коэффициент поглощения звука зависит от частоты колебания падающей звуковой волны и от угла, под которым она падает на поверхность материала. Важное значение имеет диффузный коэффициент звукового поглощения, который получается усреднением значений α по разным углам падения звуковых волн. Усредненное значение α обычно определяется при измерении образцов поглотителя звука в камере реверберации. Измеренный в камере коэффициент поглощения отождествляется с диффузным коэффициентом поглощения.

Для того чтобы избежать излишних затрат при устройстве звукопоглощающей отделки, архитектору важно определить толщину поглотителя δ , обеспечивающую полное поглощение звуковой энергии пористым материалом.

Практика показала, что экономически целесообразная толщина пористого поглотителя звука должна быть не менее значения, определяемого по формуле

$$\delta = \frac{800}{\sqrt{r\alpha f}} \quad (\text{II.29})$$

где δ — толщина слоя поглотителя в см;
 r — сопротивление продуванию в рэл/см ;
 α — пористость поглотителя, равная 0,6—1;
 f — частота в гц .

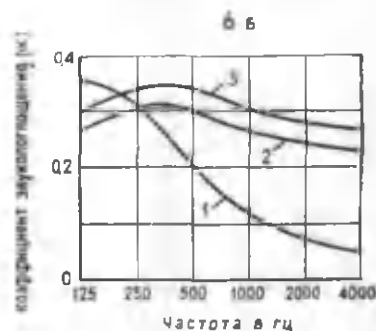
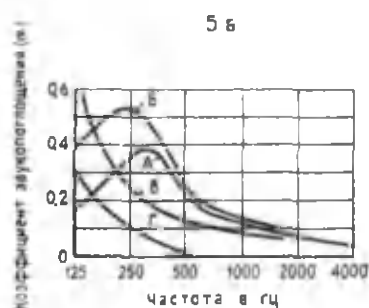
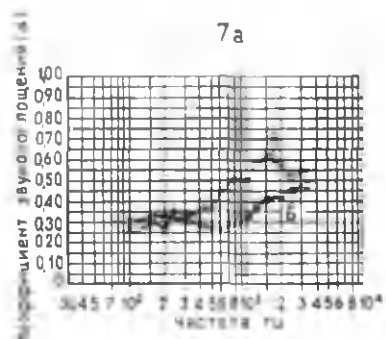
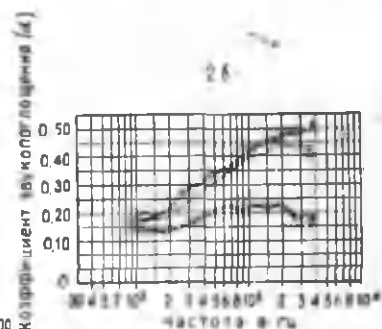
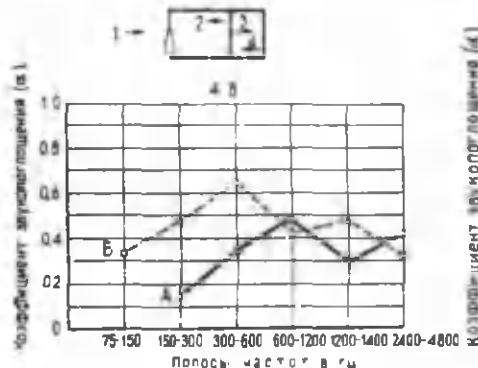
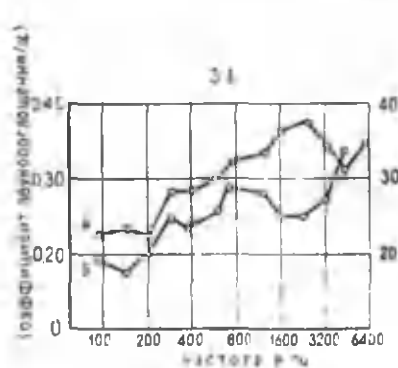
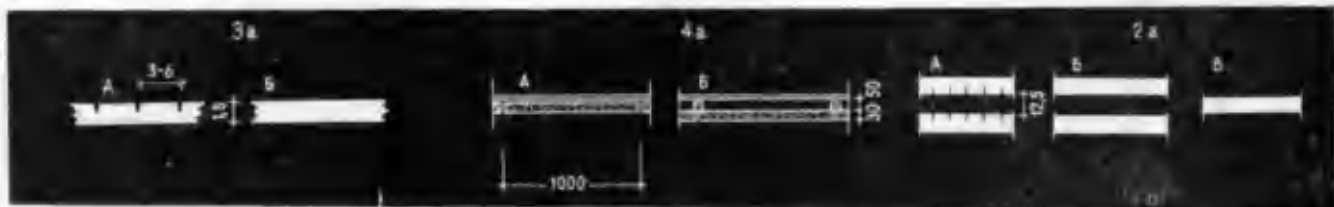
Практически нижняя, интересующая проектировщика частота равна 100 гц ; при среднем значении пористости $\alpha = 0,8$ необходимая толщина поглотителя определяется по формуле

$$\delta = \frac{90}{\sqrt{r}} \quad (\text{II.30})$$

Если слой пористого поглотителя расположен на жесткой, отражающей звуки поверхности, то наибольшего значения коэффициент звукового поглощения достигает при условии, что

$$80 < r\delta < 160 \text{ рэл},$$

где r — удельное сопротивление продуванию воздуха (при толщине пористого материала, равной 1 см).



При воздушной прослойке между пористым материалом и жестким отражающим слоем наибольший коэффициент звукового поглощения достигается при условии, что

$$40 < r_1 < 80 \text{ рэл.}$$

Вычисленная по этой формуле достаточная толщина некоторых пористых материалов приводится в табл. II.11.

Применяемые в строительстве материалы обладают различной способностью поглощать звуки разной частоты. Поэтому звукопоглощающие свойства материалов принято оценивать частотной характеристикой звукопоглощения, которая показывает зависимость коэффициента поглощения от частоты звука.

звукопоглощающие материалы и конструкции

Рис. 1. Схема, объясняющая процесс поглощения звука пористыми материалами

1 — падающая на пористый материал звуковая волна; 2 — отраженная от поверхности пористого материала звуковая волна; 3 — проходящая в толщу пористого материала звуковая волна; 4 — отраженная от твердой стенки звуковая волна

Рис. 2. Схемы (а) и частотные характеристики (б) панелей из древесно-волоконистых плит

А — перфорированные плиты; Б — сплошные плиты; В — однаочная плита

Рис. 3. Схемы (а) и частотные характеристики (б) звукопоглощения древесно-волоконистой плиты объемным весом 200—250 кг/м³

А — перфорированной; Б — сплошной

Рис. 4. Частотные характеристики перфорированных древесно-волоконистых плит объемным весом 200 кг/м³

А — плита крепится непосредственно к ограждению; Б — плита располагается на отnose от ограждения и крепится по деревянному каркасу

Рис. 5а. Конструктивная схема резонирующей панели
1 — тонкий лист (фанера и др.); 2 — воздушная прослойка;
3 — демпфирующая прокладка по периметру панели; 4 — деревянные брусья; 5 — шайбы в углах панели

Рис. 5б. Частотные характеристики звукопоглощения
А — панель из 3-мм фанеры с воздушной прослойкой; Б — панель из 3-мм фанеры, по периметру проложена слой стеклянной ваты;
В — панель из 6-мм фанеры с воздушной прослойкой толщиной 10 мм; по периметру проложена демпфирующая прокладка;
Г — оконное стекло

Рис. 6а. Конструктивная схема полуцилиндрической резонирующей панели

1 — фанера уложена по кружалам; 2 — деревянные бруски; 3 — воздушная прослойка

Рис. 6б. Частотные характеристики звукопоглощения полуцилиндрическими резонирующими панелями

1 — при размерах панели $l = 113$ см; $h = 40$ см; 2 — при $l = 90$ см; $h = 35$ см; 3 — при $l = 70$ см; $h = 32$ см

Рис. 7. Частотные характеристики звукопоглощения
А — при отделке пористого ограждения с двух сторон древесно-волоконистыми плитами на отnose; Б — при отсутствии отделки древесно-волоконистыми плитами

Таблица II.11

Толщина пористых материалов, обеспечивающая полное звуковое поглощение

Материал	Достаточная толщина материала в см
Сырье хлопка	До 40
Вата	79
Войлок шерстяной	18
Минеральное волокно	9
Пробковая плита	7,5
Штукатурка сухая	3,5
Бумажный картон	2
Древесно-волоконистая плита (объемный вес 200—250 кг/м³)	0,75
Гипсовая пористая плита	0,6

Степень затухания звуковых волн в порах материалов зависит от отношения толщины материала δ к длине волны λ ; поэтому коэффициент звукового поглощения пористых материалов резко уменьшается при звуках низкой частоты.

Из сказанного следует, что пористые погло-

тители целесообразно применять в случаях, когда необходимо обеспечить поглощение высокочастотных звуков.

Для повышения коэффициента поглощения в диапазоне низких частот плиты из пористых материалов следует располагать на отnose от плотных ограждений.

Пористые материалы изготавливаются в виде жестких плит, которые крепятся или непосредственно к ограждению или к каркасу на некотором расстоянии от поверхности ограждения (5—10 см).

К числу жестких плит относятся плиты типа «пемзолит», а также из пеностекла со сквозной пористостью. К этой же группе пористых материалов относится акустическая штукатурка. Пемзолит изготавливается из пемзовой, каолиновой, кирпичной крошки, связанной цементным раствором. При применении белой каолиновой крошки, связанной белым цементом, получают отделочные плиты толщиной 30 мм более высокого качества. Крепление пемзолитовых плит по деревянному каркасу на отnose 50—100 мм от стены (или перекрытия) повышает коэффициент звукового поглощения на низких частотах. Плиты изготавливают с различной фактурой лицевой поверхности (ноздреватой, рифленой и др.). Объемный вес плит 1000—1200 кг/м³.

Частотные характеристики звукопоглощения пемзолитовых плит при разных способах их крепления к ограждению приводятся на л. XXXIII, рис. 2.

Пористые плиты с упругим скелетом изготавливаются из древесного волокна, асбеста, минерального и стеклянного волокна и др.

Древесно-волоконистые плиты изготавливаются из древесной массы; обладают высоким сопротивлением продуванию; их достоинства: дешевизна, легкость; недостаток — возгораемость; объемный вес 200—250 кг/м³. Лицевая поверхность перфорированных древесно-волоконистых плит покрыта или круглой формы отверстиями диаметром 3—6 мм, расположенными друг от друга на расстоянии 10—20 мм, или бороздами; глубина отверстий и борозд — обычно на $\frac{2}{3}$ толщины плиты. Перфорация повышает коэффициент звукового поглощения. Частотные характеристики сплошных и перфорированных древесно-волоконистых плит при разных способах их крепления к ограждению приводятся на л. XXXIX, рис. 2, 3, 4.

К числу других видов пористых материалов относятся: маты, изготавливаемые из стеклянного и минерального волокна, обернутого с двух сторон бумагой и прошитых нитками; объемный вес матов 50—100 кг/м³; мягкие плиты

из минерального волокна на синтетических вяжущих; объемный вес 200—300 кг/м³; синтетические пористые плиты (поролон и др.), отличающиеся легкостью и высоким звуковым поглощением при сквозных капиллярах.

Если слой пористого материала с жестким скелетом лежит на жестком основании, то частотную характеристику звукопоглощения в диапазоне средних и низких частот можно определить на основе двух следующих составляющих сопротивление материала:

а) активное сопротивление, которое прямо пропорционально воздушному сопротивлению и мало зависит от частоты;

б) реактивной составляющей в виде упругого сопротивления, обусловленного упругостью воздушного объема в порах.

Реактивная составляющая имеет большое значение при частотах, для которых толщина слоя материала незначительна по сравнению с длиной волны λ . Именно этим объясняется малое значение коэффициента звукового поглощения пористых материалов в диапазоне низких частот. Определение обеих составляющих подробно изложено в специальной литературе, указанной в конце книги.

Для повышения коэффициента звукового поглощения пористого материала необходимо или увеличивать толщину материала (что экономически нецелесообразно), или располагать пористые материалы на некотором расстоянии от ограждения. В последнем случае дополнительный объем воздуха между ограждением и пористым материалом уменьшает реактивное сопротивление конструкции, сопровождаемое возрастанием ее коэффициента звукового поглощения на низких частотах.

2. Колеблющиеся (резонирующие) панели

Резонирующие панели представляют конструкции, которые обладают наиболее высоким звукопоглощением в области низких частот и малым в диапазоне высоких частот. Конструкция такой панели (л. XXXIX, рис. 5) состоит из плотного фанерного, асбестоцементного или другого листа, шарнирно закрепленного на деревянном каркасе с воздушной прослойкой между листом и ограждением. Плотный лист в этой конструкции действует как масса, а воздушная прослойка за ней — как пружина.

При такой конструкции максимальное звуковое поглощение наблюдается на резонансной частоте f_0 , которая смещается в область достаточно низких частот. В диапазоне ча-

стот, превышающих резонансную, коэффициент звукового поглощения постепенно убывает вследствие повышения сопротивления листа.

Значения резонансных частот зависят от физических параметров панели-массы и жесткости. Жесткость панели суммируется из собственной жесткости панели, ее крепления и из жесткости воздушной прослойки между панелью и ограждением. Собственная жесткость панели в большой степени зависит от конструкции сопряжения панели с ограждением.

Для повышения коэффициентов звукопоглощения воздушную прослойку обычно заполняют матом из минерального волокна, обернутого в мешковину, а также вводят упругие демпфирующие прокладки по периметру сопряжения листа с каркасом. На л. XXXIX, рис. 5б приводятся частотные характеристики звукопоглощения резонирующих панелей при наличии воздушной прослойки и при заполнении ее матом из минерального волокна.

Собственную частоту колебаний резонирующих панелей можно варьировать изменением веса листа и толщины воздушной прослойки. На л. XXXIX, рис. 7 приводятся характеристики звукопоглощения при отделке пористой стены древесно-волокнистыми плитами.

Колеблющиеся панели обладают рядом преимуществ по сравнению с пористыми поглотителями: они гигиеничны, долговечны, влагостойки, устойчивы против механических воздействий. Достоинство их также в том, что они допускают любую фактическую обработку лицевой поверхности и ее восстановление в процессе эксплуатации без ущерба для звукового поглощения.

Разновидностью резонирующих панелей являются панели полуцилиндрического профиля, схема которых приводится на л. XXXIX, рис. 6а. Такие панели наряду с значительным звукопоглощением в диапазоне низких частот обладают звукорассеивающим действием. Частотные характеристики звукопоглощения этих конструкций приводятся на л. XXXIX, рис. 6б.

К ним относятся также панели из штукатурки по сетке Рабица. В этом случае сетку натягивают на каркас из деревянных реек толщиной до 2 см; воздушную прослойку между рейками заполняют пористым поглотителем.

3. Звукопоглощающие конструкции с перфорированным слоем

Конструкция этого типа состоит из слоя пористого материала, покрытого облицовочным перфорированным листом (стальным, фанер-

ным, асбестоцементным и др.). С внутренней стороны перфорированный лист обычно покрывается слоем фрикционного материала (стеклотканью, ситцем, марлей и др.), который способствует увеличению потерь звуковой энергии.

Перфорированные листы в таких конструкциях используются обычно в качестве облицовочного слоя. В соответствии с акустическим действием перфорированные листы могут изготовляться:

а) с большой площадью отверстий; в этом случае листы практически не оказывают влияния на звукопоглощающие свойства лежащего за ними пористого материала;

б) с малой площадью отверстий; в этом случае перфорированные листы являются органической частью звукопоглощающей конструкции.

В последнем случае акустическое действие конструкции не ограничивается свойствами звукопоглотителя. Изменяя размеры отверстий, расстояние между ними, материал и расположение поглотителя, можно осуществлять любое регулирование звукового поглощения.

Материалом для пористого слоя обычно служит минеральное или стеклянное волокно или маты и пористые плиты. Такие конструкции обладают значительным поглощением и возможностью расчетным путем определить желательные частотные характеристики звукопоглощения.

Для уяснения механизма поглощения звука конструкциями с перфорированным облицовочным слоем полезно предварительно рассмотреть резонатор Гельмгольца. Он представляет собой ограниченный жесткими стенками объем, сообщающийся с окружающим пространством через горловину. Содержащийся в резонаторе воздух ведет себя на частотах, длина волны которых велика по сравнению с размерами резонатора, как упругое сопротивление.

Поглощаемая резонатором звуковая энергия в диапазоне резонансной частоты определяется по формуле

$$f_0 = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{l_k V}} \quad (II.32)$$

где C — скорость распространения звука в воздухе;

s — площадь поперечного сечения горловины резонатора;

V — объем внутренней поверхности резонатора;

l_k — эквивалентная длина горловины, равная $l_k = l + 1,57d_1$ (d_1 — радиус се-

чения горловины, l — длина горловины).

Резонаторы Гельмгольца могут применяться в виде штучных поглотителей звука или непрерывной резонирующей панели.

Создаваемое резонатором звуковое поглощение является избирательным и достигает максимума при его резонансной частоте. Величина звукового поглощения резонатором A_0 , оцениваемая в m^2 , определяется по формуле

$$A_0 = \frac{\lambda_0^2}{2\pi}, \quad (II.33)$$

где λ_0 — длина волны, соответствующая резонансной частоте резонатора.

Одиночные резонаторы нашли широкое применение в древних русских церквях и соборах (в Пскове, Новгороде и др.). Они располагались обычно в верхней зоне стен и применялись с целью заглушения помещения для снижения реверберации. Использование резонаторов как поглотителей звука в древних русских церквях и соборах — свидетельство самобытного приема улучшения акустики помещений обычных размеров.

Применение резонаторов Гельмгольца в виде непрерывной панели позволяет создавать конструкции, которые обладают высоким поглощением в широком диапазоне частот.

Если принять, что перфорированный лист представляет чистую массу, не обладающую жесткостью, то собственную частоту колебаний такого листа можно определять по формуле

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{m\delta}},$$

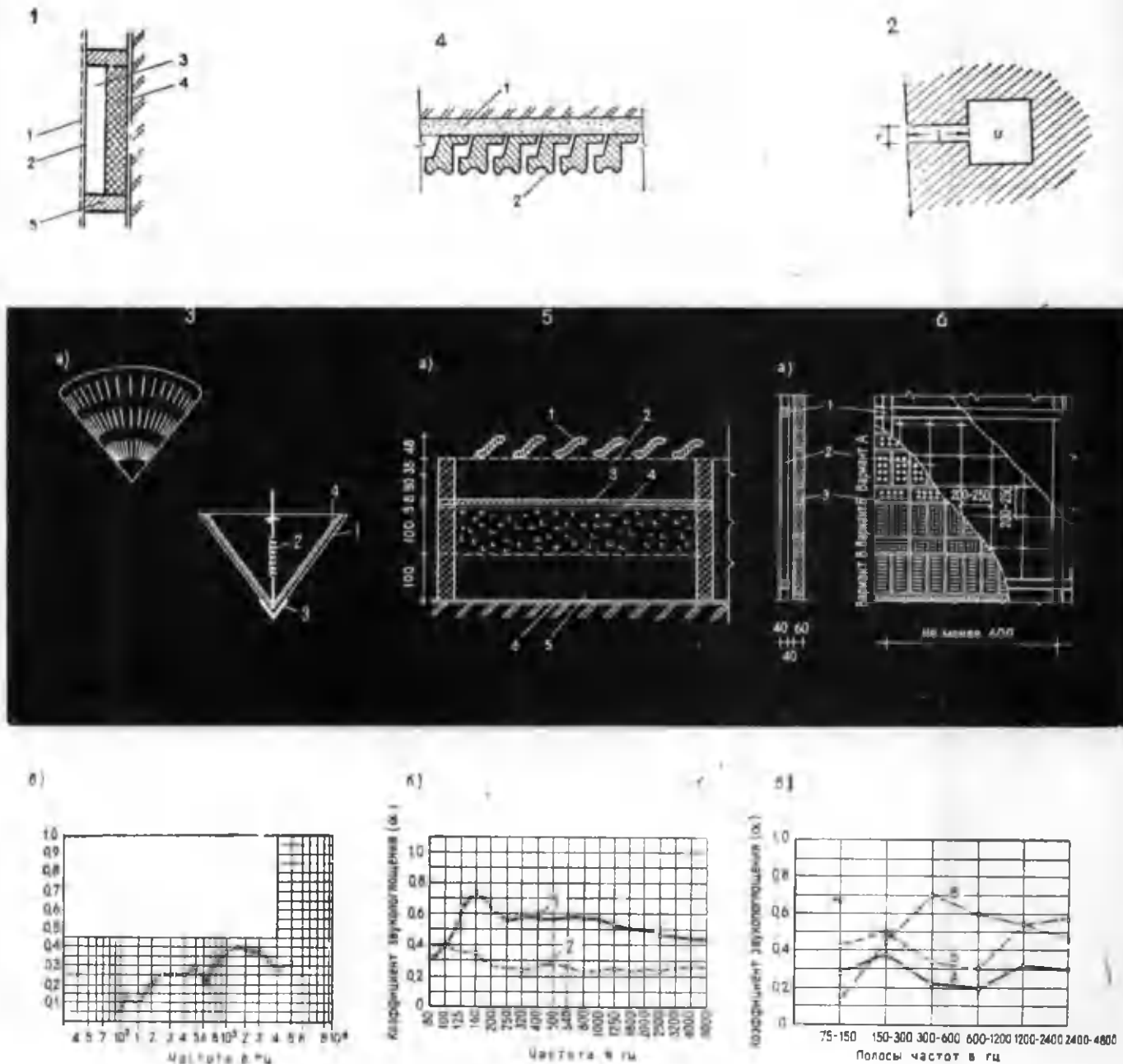
где m — масса единицы поверхности листа в kg/m^2 ;

δ — толщина воздушной прослойки в cm .

При диффузном звуковом поле собственная частота определяется по формуле

$$f_0 = \frac{850}{\sqrt{m\delta}}.$$

Большое преимущество резонансных поглотителей в том, что параметры, обеспечивающие требуемое поглощение в заданной области частот, можно определять расчетным путем. Не менее важным качеством является их экономичность и стабильность в работе. При имеющихся под рукой резонансных поглотителях проектировщику важно иметь возможность хотя бы приближенно определить область частот Δf , в пределах которой данный поглотитель окажется наиболее эффективным.



Для этого можно пользоваться формулой, предложенной Ф. Ингерслемом:

$$\Delta f = 4\pi \frac{f_0}{\lambda_0} l, \quad (II.37)$$

где f_0 — собственная частота резонатора;
 λ_0 — длина волны, соответствующая собственной частоте резонатора;

l — глубина резонатора.

Из формулы видно, что для осуществления широкополосных поглотителей резонансного типа необходимо применять панели с большой глубиной.

К резонансным поглотителям можно отнести подвесные поглотители конусообразной

поглотители звука с перфорированным слоем

Рис. 1. Конструктивная схема пористого поглотителя с перфорированным слоем

1 — перфорированный лист из плотного материала; 2 — frictionный слой (из ткани); 3 — воздушная прослойка; 4 — пористый материал; 5 — каркас

Рис. 2. Схема резонатора Гельмгольца

Рис. 3. Схема подвешенного поглотителя дифракционного типа

а — общий вид поглотителей; 1 — кожух из перфорированной фольги от 15 до 0,4 мм; диаметр перфорации 1 мм; шаг перфорации 3 мм; 2 — крепежная пружина; 3 — колпачок; 4 — мат из минерального волокна ($\gamma = 230 \text{ кг/м}^3$) в обертке из грубой ткани; б — частотная характеристика звукопоглощения при отсутствии пористого поглотителя в кожухе

Рис. 4. Разрез резонансной щелевой панели

1 — мат из минерального волокна толщиной 25 мм; 2 — деревянные фасонные рейки

Рис. 5. Резонансная щелевая панель

а — конструктивная схема резонансной щелевой панели, примененная при отделке боковых стен в Дворце съездов: 1 — деревянные рейки; 2 — декоративная металлическая сетка; 3 — деревянный щит (мобильный); 4 — пакет из капронового волокна; б — воздушная прослойка; в — стена; г — частотная характеристика звукового поглощения; 1 — без отражательного деревянного щита; 2 — с отражательным деревянным щитом (д)

Рис. 6. Конструкция с облицовочным слоем из дырчатого кирпича и частотная характеристика звукопоглощения

а — конструктивная схема поглотителя при использовании трех видов дырчатого кирпича; б — частотная характеристика звукопоглощения при различных видах дырчатого кирпича (А, Б, В); 1 — деревянные рейки сеч. $50 \times 50 \text{ мм}$; 2 — мат из минеральной ваты в обертке из паковочной бумаги ($\gamma = 230 \text{ кг/м}^3$); 3 — армированная стенка в кирпича

формы, схемы которых приводятся на л. XL, рис. 3,а.

Поглотители этого вида получили название дифракционных. Они оказываются весьма удобными в случаях, когда требуется поглотитель приблизить к источнику звука. Перфорированный кожух таких поглотителей осуществляется из тонкого листа фольги, жести, пластмассы и др. Внутри кожуха может располагаться пористый материал толщиной 12,5—25 мм, оказывающий необходимое сопротивление прохождению воздушного потока. Частотная характеристика дифракционных подвешенных поглотителей приводится на л. XL, рис. 3,б (по вертикали отложено поглощение в м^2).

Штучные поглотители обладают достаточно высоким коэффициентом звукового поглощения благодаря дифракции звуковых волн в зоне расположения этих поглотителей.

Общее звуковое поглощение, вносимое штучным поглотителем, выражают в виде эквивалентной площади звукопоглощения (A), которая обладает тем же поглощением, что и штучный поглотитель. Для поглотителей, размеры которых велики по сравнению с длиной

волны, звуковое поглощение определяют по формуле:

$$A = \alpha S,$$

где α — коэффициент звукового поглощения поверхности поглотителя;

S — площадь поверхности поглотителя.

Практический интерес представляют резонансные поглотители щелевого типа; особенностью их является отверстие в виде щели, идущей вдоль всей длины воздушной полости. Щелевые резонаторы применяются в виде одиночных устройств, а также в виде резонансных щелевых панелей. Горизонтальный разрез одной из таких панелей приводится на л. XL, рис. 4. Ширина щели составляет обычно от 10 до 20% от ширины бруска.

Максимальное количество поглощения на 1 пог. м, наблюдаемое на резонансной частоте при применении щелевых резонаторов, определяется по формуле:

$$A_0 = \frac{\lambda_0}{\pi}, \quad (11.38)$$

где λ_0 — длина волны при резонансной частоте.

На л. XL, рис. 5 приводится конструктивная схема щелевых резонансных панелей, применяемых при отделке боковых стен зрительного зала Дворца съездов в Кремле (Москва) и частотная характеристика звукопоглощения, найденная экспериментальным путем.

За последнее время получили распространение поглотители в виде дырчатых поверхностей.

Поглотители этого вида представляют комбинацию из твердого наружного слоя и располагающейся за ним воздушной прослойки 10—12 см, заполненной пористым поглотителем звука. Лицевой слой этих конструкций осуществляется из дырчатого кирпича, дырчатых плит (гипсовых, гипсобетонных, керамических и др.).

Частотные характеристики звукового поглощения некоторых из этих конструкций приводятся на л. XL, рис. 6.

Разновидностью конструкций этого типа являются поверхности с щелевидными прорезами. Простейшее решение такой конструкции достигается при применении деревянных реек шириной 4 см при ширине щели 1—2 см.

Подобная отделка интерьера в акустическом отношении имеет широкие возможности и в каждом конкретном случае выбирается с учетом экономических и архитектурных требований.

АКУСТИКА ОТКРЫТЫХ ТЕАТРОВ

1. О развитии открытых театров

Восходящие к седой древности сооружения открытых театров восхищают нас не только предельной простотой и логикой пространственного решения, но и прекрасными акустическими качествами, свидетельствующими о знании зодчими прошлого законов распространения звуков в атмосфере.

Особенно большой интерес представляют древнегреческие и римские открытые театры, предназначенные в основном для драматических представлений. Схема греческого театра, состоящего из сцены (сцены), койлона (амфитеатра) и оркестры (сценической площадки), приводится на л. XLI, рис. 1.

Средства, при помощи которых античные зодчие достигали хорошей акустики, по своему характеру разбиваются на два вида: первый связан с выбором места строительства, с учетом особенностей атмосферной акустики; второй — с использованием отраженной звуковой энергии.

Особенность греческих театров — расположение их на склонах гор, вдали от городов. Используя природные особенности местности (склоны, ветер), первичные отражения от поверхностей оркестры, вымощенной плитами из камня и мрамора, а также от деревянных щитов — дек, заполняющих интерколумний просцениума, греческие зодчие обеспечили хорошую слышимость на местах огромного амфитеатра, окружающего оркестру.

Фактором, улучшающим акустику греческих театров, является отсутствие преград на пути распространения прямых и отраженных звуков.

Наряду с мерами, обеспечивающими хорошую слышимость, зодчие древней Греции проявили заботу о сохранении естественности звучания.

Известно, что при распространении в атмосфере спектр звука претерпевает большие искажения вследствие интенсивного поглощения высокочастотных составляющих. Для оживления звучания греками применялись опрокинутые открытой частью вниз металлические сосуды (голосники), резонирующие на звуки определенной частоты.

Некоторые данные о древнегреческих театрах приводятся в табл. II.12.

Таблица II.12

Данные о некоторых греческих театрах

Театры	Вместимость (в тыс. человек)	Удаление крайних мест от центра (оркестры) в м	Уклон койлона в град
В Афинах (Диониса)	14—17	85	20
В Эпидавре	14—16	59	27
В Эфесе	23	76	26

Римские театры устраивались обычно на плоской площадке за городом и представляли единое архитектурное сооружение в виде расположенных полукругом террас, органически связанных со сценой (л. XL, рис. 2). Оркестра в римских театрах обычно представляла полукруг и постепенно превратилась в подиум высотой 1—1,3 м, ограниченный продольной и боковыми стенами. Размеры сцен некоторых римских театров приводятся в табл. II.13.

Форма сцены, осуществляемой из камня, способствовала полному использованию отраженных звуков для улучшения слышимости.

Некоторые данные о вместимости и размерах амфитеатра (кавеа) римских открытых театров приводятся в табл. II.14.

Хорошая акустика римских открытых театров достигалась совокупностью следующих архитектурных и конструктивных средств: защищенностью кавеа от ветра и внешнего шума, приближением зрителей к сцене, формой и отделкой сцены, устройством резонирующей га-

Таблица II.13

Размеры сцен в некоторых римских открытых театрах

Театры	Размеры сцены в м		
	длина	глубина	высота
Марцелла в Риме	60	8	—
В Оранже	61,12	9,3	26
В Аспенде	46,68	4,1	22

Таблица II.14

Вместимость и размеры кавеа римских театров

Театры	Вместимость (в тыс. человек)	Диаметр кавеа в м
Марцелла в Риме	13	128
В Оранже	7,8	103
В Аспенде	6,6	101

лерей по периметру амфитеатра, крутым подъемом амфитеатра.

О высоком акустическом качестве открытых римских театров свидетельствуют, в частности, результаты натурных исследований по определению разборчивости речи в некоторых из сохранившихся до сих пор амфитеатрах.

Измерениями было установлено, что при отсутствии зрителей и шума процент речевой артикуляции в наиболее удаленных от сцены рядах амфитеатра составлял от 78 до 88%, что свидетельствует о хорошей разборчивости речи.

Этому способствовал также круто поднимающийся амфитеатр, уклон которого подбирался с целью обеспечения беспрепятственной видимости сцены с учетом закона распространения звука на открытом пространстве. Применяемые в римских театрах уклоны амфитеатра составляли: в театре в Аспенде 22°, в Оранже 26°.

2. Особенности атмосферной акустики

Задачи акустики открытых театров могут быть успешно решены при знании особенностей распространения звука в атмосфере.

При распространении сферических волн от точечного источника звука разница в уровнях силы звука в точках, находящихся от источни-

ка на расстоянии D_1 и D_2 , выражаются формулой

$$\Delta L = 20 \lg \frac{D_1}{D_2} \text{ дБ.} \quad (\text{II.39})$$

Из этой формулы нетрудно определить, что уровень силы звука снижается на 6 дБ при каждом удвоении расстояния от источника, или на 20 дБ при каждом его удесятерении.

Большое влияние на распространение звука в атмосфере оказывают направление и скорость ветра, а также распределение температуры воздуха в направлении вверх от земли.

Известно, что при нормальной летней температуре воздуха скорость распространения звука в условиях безветрия принимается равной 340 м/сек. При наличии ветра, а также при изменении температуры воздуха скорость распространения звука существенно изменяется. На л. XLI, рис. 3 приводится схема, поясняющая изменение скорости и направления распространения звука при различных направлениях ветра, из которой видно, что при совпадении направления распространения звуковых волн с направлением ветра звуковые волны прижимаются к земле; результирующая скорость их распространения равна сумме скоростей звука и ветра.

Если направление ветра противоположно направлению распространения звуковых волн, последние будут отрываться от земли; результирующая скорость распространения звука в этом случае определяется разностью между скоростями звука и ветра.

Влияние ветра на уровень силы звука, распространяющегося в разных направлениях, приводится на л. XLI, рис. 4. Вектор, проведенный из точки, где располагается источник звука, характеризует амплитуду звуковой волны в данном направлении при заданном расстоянии от источника звука. Сравнение векторов по разным направлениям показывает, что амплитуда звуковой волны в направлении ветра почти в 3 раза больше соответствующей амплитуды в направлении, противоположном действию ветра.

Это обстоятельство должно учитываться при расположении здания на участке. Естественно, что удачным в акустическом отношении будет решение, при котором сцена будет располагаться с наветренной стороны (направление ветра от сцены к амфитеатру); при этом решающим будет направление господствующих ветров в летний сезон.

Большое влияние на распространение звука оказывает распределение температуры воздуха по высоте. Если температура воздуха снижается по мере удаления от земли (наибо-

лее часто встречающийся случай), то верхние звуковые волны, излучаемые источником звука, распространяются замедленно по сравнению с нижними, поэтому фронт звуковых волн изгибается вверх.

В тех относительно редких случаях (например, при расположении театра в долине), когда температура воздуха повышается по мере удаления от земли, верхние звуковые волны распространяются быстрее, чем нижние и поэтому фронт звуковых волн изгибается вниз. В этих условиях значительная часть звуковых волн многократно отражается от верхних теплых слоев воздуха.

При проектировании акустики открытых театров необходимо учитывать искажения естественности звучания, возникающие вследствие неравномерного поглощения воздухом звуков различной частоты. Особенно интенсивное поглощение звуков высокой частоты наблюдается в воздухе с высокой относительной влажностью. На л. XLI, рис. 5 приводятся кривые затухания плоских звуковых волн высокой частоты (от 10 000 до 1500 гц) при температуре воздуха 20°C * в зависимости от относительной влажности воздуха. Затухание звука выражается в децибелах на каждые 30 м расстояния от источника звука.

Пользуясь кривыми на рис. 5 при заданной относительной влажности воздуха местности, можно определить возможное снижение уровня силы звука (в дб) в зависимости от выбранного удаления зрителя от сцены. Такой подсчет позволяет найти целесообразные размеры амфитеатра. На качество акустики открытых театров существенное влияние может оказывать явление флюктуаций (колебания воздуха), которое возникает при наличии вблизи театров больших поверхностей земли, сильно нагреваемых солнцем. Поэтому при выборе участка под строительство театра надо отдавать предпочтение местности, в которой подстилающий слой не обладает высоким альбедо.

При выборе участка под строительство открытого театра необходимо проводить тщательное акустическое обследование, чтобы установить:

- а) отсутствие естественных акустических недостатков в виде эха и фокусирования;
- б) защищенность театра от шума транспортных и пешеходных магистралей; согласно существующим требованиям уровень шума на площадке театра не должен превышать 40 дб;
- в) защищенность от ветров; согласно су-

* Наиболее вероятная температура воздуха в открытых театрах.

Рис. 1. Схема открытого древнегреческого театра. Вид на оркестру со стороны амфитеатра

Рис. 2. Схема открытого древнеримского театра. Вид на сцену со стороны амфитеатра

Рис. 3. Схема, показывающая распространение звуковых волн

1 — при совпадении направления распространения звуковых волн с направлением ветра; 2 — при противоположных направлениях ветра и распространения звуковых волн; 3 — при расположении двух источников звука, направленных рупором в противоположные стороны

Рис. 4. Схема, поясняющая влияние ветра на уровень силы звука, распространяющегося в разных направлениях

Рис. 5. График, характеризующий снижение уровня силы звука на каждые 30 м расстояния (в дб) вследствие влажности воздуха. Первая (сверху) кривая для звука частотой 10 000 гц, вторая — 6000 гц, третья — 3000 гц и нижняя — 1500 гц

Рис. 6. Кривые артикуляции на открытом воздухе а — при отсутствии ветра; б — при наличии ветра (скорость 10 м/сек); в — схема к построению поля артикуляции

Рис. 7. План и разрез открытого театра, обладающего хорошей акустикой а — план и продольный разрез; б — раковина

Рис. 8. Открытый театр «Голливудская чаша» (США) а — план и продольный разрез; б — раковина

Рис. 9. Акустический экран для выступления хора в несколько тысяч человек в г. Таллине а — общий вид; б — план; в — схема конструкции

существующим требованиям скорость ветра на участке не должна превышать 4 м/сек.

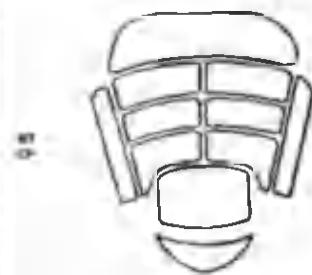
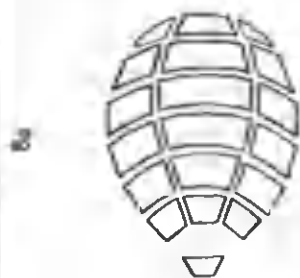
Защита театра от ветра обеспечивается или естественными склонами гор или высокими густолиственными насаждениями (кипарисами, тополями и др.).

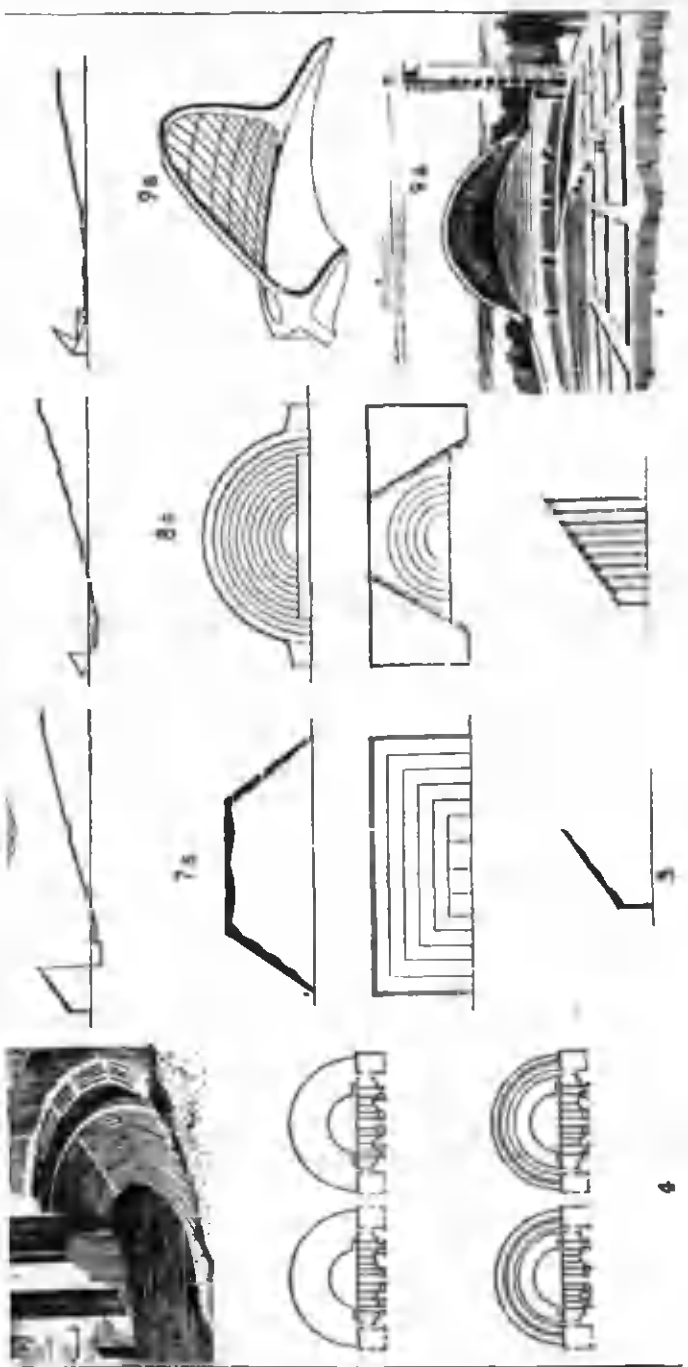
Практика показала, что зеленые насаждения (естественные или в виде плоских боскетов) хорошо изолируют театр от внешнего шума и ветра. Ветрозащитное действие зеленых насаждений при глубине 3—5 м распространяется на расстояние, равное примерно 6—10-кратной высоте посадок.

3. Определение размеров и формы открытых театров

Предельно допустимое удаление зрителей от источника звука (оратора) определяют исходя из 75% артикуляции; при полном отсутствии ветра и шума в этом случае максимальное расстояние прямо перед оратором колеблется в пределах 42 м, а в боковых направлениях — 30 м. Кривые артикуляции, полученные экспериментальным путем, в этом случае имеют вид, представленный на л. XLI, рис. 6а.

Опыт эксплуатации открытых театров показывает, что наибольший предел удаления (50 м) можно рекомендовать только для оперно-балетных и хореографических театров вместимостью от 3000 до 5000 человек.





Для театров драматических и эстрадных предел удаления обычно ограничивается 30 м при вместимости 1500—2500 человек. Однако при хорошей защищенности театра от внешнего шума и ветра и при наличии акустической раковины предельное расстояние от сцены до последнего ряда мест может быть несколько увеличено. Хороший пример открытого театра на 2000 мест приводится на л. ХLI, рис. 7. Геометрические показатели этого театра: длина по продольной оси 40 м, наибольшая ширина $2 \times 26,5 = 53$ м; уклон мест 12—15°. На рис. 7,6 приводится схема устройства раковины.

В театрах, предназначенных для симфонических концертов и хоровых выступлений, оборудованных раковинами и отражающими экранами, границы допускаемых удалений могут быть значительно раздвинуты (табл. II.15).

Таблица II.15

Предельное удаление мест в существующих открытых театрах

Театры	Вместимость	Предельное удаление мест в м	
		по оси раковины	по бокам раковины
Голливудская чаша (США)	22 500	72	$2 \times 75 = 150$
Театр массовой песни в Таллине	35 000	165	$2 \times 80 = 160$
Зеленый театр имени Горького в Москве	13 000	103	$2 \times 35 = 70$

Выстроенные за последние годы в разных городах Союза открытые театры, к сожалению, не обладают хорошим акустическим качеством. Объясняется это в основном недочетами их проектирования. В частности, почти во всех театрах отсутствуют акустические раковины. В тех театрах, где раковины имеются, форма и конструкция их выбирались случай-

но, без акустического анализа. В результате во всех открытых театрах оборудованы звукоусилительные установки, не обеспечивающие равномерности распределения излучаемой громкоговорителями звуковой энергии и хорошего качества звука.

В табл. II.16 приводятся геометрические характеристики некоторых открытых театров. Из таблицы можно видеть большое разнообразие форм и размеров амфитеатра и эстрады.

4. Акустические экраны и раковины

Под акустическим экраном и раковиной имеют в виду звукоусиливающие устройства, поверхности которых обеспечивают зеркальное отражение звука.

Существуют две основные функции акустической раковины в открытых театрах: первая — создать по возможности равномерное звуковое поле в театре и увеличить уровень силы звука в первую очередь в наиболее удаленных от сцены местах; вторая — обеспечить возможность исполнителям на сцене хорошо слышать друг друга, что очень важно для синхронного, прозрачного и сбалансированного исполнения. Музыканты считают это качество очень важным; оно позволяет им контролировать друг друга и соблюдать надлежащую громкость звучания отдельных инструментов, находящихся на значительном расстоянии друг от друга. Вторая функция акустического экрана приобретает особое значение для открытых эстрад, рассчитанных на тысячи исполнителей. Такие эстрады получили широкое распространение в Эстонии и Латвии.

Габариты экранов отражателей должны удовлетворять двум условиям: длина волны должна быть достаточно мала по сравнению с линейными размерами экранов и величина экрана должна увязываться с размерами площади, занятой источниками звука.

Строительный материал, применяемый для

Таблица II.16

Геометрические характеристики некоторых открытых театров

Наименование театров	Форма плана	Вместимость	Расстояние от эстрады		Глубина ряда в м	Количество рядов между проходами	Ширина прохода в м		Размеры эстрады в м ²
			до первого ряда	до последнего ряда			радиальных	кольцевых	
Зеленый театр в ЦПКиО имени Горького (Москва)	Секторная	13000	6	103	0,8	8	1,7	2,6	36×26
в парке имени Дзержинского (Москва)	То же	5000	6	51	0,7	14	1,5	2,0	32×39
Театр в парке ЦДСА (Москва)	Кольцевая секторная	5000	2	54	0,85	24	1	2	16×10
Остров танца в ЦПКиО имени Горького (Москва)	Полукруглая	1500	5	29	0,9	20	2	—	12×13

экрана, должен обладать следующими свойствами:

1) высоким коэффициентом отражения при любой частоте звука и любом угле падения;

2) достаточной жесткостью в продольном и поперечном сечениях;

3) низкой собственной частотой, зависящей от веса конструкции, способа крепления и жесткости элементов (чтобы конструкция не возбуждалась от ветра или мощных источников звука);

4) при применении тонких листов материала необходимо предусматривать упругие прокладки в местах сопряжения листов с основной конструкцией экрана.

Существует много различных форм акустических экранов. Наиболее простой тип экрана — звукопоглощающая плоская стена, поставленная сзади сцены; такая стена, однако, не обеспечивает равномерного распределения звуковой энергии в театре.

Акустические раковины в театрах, предназначенных для концертов, по форме разделяются на конические и сферические. Первый тип имеет форму усеченного кругового или пирамидального конуса. Раковина состоит из отражающей звуки вертикальной стены, потолка и боковых стен, идущих по направлению образующих конуса. Такого типа акустическая раковина способствует созданию в театре равномерного звукового поля и свободна от дефектов фокусирования звука (что неизбежно при сферической форме раковины). При больших размерах для усиления направляющего действия экрана внутренним поверхностям раковины целесообразно придавать пилообразный профиль. Будучи расположены под определенными углами, поверхности профиля отражают звуки в направлении, параллельном наклону пола.

Стены и потолок раковины осуществляются из плотных материалов (железобетона, дерева, камня), обладающих высокой звукоотражательной способностью.

Пол раковины целесообразно делать деревянным в виде уступов или наклонным из двойного настила досок.

Хорошим примером устройства акустической раковины может служить открытый театр «Голливудская чаша» в США, предназначенный для выступлений симфонических оркестров. Театр расположен в долине, надежно защищенной от внешнего шума горами. План и разрез театра приводятся на л. ХLI, рис. 8, а. Уклон амфитеатра 12° . Огромные размеры амфитеатра (72×150 м) потребовали применения специальной акустической ра-

ковины; план, разрез и фасад ее приводятся на рис. 8, б.

Боковые стены раковины образуют с продольной осью угол 30° ; угол наклона потолка с горизонталью 51° . По форме раковина представляет рупор гигантских размеров в виде усеченного конуса. Для лучшего рассеивания звуков внутренняя поверхность стен и потолка имеет пилообразный профиль и обработана девятью концентрическими звукоотражающими полосами, расположенными под углом 51° к горизонту. Такая пластическая отделка стен и потолка раковины обеспечивает равномерное звуковое поле на всей площади театра.

Результаты измерения слоговой артикуляции показывают, что удовлетворительная разборчивость речи имеет место почти на всех местах театра. Расположение боковых стен раковины в общем случае зависит от формы театра и диктуется необходимостью равномерного распределения отраженной звуковой энергии. Наклон потолка, оцениваемый углом α (над горизонталью), определяется из выражения

$$\alpha = 45 + \frac{\theta}{2},$$

где θ — угол наклона пола.

Большие сложности связаны с устройством акустических раковин, рассчитанных для расположения массового хора с количеством исполнителей в несколько тысяч человек. При выступлении столь крупных ансамблей распределение звуковой энергии по площади мест слушателей становится неравномерным. Нарушается в этих случаях и музыкальный баланс вследствие неодинаковой громкости звучания отдельных групп исполнителей.

Интересными примерами решения акустической раковины являются певческие трибуны в Риге, Таллине и Вильнюсе. Общий вид акустической раковины в Таллине, построенной в 1960 г., приводится на л. ХLI, рис. 9, а. Из кривых равной громкости, полученных на модели, было установлено, что на расстоянии 250 м от сцены уровень силы звука, возбуждаемого хором, уменьшается на 20 дБ по сравнению с уровнем силы вблизи сцены.

Конструкция раковины состоит из двух арок большого пролета, служащих опорами для металлических тросов и тонкой оболочки (л. ХLI, рис. 9, в). Тросы располагаются в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, образующих поверхность с формой параболоида.

Прекрасное акустическое качество раковины подтвердило правильность расчетных предположений и результатов экспериментальных работ, проведенных авторами проекта над ее моделью.

ТЕХНИКА БОРЬБЫ С ШУМАМИ

1. Источники шума и их характеристики

При решении задач звукоизоляции проектировщики имеют дело со следующими видами звуков:

воздушным, распространяющимся по воздуху:

структурным (или материальным), распространяющимся в твердом теле или в конструкции зданий;

ударным, распространяющимся под воздействием всякого рода ударов (в частности, при хождении людей, движении транспорта) по конструкциям зданий и частично трансформируемого в воздушный звук.

Под шумом в широком смысле понимают всякие звуки, нарушающие тишину и мешающие восприятию звуковых сигналов. В современном строительстве, ведущемся индустриальным методом и характеризующимся растущей механизацией производственных процессов, развитием транспорта, широким использованием инженерного оборудования в быту, шум превратился в одну из сложных проблем, которой уделяется много внимания у нас и за рубежом.

Действие шума на человека может быть разным в зависимости от его уровня, спектрального состава и длительности действия. Так, шум невысокого уровня, возникающий в зрительных залах, обычно затрудняет слушание речи и музыки; шум среднего уровня, возникающий, например, в конторских и административных помещениях, вызывает преждевременную усталость служащих; шумы высоких уровней в производственных помещениях вызывают быстрое утомление рабочих, а следовательно, отрицательно влияют на производительность труда. Воздействуя на центральную нервную систему, шумы ослабляют вни-

мание рабочих и способствуют увеличению травматизма.

Спектральный состав шума оценивается частотной характеристикой, которая показывает зависимость уровня шума от частоты колебаний. На л. XLII, рис. 1 приводится частотная характеристика шума в одном из цехов.

По спектральному составу шумы называются: низкочастотными с частотой колебания до 300 гц, среднечастотными 300—800 гц, высокочастотными более 800 гц.

По своему характеру шумы бывают длительными с постоянным узким диапазоном спектра (например, гудение электромотора); длительными с широким диапазоном мало изменяющегося спектра (например, уличный шум, образующийся в результате сложения разнообразных элементарных шумов, называемый шумовым фоном); эпизодическими, ха-

Таблица II.17
Уровни силы звуков

Источники шума	Субъективная оценка	Уровень силы звука в дБ
Порог слышимости	Полная тишина	0
Шелест листьев	Очень тихо	20—30
Тихая музыка	Тихо	40—50
Нормальный разговор	Малозвучно	50—60
Громкая речь	Шумно	60—70
Громкая музыка (передаваемая через громкоговорители)	Весьма шумно	70—80
Симфонический оркестр	То же	80—90
Производственные шумы	Тягостно	90—100
Шум самолета (на расстоянии 3 м)	Очень тягостно	120—130
Порог болевого ощущения	—	130

рактизуемым узким спектром, высоким уровнем и малой длительностью (например, шум гудка тепловоза).

Уровень силы шума измеряется прибором — шумомером; его показания определяют уровни силы звука в децибелах. В табл. II.17 приводятся уровни силы звука, создаваемые некоторыми источниками.

Вредное влияние шума на организм сказывается тем сильнее, чем больше уровень шума отличается от привычного среднего уровня шума окружающей человека среды.

При действии нескольких источников с одинаковой силой и частотой звука суммарный уровень силы определяется следующим образом: если уровень силы одного источника

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ дб,}$$

то при n источниках суммарный уровень силы определяется по формуле

$$L_c = L + 10 \lg n. \quad (\text{II.40})$$

Для определения суммарного уровня силы при разных значениях L удобно пользоваться номограммой на л. XLII, рис. 2.

Пример. Требуется определить суммарный уровень силы шума L_c при действии двух источников $L_1 = 50$ дб и $L_2 = 45$ дб.

Имеем, что $\Delta L = L_1 - L_2 = 50 - 45 = 5$ дб.

По номограмме находим, что

$$L_c = L_1 + N = 50 + 1,2 = 51,2 \text{ дб.}$$

Обычно суммарный уровень шума в помещениях создается людьми, оборудованием и внешними источниками шума. Согласно статистическим данным удельный вес каждого из этих источников составляет: в производственных помещениях соответственно 10; 80 и 10%; в помещениях общественных зданий соответственно 45; 25 и 30%.

Данные об уровнях силы шума, возбуждаемого некоторым оборудованием в производственных помещениях, приводятся в табл. II.18.

Таблица II.18

Уровни силы шума, возбуждаемого при работе оборудования

Оборудование	Уровни силы звука на расстоянии 1 м в дб
Прядильный станок	84—87
Штамповочный пресс	96—103
Кузнечный молот	110—120
Строгальный станок	101—105
Пилорама	100

Всякий шум легко переносится человеком только до определенного предела, называемого допустимым уровнем шума. Допустимый уровень зависит от шумового фона, который

обычно создается в помещениях и на улице; в классах уровень шумового фона обычно составляет 40—45 дб; на улицах 60—70 дб.

Допустимые уровни шума в помещениях разного назначения приводятся в табл. II.19.

Таблица II.19

Допустимые уровни шума в помещениях

Помещения	Допустимые уровни силы шума в дб
Радиостудии, телестудии	20—30
Палаты в больницах и санаториях; игральные и спальные в детских учреждениях	30—35
Жилые комнаты, читальные залы в библиотеках	35
Классы и аудитории в учебных заведениях	40
Зрительные залы в театрах и кинотеатрах	40
Производственные помещения при шумах:	
низкочастотных	90
среднечастотных	80
высокочастотных	75

Защита помещений от шума осуществляется совокупностью архитектурно-планировочных, конструктивных, технологических и эксплуатационных мер.

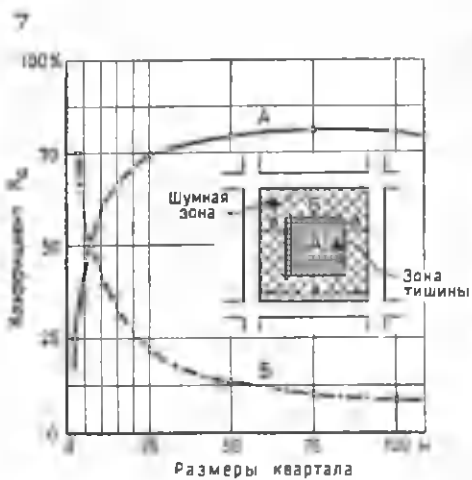
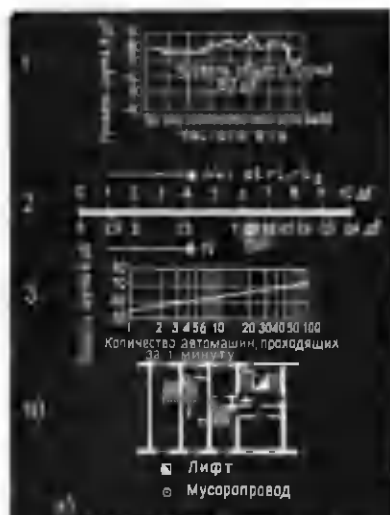
2. Архитектурно-планировочные меры борьбы с шумами

Наиболее просто и дешево защита помещений от шума решается архитектурно-планировочными мерами. Сущность их сводится к делению территории городского квартала, промышленного предприятия, а также объема и плана зданий на шумные и тихие зоны. Рациональная планировка городского квартала, территории завода, больницы, школы освобождает проектировщиков от необходимости применять дорогие конструктивные средства для звукоизоляции помещений. Поэтому вопросы звукоизоляции надо иметь в виду, начиная с первых этапов проектирования города, поселка, промышленного предприятия, здания. Только после полного использования архитектурно-планировочных мер целесообразно разрабатывать конструктивные средства в пределах доказанной необходимости.

По степени шумности город делится на четыре зоны:

промышленная, наиболее шумная зона с уровнями силы звука до 80 дб; в ней располагаются предприятия и улицы с интенсивным движением;

общественный и торговый центр города,



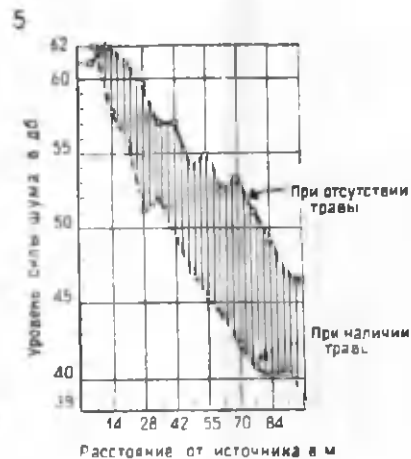
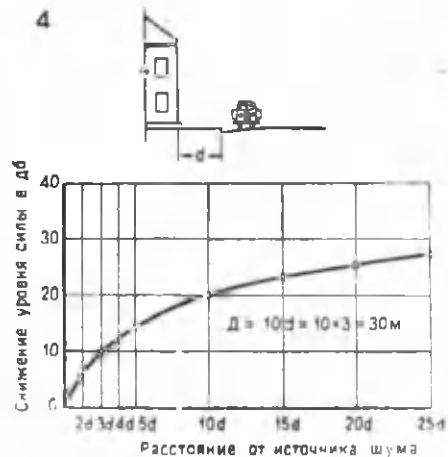
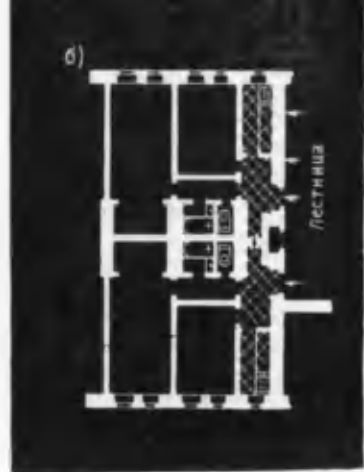


Рис. 1. Частотная характеристика шума в одном из цехов

Рис. 2. Номограмма для определения суммарного уровня силы шума от нескольких источников при разных уровнях силы создаваемого ими шума одинакового спектра

Рис. 3. Зависимость уровня силы шума от количества автомашин, проходящих в минуту

Рис. 4. График для определения снижения уровня силы шума при заданном удалении здания от проезжей части улицы (выраженном в количестве эталона, равного 3 м)

Рис. 5. Снижение уровня силы шума газомом

Рис. 6. Снижение уровня силы шума при экранировании звуковых волн зданиями различной высоты

Рис. 7. Изменение значения коэффициента K_n , характеризующего соотношение между тихой и шумной частями городского квартала

Рис. 8. Рекомендуемая планировка квартала и расположение зданий по отношению к шумной улице

Рис. 9. Типовые секции жилых зданий

a — неудовлетворительная с точки зрения защиты помещений от шума планировка секции: жилые помещения не защищены от шума лестничной клетки; *b* — удовлетворительная планировка жилой секции: между жилыми помещениями и лестничной клеткой создается звуковой шлюз вспомогательными помещениями; однако встроенный в здание лифт должен быть тщательно изолирован

Рис. 10. Неудовлетворительное с точки зрения требований звукоизоляции расположение санитарных узлов и мусоропроводов в типовой секции

шумная часть города с интенсивным движением транспорта и пешеходов, с уровнями силы звука до 70 дБ;

жилая застройка, относительно тихая часть города с уровнями силы звука до 60 дБ; зона тишины; в ней располагаются такие здания как больницы, радиостудии, библиотеки; уровни силы звука в этой зоне не превышают 50 дБ.

При разработке генеральных планов новых и реконструируемых городов промышленную зону надо располагать с подветренной стороны по отношению к жилой части города, пользуясь для этого данными о господствующих направлениях ветра в разные сезоны года.

Ширина шумозащитной зоны, изолирующей жилой часть города от шума промышленных предприятий, выбирается исходя из требования обеспечить гигиенически допускаемые уровни силы звука на границе застройки в пределах величин, указанных в табл. II.20.

Из таблицы видно, что большую роль при установлении допускаемых уровней силы звука играет спектр шума; при высокочастотных шумах допускаемый уровень снижается почти на 40%.

Распространение шума в городах и населенных пунктах обычно происходит при следующих условиях:

свободно — на открытых пространствах с различным подстилающим слоем земли;

при наличии зеленых насаждений, заполняющих пространство между источником шума и жилой территорией города;

при экранировании источника шума зданиями, подпорными стенами и др. препятствиями.

При расчете снижения уровня шума во всех трех случаях исходят из закона, по которому снижение силы звука от точечного источника обратно пропорционально квадрату расстояния от данной точки до источника звука. При этом влияние зеленых насаждений и подстилающего слоя земли учитывается поправочными коэффициентами.

Практические расчетные формулы, позволяющие определять снижение уровня силы звука (ΔL), имеют следующий вид.

А. На открытом пространстве

При точечном источнике шума (репродуктор, открытое окно шумного цеха и т. п.)

$$\Delta L = K_n \cdot 20 \lg \frac{D}{D_n}; \quad (II.42)$$

при линейном источнике шума (ряд автомашин, ленточное окно шумного цеха и т. п.)

$$\Delta L = K_n \cdot 10 \lg \frac{D}{D_n}, \quad (II.43)$$

где K_n — коэффициент, учитывающий звукопоглощающие свойства подстилающего слоя земли; его значения: при асфальте — 0,9, обычном грунте — 1, газоне — 1,1;

D — расстояние от источника шума до данной точки в м;

D_n — расстояние от источника шума до

Таблица II.20

Допускаемые уровни силы звука на границе жилой части города

Характер населенного пункта	Продолжительность работы предприятий	Частота в Гц					
		100	200	400	800	1600	3200
Крупные города	Круглосуточно	61	54	49	45	41	39
	Только днем	70	64	58	55	52	50
Малые города	Круглосуточно	51	45	39	35	32	29
	Поселки	61	54	49	45	41	39

точки, в которой определялся уровень силы звука источника шума.

Б. При наличии зеленого массива

При точечном источнике шума

$$\Delta L = K_n K_z \cdot 10 \lg \frac{D}{D_1};$$

при линейном источнике шума

$$\Delta L = K_n K_z \cdot 20 \lg \frac{D}{D_1},$$

где K_z — коэффициент, учитывающий звукопоглощающий эффект зелени; его численные значения: при деревьях с густой сомкнутой кроной — 1,5; при лесопарковых посадках с кустарником — 1,2;

D — расстояние от источника шума до удаленной от источника границы зеленого массива в м;

D_1 — расстояние от источника до ближайшей границы зеленого массива.

При отсутствии возможности снизить в жилых кварталах уровень шума до допускаемого в шумных цехах предприятий предусматриваются специальные шумозащитные устройства по уменьшению шума в местах его образования (кожухи, звукопоглощающие шахты и др.).

Шумовой фактор надо учитывать при проектировании генерального плана промышленных предприятий. При зонировании территории предприятий, расположенных в городе, целесообразно шумные цехи сосредоточивать в средней части территории, защищая остальную территорию от шума вспомогательными зданиями и зелеными насаждениями. Целесообразно также участки с шумным производством отделять экранами (зданиями, каменными заборами) или зеленым валом. В южных районах хорошим изолятором шума являются кипарисы; один сплошной ряд их может снизить уровень шума на 4 дБ.

Большую роль при переносе звуков играет ветер: под действием ветра фронт звуковой волны прижимается к земле.

Наиболее интенсивным источником шума в городах является транспорт: электропоезда, трамваи, автобусы, грузовые автомобили. Для устранения их вредного воздействия на население целесообразно:

выносить из пределов города железные дороги и автомагистрали с интенсивным движением; не допускать трамвайного движения во всех зонах города, кроме промышленной;

отделять проезжую часть улицы от зданий газонами и зелеными насаждениями.

Средний уровень силы уличного шума на

краю проезжей части зависит от количества проходящих автомашин в единицу времени.

О средних уровнях уличного шума в больших городах дают представление результаты многочисленных измерений, проведенных на краю проезжей части улиц, расположенных в разных частях города, которые даются на л. XLII, рис. 3.

В результате измерения действительных уровней шума в Москве были установлены следующие средние расчетные уровни силы уличного шума, которые могут приниматься исходными при планировке городских кварталов:

магистраль и площади с интенсивным движением всех видов транспорта — 85 дБ;

районные улицы в жилых кварталах с автобусным и автомобильным движением — 75 дБ;

улицы жилых кварталов с преимущественно легковым автобусным движением — 70 дБ.

Между тем по гигиеническим требованиям допускаемый уровень шума у наружной стены фасадов жилых зданий не должен превышать уровней, указанных в табл. II.20. Из сопоставления расчетного и допускаемого уровней силы уличного шума возникает необходимость ослабления шума в зоне расположения жилых зданий. Это обеспечивается шумозащитной зоной с зелеными насаждениями между проезжей частью улицы и зданиями.

Для ориентировочного определения ширины шумозащитной зоны в жилой застройке пользуются графиком, приведенным л. XLII, рис. 4. Принимая за эталон расстояние от фасада здания до источника шума d , равное обычно 3 м, можно определить ослабление шума как функцию от удаленности фасада здания до проезжей части улицы.

Пример. Требуется определить ослабление шума при удалении фасада от края проезжей части улицы на 30 м.

Удаленность фасада от края проезжей части d выражаем через эталонное расстояние d , равное 3 м; по оси абсцисс находим расстояние, равное 10 d , т. е. равное $10 \cdot 3 = 30$ м. По координате, соответствующей 10 d , находим, что ослабление шума составляет 20 дБ. Если принять уровень силы шума, возбуждаемого автомашинами, равным 75 дБ, то при удалении фасада от проезжей части на 30 м уровень силы шума у здания будет $75 - 20 = 55$ дБ.

При решении подобных задач существенную роль играют зеленые насаждения. На л. XLII, рис. 5 приводятся измеренные уровни силы шума при отсутствии и наличии зеленых насаждений; они показывают, что в среднем зеленые насаждения и газон заметно снижают уровень силы шума. Это позволяет уменьшать расстояние между зданиями и проезжей частью улицы.

Уровни шума при работе лифтов

Источники шума	Уровни шума в дБ
Движение кабины в шахте	60—65
Хлопанье шахтной дверью	78—75
Работа лебедки и мотора (в машинном отделении)	85—78
Работа контакторов	90

Выбранная планировка и застройка городских кварталов оказывает большое влияние на звуковой режим во внутриквартальном пространстве, которое используется как зона отдыха. В этом отношении свободная, открытая планировка кварталов и широкое применение зеленых насаждений имеют большие преимущества перед периметральной застройкой. Использование зданий как экранов, защищающих внутриквартальные пространства от шума улицы, не должно сопровождаться ухудшением гигиенических условий в жилых помещениях с окнами, выходящими на улицу. На л. XLII, рис. 6 приводится зависимость ослабления шума от расстояния между источником шума и зданиями-экранами, имеющими различную высоту¹.

Соотношение между площадью квартала, достаточно защищенной от шума, и общей его площадью зависит от размеров квартала и приближенно оценивается коэффициентом k_a . Значения этого коэффициента в зависимости от площади квартала приводятся на л. XLII, рис. 7.

Характер кривых значений k_a свидетельствует о том, что в небольших кварталах зона с неблагоприятным звуковым режимом составляет до 50% от площади квартала.

Радикальным средством для создания тишины в городских кварталах является расположение дорог с интенсивным автомобильным движением вне жилой застройки.

На л. XLII, рис. 8 приводятся схемы рациональной планировки кварталов, в которых обеспечиваются допустимые уровни шума в жилых помещениях и внутри квартала.

При прохождении автомобильных дорог через территорию, занятую жилыми и культурно-бытовыми зданиями, целесообразно вдоль дорог создавать звукоотражательные барьеры в виде торговых или вспомогательных зданий, а также земляных валов; в ряде случаев рекомендуется углублять полотно дороги на 1—1,5 м по отношению к уровню жилой застройки.

Не менее велика роль архитектурно-планировочных мер при планировке зданий. Основными источниками шума в типовых секциях жилого дома являются: лифты, лестничные клетки и сети инженерного оборудования жилого дома (мусоропроводы, система центрального отопления, водоснабжения и канализации). Данные об уровнях шума, возникающего при работе лифта, приводятся в табл. II.21.

Влияние уровней шумов, возникающих при работе лебедки, мотора и контакторов, зависит от места расположения машинного отделения: сверху над шахтой или в подвале; в звукоизоляционном отношении целесообразно машинное отделение располагать в подвальном этаже.

На л. XLII, рис. 9, а приводится пример неправильного расположения лифта и лестничной клетки в типовой секции жилого дома. Вспомогательные помещения (кухни, санитарные узлы, кладовые) в этой секции не используются для защиты жилых помещений от шума, возникающего в лестничной клетке при движении людей, а также при работе лифта.

Неприятным источником шума в кварталах является мусоропровод (хлопанье крышками, удары спускаемых твердых предметов о стенки, трубы и т. д.). Измерения показали, что на первом этаже многоэтажных зданий, на расстоянии 1 м от загрузочного клапана, шум, возникающий от ударов падающего мусора о стенки шахты, достигает 60—64 дБ, а удар крышки клапана при закрывании — 68 дБ. На л. XLII, рис. 10 приводятся неудачные в звукоизоляционном отношении примеры расположения мусоропроводов в квартирах.

Мусоропроводы целесообразно располагать в лестничной клетке; в этом случае мусоропровод обслуживает группу квартир.

Для устранения шума целесообразно спальни и детские комнаты в квартирах располагать окнами во двор или сад.

Классы в школах необходимо изолировать от внутренних дворов, гимнастических залов, кухонь, а также от производственных помещений, предназначенных для изучения трудовых процессов.

При планировке помещений в больницах необходимо надежно изолировать от шума палаты, предоперационные и операционные.

При планировке промышленных зданий шумные помещения надо объединять в один узел, изолированный от тихих помещений глухими стенами или вспомогательными помещениями (кладовыми, санитарными узлами, ко-

¹ Точный метод расчета уровня шума при экранировании изложен в книге «Борьба с шумом». Госстройиздат, 1964

ридерами и т. п.). При расположении шумных узлов в многопролетных производственных помещениях источники интенсивного шума необходимо изолировать от остального помещения глухими перегородками или кожухами.

3. Способы передачи звука через ограждение

При решении задачи звукоизоляции помещений приходится иметь дело с двумя видами звука: воздушный, распространяющийся в воздухе, и ударный, передающийся по конструкциям зданий и возникающий при всякого рода воздействиях на них.

Комплекс мер по защите помещений от воздушного и ударного звука должен обеспечить снижение уровней силы обоих видов шума до допускаемых нормами уровней.

Передача воздушного звука через ограждения происходит:

а) непосредственно через поры и неплотности в сопряжениях различных ограждений;
б) через колебания ограждений под воздействием звуковых волн;

в) косвенным путем через так называемые «мосты» звука, т. е. наиболее слабые в звуковом отношении участки ограждений.

Передача звука через неплотности наблюдается как в местах сопряжения различных ограждений (перегородок с перекрытиями), так и в створах окон и дверей.

Существенной является передача звука вследствие колебаний ограждений, возникающих под воздействием звуковых волн. Характер возникающих при этом колебаний ограждения зависит от его массы и жесткости, практически — от размеров и веса ограждения и способов его сопряжения с другими конструкциями здания.

Косвенная передача звука наблюдается в случаях, когда в ограждениях имеются слабые в звукоизоляционном отношении места. На л. XLIII, рис. 1 приводятся примеры некоторых видов косвенной передачи звука через ограждения.

Роль косвенной передачи звука возрастает в тех случаях, когда основное ограждение в помещении будет более тяжелым и жестким по сравнению с другими прилегающими к ним ограждениями, или когда основная конструкция ограждения значительно более совершенна в звукоизоляционном отношении. Нередко косвенная передача шума может резко уменьшать звукоизолирующий эффект основных ограждений.

Применяемые в настоящее время облегченные конструкции ограждений (с пустыми,

Лист XLIII КРИТЕРИИ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ

Рис. 1. Примеры косвенной передачи звука в соседнее помещение

Рис. 2. Схема камер звукоизоляции для экспериментального определения звукоизолирующей способности перегородок и стен

1 — камера высокого уровня звука; 2 — то же, низкого уровня; 3 — испытываемая перегородка; 4 — громкоговорители; 5 — микрофон

Рис. 3. Частотная характеристика звукоизолирующей способности перегородки от воздушного шума

Рис. 4. Три частотных диапазона поведения акустически однородных ограждений при оценке звукоизоляции

I — характеризуется наличием резонансных частот, которые обычно лежат ниже нормируемого диапазона частот и могут не учитываться; II — зависит в основном от массы ограждения; III — характеризуется эффектом волнового совпадения

Рис. 5. Диаграмма для определения критической частоты колебания акустически однородного ограждения в зависимости от его толщины

1 — сталь или алюминий; 2 — фанера; 3 — бетон; 4 — асфальт; 5 — легкий пористый бетон

Рис. 6. Схема, показывающая изгибные колебания пластины и условия появления эффекта волнового совпадения. Направление падающей волны определяется углом θ , образуемым с направлением отраженной волны

Рис. 7. График для определения звукоизолирующей способности ограждения в зависимости от произведения частоты колебания звука и веса ограждения в кг/м^2

Рис. 8. Характеристика звукоизолирующей способности одной из перегородок (на основе проведенного расчета)

Рис. 9. Схемы междуэтажного перекрытия «плавающего» типа

A — со сплошной упругой прокладкой; Б — с упругой прокладкой в виде полос; 1 — чистый пол; 2 — плита (бетонная, шлакобетонная и т. д.); 3 — упругая прокладка; 4 — несущая плита

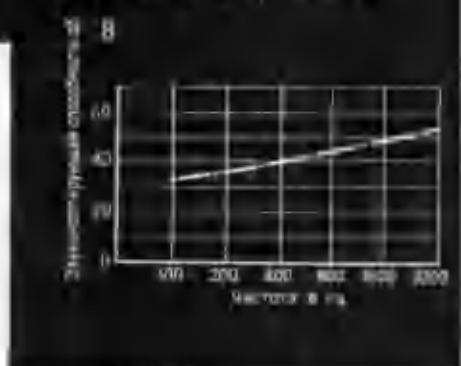
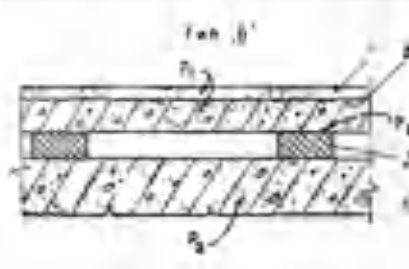
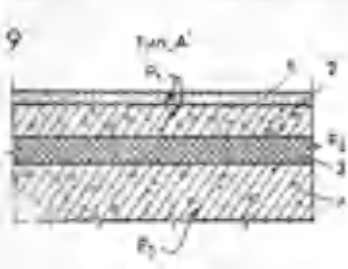
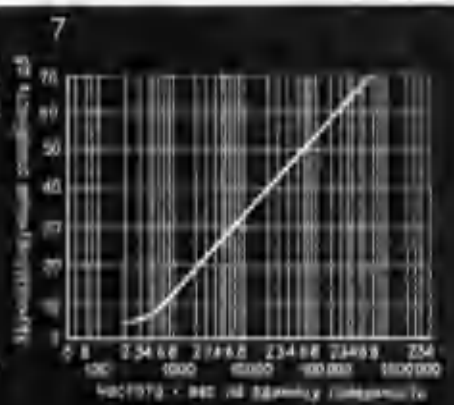
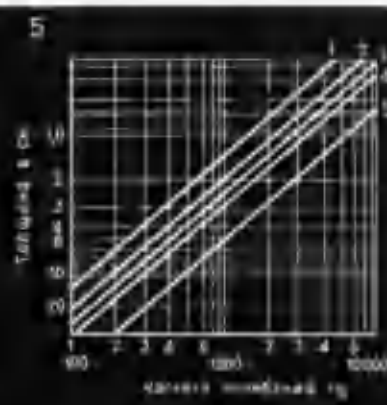
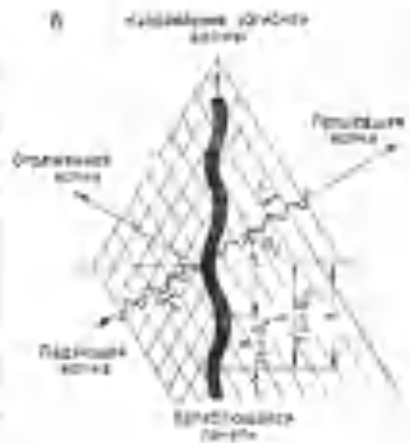
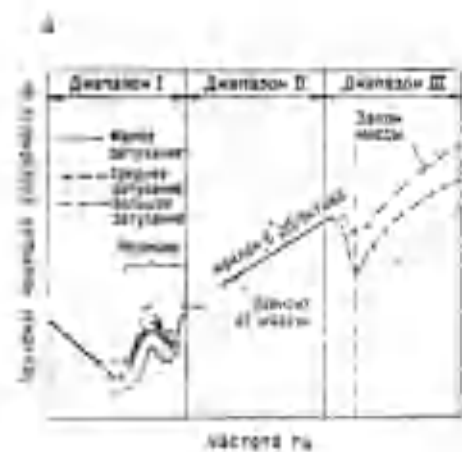
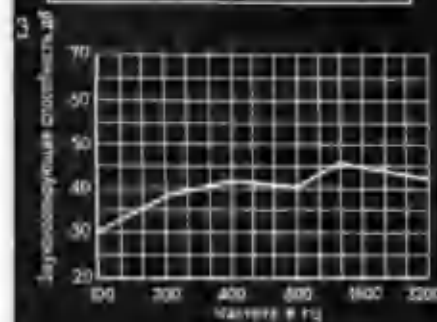
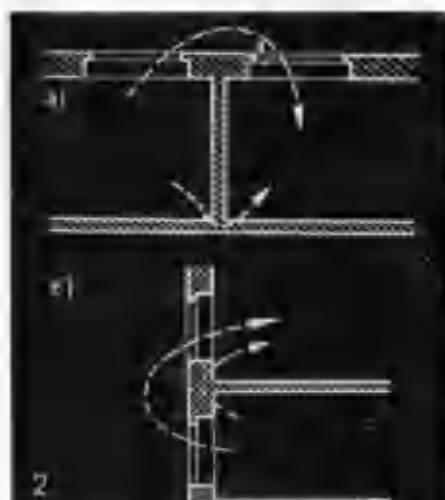
пористыми и упругими прокладками) обладают различной способностью задерживать звуки разной частоты. Поэтому условились звукоизоляцию помещений определять для следующих полос спектра: 75—150; 150—300; 300—500; 600—1200; 1200—2400 и 2400—4800 гц . Средние геометрические частоты для указанных полос спектра соответственно составляют 100; 200; 400; 800; 1600 и 3200 гц^* .

4. Звукоизоляция от воздушного шума

Степень ослабления уровня силы звука ограждением, характеризующая его звукоизолирующую способность от воздушного звука R , определяется как десятикратный логарифм отношения квадратов звукового давления от падающего на ограждение звука к прошедшему через него звуку, т. е.

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{P_i}{P_t} \text{ дБ}, \quad (\text{II.44})$$

* Подробный расчет звукоизолирующей способности согласно «Методическим указаниям по расчету звукоизоляции однослойных ограждений от воздушного шума» (1963 г.) ведется на частотах 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 640, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3200 гц , т. е. в частотных интервалах шириной $1/3$ октавы.



где τ — коэффициент звуковой проницаемости;
 P_i — звуковое давление на ограждение от падающей звуковой волны;
 P_t — звуковое давление прошедшей через ограждение звуковой волны.

Так как определение звукового давления связано с необходимостью применения точной измерительной аппаратуры, на практике звукоизолирующую способность ограждения от воздушного шума определяют по формуле

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A}, \quad (\text{II.45})$$

где L_1 — уровень силы звука (или звукового давления) в помещении с источником шума;

L_2 — уровень силы звука (или звукового давления) в изолируемом помещении;

A — эквивалентная площадь звукопоглощения в изолируемом помещении; определяется из измеренного в нем времени реверберации;

S — площадь стены или перегородки между помещениями.

В общем случае звукоизолирующая способность ограждений для звуков разной частоты определяется экспериментальным путем в камерах звукоизоляции. Камеры звукоизоляции, схема которых приводится на л. XLIII, рис. 2 состоят:

а) из камеры высокого уровня КВУ, в которой находится мощный источник звука (звуковой генератор);

б) из камеры низкого уровня КНУ, в которой располагается приемник звуковой энергии — микрофон;

в) из образца испытываемого ограждения, который заполняет проем в перегородке, разделяющей камеры.

Полученные показатели звукоизолирующей способности ограждения для звуков различной частоты оформляются в виде частотной характеристики, схема которой приводится на л. XLIII, рис. 3.

Частотные характеристики звукоизоляции от воздушного (и ударного) звука обычно строятся в $1/3$ октавных полосах в диапазоне от 100 до 3200 гц.

По конструктивному признаку ограждения делятся: на акустически однородные, отдельные и слоистые. Акустические однородные ограждения могут состоять из нескольких различных материалов, связанных между собой по всей поверхности (например, оштукатуренная с двух сторон кирпичная стена) или имеющих жесткие связи (например, стена с небольшими пустотами).

Звукоизолирующая способность акустически однородного ограждения зависит от частотного диапазона падающих на него звуковых волн XLIII, рис. 4 и определяется:

а) в первом диапазоне — жесткостью ограждения и резонансными явлениями, возникающими в нем при совпадении собственных колебаний ограждения с звуковыми;

б) во втором диапазоне — массой (весом) ограждения;

в) в третьем диапазоне — эффектом волнового совпадения.

У большинства акустически однородных ограждений, применяемых в современном строительстве, резонансная частота ниже так называемой критической частоты¹, которая для разных ограждений приводится на л. XLIII, рис. 5.

Основное значение для звукоизоляции акустически однородных ограждений имеют две области частот, а именно: область, в которой решающее значение имеет его масса, и область, в которой возникает волновое совпадение. Звукоизолирующая способность таких ограждений определяется по весовому закону и приводится в табл. II.22.

Таблица II.22

Зависимость звукоизолирующей способности ограждения R от его веса

Вес ограждения в кг/м ²	10	20	30	50	80	100	200	300	400	500	1000
R в дб	27	31	33	38	39	40	44	47	50	51	54

В нашей практике для приближенной оценки ограждений пользуются средней звукоизолирующей способностью R_{cp} , которая определяется по формуле

$$R_{cp} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}, \quad (\text{II.46})$$

где R_1, R_2, R_n — звукоизолирующая способность ограждения на разных полосах спектра;

n — количество полос спектра.

Расчетные формулы имеют следующий вид для легких ограждений весом менее 200 кг/м²

$$R_{cp} = 13 \lg P + 13 \text{ дб}; \quad (\text{II.47})$$

для тяжелых ограждений весом более 200 кг/м²

$$R_{cp} = 23 \lg P - 9 \text{ дб}. \quad (\text{II.48})$$

На звукоизоляционные качества легких ограждений (весом 30—100 кг/м²) решающее влияние оказывают изгибные волны, возникающие в них под действием падающих звуковых волн (л. XLIII, рис. 6). Изгибные волны, трансформируясь в воздушные, могут резко снижать звукоизолирующую способность ограждения.

¹ Критическая частота — частота, при которой длина изгибной волны λ_n в панели равна длине звуковой волны λ_n , падающей на панель.

Критическая частота для некоторых ограждений

Стены и перегородки	Толщина в см	Вес без штукатур- ки в кг/м ²	Критиче- ская частота в гц
Кирпичные	65	110	215
	120	200	115
	250	450	55
Бетонные	50	110	280
	100	220	140
	200	440	70
Из твердых волокнистых плит	4	4	9000
	6	6	6000
	10	10	3500

Механические колебания оборудования и машин, равно как и ударные воздействия, могут вызывать в перекрытиях изгибные волны, которые, передаваясь стенам и перегородкам, могут служить источником воздушного шума. Уровень передаваемого таким образом шума зависит от частоты колебаний, веса ограждения, угла падения звуковых волн, а также от конструкции и способов сопряжения элементов ограждения.

Зависимость звукоизолирующей способности акустически однородного ограждения от произведения частоты и веса ограждения при обычных углах падения звуковых волн, наблюдающихся в натурных условиях, приводится на л. XLIII, рис. 7.

Эффект волнового совпадения наблюдается в случае, когда вынужденные волны, падающие на ограждение под углом θ длиной $\frac{\lambda_n}{\sin \theta}$, оказываются равными длине собственной изгибной волны λ_n в ограждении при той же частоте f . В этом случае $\frac{\lambda_n}{\sin \theta} = \lambda_n$. Умножив обе части выражения на f , имеем $\frac{C}{\sin \theta} = C_n$, где C — скорость распространения звука в воздухе; C_n — то же, в ограждении.

Угол, при котором происходит явление волнового совпадения, называется углом совпадения. Для определенного угла частота, при которой происходит волновое совпадение, называется частотой совпадения.

В диапазоне критической частоты звукоизолирующая способность ограждения резко снижается: при этом с увеличением толщины ограждения снижение его звукоизолирующей способности перемещается в сторону низких частот.

В табл. 11.23 приводятся значения критической частоты для некоторых ограждений.

Из таблицы нетрудно установить, что для устранения волнового совпадения в бетонных стенах и перегородках на частоте ниже 140 гц необходимый вес их должен быть не менее 220 кг/м².

Снижение звукоизолирующей способности ограждения вследствие волнового совпадения начинается от критической частоты, которая определяется по формуле

$$f_{кр} = \frac{C^2}{1,8 C_n \delta}, \quad (11.49)$$

где C_n — скорость распространения продольных звуковых волн в материале ограждения в см/сек;

δ — толщина ограждения в см.

Из сказанного следует, что при определении звукоизолирующей способности легких ограждений нельзя пользоваться формулой (11.47). В этих случаях необходимо определять частотную характеристику звукоизолирующей способности ограждений (л. XLIII, рис. 8).

Расчет звукоизоляции проектируемого однородного ограждения от воздушного шума состоит в построении частотной характеристики звукоизолирующей способности этого ограждения, определении показателя звукоизоляции (E_n) и сравнении его с нормируемым показателем звукоизоляции. Показатель звукоизоляции ограждения представляет собой выраженное в децибелах смещение по вертикали нормативной кривой по отношению к измеренной (или вычисленной) частотной характеристике для достижения требуемой нормы звукоизоляции в пределах допустимого отклонения.

Подробно метод расчета изложен в книге В. Н. Никольского и В. И. Заборова «Звукоизоляция крупнопанельных зданий», Стройиздат, 1964.

Акустически однородные ограждения имеют обычно значительный вес. Для облегчения и повышения звукоизоляционного качества применяют отдельные и слоистые ограждения.

Звукоизоляционное качество перегородки с несвязанными между собой двумя панелями зависит от веса панели, толщины воздушной прослойки между панелями, критической частоты каждой панели, от резонанса всей конструкции, а также от углов падения звуковой волны. Наименее целесообразным в звукоизо-

ляционном отношении является ограждение из двух жестких стенок одинакового веса.

На звукоизолирующую способность отдельных ограждений большое влияние оказывают собственные частоты каждой из стенок ограждения. Звукоизолирующая способность раздельной стены будет выше, чем у акустически однородной того же веса только в диапазоне частот, превышающих собственную частоту ограждения в целом. Из этого следует, что собственная частота раздельного ограждения должна быть по возможности низкой.

Собственная частота колебаний раздельного ограждения определяется по формуле

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{\delta}} \sqrt{\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2}}, \quad (\text{II.50})$$

где δ — толщина воздушной прослойки в см;

P_1 и P_2 — вес стенок ограждения в кг/м^2 .

Наибольшая звукоизолирующая способность раздельных ограждений обеспечивается при стенках различной толщины (примерно в 2 раза) или осуществляемых из разных по весу материалов.

Звукоизолирующая способность раздельного ограждения при частотах ниже собственной частоты колебаний одной из стенок определяется его массой и мало отличается по звукоизоляционным свойствам от акустически однородного ограждения.

Значительное улучшение звукоизолирующей способности раздельного ограждения обеспечивается при применении хотя бы одной гибкой стенки (например, из древесно-стружечных плит, сухой гипсовой штукатурки и т. п.). Такие ограждения обладают пониженной способностью излучать звуковую энергию. Объясняется это образованием в гибкой обшивке изгибных волн меньшей длины по сравнению с жесткой стенкой. Благодаря этому звуковая энергия, прошедшая через жесткую стенку, претерпевает изменения тем большие, чем большей гибкостью обладает обшивка. Эффект звукоизоляции при гибкой обшивке зависит от веса обшивки и толщины воздушной прослойки, связанных формулой

$$P\delta \geq 50 \text{ кгсм/м}^2. \quad (\text{II.51})$$

При наличии в ограждении двух гибких обшивок взаимосвязь между весом обшивки и толщиной воздушной прослойки определяется по формуле

$$P\delta \geq 100 \text{ кгсм/м}^2. \quad (\text{II.52})$$

На звукоизолирующую способность раздельных ограждений большое влияние оказы-

вает конструкция их сопряжений с несущими конструкциями здания. Это влияние с особой силой сказывается на высоких частотах.

Существенное влияние на звукоизолирующую способность раздельных и слоистых ограждений оказывает характер связи панелей между собой по периметру. На частотах выше критической наличие связи по периметру панелей значительно снижает звукоизолирующую способность двух- и многослойных ограждений вследствие косвенной передачи звука путем перехода изгибных волн из одной панели в другую через связи по периметру.

Средняя звукоизолирующая способность ограждений с воздушной прослойкой определяется по следующим формулам:

при весе обеих стенок до 200 кг/м^2

$$R_{\text{ср}} = 13,5 \lg P + 13 + \Delta \delta \delta; \quad (\text{II.53})$$

при весе обеих стенок более 200 кг/м^2

$$R_{\text{ср}} = 23 \lg P - 9 + \Delta \delta \delta. \quad (\text{II.54})$$

Звукоизолирующий эффект воздушной прослойки зависит от ее толщины δ и приводится в табл. II.24.

Таблица II.24

Звукоизолирующий эффект воздушной прослойки в ограждении раздельного типа

Толщина воздушной прослойки δ в см	3	4	5	6	8	10
Δ в $\delta \delta$	1	3	4,5	5,5	6,5	7

5. Звукоизолирующая способность дверей и окон

Проходящая через большие отверстия в стенах и перегородках звуковая энергия пропорциональна площади проема. Снижение уровня силы шума, проходящего из шумного помещения через проем в соседнее, практически определяется по формуле

$$\Delta L = 10 \lg \frac{A}{S}, \quad (\text{II.55})$$

где A — полное звуковое поглощение изолируемого помещения;

S — площадь открытого проема.

Пример. Требуется определить уровень силы шума в помещении при следующих исходных данных:

а) уровень силы звука в шумном помещении $L_1 = 76 \text{ дБ}$;

б) площадь открытого проема — 10 м^2 ; полное звуковое поглощение изолируемого помещения 100 м^2 . По формуле (II.55) определяем снижение уровня силы звука

$$\Delta L_1 = 10 \lg \frac{100}{10} = 10 \text{ дБ}.$$

Таким образом, уровень силы звука в изолируемом помещении будет

$$L_2 = L_1 - 10 = 75 - 10 = 65 \text{ дб.}$$

Двери и окна являются наиболее слабыми в отношении звукоизоляции элементами здания. Средняя звукоизолирующая способность обычных дверей определяется их весом и конструкцией сопряжения полотна двери с обвязкой. В жилых зданиях средняя звукоизолирующая способность входной двери должна быть на 10 дб менее звукоизолирующей способности стены.

Звукоизолирующая способность дверей улучшается: при утяжелении веса дверного полотна; тщательной пригонке полотна двери к коробке проема; применении в притворах уплотняющих прокладок (из пористой губчатой резины, поролонa, фетра и др.); устройстве порога или фартука; обивке полотна двери клеенкой по войлоку с напуском ее на дверную коробку на 1—2 см.

Повышение звукоизолирующей способности окон достигается: при применении конструкции остекления, обладающего малой воздухопроницаемостью (например, из пустотелых стеклянных блоков, стеклянных плиток и т. п.); при увеличении толщины воздушной прослойки в окнах с двойными переплетами; последняя определяется по формуле

$$P\delta \geq 100 \text{ кгсм/м}^2,$$

где P — вес 1 м² стекла в кг;

δ — толщина воздушной прослойки в см.

Таблица II.25

Средняя звукоизолирующая способность $R_{\text{ср}}$ дверей

Конструкция дверей	$R_{\text{ср}}$ в дб
Одинарная филленчатая дверь без порога	15
Шитовая дверь из склеенных реек, облицованная фанерой или твердыми древесно-волокнистыми листами толщиной 4 мм	23—21
Тяжелая одинарная дверь с тщательной герметизацией притворов и прижимного затвора	30
Двойная дверь без герметизации притворов и прижимного затвора	30
Двойная дверь тяжелой конструкции с порогом, герметизацией приборов, со звукопоглощающими материалами по периметру пространства между дверями	40

Таблица II.26

Средняя звукоизолирующая способность $R_{\text{ср}}$ окон

Конструкция заполнения проемов	$R_{\text{ср}}$ в дб
Одинарный переплет: металлический, железобетонный, деревянный со стеклом толщиной 3 мм	15
деревянный со стеклом толщиной 6 мм	20
с двойным остеклением толщиной 3 мм	25
Двойной переплет со стеклами толщиной: 3 мм при толщине воздушной прослойки 100, 200 и 300 мм	39; 43; 45
6 мм при той же толщине воздушной прослойки 100, 200 и 300 мм	40; 45; 47
Пустотелые стеклянные блоки	40

При этом целесообразно один слой стекла (внутренний) осуществлять из более толстого стекла (например, 6 см).

В случаях, когда требуется высокая звукоизоляция окон (например, в радиостудиях), применяются окна с тремя-четырьмя слоями толстого стекла; при этом средние стекла устанавливаются непараллельно крайним. Междурамное пространство в таких окнах по периметру отделяется звукопоглощающим материалом.

Средняя звукоизолирующая способность дверей различной конструкции приводится в табл. II.25, а окон — в табл. II.26.

6. Звукоизоляция от ударного шума

Акустически однородные конструкции междуэтажных перекрытий, как правило, не обладают достаточной звукоизоляцией от ударного шума. При изоляции многослойных перекрытий от ударного звука решающее значение имеет включение в конструкцию перекрытия упругих связей. Положение этих связей в конструкции перекрытия определяет влияние на его звукоизолирующую способность частоты собственных колебаний, жесткости при изгибе, а также звуковых мостиков, по которым звуковые волны передаются в соседние помещения.

Так, например, применение подвесного или подшивного потолка не обеспечивает удовлетворительной звукоизоляции от ударного шума, так как возбужденные колебания изгиба в верхнем слое перекрытия распространяются по перегородкам в изолируемое помещение, минуя нижнюю подшивку.

В зависимости от вида и места расположения упругих связей перекрытия бывают:

плавающими — при равномерном расположении связей-прокладок в виде сплошного слоя или полос;

раздельными — когда несущая плита отделяется воздушной прослойкой и упругая связь-прокладка укладывается по периметру плиты;

с подвесным потолком при наличии упругих связей (пружин, тяжей), на которых потолок подвешивается к несущим конструкциям (фермам, балкам).

Наиболее широкое применение в массовом строительстве получили перекрытия плавающего типа, в которых между несущей плитой и чистым полом укладываются упругие прокладки.

Упругие прокладки применяются в виде:

- а) однородного сплошного слоя;
- б) лент, расположенных на определенном расстоянии;
- в) многослойными из упругих листов разной плотности.

Схемы перекрытий плавающего типа даются на л. XLIII, рис. 9.

Для устранения косвенной передачи ударного звука необходимо конструкцию пола отделять от стен по периметру помещения упругими прокладками; плинтусы в этом случае должны крепиться только к полу.

Раздельного типа перекрытия, равно как и перекрытия с подвесным потолком, находят широкое применение в производственных и общественных зданиях, там где есть необходимость применять встроенного типа осветительные приборы (светящий потолок, панели, полосы). Обычно в этих случаях глухая часть потолка выполняется из звукопоглощающих плит. Такие конструкции потолка называются светоакустическими. Звукоизолирующая способность этих перекрытий определяется экспериментальным путем в камерах звукоизоляции. Частотные характеристики некоторых перекрытий с подвесным потолком приводятся на л. XLVI.

Звукоизоляция междуэтажных перекрытий характеризуется двумя показателями; первый представляет изоляцию перекрытия от воздушного шума E_a , определяемую по формулам, изложенным в п. 2; второй — изоляцию его от ударного шума E_y . Этот показатель определяется на основании измеренного или расчетного приведенного уровня силы ударного шума под перекрытием.

Частотная характеристика приведенного ударного шума L_n определяется по формуле

$$L_n = L_r - 10 \lg \frac{A_0}{A} \quad \text{дБ}, \quad (\text{II.56})$$

где L_r — активный уровень ударного шума возникающий в изолируемом помещении под перекрытием при работе стандартной ударной машины (с пятью молотками 500 г каждый, расположенными на высоте 4 см и производящими 10 ударов в 1 сек), установленной на перекрытии;

A — эквивалентная площадь звукопоглощения в изолируемом помещении; определяется из измеренного в нем времени реверберации;

A_0 — стандартная величина звукопоглощения для данного вида помещения (для жилых помещений принимается равной 10 м²).

Расчет звукоизоляции от ударного шума проектируемых перекрытий состоит в определении частотной характеристики снижения уровня ударного шума, достигаемого применением упругих прокладок под чистым полом.

Для определения снижения уровня силы ударного шума пользуются формулой

$$\Delta E_y = E_{y_1} - E_{y_2}, \quad (\text{II.57})$$

где E_{y_1} — показатель звукоизоляции перекрытия с полом;

E_{y_2} — показатель звукоизоляции несущей плиты без пола.

Зная величину ΔE_y при различной конструкции пола, а также величину E_{y_1} , можно определить величину E_{y_2} .

Приведенный уровень ударного шума под перекрытием L определяется разностью

$$L = L_n - \Delta L,$$

где L_n — приведенный уровень ударного шума под несущей плитой (настилом) при отсутствии конструкции пола;

ΔL — снижение уровня ударного шума, достигаемое конструкцией пола; оно характеризует улучшение звукоизоляции.

Частотные характеристики применяемых в настоящее время настилов для перекрытий (сплошных, многпустотных, ребристых) известны; они определены экспериментальным путем в камерах звукоизоляции. Поэтому при нормированных частотных характеристиках приведенного уровня ударного шума под перекрытием (см. л. XLIV, рис. 5) можно определить для каждой частоты нормированную величину снижения уровня шума для каждого применяемого типа настила.

Построенные таким образом кривые снижения приведенного уровня ударного шума под перекрытием соответствуют показателю звукоизоляции от ударного шума $E_y = 0$.

В табл. II.27 приводится нормированное снижение уровня ударного шума для разных типовых перекрытий.

Таблица II.27

Нормированное снижение приведенного уровня ударного шума под перекрытием, обеспечиваемое конструкцией пола (или потолка)

№ характеристики	Виды несущих плит (настилов)	Частота в гц					
		100	200	400	800	1600	3200
I	При * многоспустных и сплошных плитах весом 160—300 кг/м²	—	6	15	22	28	34
II	При сплошных плитах весом более 300 кг/м²	—	—	6	15	22	28
III	При двухслойных перекрытиях с подвесным потолком общим весом более 300 кг/м²	—	—	—	3	12	21

Определение частотной характеристики снижения ударного шума под перекрытием производится в следующем порядке.

1) Определяются веса 1 м² основных элементов перекрытия в кг: пола на упругом основании P_1 ; упругой прокладки P_2 ; несущей плиты P_3 . При подвесных потолках вес P_3 равен суммарному весу несущей плиты и подвесного потолка.

2) Соответственно типу и весу несущей плиты перекрытия выбирается нормативная частотная характеристика снижения уровня силы ударного звука.

3) Определяется величина приведенного коэффициента жесткости k упругой прокладки по формуле

$$k = \frac{E_d}{h} \text{ кг/см}^3, \quad (\text{II.58})$$

где E_d — приведенный динамический модуль упругости прокладки;

h — толщина упругой прокладки в сжатом состоянии; вычисляется по формуле

$$h = h_0 \left(1 - \frac{\sigma}{E_{ст}}\right), \quad (\text{II.59})$$

где h_0 — толщина упругой прокладки в необжатом состоянии в см;

$E_{ст}$ — статический модуль упругости прокладки в кг/см².

Данные об объемном весе, динамическом и статическом модулях упругости некоторых прокладок приводятся в табл. II.28.

Таблица II.28

Значения приведенных статического и динамического модулей упругости некоторых упругих прокладок

Материал	Объемный вес в необжатом состоянии в кг/м³	Модуль упругости	
		статический $E_{ст}$ в кг/см²	динамический E_d в кг/см²
Стекловолоконные и минераловатные плиты и маты на синтетической связке	50—150	0,2—0,5	2,5—4,5
Мягкие древесно-волоконные плиты	200	3	14
Вспученный вермикулит (нефракционный)	До 180	До 1,5	18
Поролон (пенополиуретан)	50	0,5	2,5

4) Определяется резонансная частота пола на упругой прокладке по формуле

$$f_0 = \sqrt{500 \frac{k}{P_1}}. \quad (\text{II.60})$$

5) Производится предварительный расчет снижения уровня силы ударного звука на низких частотах по формуле

$$\Delta L_1 = 40 \lg \frac{f}{f_0}, \quad (\text{II.61})$$

где f — текущая частота ударного звука, которая должна удовлетворять требованию.

$$f < f_0 \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} \text{ гц};$$

f_0 — резонансная частота пола.

Снижение уровня силы ударного звука на низких частотах характеризуется прямой с наклоном 12 дБ на октаву.

6) Определяется снижение уровня силы ударного звука на средних и высоких частотах по формуле

$$\Delta L_2 = 20 \lg \frac{f}{f_0} + 10 \lg \frac{P_1}{P_2} - 3 \text{ дБ}, \quad (\text{II.62})$$

где f — текущая частота ударного звука, которая должна удовлетворять требованию

$$f > f_0 \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}.$$

Снижение уровня силы ударного звука на средних и высоких частотах характеризуется прямой с наклоном 6 дБ на октаву.

7) На основе этих данных строится расчетная частотная характеристика звукоизоляции

перекрытия от ударного звука (л. XLIV, рис. 1). Для этого по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладываются частоты; при этом все октавы имеют равные отрезки. Отрезок, соответствующий октаве, делится на три равные части: каждая из них определяет среднюю частоту на $1/3$ октавной полосы. По оси ординат откладывается снижение уровня звука ΔL . Затем из точки M , соответствующей резонансной частоте пола f_0 , проводится прямая ΔL_1 с наклоном на 12 дБ на октаву. Прямая MB определяет частотную характеристику звукоизоляции в диапазоне низких частот. Далее из точки M , соответствующей f_0 , проводится ордината MD , равная значению второго члена формулы (II.62) $10 \lg \frac{P_1}{P_2} - 3$; численное значение ординаты определяется по графику л. XLIV, рис. 2. Из точки D проводится прямая, соответствующая значению ΔL_2 с наклоном 6 дБ на октаву.

Эта прямая определяет частотную характеристику звукоизоляции в диапазоне средних и высоких частот.

В ряде случаев бывает необходимо уточнить снижение уровня силы ударного звука в диапазоне низких частот; для этого определяют значение $\lambda = \frac{P_2}{P_1}$, которое обычно лежит в пределах от 2 до 7; в случаях, когда $\lambda \leq 2$ или ≥ 7 , значение ΔL_3 определяется по формуле

$$\Delta L_3 = 10 \lg \left[\left(\frac{1 + \lambda}{\lambda} \right)^2 + \alpha^2 \left(\alpha^2 - 2 \frac{\lambda - 1}{\lambda} \right) \right], \quad (\text{II.63})$$

где α — представляет отношение текущей частоты к резонансной частоте колебания пола, лежащего на упругой прокладке f_0 . Значение ΔL_3 может определяться по графику на л. XLIV, рис. 3.

Расчетную частотную характеристику снижения уровня ударного звука, достигаемого применением упругой прокладки, сравнивают с нормированной ΔL_n и определяют показатель звукоизоляции перекрытия от ударного шума.

Решающее влияние на звукоизоляцию ограждений оказывает качество строительных работ. При производстве работ следует особое внимание уделять заделке щелей и неплотностей, образующихся в местах сопряжения сборных деталей и различных элементов ограждающих конструкций.

Необходимо также защищать от увлажнения, пропитки растворами и механического повреждения упругие прокладки в плавающих полах.

Лист XLIV

НОРМАТИВНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рис. 1. Построение частотной характеристики на основе вычисленных составляющих для трех частотных диапазонов поведения акустически однородного ограждения

Рис. 2. График для определения величины $10 \lg \frac{P_1}{P_2} - 3$ дБ

Рис. 3. График для определения снижения уровня ударного шума для $\lambda < 2$ и $\lambda > 7$. На графике даются кривые для $\lambda = 1,5$ (верхняя), 2, 7 и 10 (нижняя).

Рис. 4. Нормативные кривые звукоизолирующей способности от воздушного шума

R' — для ограждений, испытываемых в камерах звукоизоляции при отсутствии косвенной передачи звука; R' — для ограждений в натуральных условиях при наличии косвенной передачи

Рис. 5. Нормативная кривая приведенного уровня ударного звука для ограждения, испытываемого как в камерах звукоизоляции, так и в натуральных условиях

Рис. 6. Пример определения показателя звукоизоляции ограждения от воздушного звука E_a

1 — измеренная в натуральных условиях кривая звукоизоляции ограждения; 2 — нормативная кривая звукоизоляции; 3 — сдвинутая на 4 дБ нормативная кривая в неблагоприятную сторону

Рис. 7. Пример определения показателя звукоизоляции ограждения от ударного звука E_y

1 — измеренные значения приведенного уровня ударного звука; 2 — нормативная кривая приведенного уровня ударного звука; 3 — нормативная кривая, сдвинутая в неблагоприятную сторону на 14 дБ

7. Нормативные требования к звукоизоляции ограждений

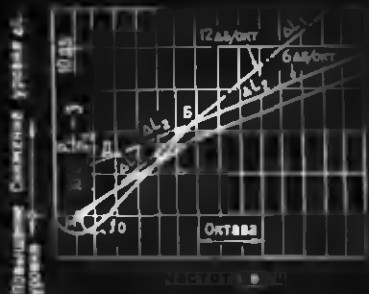
Существующие у нас нормы звукоизоляции ограждений распространяются на многоэтажные дома, гостиницы, общежития, административные здания, больницы, санатории, школы и детские учреждения.

Звукоизоляция стен и перегородок оценивается одним показателем звукоизоляции от воздушного шума E_a , который определяется расчетом или измерением на основе звукоизолирующей способности их, относимой к разным частотам звука.

Звукоизоляция междуэтажных перекрытий оценивается двумя показателями: первый показатель звукоизоляции от воздушного шума E_a и второй показатель звукоизоляции от ударного шума E_y . Оба эти показателя получают расчетом или измерениями.

Определение показателей звукоизоляции E_a и E_y производится сравнением расчетных или измеренных кривых частотных характеристик звукоизолирующей способности R и приведенного ударного шума L_n с нормативными. Нормативные кривые частотных характеристик звукоизолирующей способности приводятся на л. XLIV, рис. 4, а приведенного уровня ударного шума — на л. XLIV, рис. 5.

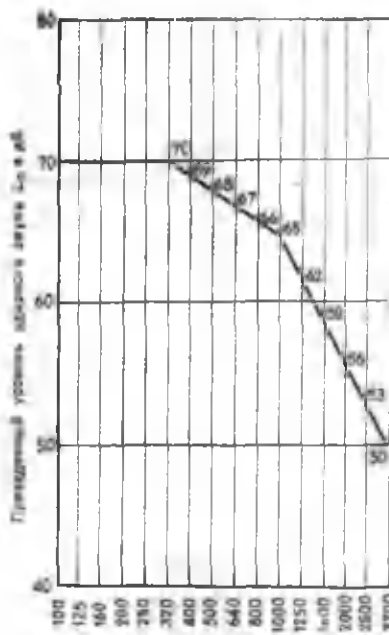
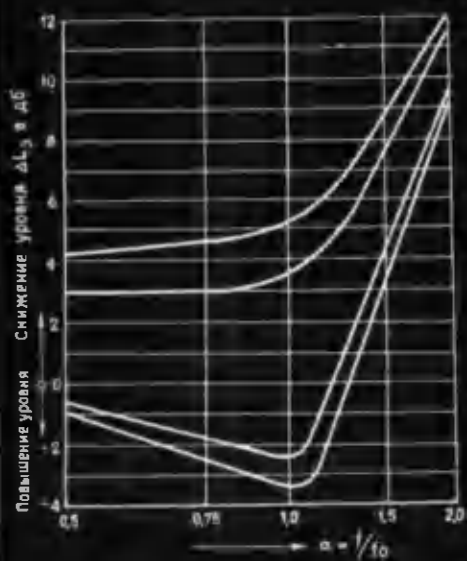
Расчетные (или измеренные) частотные характеристики R и L_n наносятся на соответствующие нормативные кривые; затем для каждой частоты вычисляются отклонения расчетных кривых от нормативных.



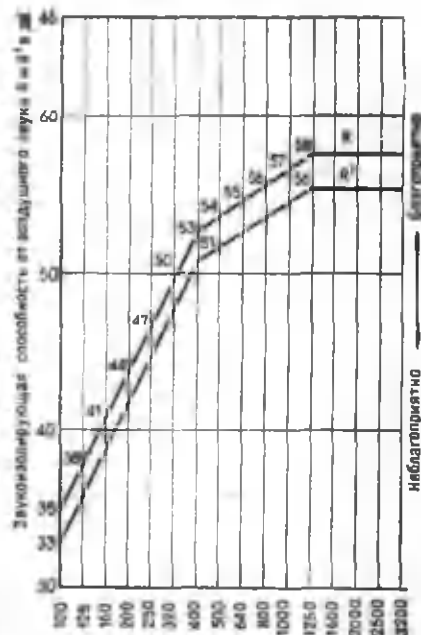
2



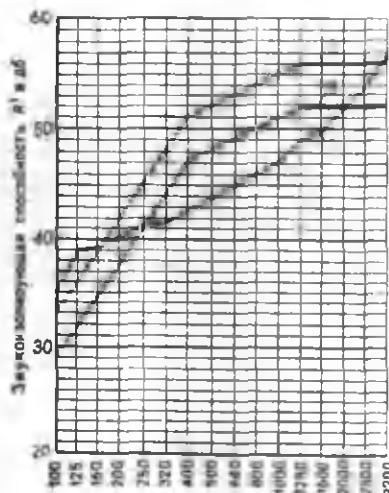
3



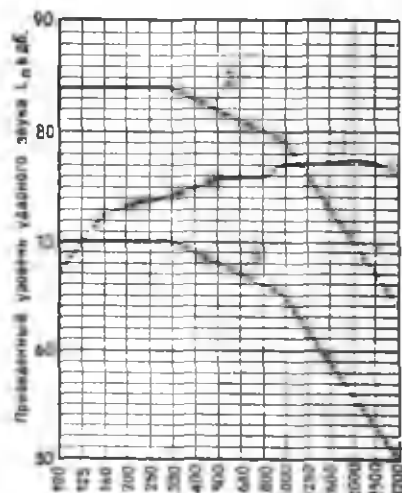
Средние частоты $\frac{1}{3}$ октавных полос



Средние частоты $\frac{1}{3}$ октавных полос



Средние частоты $\frac{1}{3}$ октавных полос



Средние частоты $\frac{1}{3}$ октавных полос

При определении показателя E_b отклонения считаются положительными, если они лежат выше нормативных кривых, и отрицательными при расположении их ниже нормативных кривых.

При определении показателя E_y отклоне-

ния считаются положительными, если они лежат ниже нормативной кривой, и отрицательными при расположении их выше нормативной кривой. При определении показателей звукоизоляции E_a и E_y берутся в расчет только отрицательные отклонения; причем отрица-

тельные отклонения на крайних частотах (100 и 3200 гц), если они имеются, берутся в половинном размере.

На основе отрицательных отклонений находится среднее неблагоприятное отклонение частотных характеристик R или L_n .

Среднее неблагоприятное отклонение представляет частное от деления вычисленного суммарного отклонения на количество полос частот, т. е. 15. В том случае, когда вычисленное среднее отрицательное отклонение равно или близко к 2 дб, показатель звукоизоляции считается равным нулю.

Если среднее отрицательное отклонение более 2 дб, нормативная кривая смещается по вертикали в худшую сторону на целое число децибел до тех пор, пока среднее отрицательное отклонение расчетной (или измеренной) частотной характеристики R или L_n не будет равным или близким к 2 дб. В этом случае целое число децибел, на которое смещена нормативная кривая, является показателем звукоизоляции.

Показатель звукоизоляции может иметь отрицательное и положительное значения. Показатель звукоизоляции E_y берется со знаком минус в тех случаях, когда расчетная (или измеренная) частотная характеристика лежит выше нормированной, и со знаком плюс, когда она расположена ниже ее.

В табл. II.29 приводятся нормированные показатели звукоизоляции ограждений в зданиях различного назначения.

Таблица II.29

Нормированные показатели звукоизоляции

Здания	Ограждения	Показатели звукоизоляции	
		E_n в дб	E_y в дб
Жилые	Стены и перегородки между квартирами	-1	—
	Стены между квартирами и лестничными клетками	-1	—
	Перегородки между жилыми комнатами и санитарными узлами одной квартиры	-5	—
	Перегородки без дверей между жилыми комнатами в квартире	-9	—
	Перекрытия между квартирами	-1	0
	Перекрытия между квартирами и подвалами, холлами	-1	0

Продолжение табл. II.29

Здания	Ограждения	Показатели звукоизоляции	
		E_n в дб	E_y в дб
Общежития, гостиницы, административные здания	Стены и перегородки между жилыми комнатами в общежитиях и номерами в гостиницах; между рабочими комнатами, кабинетами и прочими помещениями в административных зданиях	-5	—
	Перекрытия между теми же помещениями	-5	-5
Больницы и санатории	Стены и перегородки между палатами	-5	—
	Стены и перегородки, отделяющие палаты, операционные, читальные залы в санаториях от помещений общего пользования (лестничных клеток, вестибюлей и др.)	-1	—
	Перекрытия между палатами	-5	-5
	Перекрытия между операционными и другими помещениями; между палатами, кабинетами врачей и помещениями общего пользования (вестибюли, лестничные клетки и т. д.)	-1	0
Школы и учебные заведения всех типов (кроме музыкальных)	Стены и перегородки между классами в школах и аудиториях в вузах	-5	—
	Стены и перегородки, отделяющие классы и аудитории от лестничных клеток, вестибюлей и др.	-1	—
	Перекрытия между классами в школах и аудиториях в вузах	-5	-5
	Перекрытия между классами, аудиториями и вестибюлями, лестничными клетками и др.	-1	0
Детские ясли, сады	Стены и перегородки между групповыми комнатами в детских садах и между детскими комнатами в яслях	-5	—
	Перекрытия между групповыми комнатами в детских садах и детскими комнатами в яслях	-5	-5

Сравнение расчетной и измеренной звукоизолирующей способности перегородки от

воздушного шума с нормативной приводится на л. XLIV, рис. 6. Измеренная частотная характеристика звукоизолирующей способности, как это видно, лежит значительно ниже нормативной, что свидетельствует о неудовлетворительной звукоизоляции перегородки против воздушного шума. Сдвиг нормативной кривой на 4 дБ определяет показатель звукоизоляции, который сравнивают с данными табл. II.29.

Сравнение расчетного или измеренного уровня ударного шума с нормативной кривой приводится на л. XLIV, рис. 7. Расчетная частотная характеристика приведенного уровня ударного шума в данном случае лежит выше нормативной. Это свидетельство неудовлетворительной звукоизоляции междуэтажного перекрытия от ударного шума. Сдвиг нормативной кривой вверх на 14 дБ определяет показатель звукоизоляции, который сравнивается с приведенными в табл. II.29.

Измеренные частотные характеристики некоторых конструкций перегородок и дверей приводятся на л. XLV, рис. 1, а междуэтажных перекрытий на л. XLVI, рис. 1.

Пример. Требуется рассчитать изоляцию от ударного шума междуэтажного перекрытия при следующих исходных данных:

а) несущая плита толщиной 10 см и весом $P_3 = 240 \text{ кг/м}^2$;

б) упругая прокладка из древесноволокнистой плиты толщиной в сжатом состоянии 2,5 см и весом $P_2 = 2 \text{ кг/м}^2$;

в) пол — гипсоцементобетонная панель толщиной 5 см и весом 60 кг/м^2 с приклеенным слоем линолеума; таким образом, $P_1 = 62 \text{ кг/м}^2$.

1) Определяем коэффициент жесткости упругого основания

$$k = \frac{E_1}{h} = \frac{14}{2,5} = 5,6 \text{ кг/см}^3.$$

2) Находим резонансную частоту f_0 — пола на упругой прокладке

$$f_0 = 500 \sqrt{\frac{k}{P_1}} = 500 \sqrt{\frac{5,6}{62}} = 150 \text{ гц}.$$

3) Находим $\lambda = \frac{P_3}{P_1} = \frac{240}{62} = 3,9$; так как значение λ располагается между 2 и 7 ($2 < 3,9 < 7$), то снижение уровня силы ударного звука на низких частотах определяется по формуле

$$\Delta L_1 = 40 \lg \frac{f}{f_0}.$$

4) Строим расчетную частотную характеристику снижения уровня силы ударного звука. Для этого из точки M , соответствующей $f_0 = 150 \text{ гц}$, проводим прямую ΔL_1 с наклоном 12 дБ на каждую октаву;

по графику на л. XLIV, рис. 2 определяем ординату $10 \lg \frac{P_1}{P_2}$ — 3дБ, эту ординату откладываем из точки f_0 и находим точку D , из которой проводим прямую ΔL_2 с наклоном 6 дБ на октаву (л. XLIV, рис. 1).

5) Сравниваем расчетную кривую снижения уровня силы ударного звука с нормативной и определяем E_y перекрытия для разных частот¹.

8. Звукоизоляция установок вентиляции и кондиционирования

А. Способы расчета звукоизоляции систем кондиционирования и вентиляции

Современное строительство зданий и сооружений уникальных и массового характера самым тесным образом связано с применением всякого рода оборудования (энергетического, санитарно-технического, транспортного и др.), имеющего целью создание комфорта при эксплуатации.

Работа этого оборудования и механизмов является одной из причин возникновения и распространения по зданию неприятных для человека шумов, например шумов при работе систем кондиционирования и вентиляции. В ряде зданий приток или вытяжка воздуха из помещений производится мощными вентиляторами через многочисленные воздухопроводы, пронизывающие все здание. Шум особенно усиливается при неправильном расположении и конструктивном решении кондиционеров, вентиляционных камер и каналов, проникая в помещения через вентиляционные решетки. Такой шум, резко отличаясь по уровню и спектру от шумов бытового и внешнего, действует на человека особенно неприятно.

В то же время вентиляционные каналы передают из одного помещения в другое и бытовой шум, который становится особенно заметным в вечерние и ночные часы.

Работа систем кондиционирования и вентиляции, кроме того, сопровождается разнообразными колебаниями конструкций, на которых установлены вентиляторы. В весьма неблагоприятных условиях работы оказываются, в частности, междуэтажные перекрытия при установке непосредственно на них вентиляционных камер.

Амплитуды колебаний перекрытий в этом случае достигают большой величины и могут вызвать их разрушение.

Таким образом, проблема звукоизоляции помещения от шума, возникающего при работе систем вентиляции и кондиционирования, сводится к решению двух задач:

а) связанной со звукоизоляцией помещения от аэродинамического шума, передаю-

¹ Подробно расчет звукоизоляции от ударного шума изложен в книге В. Н. Никольского и В. И. Заборова «Звукоизоляция крупнопанельных зданий». Стройиздат, 1964.

2)



64



188

Рис. 1

а — схемы конструкции перегородок; б — частотные характеристики звуконизолирующей способности их

Рис. 2

а — схемы конструкции дверей; б — частотные характеристики звуконизолирующей способности дверей

Допустимая скорость движения воздуха в магистральных каналах составляет не более 5 м/сек, в отводных не более 3 м/сек и на выходе у вентиляционных решеток не более 1,5 м/сек.

Источниками шума в системах вентиляции и кондиционирования являются вентиляторы, насосы, компрессоры и электромоторы. Поэтому радикальным средством борьбы с вентиляционным шумом является применение малошумного оборудования, которое уже находит широкое применение за рубежом.

Уровень звуковой мощности шума вентилятора определяется по эмпирической формуле Е. Я. Юдина

$$L_w = \bar{L} + 25 \lg H + 10 \lg Q + 18 \text{ дБ}, \quad (\text{II.64})$$

где $\bar{L}$ — критерий шумности, позволяющий сравнить уровни звуковой мощности вентиляторов различных типов при работе их на одну и ту же сеть, т. е. при одинаковых значениях H и Q ;

H — полное давление, создаваемое вентилятором, в кг/м²;

Q — производительность вентилятора в м³/сек.

Физический критерий шумности равен разнице уровней силы шума, создаваемого при одинаковом затухании заданным вентилятором и идеальным (выбранным эталоном сравнения, у которого $Q = 1$; $H = 1$) при работе на ту же сеть одинаковой производительности. Критерий шумности не зависит от размеров вентилятора, сети, на которую он работает, плотности перемещаемого воздуха и акустических условий в помещении и является функцией только шумовой и акустической характеристик вентилятора. Он позволяет выбирать вентиляторы с наименьшим уровнем шума.

Этот критерий, следовательно, дает только сравнительную оценку количественной стороны шума и не учитывает ни громкости шума, ни его спектра.

Зависимость между уровнем шума вентилятора и его производительностью называют шумовой характеристикой вентилятора.

Практически удобно уровень шума вентилятора определять по графику на л. XLVII, рис. 1, где дается зависимость между произво-

дительностью Q , числом оборотов n и уровнем шума L вентилятора.

Спектральный состав шума вентилятора характеризуется частотной характеристикой, показывающей зависимость между уровнем силы вентилятора и частотой звука.

Спектры шума центробежных вентиляторов бывают сплошными и с резко выраженными дискретными составляющими, возникающими вследствие неоднородности воздушных потоков. Примеры спектра шума сплошного и с дискретными составляющими приводятся на л. XLVII, рис. 2.

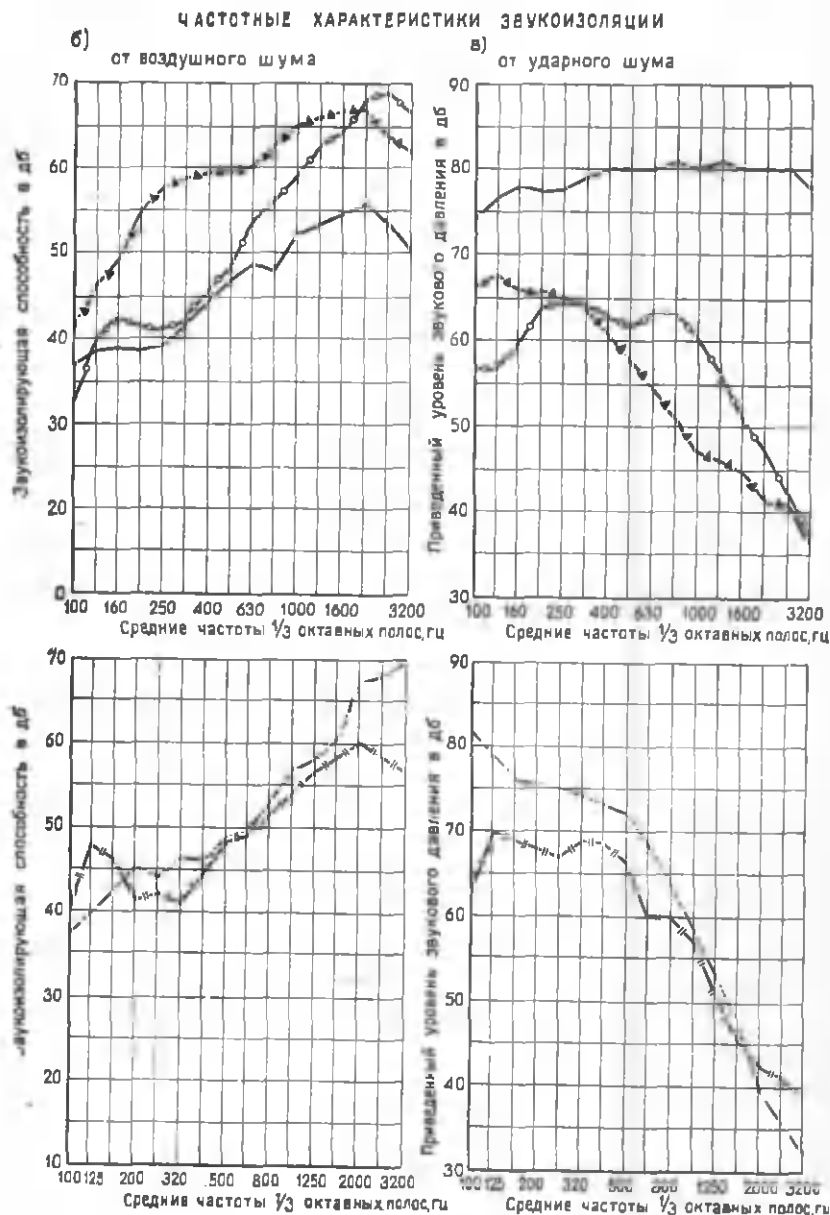
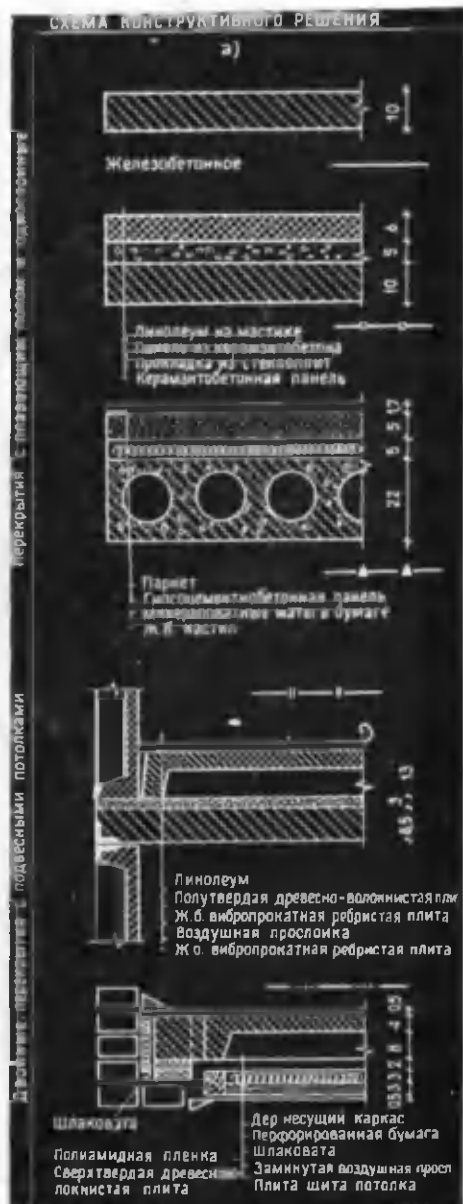
Частотная характеристика шума вентилятора зависит от числа его оборотов: высокоскоростные вентиляторы характеризуются высокочастотным шумом; для вентиляторов с небольшим числом оборотов характерен низкочастотный шум.

Частотные характеристики наиболее распространенных в практике центробежных вентиляторов незначительно отличаются друг от друга. Поэтому при расчетах звукоизоляции от вентиляционных установок пользуются следующими усредненными приближенными данными, относимыми к двигателям с числом оборотов, равным 1000 в минуту.

Полосы частот в гц	Октавы в гц					
	38—75	75—150; 150—300	300—600; 600—1200	1200—2400	2400—4800	4800—9600
Частотная характеристика шума от вентилятора в дБ	13	3; 6	9; 13	17	21	26

В большинстве случаев спектр вентиляционного шума, распространяющегося по воздуховодам, изменяется вследствие воздействия поворотов, изменения сечения воздуховодов и т. п. Поэтому характер шума, создаваемого одним и тем же вентилятором, различен в разных помещениях, обслуживаемых одной вентиляционной установкой. Учитывая эти обстоятельства, частотную характеристику действительного шума вентилятора при протяженности сети не менее 15 м ориентировочно характеризуют следующими показателями:

Полосы частот в гц	Октавы в гц					
	38—75	75—150	150—300	300—600	600—1200	> 1200
Частотная характеристика в дБ	6	2	9	32	47	62



Эти показатели относятся к вентилятору с 1000 об/мин. При другом числе оборотов частотную характеристику сдвигают пропорционально частоте; при этом число октав, на которое она сдвигается, округляется до ближайшего целого числа. Для этого пользуются следующими данными:

Пределы изменения числа оборотов в минуту	90—180	180—350	350—700	700—1400	1400—2800	2800—5600	5600—11200
Число октав, на которое сдвигается частотная характеристика в области сплошного спектра	—3	—2	—1	0	+1	+2	+3
сдвиг влево	сдвиг вправо						

Лист XLVI
ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ МЕЖДУЭТАЖНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

Рис. 1

а — схемы междуэтажных перекрытий; б — частотные характеристики звукоизолирующей способности от воздушного звука; в — частотные характеристики звукоизоляции от ударного шума

Пример. Пусть вентилятор делает 600 об/мин; в этом случае спектр надо сдвинуть на одну октаву влево. Следовательно, частотная характеристика центробежного вентилятора в первой октаве будет не 13, а 9 дБ; во второй октаве не 6, а 3 дБ.

Практически задача звукоизоляции помещений от шума систем вентиляции и кондиционирования сводится к снижению расчетного уровня шума L_p до гигиенически допускаемого уровня L_d

$$L_p - \Delta L < L_d, \quad (II.65)$$

где ΔL — снижение уровня шума, обеспечиваемое совокупностью архитектурных и конструктивных мер.

Допускаемый уровень шума при работе вентиляторов и кондиционеров обычно принимается на 10 дБ ниже по сравнению с допускаемым уровнем производственного или бытового шума.

Б. Способы снижения шума вентиляторов и кондиционеров

Существуют следующие способы снижения уровня шума на пути от источника шума до вентиляционной решетки:

а) удаление вентиляционной камеры и кондиционеров от основных помещений; это удлиняет пути, проходящие воздушным потоком, а следовательно, увеличивает поглощение звуковой энергии стенками каналов; вентиляционные камеры и кондиционеры не следует располагать над или под помещениями с допускаемым уровнем, равным или менее 40 дБ;

б) обработка внутренних поверхностей каналов звукопоглощающими материалами.

Стенки вентиляционных каналов целесообразно выполнять из бетонных, шлакоцементных, пензолитовых плит; толщина стенок канала должна обеспечивать в помещении гигиенически допускаемый уровень шума.

На основе теоретических и экспериментальных работ А. И. Беловым была установлена следующая формула для расчета снижения уровня громкости шума на прямолинейном участке вентиляционных каналов:

$$\Delta L = 1,09 \frac{\alpha l p}{F_k}, \quad (II.66)$$

где α — коэффициент звукового поглощения внутренней облицовки канала;

l — длина канала в м;

p — периметр поперечного сечения канала в м;

F_k — площадь поперечного сечения канала в м².

Величины коэффициентов звукового поглощения различных видов облицовки вентиляционных каналов для частоты 256 гц даются в табл. II.30.

Таблица II.30

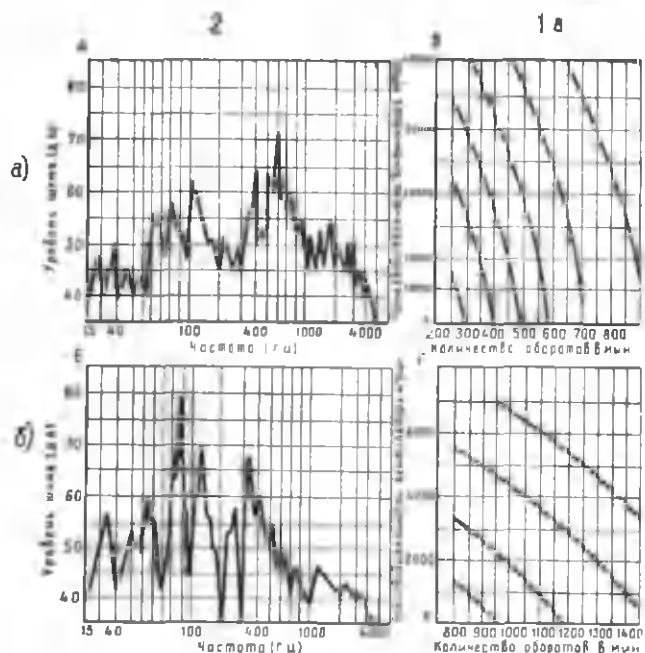
Коэффициенты звукопоглощения некоторых облицовочных материалов

Наименование материалов и конструкций	Коэффициент звукопоглощения на частоте 256 гц
Бетон и железобетон	0,01
Штукатурка:	
известковая по дроби	0,045
алебастровая по деревянной обрешетке на деревянных брусках	0,032
Акустическая цементно-пемзовая штукатурка:	
толщиной 3,4 см	0,20
2,5 см на расстоянии 5 см от стенки	0,50
то же, на расстоянии 2,5 см от стенки	0,32
Плиты:	
шлакоцементные толщиной 4—6 см	0,20
пензолитовые толщиной 2—3 см	0,20
Маты из минерального волокна:	
толщиной 15 см	0,53
2,5 см, покрытые перфорированным металлическим листом с отверстиями диаметром 1,5 мм в количестве 10 шт. на 1 см ²	0,25
Фанера толщиной 3 см, оклеенная бумагой	0,11
Хлопчатобумажная ткань, прикрепленная вплотную к стене	0,04
Воздуховоды:	
металлические	0,01
шлакоалебастровые, шлакобетонные и деревянные, оштукатуренные	0,07

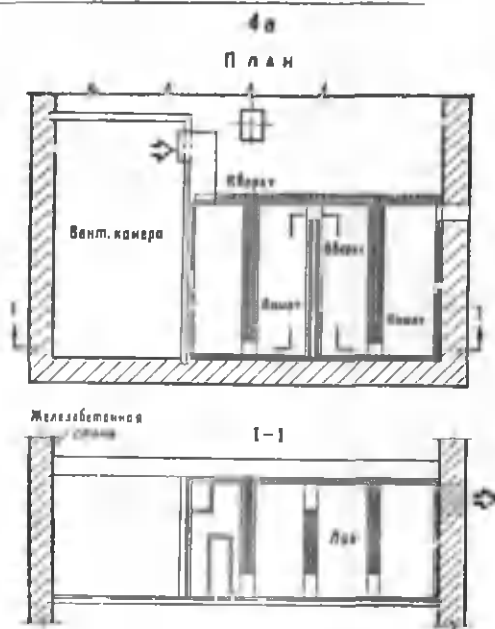
Схемы крепления облицовки к каналу даются на л. XLVII, рис. 3.

Приведенная формула позволяет установить, что степень затухания звука при прохождении в вентиляционных каналах при прочих равных условиях определяется отношением $\frac{p}{F_k}$.

Величина этого отношения увеличивается при уменьшении сечения канала. Это позволяет сделать вывод о том, что относительно большей звукоизолирующей способностью обладают каналы малого сечения, облицованные внутри материалами с высокими коэффициентами звукового поглощения для звуков всех частот.

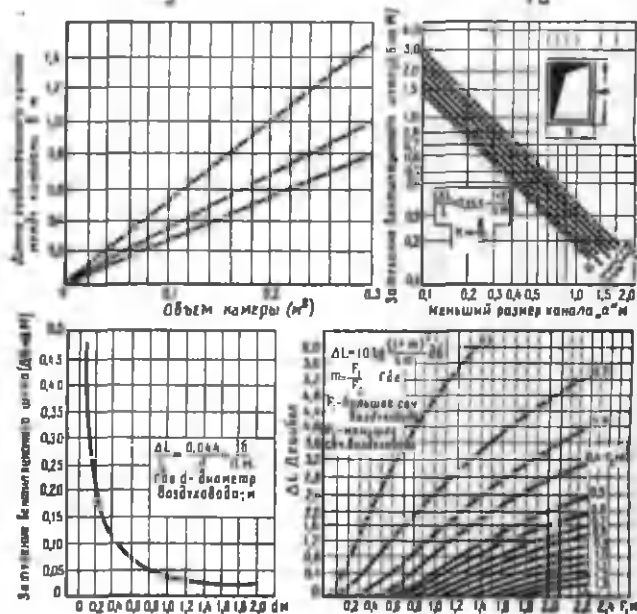


15



5

7а



75

В. Виды глушителей шума

Если применение звукопоглощающей облицовки и выбранные сечения вентиляционных каналов не создают в помещении необходимого снижения уровня шума от вентиляторов до допустимого уровня, то необходимо применять специальные устройства в виде глушителей шума.

Различают следующие виды глушителей:

- а) камерные;
- б) ячейковые;
- в) пластинчатые.

Камерного типа глушители (л. XLVII, рис. 4,а) обычно состоят из нескольких камер, соединенных между собой при помощи соединительных отверстий, сечение которых равно сечению канала. Внутренние поверхности та-

Лист XLVII
ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ УСТАНОВОК
ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

Рис. 1. График для определения уровня шума центробежных вентиляторов при заданной производительности и количестве оборотов

a — типа «Сирокко» № 8; *b* — то же, № 3. Кривые для «Сирокко» № 8 показывают уровни шума 105 (верхняя); 100; 95; 90; 85 и 80 (нижняя) дБ. Кривые для «Сирокко» № 3 показывают уровни 90 (верхняя), 85, 80 и 75 (нижняя) дБ

Рис. 2. Примеры спектра шума

a — сплошного; *b* — с резко выраженными дискретными составляющими

Рис. 3. Схемы вентиляционного канала прямоугольной формы и крепления облицовки к стенкам канала

Рис. 4. Виды глушителей шума

a — камерного типа; *b* — ячеякового типа; *в* — пластинчатые

Рис. 5. График для определения размеров соединительных каналов и объема камеры при разной звукопоглощающей отделке камеры

Верхняя прямая — звукоизоляция на частоте 35 гц и выше; средняя — то же, 42 гц и выше; нижняя — 50 гц и выше

Рис. 6. Пластинчатые глушители, обеспечивающие заглушение шума на высоких и низких частотах

Рис. 7. График для определения затухания шума на прямолинейных участках канала

a — с сечением прямоугольной формы; *b* — круглой

Рис. 8. График для определения затухания шума в местах внезапного изменения сечения воздуховодов

ких камер облицовываются звукопоглощающими материалами.

Отверстия между камерами целесообразно располагать в шахматном порядке. Следует отметить, что заглушение шума в камерах происходит неравномерно для разных частот спектра шума. В большей степени поглощаются при этом составляющие шума, которые обладают высокими частотами.

Снижение уровня шума в одной камере определяется по формуле

$$\Delta L = 10 \lg \frac{\Sigma \alpha S}{F_k}, \quad (II.67)$$

где F_k — площадь сечения воздуховода;

S — площадь внутренних поверхностей камеры;

α — средний коэффициент звукового поглощения в камере.

При наличии m камер снижение уровня громкости шума определяется по формуле

$$\Delta L = m 10 \lg \frac{\Sigma \alpha S}{F_k}. \quad (II.68)$$

Практически бывает очень важно установить, будут ли заглушаться в камере звуки низкой частоты и до какой именно. Эта предельная частота звука получила название граничной частоты.

Для ориентировочного определения граничной частоты поглощаемого камерой шума пользуются формулой

$$f_0 = 115 \sqrt{\frac{VF_k}{V}}, \quad (II.69)$$

где F_k — площадь сечения воздуховода или отверстия между камерами в m^2 ;

V — объем камеры в m^3 .

Задаваясь граничной частотой шума, можно определить необходимые сечения соединительных каналов и объем камеры; применяя затем соответствующую внутреннюю облицовку внутренних поверхностей камер, можно достигнуть снижения уровня громкости шума на всем желательном спектре частот. Выбор необходимых размеров соединительных каналов и объема камер можно производить согласно графику, приведенному на л. XLVII, рис. 5.

Ячеяковые глушители характеризуются большим количеством ячеек небольших размеров, общее сечение которых равно сечению запроектированного воздуховода.

Снижение уровня громкости шума будет эквивалентным снижению шума одной ячеякой, образующей глушитель. Сказанное позволяет для расчета заглушения шума при помощи глушителей пользоваться формулой (II.66). Для снижения уровня громкости шума низких частот весьма целесообразно применять так называемые пластинчатые или щелевидные глушители. Вставляемые в расширенную часть воздуховода пластины обладают достаточно высоким коэффициентом звукового поглощения на низких частотах. Хороший результат дает также резонансный способ глушения шума при применении пластин из листов кровельного железа, схема конструкции которых приводится на л. XLVII, рис. 6. Стенки такого глушителя состоят из металлических листов, собранных в виде каскет. Под листы по периметру их проложен слой ваты, которая создает трение и тем самым расширяет диапазон эффективно поглощаемых частот. При таком устройстве глушителя получается упругая система, в которой роль упругой связи выполняет воздух между листами, имеющий резонансную частоту колебаний. Близкие к этой частоте составляющие шума будут приводить упругую систему в колебательное движение; в результате звуковая энергия будет переходить в механическую.

Снижения уровня громкости шума на всем диапазоне частот можно достигнуть чередованием ячеястого глушителя, эффективно работающего на участке звукового спектра частот (от 300 до 400 гц) с пластинчатым глушителем, поглощающим низкочастотные составляющие шума.

Пластинчатые глушители могут применяться и для глушения всех составляющих частот спектра; в этом случае рекомендуется $2/3$ дли-

ны глушителя занимать заполненными ватой кассетами, предназначенными для глушения звуков высокой частоты (боковые стенки этих кассет состоят из перфорированных стальных листов), и $1/3$ длины кассетами, предназначенными для глушения звуков низкой частоты.

Пластинчатые глушители нашли широкое применение в строительстве ряда современных зданий: Московского государственного университета, санатория Совета Министров СССР в Сочи, Дворца культуры и науки в Варшаве и т. д. В качестве звукопоглотителя в этих глушителях применялись пемзолитовые плиты.

Экспериментальная проверка их показала, что 1 *пог. м* такого глушителя снижает уровень силы шума на 5—6 *дб* в области низких частот (128—250 *гц*).

Заглушение шума в пластинчатом глушителе, состоящем из сплошных пластин, определяется по эмпирической формуле (II.70).

$$\Delta L = 2,18 \frac{\alpha l}{a} \text{ дб,} \quad (\text{II.70})$$

где α — коэффициент звукового поглощения пластин глушителя;

a — расстояние между пластинами в *см*;

l — длина глушителя в *см*.

Обычно расчетную длину глушителя увеличивают «в запас» на 15%. Расстояние a между пластинками рекомендуется принимать для глушителей из сплошных плит (например, пемзолитовых, пористых, асбестоцементных и др.) 6—12 *см*.

Выбор той или иной системы глушителей в значительной мере определяется наличием свободного пространства для их расположения в здании. При ограниченном месте для расположения глушителей выгоднее пользоваться глушителями ячеистыми или пластинчатыми; при наличии свободного места целесообразнее применять системы камерного вида. При этом в последнем случае необходимо обеспечить достаточную звукоизоляцию стенок камеры.

Применяемые для облицовки вентиляционных каналов звукопоглощающие материалы должны обладать долговечностью, огнестойкостью, низкой влагоемкостью, а также малым коэффициентом сопротивления трению.

Расчеты по снижению уровня шума обычно производятся для частоты 256 *гц*.

Общую величину затухания шума на прямых участках воздуховодов в местных сопротивлениях, в звукоглушителях и звукопоглощающих вставках определяют по формуле

$$\Sigma \Delta L = \Sigma \Delta L_1 + \Sigma \Delta L_2 + \Sigma \Delta L_3 + \Sigma \Delta L_4. \quad (\text{II.71})$$

где $\Sigma \Delta L_1$ — величина затухания шума на прямых участках канала определяется по графику на л. XLVII, рис. 7;

$\Sigma \Delta L_2$ — величина затухания шума в местных сопротивлениях; определяется по графику на л. XLVII, рис. 8;

$\Sigma \Delta L_3$ — величина затухания шума в пластинчатых и камерных глушителях; определяется по формулам (II.66), (II.68) и (II.70);

$\Sigma \Delta L_4$ — величина затухания шума в ячеистых глушителях и каналах, облицованных звукопоглощающими материалами; определяется по формуле (II.66).

Величина затухания шума на повороте (в колене) принимается равной 2 *дб*; в вентиляционной решетке 5 *дб*.

Для ориентировочных расчетов можно принимать среднюю величину затухания шума в сети воздуховодов обычных (без облицовки) вентиляционных систем в жилых и общественных зданиях равной 1 *дб* на 1 *пог. м* канала.

Пример. Требуется устранить шум при работе вентиляционной камеры, расположенной на междуэтажном перекрытии гостиницы, при следующих исходных данных:

а) вентилятор центробежный типа Сирокко с 960 оборотами в 1 *мин*;

б) допускаемый уровень шума в помещении при работе вентилятора 25 *дб*;

в) канал имеет сечение 40×40 *см*;

г) расчетный уровень шума, возникающего в камере при работе вентилятора, 92 *дб*.

1) Находим необходимую степень ослабления шума при прохождении его по вентиляционному каналу

$$\Delta L = 92 - 25 = 67 \text{ дб.}$$

2) Принимаем внутреннюю облицовку вентиляционного канала пемзолитовыми плитами толщиной 3 *см*. Для выбранной облицовки канала имеем коэффициент звукового поглощения $\alpha_{256} = 0,2$.

3) Определяем необходимую длину вентиляционного канала с указанной облицовкой

$$\Delta L = 1,09 \frac{\alpha l p}{F_k},$$

откуда

$$l = \frac{\Delta L F_k}{1,09 p \alpha} = \frac{67 \cdot 0,16}{1,09 \cdot 1,6 \cdot 0,2} = 30 \text{ м.}$$

4) При отсутствии возможности расположить вентиляционный канал такой длины на чердаке здания применяем пластинчатый глушитель с пластинками (кассетами) из перфорированного железа по минеральному войлоку толщиной 2,5 *см* ($\alpha = 0,25$) при расстоянии между пластинками 0,1 *м*.

Пользуемся формулой

$$\Delta L = 2,18 \frac{\alpha l}{a},$$

откуда

$$l = \frac{\Delta L a}{2,18 \alpha} = \frac{67 \cdot 0,1}{2,18 \cdot 0,25} = 12,5 \text{ м.}$$

С учетом запаса необходимая длина глушителя составляет

$$12,5 + 0,15 \cdot 12,5 = 18,75 \text{ м.}$$

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

При проектировании зданий ограждающим конструкциям должны быть приданы качества, обеспечивающие возможность поддержания определенного микроклимата внутри здания и температурно-влажностного режима самих ограждений. В связи с этим строительная теплотехника рассматривает теплотехнические свойства строительных материалов и ограждающих конструкций, а также физические процессы, происходящие в них при эксплуатации здания. Рациональное проектирование ограждающих конструкций (выбор материала, расположение его в ограждении, установление оптимальной толщины) может быть обеспечено при учете климата и тепло-влажностного режима помещений.

В связи с большим разнообразием климатических условий в нашей стране вопросы

строительной теплотехники ограждающих частей здания являются весьма актуальными. Особенно большое значение приобретает строительная теплотехника для современного строительства, характеризующегося широким применением сборных крупноразмерных облегченных элементов индустриального изготовления.

Знание строительной теплотехники и закономерностей прохождения физических процессов в ограждении, обусловленных воздействием окружающей среды, позволяет архитектору и проектировщику правильным выбором материала и конструктивного решения ограждения ограничить вредное влияние некоторых из этих физических процессов на ограждающие конструкции здания и тем самым обеспечить для них требуемые эксплуатационные качества и долговечность.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЕЛИЧИНЫ

1. Объемный вес и пористость строительных материалов

Теплотехнические показатели ограждающих конструкций устанавливаются теплотехническим расчетом. Необходимым условием для правильного теплотехнического расчета и последующего проектирования ограждения является знание теплотехнических свойств строительных материалов и правильное использование их в зависимости от особенностей наружного и внутреннего климата здания.

Одним из основных показателей строительных материалов является объемный вес

$$\gamma = \frac{P}{V}, \quad (\text{III.1})$$

где γ — объемный вес материала в кг/м^3 ;

P — вес материала в кг ;

V — объем материала в м^3 .

Объемный вес строительных материалов колеблется в пределах от 25—30 кг/м^3 (материалы из пористых пластмасс) до 2800—3000 кг/м^3 (гранит, мрамор).

Все строительные материалы за малым исключением в своей массе содержат поры, заполненные воздухом. Вследствие этого объемный вес многих однородных материалов неодинаков.

Пористость материала выражается процентным отношением объема пор в материале к объему всего материала. При известных значениях удельного веса материала и его объемного веса значение степени пористости определяется по формуле

$$P = \frac{g - \gamma}{g} 100\%, \quad (\text{III.2})$$

где P — пористость материала в %;

γ — объемный вес материала в кг/м^3 ;

g — удельный вес материала в кг/м^3 .

Удельный вес органических материалов $g = 1450—1550 \text{ кг/м}^3$, неорганических $g = 2400—3000 \text{ кг/м}^3$.

Для строительных материалов силикатного происхождения пористость изменяется от нуля (плотные породы — гранит) до 75% (высокопористый кирпич).

2. Влажность строительных материалов

Строительные материалы в ограждающих конструкциях здания всегда находятся в увлажненном состоянии. Влажностное состояние материала характеризуется в относительных весовых и объемных величинах (в %).

Весовая влажность материала

$$\omega_n = \frac{P_1 - P_2}{P_2} 100\%, \quad (\text{III.3})$$

где ω_n — весовая влажность материала в %;

P_1 — вес влажного материала в г ;

P_2 — вес сухого материала в г .

Объемная влажность материала

$$\omega_o = \frac{V_1}{V_2} 100\%, \quad (\text{III.4})$$

где ω_o — объемная влажность материала в %;

V_1 — объем влаги, содержащейся в материале, в см^3 ;

V_2 — объем сухого материала в см^3 .

Зависимость между объемной и весовой влажностью одного и того же образца материала выражается в следующем виде:

$$\frac{\omega_o}{\omega_n} = \frac{\gamma}{1000}. \quad (\text{III.5})$$

В большинстве случаев поры внутри строи-

тельных материалов не замкнуты и сообщаются друг с другом и окружающей средой.

При соприкосновении материала с влагой последняя под действием капиллярных сил проникает в материал. Таким путем происходит увлажнение материала атмосферными осадками и влагой, конденсирующейся на его поверхности; кроме этого увлажнение может происходить при внутренней конденсации водяных паров воздуха, проникающих в поры материала.

В некоторых строительных материалах и изделиях значительное содержание влаги обусловлено технологическим процессом их изготовления. Весьма часто бетонные изделия (стеновые блоки), поступающие с бетонных заводов на строительную площадку, имеют весьма высокую влажность (шлакобетон 12—15%, пенобетон свыше 20%). Значительное количество влаги поступает в ограждение при кладке кирпичных стен (свыше 5% от веса стены). Влага, вносимая в строительные материалы при изготовлении и транспортировке их, хранении на заводской и строительной площадках, а также при возведении здания, носит случайный характер. При нормальных условиях эксплуатации здания избыточная влага из ограждающих конструкций постепенно удаляется и влажность материала в ограждении достигает равновесного состояния.

Влажностное состояние материала ограждения при его влажностном равновесии с окружающей воздушной средой зависит от влажности воздуха, эксплуатационных условий, вида материала и конструктивного решения ограждения. При нормальных условиях эксплуатации здания для каждого вида материала характерно определенное содержание влаги. Это влажностное состояние материала называется нормальным, а влажность материала — нормальной влажностью материала.

3. Теплопроводность строительных материалов

Основным теплотехническим показателем строительных материалов является теплопроводность, т. е. способность материала проводить тепло через свою массу.

Теплопроводность материала характеризуется величиной коэффициента теплопроводности λ , выражающей собой количество тепла в килограмм-калориях, которое будет проходить в 1 ч через 1 м² плоской стены толщиной в 1 м из данного материала при разности температур на внутренней и внешней поверхностях в 1°. Коэффициент теплопроводности имеет размерность в ккал/м ч град. Строитель-

ные материалы имеют численные значения λ от 0,035 (мипора) до 2,8 ккал/м ч град (гранит, мрамор).

На коэффициент теплопроводности оказывает влияние объемный вес (пористость), влажность, температура и химико-минералогический состав материала.

а) Зависимость λ от пористости материала. Основные строительные материалы имеют пористую структуру, состоящую из твердого вещества, образующего остов (скелет) материала, и воздуха, заполняющего пространство (поры) между твердым веществом. Составные части материала обладают различным коэффициентом теплопроводности. Коэффициент теплопроводности вещества материала примерно в 100 раз превышает коэффициент теплопроводности воздуха, заключенного в порах материала. Коэффициент теплопроводности воздуха, заключенного в порах материала, зависит от размера пор. С уменьшением размера пор уменьшается и значение коэффициента теплопроводности воздуха.

Коэффициент теплопроводности пористого материала представляет собой некоторую промежуточную величину между коэффициентами теплопроводности основного материала и воздуха, заключенного в его порах. Изменение соотношения между общим объемом пор и объемом твердого вещества вызывает соответствующие изменения величины коэффициента теплопроводности материала. Так, например, пенобетон в зависимости от объемного веса имеет следующие значения коэффициента теплопроводности:

при $\gamma=1000$ кг/м ³	$\lambda=0,34$ ккал/м ч град
• $\gamma=600$:	$\lambda=0,18$:
• $\gamma=400$:	$\lambda=0,13$:

б) Зависимость λ от химико-минералогического состава материала. Строительные материалы в своей основной массе могут содержать в различных соотношениях кристаллические и аморфные вещества, обладающие различным коэффициентом теплопроводности при одном и том же химическом составе.

Коэффициент теплопроводности кристаллических веществ превосходит в несколько раз коэффициент теплопроводности аморфных веществ подобного химического состава. Например, двуокись кремния SiO₂ в кристаллическом состоянии (кремнезем, кварц) имеет $\lambda=7,71$ ккал/м ч град, а в аморфном состоянии (трепел, инфузорная земля) $\lambda=1,19$ ккал/м ч град. Наибольшее количество кристаллических веществ содержится в граните и мраморе (65—75%). Большое количество кристаллических веществ может содер-

жаться также в бетонах на кварцевом песке, гравии или на щебенке из плотных изверженных пород. Вследствие этого материалы одинакового химического состава с одним и тем же объемным весом могут обладать различным коэффициентом теплопроводности. Например, материалы с объемным весом $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, но с различным содержанием кристаллических веществ имеют следующие значения коэффициента теплопроводности:

раствор цементно-песчаный	$\lambda = 0,8 \text{ ккал/м ч град}$
кирпич красный машинный	$\lambda = 0,66$
раствор портландцементный без песка	$\lambda = 0,4$

Еще более резкое расхождение в значениях коэффициента теплопроводности имеет место при сопоставлении тяжелых материалов с аморфным и с преобладающим кристаллическим содержанием веществ. При объемном весе гранита $\gamma = 2800 \text{ кг/м}^3$ и обычного стекла $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности этих материалов соответственно равен $\lambda = 2,8$ и $\lambda = 0,65 \text{ ккал/м ч град}$, т. е. при расхождении объемного веса на 12% коэффициент теплопроводности гранита более чем в 4 раза превышает коэффициент теплопроводности стекла.

в) Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры материала. Коэффициент теплопроводности строительных материалов зависит от средней температуры материала, при которой происходит теплопередача. С повышением температуры повышается и коэффициент теплопроводности материала.

В интервале положительных температур от 0 до 100° зависимость между коэффициентом теплопроводности и температурой материала выражается эмпирической формулой

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + \rho t), \quad (\text{III.6})$$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности материала при $t = 0^\circ\text{C}$;

λ_t — коэффициент теплопроводности материала при температуре t ;

t — температура материала;

ρ — коэффициент пропорциональности, равный 0,0025.

г) Зависимость λ от влажности материала. При увлажнении материала влага вытесняет воздух из пор материала и заполняет их частично или полностью, т. е. поры материала заполняются веществом, теплопроводность которого примерно в 20 раз превышает теплопроводность воздуха.

При замерзании влаги и превращении ее в лед коэффициент теплопроводности послед-

него превышает в 4 раза коэффициент теплопроводности жидкой влаги и в 80 раз коэффициент теплопроводности воздуха, заполняющего полностью поры этого материала. В зависимости от степени заполнения пор влагой и от агрегатного ее состояния коэффициент теплопроводности материала как средняя величина между коэффициентами теплопроводности твердого вещества, воздуха и влаги, заполняющих поры материала, имеет различные значения. С повышением влажности материала возрастает λ . Еще большее повышение λ имеет место при замерзании влаги в порах материала, что приводит к дальнейшему понижению его теплозащитных свойств.

При переходе жидкой влаги в иней коэффициент теплопроводности материала, наоборот, понижается.

В зависимости от степени заполнения пор влагой коэффициент теплопроводности материала имеет различные значения. С повышением влажности материала возрастает λ и тем самым понижаются его теплозащитные свойства.

д) Расчетные коэффициенты теплопроводности. В зависимости от условий эксплуатации здания и температурно-влажностных условий окружающей воздушной среды ограждающие конструкции всегда содержат определенное установленное количество влаги и в зимний период года находятся под одновременным воздействием положительной и отрицательной температур окружающего воздуха. В соответствии с этим в качестве расчетного коэффициента теплопроводности материала наружных ограждающих конструкций принят коэффициент теплопроводности этого материала при средней температуре, равной 0°, и средней установившейся влажности, которая имеет место в наружных ограждающих конструкциях при эксплуатации здания.

Среднее содержание влаги в материале сграждения при эксплуатации здания зависит не только от влажностных условий внутри здания, но и от климатических особенностей местности строительства. Кроме этого, в первые годы эксплуатации здания большое влияние на влажностный режим ограждения может оказывать строительная влага.

Согласно СНиП нормативные расчетные величины λ для каждого строительного материала подразделены на две группы: для сухих и нормальных условий эксплуатации зданий. Выбор расчетной величины коэффициента теплопроводности производится с учетом температурно-влажностного режима помещений и влажностной характеристики климата района строительства, а также учи-

тывается влияние строительной влаги на теплозащитные качества ограждения. В связи с этим для ряда строительных материалов СНиП дает указания повышать расчетные величины коэффициента теплопроводности на 10—15%.

4. Теплоемкость строительных материалов

Для повышения температуры материала на Δt° требуется затратить определенное количество Q тепловой энергии. При понижении температуры этого же материала на Δt° такое же количество Q тепла выделяется из него.

Свойство материала поглощать (аккумулировать) тепло при нагревании и выделять его при охлаждении называется теплоемкостью материала.

Показателем теплоемкости материала является удельная теплоемкость, численно равная количеству тепла в ккал, которое необходимо сообщить 1 кг материала для повышения температуры всей его массы на 1°C .

Удельная теплоемкость, обычно называемая теплоемкостью материала, имеет размерность в ккал/кг град.

Потребное количество тепла для повышения температуры на Δt определяется по формуле

$$Q = c \gamma V \Delta t, \quad (\text{III.7})$$

где Q — количество тепла в ккал;

c — удельная теплоемкость материала в ккал/кг град;

γ — объемный вес материала в кг/м³;

V — объем материала в м³;

Δt — изменение температуры материала в град.

Теплоемкость строительных материалов изменяется в пределах от $c=0,18$ (бетон) до $c=0,6$ (древесина) и зависит от влажности материала. С повышением влажности материала повышается его теплоемкость (теплоемкость воды $c=1$ ккал/кг град).

5. Тепловое излучение и поглощение

Строительные материалы, как и все физические тела, обладают внутренней тепловой энергией (кинетическая энергия молекул и атомов), непрерывно ее излучают в окружающую среду и одновременно поглощают и отражают падающую на них лучистую энергию других тел. Численной характеристикой теплового излучения является коэффициент излучения, значения которого зависят от вида ма-

териала, его химического состава и характера обработки излучающих поверхностей. Шероховатые поверхности обладают большей излучающей способностью, чем полированные из подобных материалов (табл. III.1). Наибольшее значение коэффициента излучения, равное $C_0=4,96$, имеет условно принятое для теоретических исследований «абсолютно черное тело».

Таблица III.1

Коэффициенты излучения материала C в ккал/м² град

Наименование материала	Состояние поверхно	Значения C
Бетон	—	3,1
Бумага строительная	Матовая	4,62
Кирпич красный	Шероховатая	4,61
Лак спиртовой черный	Блестящая	4,35
То же	Матовая	4,8
Масляная краска	—	4
Алюминиевая фольга	Блестящая	0,4
Цементный раствор	Гладкая	3,35
Шлакобетон	Шероховатая	4,46
Штукатурка известковая	—	4,5
Абсолютно черное тело	—	4,96

Материалы с наибольшей излучающей способностью обладают наибольшей способностью поглощать лучистую энергию. Поглощательная способность материала характеризуется коэффициентом черноты или относительной излучающей способностью ϵ материала, который определяется как отношение излучающей способности материала к излучающей способности абсолютно черного тела при той же температуре

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} = \frac{C}{4,96}. \quad (\text{III.8})$$

Связь между излучающей и поглощающей способностью материала выражается законом Кирхгофа, согласно которому отношение между коэффициентом излучения C и коэффициентом поглощения A для всех материалов одинаково и численно равно коэффициенту излучения абсолютно черного тела при той же температуре

$$\frac{C}{A} = C_0, \quad (\text{III.9})$$

откуда

$$A = \frac{C}{C_0}, \quad (\text{III.10})$$

т. е. поглощающая способность материала равняется степени черноты излучения его при данной температуре.

Согласно молекулярной физике любое тело состоит из молекул и атомов, находящихся в состоянии постоянного движения. Кинетическая энергия этого движения определяется теплосодержанием, а интенсивность его характеризуется температурой тела. Теплота и температура — взаимосвязаны. Изменение температуры тела сопровождается соответствующим изменением его теплосодержания. Разность температуры показывает степень нарушения теплового равновесия внутри тела. При отсутствии теплового равновесия внутри тела происходит перераспределение кинетической энергии и изменение интенсивности теплового движения молекул и атомов, т. е. происходит перемещение некоторого количества тепла из более нагретой области тела в менее нагретую с соответствующим изменением температуры в этих областях. Этот процесс, называемый теплопередачей или теплообменом, продолжается до выравнивания теплосодержания и температуры в теплообменивающих областях тела.

Теплопередача является сложным физическим процессом и может осуществляться в трех совершенно различных по своей природе формах: теплопроводности, конвекции и излучении. Все эти формы теплопередачи, имеющие свои закономерности, могут встречаться в отдельности, но в большинстве случаев они дополняют друг друга и создают единый процесс теплопередачи.

7. Теплопроводность

Теплопроводность — передача тепла путем непосредственного соприкосновения (контакта) частиц тепла с различной температурой. При теплопроводности температура внутри тела различна и непрерывна между соприкасающимися частицами тела. Мгновенное значение температуры во всех точках тела для какого-либо момента времени называется температурным полем данного тела.

Температурное поле может быть переменным (нестационарным) и постоянным (стационарным) во времени и иметь различные значения температуры в трех, двух и одном измерениях пространства. В соответствии с этим температурное поле называется трех-, двух- и одномерным температурным полем. Температурное поле может быть изображено посредством изотермических поверхностей и линий, соединяющих точки тела с одинаковой температурой (л. XLVIII, рис. 1).

Лист XLVIII СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

- Рис. 1. Температурное поле, температурный градиент и тепловой поток
Рис. 2. Температурное поле плоской однородной стенки
Рис. 3. Трехслойная стенка из разнородных материалов
Рис. 4. Температурное поле трехслойной стенки
а — аналитический расчет; б — графический расчет
Рис. 5. Теплопередача через воздушную прослойку
Рис. 6. К расчету примера 3. Ограждение с воздушной прослойкой, армированной алюминиевой фольгой
Рис. 7. Элементы прямоугольной сетки температурного поля
Рис. 8. К расчету примера 5. Ограждение с термовкладышами
а — расположение термовкладышей; б — повторяющийся элемент
Рис. 9. Ограждение с теплопроводными включениями
Рис. 10. Схемы теплопроводных включений

Наиболее резкое изменение температуры в теле имеет место в направлении, перпендикулярном изотермическим поверхностям (или линиям). Если $\Delta t = t_1 - t_2$ — бесконечно малое изменение температуры между изотермическими поверхностями (или линиями) в этом направлении и Δx — бесконечно малое расстояние между ними, то предел отношения температуры Δt к расстоянию Δx называется температурным градиентом, который обозначается

$$\lim \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) = \frac{dt}{dx} \quad (\text{III.11})$$

и имеет размерность в град/м.

Температурный градиент является векторной величиной и характеризует степень изменения температуры на единицу длины в направлении ее возрастания.

Тепловой поток является также вектором, направление которого противоположно вектору температурного градиента и совпадает с направлением переноса тепла, а абсолютная величина его выражает интенсивность теплопередачи.

Тепловой поток (интенсивность теплопередачи посредством теплопроводности) пропорционален температурному градиенту (закон Фурье).

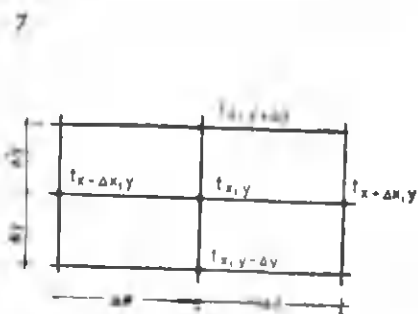
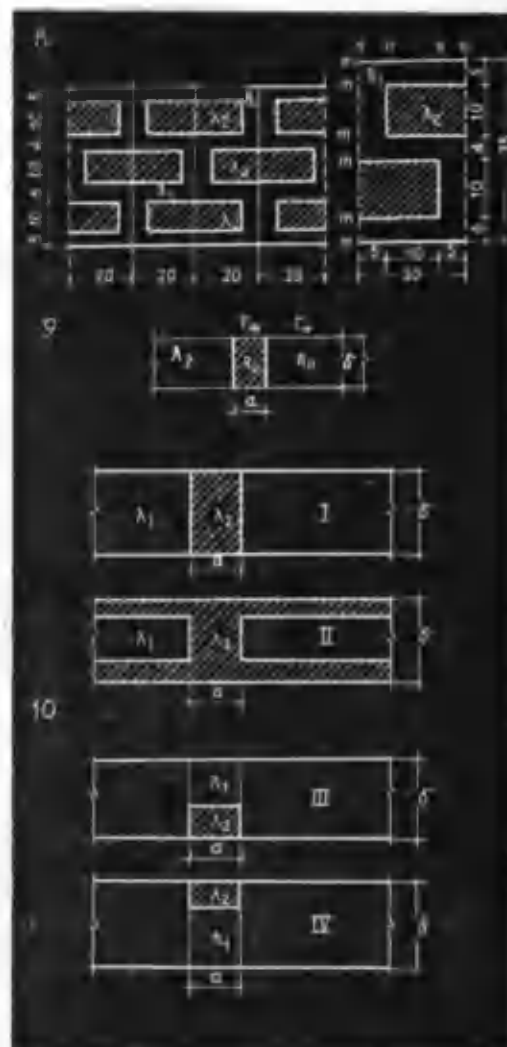
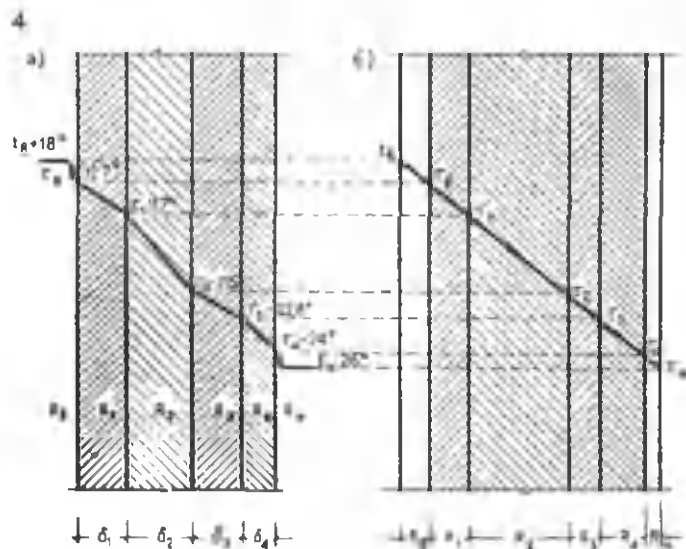
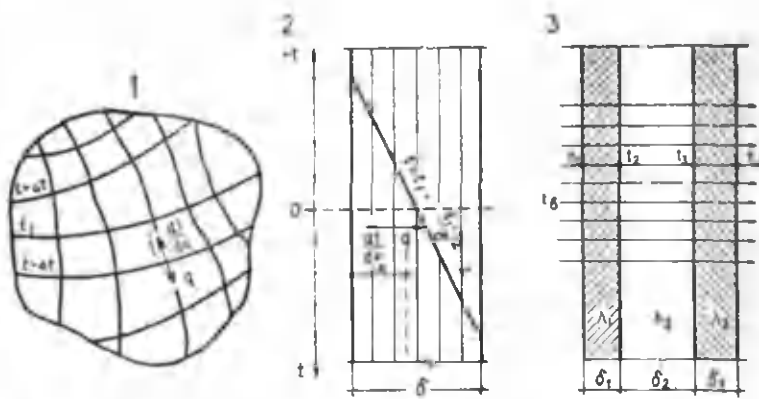
$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (\text{III.12})$$

где q — тепловой поток в ккал/м² ч;

λ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности;

$\frac{dt}{dx}$ — температурный градиент.

Знак минус показывает взаимно противо-



положительные направления теплового потока и температурного градиента.

С помощью закона Фурье и закона сохранения энергии процесс теплопроводности ана-

литически изображается в виде дифференциального уравнения теплопроводности, которое выражает зависимость между температурой, временем и координатами элемента тела.

Для двух- и одномерного температурных полей эти дифференциальные уравнения имеют вид:

а) для нестационарных условий теплопередачи

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right); \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \quad (\text{III.14})$$

б) для стационарных условий теплопередачи (уравнение Лапласа)

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0; \quad (\text{III.15})$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0, \quad (\text{III.16})$$

где x, y — координаты температурного поля;
 Z — время;

a — коэффициент температуропроводности тела (равный $\frac{\lambda}{c_1}$, характеризующий способность материала проводить тепло) в $\text{м}^2/\text{ч}$.

Из решения дифференциального уравнения теплопроводности находится температурное поле и тепловой поток внутри тела для любого момента времени, а также количество тепла, переместившегося за определенный промежуток времени из одной области тела в другую.

Простейшим случаем теплопередачи посредством теплопроводности является стационарная теплопередача через плоскую однородную стенку толщиной δ с коэффициентом теплопроводности материала λ с постоянной температурой t_1 и t_2 на своих поверхностях (л. XLVIII, рис. 2).

Стационарное температурное поле плоской однородной стенки находится из общего решения уравнения (III.16)

$$t = A_1 x + A_2. \quad (\text{III.17})$$

При краевых условиях

$$1) \ x = 0 \text{ и } t = t_1;$$

$$2) \ x = \delta \text{ и } t = t_2$$

имеем:

$$1) \ A_2 = t_1;$$

$$2) \ A_1 = \frac{t_2 - t_1}{\delta}.$$

Подставляя значения постоянных интегрирования в уравнение (III.17), получаем решение одномерного температурного поля однородной стенки в следующем виде:

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\delta} x. \quad (\text{III.18})$$

Уравнение (III.18) представляет собой уравнение прямой линии. Следовательно, при наличии температурного перепада между противоположными поверхностями однородной стенки изменение температуры между этими поверхностями происходит по прямой линии.

Для определения теплового потока, проходящего через плоскую стенку, уравнение теплопроводности (III.16) должно еще удовлетворять дополнительному условию, полученному из закона Фурье (III.12):

$$\frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{q}{\lambda}.$$

Из уравнения (III.16) имеем

$$\frac{\partial t}{\partial x} = A_1 = \frac{t_2 - t_1}{\delta}.$$

Следовательно:

$$\frac{q}{\lambda} = \frac{t_1 - t_2}{\delta}. \quad (\text{III.19})$$

Откуда находим

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2); \quad (\text{III.20})$$

$$\lambda = \frac{q \delta}{t_1 - t_2}, \quad (\text{III.21})$$

где

q — тепловой поток в $\text{ккал}/\text{м}^2 \text{ ч}$;

δ — толщина стенки в м ;

$t_1 - t_2$ — разность температуры между противоположными поверхностями стенки в $^\circ\text{град}$;

λ — коэффициент теплопроводности материала в $\text{ккал}/\text{м ч } ^\circ\text{град}$.

8. Конвективная теплопередача

Конвективная теплопередача имеет место в жидкостях или газах и представляет собой перенос тепла движущимися массами жидкости или газа.

В обычном понятии конвективная теплопередача представляет собой процесс теплопередачи между непосредственно соприкасающейся поверхностью твердого тела с движущейся жидкой или газообразной средой. Различают два вида конвекции: естественную и вынужденную.

Естественная конвекция вызывается наличием температурного перепада в жидкой или газообразной среде и связанным с этим изменением плотности по объему среды. Температурный перепад в среде обусловлен наличием

ем источника тепловыделения в эту среду или теплопоглощением из нее.

Источником тепловыделения в воздушную среду могут быть горячие поверхности отопительных приборов, а теплопоглощение из воздушной среды может производиться внутренними поверхностями наружных ограждающих конструкций, имеющих в зимнее время более низкую температуру, чем внутренний воздух.

При соприкосновении с этими поверхностями воздух нагревается (или охлаждается) и поднимается вверх (или опускается вниз). Его место занимают новые массы воздуха, которые в свою очередь также подвергаются нагреву или охлаждению. Таким путем возникает циркуляционное перемещение массы воздуха из одной части помещения в другую, вызывающее конвективный теплообмен между соприкасающимися воздушной средой и внутренней поверхностью ограждения.

Вынужденная конвекция воздушной среды вызывается механическими воздействиями, приводящими в движение воздушную среду. Побудителями этих воздействий на воздушную среду могут быть внутри здания работа вентиляторов, вращающиеся части механизмов, а снаружи здания — сила ветра.

Конвективный теплообмен зависит от многих факторов, как-то: от характера движения воздуха, его плотности и температуры, состояния поверхности твердого тела, величины температурного перепада между воздухом и поверхностью ограждения и др.

Большое количество факторов, оказывающих влияние на конвективную теплопередачу, весьма затрудняет не только аналитическое решение данной задачи, но и опытное изучение конвективного теплообмена.

В практических расчетах для определения количества тепла, передаваемого в 1 ч при конвективном теплообмене между воздухом и поверхностью твердого тела, пользуются законом Ньютона, согласно которому

$$Q = \alpha_k (t_n - t_v) F, \quad (\text{III.22})$$

где Q — количество тепла в ккал/ч ;

F_n — поверхность твердого тела в м^2 ;

t_n — температура поверхности в $^\circ\text{град}$;

t — температура воздуха в $^\circ\text{град}$;

α_k — коэффициент конвективной теплопередачи в $\text{ккал/м}^2\text{ч}^\circ\text{град}$.

Коэффициент конвективной теплопередачи α_k является условной величиной и выражает собой тепловой поток, приходящийся на 1 м^2 поверхности ограждения в 1 ч при разности температуры между поверхностью и соприкасающимся с ней воздухом в 1° .

Несмотря на кажущуюся простоту форму-

лы (III.22), сложность ее заключается в нахождении значения α_k , которое в данном случае фактически определяет конвективную теплопередачу. Для частных случаев конвективной передачи рядом исследователей получены различные значения α_k . Эти данные являются справедливыми для весьма ограниченных условий конвективного теплообмена.

Значительное расширение области применения имеющихся экспериментальных данных по конвективному теплообмену дает теория подобия. На основе обобщения частных результатов аналитических и экспериментальных исследований конвективной теплопередачи получены формулы для приближенного определения условной величины α_k при более широких условиях конвективного теплообмена.

В соответствии с этим для внутренней поверхности ограждения условная величина α_k определяется по формулам:

а) при $\Delta t = (t_n - t_v) < 5^\circ$

$$\alpha_k = 3 + 0,08 (t_n - t_v), \quad (\text{III.23})$$

где $\Delta t = (t_n - t_v)$ — разность температуры воздуха и внутренней поверхности ограждения;

б) при $\Delta t = (t_n - t_v) > 5^\circ$

$$\alpha_k = b \sqrt[4]{t_n - t_v}, \quad (\text{III.24})$$

где b — коэффициент, принимаемый равным: для замкнутого комнатного воздуха — 2,2; для воздуха производственных помещений с вращающимися механизмами или около охлаждающих поверхностей (окна, двери) — 2,75.

Для наружной поверхности ограждения величина α_k определяется по формуле

$$\alpha_k = 6,31v^{0,656} + 3,25e^{-1,91}, \quad (\text{III.25})$$

где v — скорость ветра в м/сек ;

e — основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$).

За расчетную зимнюю скорость ветра v принимается по СНиП наибольшая средняя скорость из восьми румбов за январь с увеличением ее для зданий высотой от 15 до 30 м на 15%, для зданий высотой от 31 до 50 м на 40%.

9. Тепловое излучение

Теплопередача посредством излучения происходит от материального тела в воздушное и безвоздушное пространство независимо от температуры в этом пространстве, причем теплопередача сопровождается превращением

тепловой энергии пограничного слоя тела в лучистую энергию, распространяющуюся в пространстве в виде электромагнитных волн со скоростью света.

При падении на поверхность других тел часть лучистой энергии отражается обратно в пространство, а другая часть ее поглощается поверхностным слоем этих тел и преобразуется в тепловую энергию.

Отраженная от поверхности тела лучистая энергия, присоединяясь к излучаемой данным телом энергии, образует совместно с последней эффективное излучение, которое в свою очередь претерпевает поглощение и отражение поверхностями других тел.

Испускание, поглощение и отражение лучистой энергии телом, имеющим температуру более абсолютного 0° , происходит непрерывно и независимо от температуры окружающей среды.

В результате взаимного облучения и многократного отражения и поглощения излучаемой энергии между телами происходит теплообмен. В зависимости от разности излучаемой и поглощаемой лучистой энергии тела могут нагреваться и остывать и тем самым посредством излучения осуществлять теплопередачу от более нагретых тел к менее нагретым. При одинаковом количестве излучаемой и поглощаемой лучистой энергии тело находится в тепловом равновесии и температура его остается неизменной.

Согласно закону Стефана-Больцмана количество тепла, излучаемое единицей поверхности какого-либо тела за единицу времени, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры.

$$q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (\text{III.26})$$

где q — тепловой поток в $\text{ккал/м}^2\text{ч}$;

T — абсолютная температура в $^\circ\text{град}$;

C — коэффициент излучения поверхности материала.

Практически этот закон применим не только к абсолютно черным, но и к серым телам, имеющим значения C , близкие к 4,96. Большинство строительных материалов относится к серым телам.

Интенсивность теплопередачи посредством взаимного облучения двух параллельных поверхностей, расположенных на близком расстоянии, определяется по формуле

$$q_1 = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (\text{III.27})$$

где q_1 — тепловой поток лучистой теплопередачи в $\text{ккал/м}^2\text{ч}$;

C_1, C_2 — коэффициенты излучения поверхностей;

C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Для определения теплового потока, передаваемого двумя параллельными взаимно облучаемыми поверхностями, обычно пользуются упрощенной формулой

$$q_1 = \alpha_1 (t_1 - t_2), \quad (\text{III.28})$$

где q_1 — тепловой поток в $\text{ккал/м}^2\text{ч}$;

$t_1 - t_2$ — температура взаимно облучаемых поверхностей в $^\circ\text{град}$;

α_1 — коэффициент передачи тепла излучением в $\text{ккал/м}^2\text{ч}^\circ\text{град}$.

Приравнявая последние два уравнения, находим значения коэффициента передачи тепла излучением

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \times \left[\frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2} \right] = C' \varphi; \quad (\text{III.29})$$

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}; \quad (\text{III.29})$$

$$\varphi = \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}, \quad (\text{III.30})$$

где C' — приведенный коэффициент излучения взаимно облучаемых поверхностей;

φ — температурный коэффициент взаимно облучаемых поверхностей.

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

1. Теплопереход и сопротивление теплопереходу у поверхности ограждения

Теплообмен между ограждающими конструкциями здания и окружающей их средой происходит посредством конвекции и излучения. Конвективная теплопередача имеет место между воздушной средой и поверхностью ограждения при наличии между ними температурного перепада

$$\Delta t = (t_1 - t_2).$$

В этом случае тепловой поток, передаваемый посредством конвекции, равняется

$$q = \alpha_k (t_1 - t_2). \quad (\text{III.31})$$

Теплопередача посредством излучения происходит между телами, находящимися на расстоянии друг от друга и имеющими различную температуру.

Таковыми телами, с которыми поверхности ограждения производят теплообмен, являются:

а) внутри здания — внутренние ограждающие конструкции и предметы, находящиеся в помещении;

б) снаружи здания — противостоящие предметы (здания, деревья и т. п.), земля и небо-свод.

Температура для тел, находящихся в лучистом теплообмене с ограждающими конструкциями здания, принимается равной температуре воздушной среды, в которой они находятся.

В этом случае тепловой поток, возникающий при тепловом излучении, будет

$$q_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} (t_1 - t_2). \quad (\text{III.32})$$

Тепловой поток, возникающий при совме-

стной теплопередаче посредством конвекции и излучения, равняется

$$q = q_k + q_{\text{л}} = (\alpha_k + \alpha_{\text{л}}) (t_1 - t_2) = \alpha (t_1 - t_2), \quad (\text{III.33})$$

где α — коэффициент теплоперехода у поверхности ограждения, равный сумме двух коэффициентов, в $\text{ккал/м}^2\text{ч}^\circ\text{C}$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{л}}. \quad (\text{III.34})$$

При

$$\Delta t = (t_1 - t_2) = 1 \quad q = \alpha.$$

Коэффициент теплоперехода у поверхности ограждения представляет собой тепловой поток, который имеет место при разности температур в 1° между поверхностью ограждения и соприкасающейся с ней воздушной средой.

Коэффициенты теплоперехода у внутренней и наружной поверхностей ограждения являются условными величинами и имеют различные численные значения, которые в основном зависят от условий конвективного теплообмена.

При естественной конвекции внутри здания и действии ветра снаружи коэффициент теплоперехода имеет по СНиП следующие значения:

а) у внутренней поверхности ограждения

$$\alpha_{\text{в}} = 7,5 \text{ ккал/м}^2\text{ч}^\circ\text{C};$$

б) у наружной поверхности ограждения

$$\alpha_{\text{н}} = 20 \text{ ккал/м}^2\text{ч}^\circ\text{C}.$$

Величина, обратная коэффициенту теплоперехода, называется сопротивлением теплопереходу у соответствующей поверхности ограждения и имеет значения:

а) у внутренней поверхности ограждения

$$R_b = \frac{1}{\alpha_b} = \frac{1}{7,5} = 0,133 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал};$$

б) у наружной поверхности ограждения

$$R_n = \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал}.$$

2. Термическое сопротивление плоской стенки

Тепловой поток, проходящий через плоскую однородную стенку (III.20), может быть представлен в следующем виде:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{t_1 - t_2}{R}, \quad (\text{III.35})$$

где R — термическое сопротивление стенки в $\text{м}^2 \text{ ч град/ккал}$.

Термическое сопротивление плоской стенки из однородного материала определяется по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (\text{III.36})$$

Термическое сопротивление пропорционально толщине стенки и обратно пропорционально λ материала.

Выражая термическое сопротивление стенки через тепловой поток и разность температур на поверхности стенки

$$R = \frac{t_1 - t_2}{q}$$

и принимая $q = 1 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}$, получаем

$$R = t_1 - t_2 = \Delta t.$$

Отсюда следует, что численное выражение термического сопротивления стенки равно разности температуры на ее противоположных поверхностях, при которой через нее проходит тепловой поток в $1 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}$.

Термическое сопротивление является показателем теплозащитных качеств ограждения. С увеличением величины термического сопротивления повышаются теплозащитные качества ограждения.

Стенки, состоящие из нескольких слоев разнородных материалов, называются многослойными (л. XLVIII, рис. 3).

Примером многослойной стены являются:

1) обычные кирпичные стены с наружной и внутренней штукатуркой;

2) утепленные панели, состоящие из слоев конструктивного и термоизоляционного материалов.

Плоская многослойная стенка из различ-

ных материалов, слои которого расположены параллельно поверхностям стенки, обладают одномерным температурным полем.

Термическое сопротивление многослойной стенки равно сумме термических сопротивлений всех слоев, содержащихся в стенке, и определяется по формуле

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (\text{III.37})$$

где

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ — толщины слоев стенки;
 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности материала слоев стенки;

$R_1, R_2, \dots, R_n$ — термические сопротивления слоев стенки.

3. Сопротивление теплопередаче плоской стенки

Стационарный тепловой поток, проходящий через плоскую однородную стенку из одной воздушной среды в другую, на своем пути не изменяет своей величины и прямолинейного направления. Вследствие этого тепловой поток на различных участках его пути можно выразить в следующем виде:

а) при прохождении из внутренней среды к внутренней поверхности ограждения

$$q = \frac{t_b - \tau_b}{R_b};$$

б) при прохождении толщ. ограждения

$$q = \frac{\tau_b - \tau_n}{R};$$

в) при прохождении от наружной поверхности ограждения в наружную среду

$$q = \frac{\tau_n - t_n}{R_n}.$$

Разность температуры между поверхностями стенки и соприкасающимися с ними внутренней и наружной средами

$$t_b - \tau_b = qR_b;$$

$$\tau_b - \tau_n = qR;$$

$$\tau_n - t_n = qR_n.$$

Складывая все эти значения, получаем

$$t_b - t_n = q(R_b + R + R_n),$$

откуда

$$q = \frac{t_b - t_n}{R_b + R + R_n} = \frac{t_b - t_n}{R_0} = K(t_b - t_n),$$

где R_0 — сопротивление теплопередаче стенки в $\text{м}^2 \text{ ч град/ккал}$;

K — коэффициент теплопередачи стенки в $\text{ккал}/\text{м}^2\text{ч град}$.

Сопротивление теплопередаче R_0 стенки, определяемое по формуле

$$R_0 = R_a + R + R_n, \quad (\text{III.38})$$

является основным показателем теплозащитных качеств ограждения и используется при проектировании ограждения.

Коэффициент теплопередачи K стенки является величиной, обратной сопротивлению теплопередаче R_0 стенки,

$$K = \frac{1}{R_0}$$

и используется в основном при проектировании отопления для определения теплотерь здания через ограждения.

Пример 1. Определить сопротивление теплопередаче R_0 трехслойного ограждения (л. XLVII, рис. 3) при следующих данных:

Цементно-песчаная штукатурка на внутренней поверхности ограждения . . .	$\delta_1 = 2 \text{ см}$	$\lambda_1 = 0,65$
Пеностекло	$\delta_2 = 10 \text{ см}$	$\lambda_2 = 0,1$
Железобетонная плита . . .	$\delta_3 = 4 \text{ см}$	$\lambda_3 = 1,2$

Решение.

1) По формуле (III.36) находим термическое сопротивление

а) внутренней цементно-песчаной штукатурки

$$R_1 = \frac{0,02}{0,65} = 0,031;$$

б) пеностекла

$$R_2 = \frac{0,1}{0,1} = 1;$$

в) железобетонной плиты

$$R_3 = \frac{0,04}{1,2} = 0,033.$$

2) По формуле (III.37) находим термическое сопротивление ограждения в целом:

$$R = 0,031 + 1 + 0,033 = 1,064.$$

3) По формуле (III.38) находим сопротивление теплопередаче ограждения при $R_a = 0,133$ и $R_n = 0,05$:

$$R_0 = 0,133 + 1,064 + 0,05 = 1,247 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал}.$$

4. Температурное поле многослойного ограждения

Ограждение, состоящее из нескольких слоев материала с различными коэффициентами теплопроводности (рис. III.3), имеет сопротивление теплопередаче

$$R_0 = R_a + R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (\text{III.39})$$

где

R_a и R_n — сопротивления теплопередаче у поверхности ограждения;

$R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ — термическое сопротивление отдельных слоев материала ограждения.

Температура окружающей воздушной среды равняется t_n и t_n , причем $t_n > t_n$.

Чтобы установить распределение температуры по сечению данного ограждения, требуется определить температуру лишь в характерных плоскостях ограждения. Такими плоскостями являются внутренняя и наружная поверхности стенки и плоскости соприкосновения смежных слоев разнородных материалов стенки. Внутри однородного слоя материала температура распределяется по прямой линии (III.18). При стационарных условиях теплопередачи из одной воздушной среды через многослойное ограждение в другую воздушную среду тепловой поток проходит ограждение по кратчайшему пути, не изменяя своей величины:

$$q = \frac{t_n - t_n}{R_0}.$$

В этом случае тепловой поток, воспринимаемый внутренней поверхностью ограждения

$$q_n = \frac{t_n - \tau_n}{R_n}.$$

равняется тепловому потоку, проходящему через ограждение.

Приравняв эти уравнения, получаем

$$\frac{t_n - t_n}{R_0} = \frac{t_n - \tau_n}{R_n}.$$

Отсюда находим температуру внутренней поверхности ограждения

$$\tau_n = t_n - \frac{t_n - t_n}{R_0} R_n. \quad (\text{III.40})$$

Тепловой поток из внутренней воздушной среды, проходящий через первый слой материала, равняется

$$q_1 = \frac{t_n - t_1}{R_n + R_1}$$

и также равняется тепловому потоку, проходящему через ограждение, т. е.

$$\frac{t_n - t_n}{R_0} = \frac{t_n - \tau_1}{R_n + R_1},$$

откуда находим температуру τ_1 наружной поверхности первого слоя материала

$$\tau_1 = t_n - \frac{t_n - t_n}{R_0} (R_n + R_1).$$

Аналогичным путем находим температуру на противоположной поверхности второго слоя

$$t_2 = t_b - \frac{t_b - t_n}{R_0} (R_0 + R_1 + R_n).$$

Температура наружной поверхности n -го слоя, считая от внутренней поверхности стенки, определяется по формуле

$$t_n = t_b - \frac{t_b - t_n}{R_0} (R_0 + \Sigma R_n), \quad (\text{III.41})$$

где t_n — температура наружной поверхности n -го слоя стенки, считая от внутренней поверхности стенки;

ΣR_n — сумма термических сопротивлений n первых слоев материала ограждения, считая от внутренней поверхности ограждения;

R_n — сопротивление теплопереходу у внутренней поверхности ограждения.

Эта формула позволяет вычислять температуру на границах любых слоев материала ограждения.

Обычно вычисленное распределение температуры по сечению стенки изображается графически. Для этого значения температуры поверхностей всех смежных слоев с помощью температурной шкалы переносятся в виде точек на чертеж стенки и в последовательном порядке соединяются между собой прямыми линиями. Полученная температурная линия для многослойной стенки из разнородных материалов представляет собой ломаную линию. Более интенсивное изменение температуры по толщине слоя имеет место в слоях материала с меньшим значением λ и характеризуется более крутым участком температурной линии в данном слое (л. XLVIII, рис. 4,а).

Распределение температуры по сечению многослойной стенки из разнородных материалов возможно определить графическим способом. Для этого следует многослойные ограждения из разнородных материалов привести к виду однородного ограждения с общим коэффициентом теплопроводности для всех слоев материала, представив сопротивление теплопередаче данного ограждения в следующем виде:

$$R_0 = R_b + R_1 + R_2 + \dots + R_n = R_{\text{прив}} = \frac{\Delta_{\text{прив}}}{\lambda_{\text{прив}}},$$

откуда имеем

$$\Delta_{\text{прив}} = \lambda_{\text{прив}} R_0 = \lambda_{\text{прив}} (R_b + R_1 + R_2 + \dots + R_n), \quad (\text{III.42})$$

где $R_{\text{прив}}$ — условное термическое сопротивление приведенного к однородности ограждения;

$\Delta_{\text{прив}}$ — условная толщина приведенного к однородности ограждения;

$\lambda_{\text{прив}}$ — условный коэффициент теплопроводности приведенного к однородности материала ограждения.

На первом разрезе в произвольном масштабе изображаются толщины стенки и ее слоев. На втором разрезе (рис. XLVIII, 4,б) изображается эта же стенка, но в произвольном масштабе, приведенном к однородности ее толщины. Поскольку приведенная толщина стенки пропорциональна сопротивлению теплопередаче многослойной стенки, то ее изображают в масштабе сопротивления теплопередаче R_0 многослойной стенки. В этом случае на разрезе вместо приведенной толщины стенки и ее слоев изображается в произвольном масштабе сопротивление теплопередаче R_0 , сопротивления теплопереходу R_b и R_n и термические сопротивления отдельных слоев стенки.

Параллельно поверхностям стенки проводится вертикальная шкала температуры, с которой на внутреннюю и наружную поверхности условной стенки переносятся точки, соответствующие температуре t_n и t_b окружающей воздушной среды. Прямая линия, соединяющая эти точки, показывает изменение температуры по сечению условной стенки (III.48). Проектируя точки пересечения данной прямой линии с характерными плоскостями ограждения на соответствующие плоскости первого разреза и соединяя последовательно эти точки между собой, получаем температурную линию по сечению многослойной стенки из разнородных материалов. Численные значения температуры в любой плоскости стенки определяются по температурной шкале. Результаты аналитического и графического расчетов распределения температуры многослойной стенки идентичны.

Пример 2. Вычислить распределение температуры в многослойном ограждении, приведенном в примере 1 при следующих данных:

1) температура внутреннего воздуха $t_n = 18^\circ$;

2) температура наружного воздуха $t_b = -32^\circ$.

Решение. По формуле (III.40) определяется температура внутренней поверхности ограждения

$$t_a = 18 - \frac{18 - (-32)}{1,247} \cdot 0,133 = 18 - 5,3 = 12,7^\circ.$$

По формуле (III.41) в последовательном порядке определяется температура наружной поверхности каждого слоя материала, начиная от внутренней поверхности ограждения:

а) температура под внутренней штукатуркой

$$t_1 = 18 - \frac{18 - (-32)}{1,247} (0,133 + 0,031) = 11,4^\circ;$$

б) температура под пеностеклом

$$t_2 = 18 - \frac{18 - (-32)}{1,247} (0,133 + 0,031 + 1) = -28,5^\circ;$$

в) температура наружной поверхности ограждения

$$\tau_0 = 18 - \frac{18 - (-32)}{1,247} \times \\ \times (0,133 + 0,031 + 1 + 0,033) = -30^\circ.$$

На л. XLVII, рис. 4 изображены результаты аналитического и графического расчета распределения температуры по сечению данного трехслойного ограждения.

5. Плоские ограждения с воздушными прослойками

Воздушные прослойки в ограждающих конструкциях представляют собой замкнутые полости, заполненные воздухом и расположенные параллельно поверхностям ограждения.

Теплотехнический эффект воздушных прослоек состоит в том, что воздух, заполняющий пустоты, обладает по сравнению со строительным материалом меньшим коэффициентом теплопроводности и при определенных условиях может выполнять функции утеплителя.

Теплотехнический расчет ограждения с воздушными прослойками не отличается от подобного расчета беспустотного ограждения за исключением определения термического сопротивления воздушной прослойки.

Это обусловлено различным характером теплопередачи через слои беспустотного ограждения и через воздушные прослойки.

Если через все слои беспустотного ограждения теплопередача осуществляется посредством теплопроводности, то теплопередача через воздушную прослойку осуществляется одновременно всеми тремя видами теплопередачи: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Изобразим вертикальный разрез ограждения с воздушной прослойкой, имеющей толщину δ и температуру на поверхностях τ_1 и τ_2 , причем $\tau_1 > \tau_2$ (л. XLVIII, рис. 5).

Количество тепла, передаваемого через неподвижную воздушную среду прослойки посредством теплопроводности, обратно пропорционально толщине прослойки и выражается формулой

$$q_T = (\tau_1 - \tau_2) \frac{\lambda_T}{\delta}, \quad (\text{III.43})$$

где q_T — тепловой поток тепла, проходящий через воздушную прослойку в $\text{ккал/м}^2\text{ч}$;

λ_T — коэффициент теплопроводности воздуха в $\text{ккал/м}^2\text{ч град}$.

В воздушных прослойках противоположные поверхности в направлении теплового по-

тока обладают различной температурой, вследствие чего в прослойке имеет место естественная конвекция воздуха, осуществляющая конвективную теплопередачу через воздушную прослойку.

С увеличением толщины прослойки и увеличением разности температуры между ее противоположными поверхностями конвективная теплопередача возрастает.

Количество тепла, передаваемое через воздушную прослойку посредством конвекции, равняется

$$q_k = (\tau_1 - \tau_2) \frac{\lambda_k}{\delta}, \quad (\text{III.44})$$

где q_k — тепловой поток, передаваемый через воздушную прослойку посредством конвекции;

λ_k — условный коэффициент теплопередачи конвекцией.

Условный коэффициент теплопередачи конвекцией является величиной переменной, зависящей от толщины и расположения воздушной прослойки, разности температуры между ее противоположными поверхностями и направления пересекающего ее теплового потока; при этом λ_k возрастает с увеличением как толщины прослойки, так и разности температуры между ее противоположными поверхностями.

С уменьшением толщины прослойки замедляется конвективное движение воздуха в прослойке. При толщине прослойки 5 мм прекращается конвекция воздуха в прослойке, в этом случае $\lambda_k = 0$.

В горизонтальных воздушных прослойках ограждающих конструкций, расположенных над неотапливаемыми помещениями и наружными проездами, тепловой поток проходит через воздушную прослойку сверху вниз. Здесь более нагретые слои воздуха располагаются в верхней части прослойки. В этом случае также отсутствует конвекция воздуха в прослойке и условный коэффициент теплопередачи конвекцией $\lambda_k = 0$.

В табл. III.2 приводятся значения величины $(\lambda_T + \lambda_k)$ для вертикальных воздушных прослоек в зависимости от толщины прослойки δ и разности температур на ее поверхности $\tau_1 - \tau_2$.

Количество тепла, передаваемое через воздушную прослойку излучением, не зависит от толщины прослойки и выражается следующей формулой:

$$q_L = \lambda_L (\tau_1 - \tau_2), \quad (\text{III.45})$$

Значения $\lambda_T + \lambda_k$ для вертикальных прослоек (по К. Ф. Фокину)

δ в см $\tau_1 - \tau_2$ в град С	1	2	3	5	7	10	12	15	20	25
1	0,02	0,021	0,029	0,042	0,054	0,07	0,08	0,096	0,12	0,14
2,5	0,02	0,027	0,036	0,053	0,068	0,089	0,101	0,12	0,15	0,177
5	0,021	0,032	0,043	0,063	0,081	0,106	0,121	0,143	0,178	0,207
10	0,022	0,038	0,051	0,075	0,096	0,125	0,142	0,17	0,213	0,25
15	0,024	0,042	0,056	0,083	0,106	0,138	0,158	0,0188	0,236	0,276
20	0,026	0,045	0,061	0,089	0,114	0,148	0,17	0,202	0,256	0,297
25	0,028	0,048	0,064	0,094	0,121	0,157	0,18	0,214	0,263	0,314
30	0,029	0,05	0,067	0,099	0,126	0,164	0,19	0,224	0,28	0,329

где $\lambda_d = \alpha_d = C'$ — коэффициент теплопередачи излучением, определяемый по формуле (III.29').

Коэффициент теплопередачи излучением λ_d является переменной величиной, зависящей от приведенного коэффициента излучения C' и температурного коэффициента φ взаимооблучаемых поверхностей воздушной прослойки.

Температурный коэффициент φ зависит от

средней температуры взаимооблучаемых поверхностей воздушной прослойки.

Общее количество тепла, проходящее через воздушную прослойку, является суммой всех трех видов теплопередачи

$$q = q_T + q_k + q_d = (\tau_1 - \tau_2) \frac{\lambda_T + \lambda_k + \delta \lambda_d}{\delta} =$$

$$= (\tau_1 - \tau_2) \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\delta},$$

Таблица III.3

Значения температурного коэффициента φ в зависимости от средней температуры воздушной прослойки

$\frac{\tau_1 + \tau_2}{2}$ в град С	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25
φ	1,06	1,01	0,96	0,91	0,85	0,81	0,77	0,73	0,69	0,65	0,61

В табл. III.3 приводятся вычисленные значения φ , из которых видно, что с уменьшением средней температуры воздушной прослойки уменьшается и температурный коэффициент φ , т. е. теплозащитные свойства воздушной прослойки повышаются. Поэтому для повышения теплозащитных качеств ограждения воздушные прослойки следует располагать ближе к наружной поверхности ограждения.

Понижение коэффициента излучения и средней температуры поверхностей воздушной прослойки соответственно уменьшает приведенный коэффициент излучения C' и температурный коэффициент φ этих поверхностей и тем самым снижает теплопередачу излучением через воздушную прослойку.

Значительное снижение теплопередачи излучением достигается при отделке внутренних поверхностей воздушной прослойки фольгой, обладающей малым коэффициентом излучения ($C=0,2-0,4$).

где $\lambda_{\text{экв}}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха в прослойке.

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_T + \lambda_k + \delta \lambda_d. \quad (\text{III.46})$$

В этом случае термическое сопротивление воздушной прослойки будет

$$R_{\text{в. пр}} = \frac{\delta}{\lambda_{\text{экв}}}. \quad (\text{III.47})$$

При практических расчетах наружных ограждающих конструкций с воздушными прослойками, не требующих большой точности, СНиП рекомендует пользоваться табличными значениями термического сопротивления замкнутых воздушных прослоек в наружных ограждениях $R_{\text{в. пр}}$ (табл. III.4), вычисленными с учетом толщины прослойки, ее расположения и направления теплового потока, а также с учетом температуры внутри воздушной прослойки в летних и зимних условиях.

Таблица III.4

Термическое сопротивление воздушных прослоек $R_{в.пр}$ при разности температуры на поверхности прослойки $\Delta t = 10^\circ$

Толщина прослойки δ в мм	$R_{в.пр}$ в $\text{м}^2 \text{ ч град/ккал}$			
	для прослоек вертикальных и горизонтальных при потоке тепла снизу вверх		для горизонтальных прослоек при потоке тепла сверху вниз	
	лето	зима	лето	зима
10	0,147	0,172	0,151	0,179
20	0,155	0,183	0,182	0,222
30	0,16	0,19	0,192	0,238
50	0,165	0,196	0,264	0,256
100	0,172	0,208	0,213	0,27
150	0,175	0,213	0,217	0,278
200—300	0,179	0,217	0,217	0,278

Примечание. При значениях разности температуры на поверхностях прослойки $\Delta t < 10^\circ$ следует для уточнения расчета величины $R_{в.пр}$ умножать на коэффициенты:

при $\Delta t = 8^\circ$ на	$c = 1,05$
• $\Delta t = 6^\circ$ •	$c = 1,1$
• $\Delta t = 4^\circ$ •	$c = 1,25$
• $\Delta t = 2^\circ$ •	$c = 1,4$

Пример 3. Определить сопротивление теплопередаче R_0 наружной стены, состоящей из железобетонной плиты, облицованной изнутри на основе 5-см гипсовой плитой с органическим наполнителем, оклеенной алюминиевой фольгой со стороны воздушной прослойки (л. XLVIII, рис. 6).

Таблица а

Данные для расчета

Материал ограждения	γ в кг/м^3	δ в см	λ в ккал/м ч град	C	R в $\text{м}^2 \text{ ч град/ккал}$
Гипсовая плита с органическим наполнителем	700	10	0,18	4	0,555
Алюминиевая фольга	—	5	—	0,4	—
Воздушная прослойка	—	—	—	—	—
Железобетонная плита	2500	5	1,25	3,1	0,04

Температура внутреннего воздуха $t_{в} = 18^\circ$; температура наружного воздуха $t_{н} = -26^\circ$.

$R_{в} = 0,133 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал}$; $R_{н} = 0,05 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал}$.

Решение.

1) Принимая $\tau_1 - \tau_2 = 17^\circ$ и $0,5 (\tau_1 + \tau_2) = -14^\circ$, находим:

а) по табл. III.2 ($\lambda_{\text{гипс}} + \lambda_{\text{фольга}} = 0,096$;

б) по формуле (III.29) $\lambda_{\text{д}} = C' \varphi = 0,381 \cdot 0,7 = 0,267$;

в) по формуле (III.46) $\lambda_{\text{эфф}} = 0,086 + 0,05 \cdot 0,267 = 0,099$;

г) по формуле (III.47) $R_{в.пр} = \frac{0,05}{0,099} = 0,505$.

2) Сопротивление теплопередаче ограждения

$R_0 = 0,133 + 0,555 + 0,505 + 0,04 + 0,05 = 1,283$.

3) Температура на поверхностях воздушной прослойки

$$\tau_1 = 18 - \frac{18 + 26}{1,283} (0,133 + 0,555) = -5,6^\circ;$$

$$\tau_2 = 18 - \frac{18 + 26}{1,283} (0,133 + 0,555 + 0,504) = -23^\circ;$$

$$\tau_1 - \tau_2 = -5,6 + 23 = 17,4^\circ;$$

$$0,5 (\tau_1 + \tau_2) = 0,5 (-5,6 - 23) = -14,3.$$

Пример 4. Определить R_0 наружной стены примера 3 без алюминиевой фольги.

Решение.

1) Принимая $(\tau_1 - \tau_2) = 12^\circ$ и $0,5 (\tau_1 + \tau_2) = 16^\circ$, находим:

а) $\lambda_{\text{г}} + \lambda_{\text{к}} = 0,078$;

б) $\lambda_{\text{д}} = 2,59 \cdot 0,68 = 1,79$;

в) $\lambda_{\text{эфф}} = 0,078 + 0,05 \cdot 1,79 = 0,167$;

г) $R_{в.пр} = \frac{0,05}{0,167} = 0,299$.

2) Сопротивление теплопередаче ограждения

$R_0 = 0,133 + 0,555 + 0,299 + 0,04 + 0,05 = 1,077$.

3) Температура на поверхностях воздушной прослойки

$$\tau_1 = 18 - \frac{18 + 26}{1,077} 0,688 = -10,1^\circ;$$

$$\tau_2 = 18 - \frac{18 + 26}{1,077} 0,987 = -22,3^\circ;$$

$$\tau_1 - \tau_2 = -10,1 + 22,3 = 12,2^\circ;$$

$$0,5 (\tau_1 + \tau_2) = (-10,1 - 22,3) 0,5 = -16,2^\circ.$$

Применение алюминиевой фольги в качестве отражательной теплоизоляции в замкнутой воздушной прослойке повысило термическое сопротивление воздушной прослойки $R_{в.п}$ на 69%, сопротивление теплопередаче ограждения R_0 на 19%.

Еще в большей степени возрастает эффективность применения отражательной теплоизоляции в ограждающих конструкциях с несколькими слоями параллельных воздушных прослоек, армированных алюминиевой фольгой, а также в горизонтальных прослойках при направлении теплового потока сверху вниз.

Применение фольги в качестве отражательной теплоизоляции имеет значительное распространение в зарубежных странах, где оно зарекомендовало себя с лучшей стороны.

Однако, несмотря на высокую эффективность, отражательная теплоизоляция у нас до сих пор не получила распространения.

6. Неоднородные плоские стенки с двух- и трехмерными температурными полями

В плоских многослойных стенках, в которых слои разнородных материалов расположены параллельно поверхности стенки, однородность материала нарушена в направлении теплового потока. Здесь в плоскости каждого слоя материала температура и тепловой поток имеют равномерное распределение. Такие стенки обладают одномерным температурным полем.

Весьма часто в толще ограждения располагаются конструктивные элементы ограждения из материала более высокой теплопроводности по сравнению с основным материалом ограждения. Такими конструктивными элементами, заделанными в толще однородного ограждения, могут быть железобетонные каркасы, пояса, перемычки и т. п.

Наличие в однородном ограждении теплопроводных включений, занимающих ограниченную площадь, нарушает одномерность температурного поля в зоне влияния этих включений. Здесь тепловой поток отклоняется от прямолинейного прохождения толщи ограждения и равномерность температуры в плоскостях, параллельных поверхностям ограждения, нарушается.

Участки стены с теплопроводным включением обладают повышенной теплопередачей, что может отразиться на общей теплопередаче ограждения. Но наиболее отрицательное влияние теплопроводных включений проявляется в понижении температуры участка внутренней поверхности ограждения в зоне влияния теплопроводного включения. Здесь температура может иметь значение ниже точки росы внутреннего воздуха, что приведет к образованию конденсата и отсыреванию этих участков внутренней поверхности.

Одномерность температурного поля ограждения нарушается также в наружных углах здания и в местах примыкания внутренних стен, перегородок, междуэтажных перекрытий и т. д. к наружным стенам здания.

Обычно на внутренней поверхности углового сопряжения этих элементов имеет место понижение температуры. Особенно значительное снижение температуры обнаруживается на внутренней поверхности наружного угла ограждения. Понижение температуры на внутренней поверхности в угловых сопряжениях наружного ограждения обусловлено:

а) различной площадью теплового сопротивления и теплоотдачи угловых сопряжений наружного ограждения. Наружная теплоотдающая

поверхность имеет большую площадь, чем внутренняя теплопринимающая поверхность ограждения;

б) в углах здания замедлены конвективные токи воздуха, вследствие чего меньшее количество тепла поступает к угловой поверхности по сравнению с гладкой поверхностью стены.

Повышение температуры внутренней поверхности угла возможно путем утепления угла с наружной стороны ограждения или же путем изменения формы углового сопряжения внутри здания.

Теплозащитные качества подобных участков наружных ограждающих конструкций возможно установить из решения уравнения Лапласа (III.15) или путем экспериментального исследования их в натурных и лабораторных условиях.

7. Применение метода конечных разностей при решении задачи двухмерного стационарного температурного поля

Точное аналитическое решение задачи стационарного двухмерного температурного поля (III.15) является весьма сложным. Для практических целей обычно используются методы приближенного решения данной задачи.

Одним из методов приближенного решения уравнения (III.15) является метод численного интегрирования посредством конечных разностей. Сущность этого метода заключается в том, что уравнение (III.15) представляется в виде системы линейных уравнений, которые получаются при замене производных уравнения (III.15) их разностными выражениями, охватывающими всю исследуемую область температурного поля.

Разностные уравнения весьма просто получаются из уравнения теплового баланса стационарного теплового потока

$$\frac{\Delta Q_x}{\Delta x} + \frac{\Delta Q_y}{\Delta y} = 0, \quad (\text{III.48})$$

которое является водоизмененным уравнением (III.15).

Разложение уравнения (III.48) по конечным разностям производится следующим путем.

На исследуемое температурное поле (поперечный разрез ограждения) накладывается прямоугольная сетка (л. XLVIII, рис. 7) и для каждого ее узла составляется уравнение теплового баланса.

$$\begin{aligned} Q_{(x-\Delta x)-x} &= k_1(t_{x,y} - t_{x-\Delta x,y}); \\ Q_{x-(x+\Delta x)} &= k_2(t_{x+\Delta x,y} - t_{x,y}); \\ \Delta Q_x &= Q_{(x-\Delta x)-x} - Q_{x-(x+\Delta x)} = \\ &= (k_1 + k_2)t_{x,y} - k_1 t_{x-\Delta x,y} - k_2 t_{x+\Delta x,y}. \end{aligned}$$

По аналогии находим

$$\Delta Q_y = (k_2 + k_4) t_{x,y} - k_2 t_{x,y-\Delta y} - k_4 t_{x,y+\Delta y}.$$

Подставляя значения ΔQ_x и ΔQ_y в уравнение (III.48) и решая его относительно $t_{x,y}$, получаем линейное уравнение температуры узла (x, y) прямоугольной сетки стационарного двухмерного температурного поля неоднородной среды

$$t_{x,y} = \frac{\Delta y (k_1 t_{x-\Delta x,y} + k_2 t_{x+\Delta x,y})}{\Delta y (k_1 + k_2) + \Delta x (k_3 + k_4)} + \frac{\Delta x (k_2 t_{x,y-\Delta y} - k_4 t_{x,y+\Delta y})}{\Delta y (k_1 + k_2) + \Delta x (k_3 + k_4)}. \quad (\text{III.49})$$

Уравнения температурного поля для ограждения, находящегося под воздействием окружающей воздушной среды, имеют граничные условия третьего рода, которые определяются заданной температурой t_a и t_n воздушной среды и соответствующими коэффициентами теплоперехода α_a и α_n у поверхности ограждения.

В уравнениях конечных разностей для узлов сетки, расположенных на границе ограждения и воздушной среды, коэффициент α и температура воздушной среды t входят в виде произведения и образуют свободный член данных линейных уравнений. Поэтому разность между температурой любой точки ограждения и температурой внутреннего или наружного воздуха пропорциональна разности температур внутреннего и наружного воздуха. Это дает возможность по одному решению температурного поля при неизменном значении коэффициентов теплоперехода α_a и α_n определять температурное поле этого же ограждения для любой температуры окружающего воздуха без решения системы уравнения.

Решение уравнения (III.15) путем непосредственного составления и решения системы линейных уравнений температурного поля является весьма трудоемким. Значительно проще эта задача решается посредством электро-моделирования, путем использования термо-электрической аналогии.

Термоэлектрическая аналогия заключается в том, что распределение температуры в стационарном температурном поле и напряжения в электростатическом поле выражаются одним и тем же математическим уравнением (III.15). Вследствие этого между определенными термическими и электрическими параметрами существует аналогия, что позволяет из решения электрической задачи получать решение задачи температурного поля.

Одним из электро моделирующих устройств является сетчатый электроинтегратор,

посредством которого решаются уравнения температурного поля в конечных разностях.

Электроинтегратор представляет собой электрическую сетку, между узлами которой включены омические сопротивления, изменяемые в целых числах от 0 до 100. Крайние узлы сетки присоединены к шинам, на которых создаются краевые потенциалы электрического поля.

Для решения задачи стационарного температурного поля посредством электроинтегратора вычисляются термические сопротивления между смежными узлами сетки, наложенной на исследуемую область температурного поля.

Термические сопротивления R между узлами расчетной сетки температурного поля и краевые температуры t_a и t_n рассматриваются соответственно как омические сопротивления между соответствующими узлами сетки электроинтегратора и как краевые потенциалы электростатического поля.

При прямоугольной сетке с различными сторонами ячеек количество тепла, передаваемое между узлами, пропорционально ширине полосы Δ прохождения теплового потока между узлами расчетной сетки. Если в этом случае при составлении линейных уравнений конечных разностей (III.49) вычисляются произведения $k_x \Delta y$ и $k_y \Delta x$, то для сетки электроинтегратора омические сопротивления вычисляются как величины, обратные этим произведениям:

$$\frac{1}{k_x \Delta y} = \frac{R_x}{\Delta y}; \quad \frac{1}{k_y \Delta x} = \frac{R_y}{\Delta x}.$$

Посредством гальванометра замеряются разности потенциалов между границей и соответствующими узлами сетки электроинтегратора. Замеренные разности потенциалов электростатического поля пропорциональны температуре искомого температурного поля.

Переход от электростатического поля к температурному осуществляется по формуле

$$t_x = t_a - m(P_1 - P_x), \quad (\text{III.50})$$

где t_x — искомая температура температурного поля;

$$m = \frac{P_1 - P_2}{t_a - t_n}.$$

$P_1 - P_x$ — разность потенциалов между границей электростатического поля и узлом x сетки электроинтегратора;

$P_1 - P_2$ — разность граничных потенциалов электростатического поля;

$t_{в}-t_{н}$ — разность температуры внутреннего и наружного воздуха.

8. Упрощенные способы определения теплозащитных качеств ограждающих конструкций с двухмерным температурным полем

При практических расчетах ограждающих конструкций с двухмерным температурным полем, не требующих большой точности, обычно пользуются упрощенными способами расчета, позволяющими определять:

а) среднее термическое сопротивление ограждения с термовкладышами и прерывистыми воздушными прослойками, располагаемыми в ограждении на близком расстоянии друг от друга;

б) минимальную температуру на внутренней поверхности ограждения с включениями повышенной теплопроводности, занимающими весьма ограниченную площадь стены и находящимися друг от друга на значительном расстоянии (колонны, пояса, стыки и ребра панелей и т. п.).

А. Ограждающие конструкции с термовкладышами и прерывистыми воздушными прослойками

Для повышения теплозащитных качеств ограждения и снижения его собственного веса теплоизоляционные материалы в наружных ограждающих конструкциях могут применяться не только в виде сплошных слоев, но также в виде отдельных малотеплопроводных включений, нарушающих однородность материала как в направлении, параллельном тепловому потоку ($\parallel q$), так и в направлении, перпендикулярном ему ($\perp q$).

К таким ограждающим конструкциям относятся ограждения из пустотелых блоков и камней, кладки с утепляющими вкладышами, блоки с термовкладышами и прерывистыми воздушными прослойками и т. п. Теплозащитные качества таких ограждающих конструкций оцениваются по среднему значению сопротивления теплопередаче

$$R_{0\text{ср}} = R_{в} + R_{сп} + R_{н}. \quad (\text{III.51})$$

Если принять $R_{в}$ и $R_{н}$ независимыми от температурного поля ограждения, то определение теплозащитных показателей ограждения сводится к определению лишь среднего значения термического сопротивления $R_{сп}$, для чего из рассматриваемой конструкции выделяется повторяющийся элемент (л. XLVIII, рис. 8,б). Среднее термическое сопротивление этого элемента является в то же время средним термическим сопротивлением всего ограждения. Термическое сопротивление повто-

ряющегося элемента ограждения определяется следующим образом.

1) Плоскостями, параллельными направлению теплового потока ($\parallel q$), повторяющийся элемент расчленяется на характерные в теплотехническом отношении участки, состоящие из одного или нескольких слоев. Среднее термическое сопротивление ограждения $R_{\parallel}$ при расчленении его плоскостями на слои, параллельные тепловому потоку ($\parallel q$), определяется по формуле

$$R_{\parallel} = \frac{F_{\text{I}} + F_{\text{II}} + F_{\text{III}} + \dots}{\frac{F_{\text{I}}}{R_{\text{I}}} + \frac{F_{\text{II}}}{R_{\text{II}}} + \frac{F_{\text{III}}}{R_{\text{III}}} + \dots}, \quad (\text{III.52})$$

где R_{I} , R_{II} , R_{III} — термическое сопротивление отдельных характерных участков на поверхности ограждения, вычисленные по формулам (III.36) или (III.37);

F_{I} , F_{II} , F_{III} — площади отдельных участков по поверхности ограждения.

2) Плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока ($\perp q$), повторяющийся элемент расчленяется на слои, из которых одни могут состоять только из одного материала, а другие из участков с различными материалами. Термическое сопротивление однородных слоев вычисляется по формуле (III.36), неоднородных — по формуле (III.52).

Среднее термическое сопротивление ограждения $R_{\perp}$ при расчленении его плоскостями на слои, перпендикулярные тепловому потоку ($\perp q$), определяется как сумма термических сопротивлений отдельных слоев.

Между значениями $R_{\parallel}$ и $R_{\perp}$ имеется соотношение. Всегда $R_{\parallel} > R_{\perp}$.

Степень расхождения между $R_{\parallel}$ и $R_{\perp}$ зависит от формы и расположения неоднородных включений в ограждении и от соотношения коэффициентов теплопроводности основного материала ограждения и материала включения.

Среднее термическое сопротивление ограждения $R_{\text{ср}}$ вычисляется по приближенной формуле

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{\parallel} + 2R_{\perp}}{3}. \quad (\text{III.53})$$

Пример 5. Наружная стена толщиной $\delta = 35$ см выполнена из бетонных блоков с термовкладышами из пенобетона. Термовкладыши размером 40×10 см расположены в два ряда на расстоянии 10 см один от другого и 4 см между рядами (л. XLVIII, рис. 8). Материал блоков: бетон $\gamma = 2000 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,8 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$; пенобетон $\gamma = 400 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,11 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Порядок расчета

Выделяем из ограждения повторяющийся элемент (л. XLVIII, рис. 8,б).

1) Расчленим повторяющийся элемент плоскостями Π на слои I, II и III, параллельные направлению теплового потока, и определим термическое сопротивление их по формуле (III.37)

$$R_I = \frac{0,05 + 0,04 + 0,1 + 0,06}{0,8} + \frac{0,1}{0,11} = 1,222;$$

$$R_{II} = \frac{0,05 + 0,04 + 0,06}{0,8} + \frac{0,1 + 0,1}{0,11} = 2,008;$$

$$R_{III} = R_I = 1,222 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал.}$$

Площади поверхностей слоев I, II и III равны:

$$F_I = a_I l; \quad F_{II} = a_{II} l; \quad F_{III} = a_{III} l,$$

где l — протяженность термовкладыша по высоте блока. При $l = 1$ $F_I = a_I$; $F_{II} = a_{II}$; $F_{III} = a_{III}$.

По формуле (III.52) находим

$$R_{\Sigma} = \frac{5 + 10 + 5}{\frac{5}{1,222} + \frac{10}{2,008} + \frac{5}{1,222}} = \frac{20}{8,16 + 5} = 1,52 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал.}$$

2) Расчленим повторяющийся элемент плоскостями m на слои 1—5, перпендикулярные направлению теплового потока, и по формуле (III.36) определим термическое сопротивление их

$$R_1' = \frac{0,05}{0,8} = 0,062; \quad R_3' = \frac{0,04}{0,8} = 0,05;$$

$$R_5' = \frac{0,06}{0,8} = 0,075.$$

По формуле (III.36) находим для 2 и 4 слоев

$$R_1' = \frac{0,1}{0,11} = 0,91; \quad a_I = 5 \text{ см};$$

$$R_{II}' = R_1' = 0,91; \quad a_{II} = 10 \text{ см};$$

$$R_{III}' = \frac{0,1}{0,8} = 0,125; \quad a_{III} = 5 \text{ см.}$$

По формуле (III.52) имеем

$$R_2 = R_4 = \frac{5 + 10 + 5}{\frac{5 + 10}{0,91} + \frac{5}{0,125}} = 0,35.$$

По формуле (III.37) получаем

$$R_{\Sigma} = 0,032 + 0,35 + 0,05 + 0,35 + 0,075 = 0,887 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал.}$$

3) Среднее термическое сопротивление всего ограждения равняется

$$R_{\text{ср}} = \frac{R_{II} + 2R_{\Sigma}}{3} = \frac{1,52 + 2 \cdot 0,887}{3} = 1,215 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал.}$$

4) Эффективность применения термовкладышей в бетонных блоках видна из следующего сопоставления. Бетонные блоки с термовкладышами $R_{\text{ср}} = 1,215$;

$$P_1 = 409 \text{ кг/м}^2,$$

то же, без термовкладышей $R = 0,44$; $P_2 = 700 \text{ кг/м}^2$.

Применение термовкладышей в бетонных блоках повысило термическое сопротивление блока $R_{\text{ср}}$ в 2,75 раза и понизило собственный вес P на 41%.

Б. Ограждающие конструкции с включениями повышенной теплопроводности

Для определения минимальной температуры на внутренней поверхности ограждения

рассмотрим случай сквозного включения повышенной теплопроводности, понижающего всю толщу однородного ограждения (л. XLVIII, рис. 9).

Температура τ_x внутренней поверхности против сквозного теплопроводного включения зависит от соотношения между шириной a включения и толщиной ограждения.

Уменьшение величины отношения $\frac{a}{\delta}$ вызывает на внутренней поверхности ограждения против теплопроводного включения повышение температуры τ_x , которая в пределе стремится к величине температуры τ_b внутренней поверхности данного ограждения за пределами зоны влияния теплопроводного включения.

Увеличение отношения $\frac{a}{\delta}$ вызывает против теплопроводного включения на внутренней поверхности ограждения понижение температуры τ_x , которая в пределе стремится к температуре внутренней поверхности данного ограждения, выполненного из материала теплопроводного включения.

Значение температуры τ_x находится между значениями τ_b и $\tau_{\text{ж}}$, т. е. $\tau_b > \tau_x > \tau_{\text{ж}}$. Точное определение температуры внутренней поверхности данного ограждения против теплопроводного включения находится из решения уравнения Лапласа (III.15).

Ограждающие конструкции с теплопроводными включениями прямоугольного сечения значительной протяженности (колонны, пояса и т. п.) обладают двухмерным температурным полем. Для таких ограждающих конструкций К. Ф. Фокин предложил упрощенный способ определения приближенного значения температуры τ_x на внутренней поверхности ограждений против теплопроводного включения. Суть этого способа заключается в следующем. Допускается, что разность температур $\tau_b - \tau_x$ пропорциональна разности $\tau_b - \tau_{\text{ж}}$, т. е.

$$\tau_b - \tau_x = \eta(\tau_b - \tau_{\text{ж}}), \quad (\text{III.54})$$

где η — коэффициент пропорциональности

$$\tau_b = t_b - \frac{t_b - t_{II}}{R_3} R_b;$$

$$\tau_{\text{ж}} = t_{\text{ж}} - \frac{t_b - t_{II}}{R_0} R_b;$$

$$\begin{aligned} \tau_b - \tau_{\text{ж}} &= R_b \left(\frac{t_b - t_{II}}{R_3} - \frac{t_b - t_{II}}{R_0} \right) = \\ &= R_b \frac{(R_1 - R_3)(t_b - t_{II})}{R_0 R_3}. \end{aligned}$$

Подставляя значение $(\tau_{в} - \tau_{ж})$ в уравнение (III.54) и решая его относительно τ_x , находим:

$$\tau_x = t_{в} - \frac{R_0' + \eta(R_0 - R_0')}{R_0 R_0'} R_0 (t_{в} - t_{н}), \quad (III.55)$$

$t_{в}$ — температура внутреннего воздуха;

$t_{н}$ — температура наружного воздуха;

R_0 — сопротивление теплопередаче ограждения при отсутствии в нем теплопроводных включений в m^2 и $град/ккал$;

R_0' — сопротивление теплопередаче ограждения по теплопроводному включению в m^2 и $град/ккал$;

$R_в$ — сопротивление тепловосприятию в m^2 и $град/ккал$;

η — коэффициент, зависящий от отношения ширины a теплопроводного включения к толще δ ограждения.

Формула (III.55) позволяет приближенно определять значения температуры на внутренней поверхности ограждения не только против сквозного включения, но и против несквозных теплопроводных включений. В этом случае величина η зависит от соотношения $\frac{a}{\delta}$

и расположения теплопроводного включения в ограждении, а также от его размера H по высоте сечения включения.

Численные значения η для некоторых видов теплопроводных включений, изображенных на л. XLVIII, рис. 10, приводятся в табл. III. 5.

Таблица III.5

Значения η (по СНиП II-A.7-62)

$\frac{a}{\delta}$	0,02	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,5
Схема включения									
I	0,12	0,24	0,39	0,55	0,74	0,83	0,87	0,9	0,95
II	0,07	0,15	0,26	0,42	0,62	0,73	0,81	0,85	0,94
III	0,25	0,5	0,96	1,26	1,27	1,21	1,16	1,1	1
IV	0,04	0,1	0,17	0,32	0,5	0,62	0,71	0,77	0,89

При $\frac{a}{\delta} > 1,5$ участок ограждения с теплопроводным включением рассматривается как самостоятельная часть ограждения, для которой отдельно от остальной части ограждения определяется сопротивление теплопередаче и температура внутренней поверхности.

При площади включений по поверхности ограждения свыше 15% ограждение надлежит рассматривать как неоднородное и определе-

ние термического сопротивления ограждения производить по (III.52).

Пример 6. В кирпичной стене толщиной 51 см расположена железобетонная колонна. Размеры сечения колонны: ширина 20 см, толщина 30 см. Коэффициенты теплопроводности: кирпичной кладки — $\lambda = 0,6$ ккал/м и град; железобетона $\lambda = 1,2$ ккал/м и град.

Определить температуру наиболее охлаждаемого участка внутренней поверхности ограждения при расположении железобетонной колонны заподлицо с внутренней и наружной поверхностями ограждения (л. XLVIII, рис. 10, а).

Расчетная температура: $t_{в} = 18^\circ$; $t_{н} = -26^\circ$.

Сопротивление теплопередаче у внутренней поверхности ограждения: $R_в = 0,133$ м² и град/ккал; $R_н = 0,05$ м² и град/ккал.

Решение.

1) Сопротивление теплопередаче кирпичной стены:

$$R_0 = R_в + R + R_н = 0,133 + \frac{0,51}{0,6} + 0,05 = 1,033 \text{ м}^2 \text{ и град/ккал.}$$

2) Сопротивление теплопередаче стены по сечению теплопроводного включения R_0' не зависит от расположения колонны по отношению к поверхности стены. В обоих случаях

$$R_0' = 0,133 + \frac{0,21}{0,6} + \frac{0,3}{1,2} + 0,05 = 0,783 \text{ м}^2 \text{ и град/ккал.}$$

а) При расположении железобетонной колонны заподлицо с внутренней поверхностью ограждения численное значение η формулы (II.25) находится по табл. III.5.

для схемы III. При $\frac{a}{\delta} = \frac{0,2}{0,51} = 0,4$ $\eta = 1,27$, откуда по формуле (III.55) находим

$$\tau_x = 18 - \frac{0,783 + 1,27(1,033 - 0,783)}{1,033 \cdot 0,783} \times 0,133[18 - (-26)] = 10^\circ.$$

б) При расположении железобетонной колонны заподлицо с наружной поверхностью ограждения численное значение η находится по табл. III.5 для схемы IV

При $\frac{a}{\delta} = 0,4$ $\eta = 0,5$

$$\tau_x = 18 - \frac{0,783 + 0,5(1,033 - 0,783)}{1,033 \cdot 0,783} \times 0,133[18 - (-26)] = 11,4^\circ.$$

Для повышения температуры внутренней поверхности против несквозного включения, образованного железобетонной колонной, целесообразно несквозное теплопроводное включение располагать с наружной стороны ограждения.

9. Лабораторное определение теплотехнических показателей ограждения

Теплотехнические показатели ограждения определяются испытанием макетов ограждения на теплопередачу в климатической ка-

мере, состоящей из камер наружного и внутреннего климата.

В проеме между камерами устанавливается макет, имеющий натуральную толщину ограждения и размеры по ширине и высоте не менее пятикратной толщины.

Внутри камер автоматически поддерживается стационарная температура, соответствующая наружному и внутреннему климату здания.

При наличии разности температуры через толщу ограждения проходит стационарный тепловой поток и устанавливается температурное поле.

Замеры температурного поля и теплового потока производятся посредством термопар или термометров электрического сопротивления и тепломера.

Термодатчики устанавливаются на поверхностях и между слоями многослойного ограждения; на поверхности ограждения устанавливается также тепломер, что дает возможность в одном и том же сечении ограждения одновременно определять распределение температуры (температурное поле) и проходящий тепловой поток.

Термопары представляют собой замкнутую цепь, состоящую из медного и константанового проводов, концы которых спаяны между собой в двух местах. При наличии в местах спаев разности температуры в цепи возникает ЭДС, замеряемая электроизмерительным прибором (потенциометром ПП). Замеры температуры производятся градуированными термопарами, один конец которых устанавливается в месте замера температуры (горячий спай), а другой помещается в термос с тающим льдом при 0° (холодный спай). По величине ЭДС определяется разность температур горячего и холодного спаев, т. е. температура горячего спаев, в данном случае — температура в месте постановки термопары.

Термометры сопротивления состоят из медного провода диаметром 0,05—0,07 мм, заключенного в предохранительную оболочку и включенного в электросеть. По омическому сопротивлению термометра, увеличивающемуся с повышением температуры, определяется температура в месте постановки термометра сопротивления.

Тепломеры представляют собой пластину толщиной 4—6 мм и диаметром 150—300 мм из диэлектриков (резина, эбонит). На поверхностях этой пластины расположены термопары, соединенные последовательно. Поверхности пластин с термопарами покрыты тонким слоем диэлектрика. Тепломеры тарируются и по величине ЭДС определяется величина теп-

лового потока q , проходящего через ограждение и тепломер.

По замеренным значениям температуры и теплового потока, проходящего через макет ограждения, устанавливается:

- а) температурное поле ограждения τ ;
- б) термическое сопротивление ограждения

$$R = \frac{\tau_1 - \tau_2}{q};$$

- в) коэффициент теплопроводности материала

$$\lambda = \frac{q \delta}{\tau_1 - \tau_2},$$

где τ_1 и τ_2 — температура на поверхности ограждения или его отдельных слоев;

δ — толщина ограждения или отдельных его слоев.

10. Периодические колебания температуры

Наружные ограждающие конструкции здания находятся под воздействием переменной температуры наружной и внутренней среды здания. Эти температурные воздействия в подавляющем большинстве случаев имеют периодический характер, т. е. повторяются через определенные промежутки времени. В течение одного промежутка или периода времени температура достигает максимальной и минимальной своей величины, совершая колебания около некоторой своей средней величины.

Таковыми периодически повторяющимися температурными воздействиями на ограждающие конструкции здания являются:

- 1) колебания температуры наружного воздуха в течение одних или нескольких суток, вызываемые непостоянством метеорологических условий;
- 2) колебания температуры внутреннего воздуха при периодическом отоплении здания;
- 3) воздействие солнечной радиации на наружные поверхности ограждения.

Периодические температурные воздействия окружающей среды на ограждающие конструкции вызывают соответствующие колебания температуры на поверхностях и в толще ограждения.

Эксплуатационные качества ограждающих конструкций в значительной мере зависят от степени колебания температуры на внутренней поверхности ограждения. При значительной амплитуде колебания температуры на внутренней поверхности ограждения может иметь место:

1) в зимнее время — периодическое понижение температуры внутренней поверхности ограждения, сопровождаемое отсыревaniem стены здания и переохлаждением его помещений;

2) в летнее время — периодическое повышение температуры внутренней поверхности ограждения выше температуры внутреннего воздуха с последующей отдачей тепла внутрь здания и перегревом его помещений.

Ограждающие конструкции, обладающие одинаковым сопротивлением теплопередаче R_0 и находящиеся под одинаковым воздействием переменной температуры окружающей среды, могут иметь различную амплитуду колебания температуры на внутренней поверхности ограждения, т. е. амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности ограждения зависит не только от степени колебания температуры окружающей среды, но и от так называемых теплоустойчивости ограждения и теплоусвоения его внутренней поверхности.

Теория теплоусвоения и теплоустойчивости ограждения, разработанная О. Е. Власовым и развитая А. М. Шкловером, положена в основу современного теплотехнического расчета ограждающих конструкций здания.

11. Теплоусвоение и тепловая инерция ограждения

Согласно теории О. Е. Власова ограждающие конструкции находятся под воздействием периодически изменяющейся по закону косинусоиды температуры окружающего воздуха. Колебания температуры воздушной среды, соприкасающейся с поверхностью ограждения, вызывают соответствующие колебания температуры и теплового потока на поверхности и в толще ограждения (л. XLIX, рис. 1).

Свойство поверхности ограждения в различной мере воспринимать тепло при периодическом колебании теплового потока или температуры воздуха называется теплоусвоением ограждения.

Возникающие на поверхности ограждения температурные волны и волны теплового потока распространяются в глубь ограждения и по мере проникновения в толщу ограждения постепенно затухают (л. XLIX, рис. 2). При значительной толщине ограждения температурные волны полностью затухают в ограждении. В этом случае максимальные амплитуды колебания температуры A_i и теплового потока A_q на поверхности ограждения имеют значения

$$A_i = \Delta t_{\max} \text{ и } A_q = \Delta t_{\max} \sqrt{\lambda c \gamma \omega}.$$

Рис. 1. Периодические колебания температуры внутренней поверхности ограждения

Рис. 2. Затухание температурных колебаний в толще ограждения

Рис. 3. Изотермы сорбции водяного пара древесиной

Рис. 4. Схемы положения плоскости вероятной конденсации в наружных ограждающих конструкциях

Рис. 5. Влажностное состояние ограждения к концу зимнего периода

Рис. 6. Изотерма сорбции водяного пара фибролитом

Максимальная амплитуда колебания теплового потока на поверхности такого ограждения прямо пропорциональна величине максимальной амплитуды колебания температуры на этой же поверхности ограждения.

Коэффициент этой пропорциональности, называемый коэффициентом теплоусвоения поверхности ограждения, характеризует способность поверхности ограждения поглощать тепло при колебании температуры среды, соприкасающейся с поверхностью ограждения. Коэффициент определяется как отношение максимальной величины амплитуды колебания теплового потока A_q на внутренней поверхности ограждения к максимальной величине амплитуды колебания температуры A_i на этой же поверхности, т. е.

$$S_s = \frac{A_q}{A_i} = \sqrt{\lambda c \gamma \omega} = \sqrt{\lambda c \gamma \frac{2\pi}{T}} = 2,507 \sqrt{\frac{\lambda c \gamma}{T}}, \quad (\text{III.56})$$

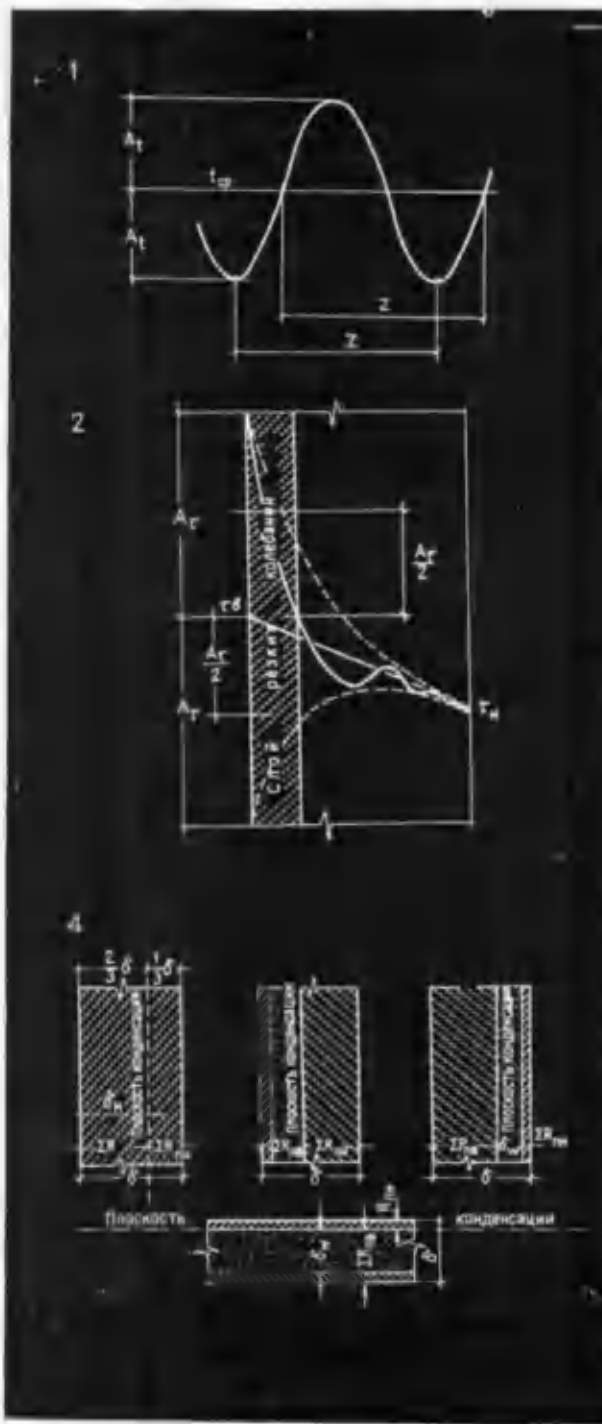
где S_s — коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения в $\text{ккал/м}^2 \text{ ч град}$;

T — продолжительность периода колебания температуры и теплового потока в ч;

λ, c, γ — коэффициент теплопроводности, теплоемкость и объемный вес материала ограждения.

Коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения представляет собой максимальное изменение амплитуды колебания теплового потока на внутренней поверхности ограждения при амплитуде колебания температуры на этой поверхности, равной 1° .

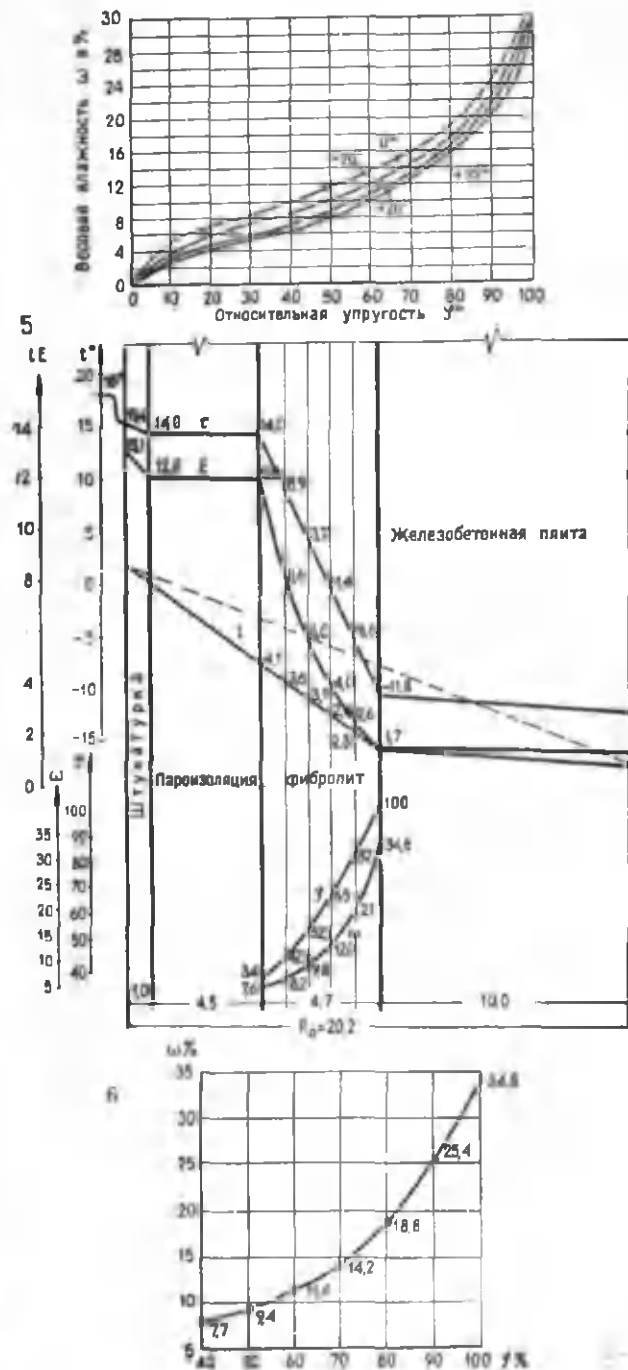
Величина коэффициента теплоусвоения S_s внутренней поверхности ограждения и характер теплообмена между соприкасающимися поверхностью ограждения и воздушной средой зависят от периода колебания температуры T и от теплотехнических свойств материала ограждения. С увеличением величины T



уменьшается $S_{\text{в}}$ и, наоборот, с уменьшением T возрастает $S_{\text{в}}$.

При $T \rightarrow \infty$ $S_{\text{в}} \rightarrow 0$ имеет место нестационарная теплопередача, т. е. случай нагрева или остывания тела.

При $T \rightarrow 0$ $S_{\text{в}} \rightarrow \infty$ имеет место стационар-



ная теплопередача при установившемся тепловом потоке в ограждении.

Следовательно, периодическая теплопередача имеет место в тех случаях, когда $0 < T < \infty$.

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения, состоящего из одно-

родного материала значительной толщины, при заданном периоде колебания температуры зависит лишь от теплофизических свойств материала.

Для такого ограждения, выполненного из однородного материала, коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения одновременно является и коэффициентом теплоусвоения самого материала ограждения:

$$s = S_b = 2,507 \sqrt{\frac{\lambda c \gamma}{T}}, \quad (\text{III.57})$$

где s — коэффициент теплоусвоения материала ограждения в $\text{ккал/м}^2 \text{ ч град}$.

Коэффициент теплоусвоения s материала является теплофизической величиной, характеризующей способность материала воспринимать тепло при колебании температуры на его поверхности. Численное значение s зависит от периода колебания температуры.

При теплотехническом расчете ограждающих конструкций, находящихся под воздействием суточных колебаний температуры окружающей воздушной среды, период колебания T температуры принимается равным 24 ч. В этом случае коэффициент теплоусвоения материала равняется

$$s_{24} = 0,51 \sqrt{\lambda c \gamma}, \quad (\text{III.58})$$

где s_{24} — коэффициент теплоусвоения материала при периоде колебания температуры в 24 ч.

Численные значения коэффициента теплоусвоения строительных материалов, приуроченные к суточным колебаниям температуры воздушной среды, приводятся в таблице величин расчетных физических показателей строительных материалов в СНиП.

На л. XLIX, рис. 2, изображено мгновенное распределение температуры на поверхностях и в толще ограждения в момент времени, когда на внутренней поверхности ограждения имеет место максимальная амплитуда колебания температуры. Затухание колебания температуры в толще ограждения происходит асимптотически около среднего значения ее. Эта средняя температура является стационарной для данного периода времени и падение ее в толще ограждения изображается прямой $\tau_b - \tau_n$. Пределы колебания температуры в толще ограждения ограничиваются огибающими кривыми, показанными пунктиром.

Расстояние между двумя максимумами или минимумами температурной волны является длиной волны

$$l = 2 \sqrt{\pi a T}, \quad (\text{III.59})$$

где l — длина волны;

a — коэффициент температуропроводности материала ограждения.

Длина волны и число волн, располагающихся в толще ограждения, зависят от периода колебания температуры и коэффициента температуропроводности материала ограждения.

С уменьшением величины T , а также и величины a уменьшается длина волны, но увеличивается число их в ограждении, что приводит к более интенсивному затуханию температурной волны в толще ограждения.

Ограждающие конструкции обладают ограниченной толщиной, вследствие чего колебания температуры в толще ограждения не затухают и передаются с одной поверхности ограждения на другую. Поэтому в толще ограждения располагается более или менее одной волны. Чем меньшая часть волны будет располагаться в толще ограждения, тем большие будут передаваться колебания температуры на противоположную поверхность ограждения.

Следовательно, от того какая часть температурной волны располагается в ограждении, зависит величина амплитуды колебания температуры на противоположной поверхности ограждения.

В качестве характеристики, определяющей число волн, располагающихся в толще ограждения, служит безразмерная величина D , называемая показателем тепловой инерции.

Показатель тепловой инерции D однородного ограждения определяется как произведение термического сопротивления R ограждения и коэффициента теплоусвоения s материала ограждения:

$$D = Rs = \frac{\delta}{\lambda} \sqrt{\lambda c \gamma \frac{2\pi}{T}}, \quad (\text{III.60})$$

где δ — толщина ограждения в м.

Показатель тепловой инерции зависит от периода T колебания температуры. С уменьшением T возрастает D , т. е. уменьшается длина волны и увеличивается число волн в ограждении.

Одной волне, расположенной в толще ограждения, соответствует $D \approx 8,5$.

Для многослойных ограждений из разнородных материалов показатель тепловой инерции ограждения определяется как сумма показателей тепловой инерции отдельных слоев, т. е.

$$D = R_1 s_1 + R_2 s_2 + \dots, \quad (\text{III.61})$$

где R_1, R_2 — термическое сопротивление отдельных слоев ограждения в $\text{м}^2 \text{ ч град/ккал}$;

s_1, s_2 — коэффициент теплоусвоения отдельных слоев ограждения в ккал/м² ч град.

Согласно теории О. Е. Власова на величину коэффициента теплоусвоения поверхности ограждения оказывает решающее влияние лишь материал, находящийся в так называемом слое резких колебаний, прилегающем непосредственно к поверхности ограждения. Материал, находящийся за пределами слоя резких колебаний, оказывает весьма незначительное влияние на коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения. Вследствие этого при определении коэффициента теплоусвоения поверхности ограждения слои материала, расположенные за пределами слоя резких колебаний, исключаются из рассмотрения.

Слой резких колебаний характеризуется тем, что для него показатель тепловой инерции принимается равным единице, т. е.

$$D = R_s = \frac{\delta}{\lambda} s = 1, \quad (\text{III.62})$$

и на противоположной его поверхности максимальная амплитуда колебания температуры имеет половинное значение по отношению к максимальной амплитуде колебания температуры на поверхности ограждения. Толщина слоя резких колебаний определяется из уравнения (III.62). Слой резких колебаний может распространяться на один, два и более слоев материала многослойного ограждения и даже выходить за пределы ограждения.

Принятая характеристика слоя резких колебаний является справедливой лишь для однородных ограждений значительной толщины. Только лишь в таких ограждениях при

$$D = R_s = 1$$

слои материала, лежащие за пределами слоя резких колебаний, не оказывают влияния на коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения.

В многослойных ограждениях слой резких колебаний, за пределами которого материал ограждения не оказывает влияния на S_n , имеет показатель тепловой инерции $D \gg 1$. Величина D слоя резких колебаний возрастает с уменьшением толщины слоев материала, входящих в слой резких колебаний. В этом случае показатель тепловой инерции слоя резких колебаний заключается в границах неравенства $1 \leq D \leq 3$. Однако распространение формулы (III.62) на многослойные ограждения, в которых слой резких колебаний захватывает несколько слоев различных материалов, весьма упрощает методику теплотехнического

расчета ограждения при допустимых для практических целей погрешностях.

При определении коэффициента теплоусвоения поверхности ограждения могут иметь место следующие случаи.

1. Слой резких колебаний полностью или частично располагается в первом слое материала ограждения. В этом случае имеем

$$D_1 = R_1 s_1 \geq 1.$$

Поскольку здесь в теплоусвоении поверхности ограждения участвует лишь материал первого слоя, то коэффициент теплоусвоения S_n поверхности ограждения является одновременно и коэффициентом теплоусвоения s_1 материала этого же слоя. Следовательно:

$$S_n = s_1.$$

2. Слой резких колебаний не уместается в первом слое материала и полностью или же частично захватывает следующий слой материала, т. е.

$$D_1 < 1 < D_1 + D_2.$$

В этом случае коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения зависит от теплоусвоения материалов обоих слоев, на которые распространяется слой резких колебаний.

Точное определение величины S_n для случая, когда слой резких колебаний распространялся на два слоя различных материалов, является весьма затруднительным. Обычно в этом случае определение величины S_n производится посредством приближенной формулы, имеющей вид

$$S_n = \frac{R_1 s_1^2 + s_2}{1 + R_1 s_2}, \quad (\text{III.63})$$

где R_1 — термическое сопротивление первого слоя материала;

s_1, s_2 — коэффициенты теплоусвоения соответственно первого и второго слоев материала.

3. Слой резких колебаний захватывает частично или же полностью три первых слоя материала ограждения, т. е.

$$D_1 + D_2 < 1 < D_1 + D_2 + D_3.$$

Здесь на величину S_n оказывает влияние теплоусвоение всех трех слоев, на которые распространяется слой резких колебаний. Определение величины S_n производится постепенно, начиная с определения коэффициента теплоусвоения S_a внутренней поверхности предпоследнего слоя, входящего в слой резких колебаний, т. е. второго слоя от поверхности ограждения. Вычисление величины S_n производится с помощью формулы

Конструкция стены и теплотехнические показатели ограждения

Наименование материала	δ в см	λ в ккал/м ч град	R в м ² ч град/ккал	s_i в ккал/м ² ч град	D
Внутренняя цементно-песчаная штукатурка	2	0,65	0,03	7,8	0,23
Пеностекло $\gamma=300$ кг/м ³	12	0,09	1,333	1,18	1,58
Наружная железобетонная плита	6	1,2	0,05	12,5	0,62
$R_n + R_n$	—	—	0,133	—	—
R_o	—	—	1,596	—	—
D	—	—	—	—	2,43

$$S_2 = \frac{R s_2 + s_3}{1 + R s_3} \quad (\text{III.64})$$

где R_2 — термическое сопротивление второго слоя;

s_2, s_3 — коэффициенты теплоусвоения второго и третьего слоев материала.

Необходимо отметить, что весьма часто величину S_2 определяют, когда $D_2 + D_3 < 1$. Однако этим пренебрегают, считая, что $D_2 + D_3 \geq 1$; тем самым еще более углубляется приближенность определения величины S_2 .

Рассматривая величину S_2 как средний коэффициент теплоусвоения материала последних двух слоев, входящих в слой резких колебаний, согласно (III.63) получаем

$$S_n = \frac{R s_1^2 + S_2}{1 + R s_2} \quad (\text{III.65})$$

4. Слой резких колебаний захватывает четыре первых слоя материала ограждения, т. е. $D_1 + D_2 + D_3 < 1 < D_1 + D_2 + D_3 + D_4$.

По аналогии с предшествующим случаем находим

$$S_3 = \frac{R s_3^2 + s_4}{1 + R s_4}$$

затем

$$S_2 = \frac{R s_2^2 + S_3}{1 + R s_3}$$

и, наконец,

$$S_n = \frac{R s_1^2 + S_2}{1 + R s_2}$$

5. Слой резких колебаний выходит за пределы ограждения, т. е. для четырехслойного ограждения имеем $D_1 + D_2 + D_3 + D_4 < 1$.

В данном случае, рассматривая коэффициент теплоперехода α_n у наружной поверхности ограждения как величину, аналогичную коэффициенту теплоусвоения воздушной среды, определяют коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности последнего (четвертого) слоя материала по формуле

$$S_4 = \frac{R s_4^2 + \alpha_n}{1 + R s_n} \quad (\text{III.66})$$

затем находят S_3 и так далее аналогично предшествующему случаю.

Пример 7. Определить коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности S_n трехслойной стены (л. XLVIII, рис. 3).

Решение.

Показатель тепловой инерции первого слоя

$$D = 0,22 < 1, \text{ но } D_1 + D_2 = 0,23 + 1,53 > 1.$$

Следовательно, слой резких колебаний захватывает первый и частично второй слой.

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности при $D_1 < 1 < D_1 + D_2$ определяем по формуле (III.63)

$$S_n = \frac{0,03 \cdot 7,8^2 + 1,18}{1 + 0,03 \cdot 1,18} = 2,91.$$

При расположении слоев материала в обратном порядке $D_1 < 1 < D_1 + D_2$:

$$S_n = \frac{0,05 \cdot 12,5^2 + 1,18}{1 + 0,05 \cdot 1,18} = 7,04.$$

Из решения данного примера видно, что величина коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности трехслойного ограждения S_n зависит от порядка расположения слоев материала по отношению к внутренней поверхности ограждения. Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности возрастает с увеличением коэффициента теплоусвоения материала s_{24} , расположенного у внутренней поверхности ограждения.

12. Теплоустойчивость ограждающих конструкций

Колебание температуры внутренней поверхности ограждения может быть обусловлено или неравномерностью отдачи тепла отопительными приборами или же неравномерностью температурных воздействий наружной среды на ограждающие конструкции здания.

В зависимости от конструктивного решения и теплотехнических качеств ограждающие конструкции обладают различной способностью противодействовать колебанию температуры на внутренней поверхности ограждения.

Способность ограждающих конструкций в различной мере воспринимать своей внутрен-

ней поверхностью изменения температуры, вызываемые колебанием теплового потока, проходящего через ограждение, называется теплоустойчивостью ограждения. Чем меньше колебание температуры на внутренней поверхности, тем теплоустойчивее является ограждение. От теплоустойчивости ограждения зависит постоянство теплового режима внутри здания.

При непрерывном отоплении здания неравномерность отдачи тепла отопительными приборами оказывает незначительное влияние на температуру внутренней поверхности ограждения. Температурные изменения на внутренней поверхности ограждения в основном вызваны неравномерностью тепловых воздействий наружной среды на ограждающие конструкции и зависят от степени затухания температурных волн в ограждении.

Степень затухания температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения характеризует теплоустойчивость ограждения.

Вопрос затухания температурных волн в ограждении и особенно его внутренней поверхности при периодических воздействиях наружной среды представляет определенный интерес как для зимних, так и для летних условий эксплуатации здания.

Точный расчет затухания температурных колебаний в ограждении является в математическом отношении весьма сложным. А. М. Шкловер на основе теории О. Е. Власова разработал методику расчета затухания периодических колебаний температуры в ограждении.

Для практических расчетов затухания температурных колебаний на поверхностях и в толще ограждения СНиП рекомендует пользоваться приближенной формулой, предложенной А. М. Шкловером. В зависимости от количества слоев материала в ограждении эта формула общего затухания температурных колебаний в ограждении имеет следующий вид:

1) однослойное ограждение

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_n)(\tau_n + S_1)}{(s_1 + S_1) \alpha_n}; \quad (\text{III.67})$$

2) двуслойное ограждение

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_n)(s_2 + S_1)(\tau_n + S_2)}{(s_1 + S_1)(s_2 + S_2) \alpha_n}; \quad (\text{III.68})$$

3) трехслойное ограждение

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_n)(s_2 + S_1)(s_3 + S_2)(\tau_n + S_3)}{(s_1 + S_1)(s_2 + S_2)(s_3 + S_3) \alpha_n}. \quad (\text{III.69})$$

Эта же формула для многослойных ограждений может быть представлена в общем виде

$$\nu = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_n)(s_2 + S_1) \dots \times \dots (s_1 + S_{n-1})(\tau_n + S_n)}{\dots (s_1 + S_n) \alpha_n}, \quad (\text{III.70})$$

где

ν — число, показывающее степень затухания температурных колебаний на противоположной поверхности ограждения (сквозное затухание);

$D = D_1 + D_2 + D_3 \dots$ — показатель тепловой инерции всего ограждения;

s_n — коэффициент теплоусвоения материала отдельных слоев;

S_n — коэффициенты теплоусвоения поверхностей отдельных слоев;

α_n, α_n — коэффициент теплоперехода у поверхности ограждения;

e — основание натуральных логарифмов.

Коэффициенты теплоусвоения поверхностей конструктивных слоев ограждения вычисляются со стороны теплового воздействия внешней среды на ограждение. При периодических тепловых воздействиях наружной среды на ограждение коэффициенты теплоусвоения вычисляются для наружных поверхностей всех слоев ограждения. В этом случае нумерация слоев ведется от внутренней поверхности ограждения и определение коэффициента теплоусвоения начинается с наружной поверхности первого слоя, непосредственно прилегающего к внутренней поверхности ограждения. Вслед за этим первым слоем в последовательном порядке навстречу тепловой волне определяются коэффициенты теплоусвоения всех остальных слоев ограждения. Коэффициент теплоусвоения последнего слоя является одновременно и коэффициентом теплоусвоения наружной поверхности ограждения.

При периодических тепловых воздействиях с внутренней стороны ограждения коэффициенты теплоусвоения вычисляются в обратном порядке.

При известных величинах ν и A_n амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности ограждения будет

$$A_{n,n} = \frac{A_1}{\nu}, \quad (\text{III.71})$$

где $A_{n,n}$ — амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности ограждения;

A_n — амплитуда колебания температуры наружной среды.

Максимальное количество тепла, отдаваемое или воспринимаемое внутренней поверхностью ограждения внутрь помещения в результате периодических температурных воздействий наружной среды на ограждение, равно

$$q_{\text{макс}} = \alpha_n A_{\text{в. п}} \text{ ккал/м}^2 \text{ ч.} \quad (\text{III.72})$$

Наряду с затуханием температурных колебаний в ограждении имеет место запаздывание (сдвиг фаз) этих колебаний по отношению к температурным колебаниям наружной среды.

Запаздывание температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения по отношению к колебанию наружной температуры зависит от массивности ограждения и определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{1}{15} \left(40,5D - \arctg \frac{\alpha_n}{\alpha_n + S_{\text{в. п}} \sqrt{2}} + \arctg \frac{S_{\text{н. п}}}{S_{\text{н. п}} + \alpha_n \sqrt{2}} \right), \quad (\text{III.73})$$

где ϵ — запаздывание температурных колебаний в ч;

$S_{\text{в. п}}$ — коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения при направлении температурной волны изнутри наружу;

$S_{\text{н. п}}$ — коэффициент теплоусвоения наружной поверхности ограждения при направлении температурной волны снаружи внутрь.

Величина $\arctg$ — в градусах.

Вычисление величины $S_{\text{в. п}}$ при направлении тепловых волны изнутри наружу надлежит производить начиная с внутренней поверхности наружного слоя, от которого в данном случае и ведется нумерация слоев.

Пример 8. Определить степень затухания и запаздывания температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения примера 7 по отношению к температурным колебаниям наружной среды (см. л. XLVIII, рис. 3) при наличии слабого ветра ($\alpha_n = -15 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч град}$).

Решение.

1. Степень затухания температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения по отношению к температурным колебаниям наружной среды определяется по формуле (III.69).

а) Коэффициенты теплоусвоения наружных поверхностей слоев материала ограждения.

Порядок слоев материала считается от внутренней поверхности ограждения. Определение коэффициентов теплоусвоения наружных поверхностей слоев материала производят начиная с первого слоя.

При $D_1 < 1$ по формуле (III.66) имеем

$$S_1 = \frac{0,020 \cdot 7,8^2 + 7,5}{1 + 0,03 \cdot 7,5} = 7,62.$$

При $D_2 > 1$, $S_2 = S_3 = 1,18$

При $D_3 < 1 < D_2 + D_3$ слои резких колебаний захватывают третий и частично второй слои

$S_3 = S_n = 7,04$ (см. пример 7).

б) Затухание температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения

$$\begin{aligned} v &= 0,9e^{\frac{2,43}{\sqrt{2}}} \frac{(7,8 + 7,5)(1,18 + 7,6) \times}{(7,8 + 7,6)(1,18 + 1,18) \times} \\ &\quad \times \frac{(12,5 + 1,18)(15 + 7,04)}{\times (12,5 + 7,04) 15} = 19,2. \end{aligned}$$

2. Запаздывание температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения. Для определения по формуле (III.73) запаздывания колебаний температуры на внутренней поверхности ограждения по отношению к колебаниям температуры наружной среды необходимо вычислить значения коэффициентов теплоусвоения внутренней и наружной поверхностей ограждения.

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения, приведенного в примере 7, равняется $S_{\text{в. п}} = 2,91$.

Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности данного ограждения $S_{\text{н. п}} = S_n = 7,04$, откуда

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{1}{15} \left(40,5 \cdot 2,43 - \arctg \frac{7,5}{7,5 + 2,91 \sqrt{2}} + \right. \\ &\quad \left. + \arctg \frac{7,04}{7,04 + 20 \sqrt{2}} \right) = 5,12. \end{aligned}$$

Пример 9. Для ограждения, приведенного в примере 8, с расположением слоев материала в обратном порядке определить общее затухание и запаздывание колебаний температуры на внутренней поверхности ограждения по отношению к наружной среде.

Решение.

1. Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности слоев материала ограждения.

При $D_1 < 1$ имеем по формуле (III.66)

$$S_1 = \frac{0,05 \cdot 12,5^2 + 7,5}{1 + 0,05 \cdot 7,5} = 14,75.$$

При $D_2 < 1$; $S_2 = 1,18$.

При $D_3 < 1 < D_2 + D_3$; $S_3 = 2,91$ (см. пример 7).

2. Затухание температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения

$$\begin{aligned} v &= 0,9e^{\frac{2,43}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{(12,5 + 7,5)(1,18 + 14,75) \times}{(12,5 + 14,75)(1,18 + 1,18) \times} \\ &\quad \times \frac{(7,8 + 1,18)(15 + 2,91)}{\times (7,8 + 2,91) 15} = 27,8. \end{aligned}$$

3. Запаздывание температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения

при $S_{\text{в. п}} = 7,04$ и $S_{\text{н. п}} = 2,91$ находим

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{1}{15} \left(40,5 \cdot 2,43 - \arctg \frac{7,5}{7,5 + 7,04} + \right. \\ &\quad \left. + \arctg \frac{2,91}{2,91 + 20 \sqrt{2}} \right) = 5,35 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Большее затухание амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения имеет место в случае расположения в внутренней стороны ограждения поверхности с большим коэффициентом теплоусвоения S_n .

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ

1. Наружный климат и микроклимат здания

При проектировании здания и его ограждающих конструкций исходными данными являются:

- 1) климатические особенности местности (наружный климат здания);
- 2) назначение здания (микроклимат здания).

Наружный климат здания зависит от географической широты местности, от степени отдаленности ее от незамерзающих водных бассейнов, рельефа местности и преобладающего направления ветров. Наружный климат здания складывается из взаимодействия физико-климатических факторов, главными параметрами которых являются температура и влажность воздуха, направление и скорость ветра и солнечная радиация.

Микроклимат здания определяется температурой, влажностью и скоростью движения воздуха внутри помещений и температурой излучения ограждающих поверхностей.

Наружный климат через ограждающие конструкции воздействует на микроклимат. Степень этого воздействия зависит от теплотехнических качеств ограждения и от тепловых факторов наружного климата.

2. Температурно-влажностный режим здания для зимних условий

Для пребывания людей и протекания производственных процессов требуются определенные температурно-влажностные условия внутри здания, отличающиеся от условий наружной среды.

Основными санитарно-гигиеническими тре-

бованиями, предъявляемыми к микроклимату здания, являются обеспечение постоянства температурно-влажностного режима в его помещениях. В соответствии с этим для помещений жилых и общественных зданий СНиПом установлены значения расчетной температуры и влажности внутреннего воздуха (табл. III.6).

Таблица III.6

Расчетная температура и влажность внутреннего воздуха основных помещений жилых и общественных зданий для зимних условий

Наименование зданий и помещений	Температура внутреннего воздуха в град	Относительная влажность внутреннего воздуха в %
Здания:		
жилые	18	55
лечебные	20	55
Детские учреждения	20	60
Школы и лаборатории	16	45
Театры и клубы	18	50
Магазины	15	40

Однако требуемые параметры обеспечиваются полностью лишь при кондиционировании воздуха, применяемом у нас в единичных промышленных и общественных зданиях. Зимой в жилых зданиях при надлежащем сопротивлении теплопередаче наружных ограждений отоплением обеспечиваются только температура внутреннего воздуха и поверхностей излучения. В летнее время искусственное регулирование микроклимата, как правило, не применяется.

Внутренний климат промышленных зданий складывается в зависимости от специфики и технологических требований производства.

Для производственных зданий расчетные температуры и влажность внутреннего воздуха не нормируются и принимаются по данным и требованиям технологии производства.

Температурно-влажностный режим помещений оказывает большое влияние на влажностное состояние материала и теплозащитные качества ограждения, а также на долговечность ограждения. Наибольшее увлажнение материала ограждения водяными парами внутреннего воздуха происходит за зимний период года.

Степень влажностного воздействия микроклимата здания на ограждающие конструкции зависит от абсолютной влажности внутреннего воздуха, характеризующейся упругостью водяных паров, содержащихся в воздухе.

В соответствии с этим влажностный режим внутренних помещений зданий в зависимости от относительной влажности внутреннего воздуха φ_n подразделяется:

на сухой $\varphi_n < 50\%$; нормальный $\varphi_n = 50-60\%$; влажный $\varphi_n = 61-75\%$; мокрый $\varphi_n > 75\%$.

Температура внутренней поверхности ограждения является одним из основных факторов, определяющих тепловой комфорт внутри здания. В зимнее время температура внутренней поверхности ограждения в значительной мере зависит от температурных воздействий наружной среды на ограждающие конструкции здания, вызывающие соответствующие понижения или повышение температуры внутри здания.

С понижением температуры внутренней поверхности ограждения:

1) возрастает лучистый и конвективный теплообмен между поверхностью ограждения и внутренней средой здания;

2) усиливается лучистый теплообмен между телом человека и поверхностью ограждения;

3) возникает возможность образования конденсата на поверхности ограждения с последующим отсыреванием стен, увлажнением материала ограждения и повышением влажности внутреннего воздуха.

Амплитуда колебания температуры внутренней поверхности зависит от теплоустойчивости ограждения. Для ограничения этой амплитуды конструкции должны обладать определенной теплоустойчивостью, характеризующейся максимальной допустимой величиной тем-

пературного перепада между внутренней поверхностью ограждения и внутренним воздухом помещения.

Согласно требованиям СНиП предельное минимальное значение температуры внутренней поверхности ограждения t_n не должно быть ниже значения, определяемого по формуле

$$t_n = t_v - \Delta t^n, \quad (III.74)$$

где t_v — расчетная температура внутреннего воздуха;

Δt^n — нормируемый температурный перепад.

Нормируемая величина Δt^n зависит от назначения здания и от температурно-влажностного режима его помещений (табл. III.7).

Таблица III.7

Нормируемые величины Δt^n в град

Виды помещений и зданий	Для наружных стен	Для бесчердачных покрытий и чердачных перекрытий
Жилые помещения, а также помещения общественных зданий с повышенными санитарно-гигиеническими требованиями (лечебные, дошкольные и школьные учреждения)	6	4,5
Помещения общественных и административных зданий с нормальным температурно-влажностным режимом (театры, кино, клубы, конторские помещения, вокзалы, а также вспомогательные здания и помещения промышленных предприятий (за исключением помещений влажных и мокрых)	7	5,5
Отапливаемые помещения производственных зданий с расчетной влажностью внутреннего воздуха:		
менее 50%	10	8
от 50 до 60%	8	7
Помещения производственных зданий с избыточным тепловыделением и с расчетной влажностью внутреннего воздуха не более 45%	12	12
Помещения производственных зданий с расчетной влажностью внутреннего воздуха выше 60%, в которых не допускается конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения	$t_n - t_p$	$t_n - t_p - 1^\circ$

3. Расчетная зимняя температура наружного воздуха

Теплотехнический расчет ограждающих конструкций для зимних условий ведется по наиболее низким температурам наружного воздуха.

Однако годовые изменения температуры наружного воздуха в различные годы для одной и той же местности неодинаковы и зависят от циркуляции атмосферы, т. е. от направления преобладающих ветров в течение года. В соответствии с этим в различные годы минимальная температура наружного воздуха также имеет различные значения.

Колебания температуры наружного воздуха в течение года носят беспорядочный характер. Наиболее низкая температура наружного воздуха в большинстве случаев имеет место в январе и сохраняется непродолжительное время, весьма часто исчисляемое часами.

Для обеспечения необходимых теплозащитных качеств ограждающих конструкций теплотехнический расчет их ведется с учетом наиболее низких температур наружного воздуха не только в течение одной зимы, но и с учетом возможного понижения температуры наружного воздуха в течение ряда зим.

В соответствии с этим расчетные зимние температуры наружного воздуха для проектирования ограждающих конструкций приняты равными средней температуре воздуха наиболее холодного интервала времени из восьми зим за 50-летний период. Длительность этого интервала времени зависит от показателя тепловой инерции ограждения D .

Показатель тепловой инерции ограждения D характеризует скорость распространения и затухания температурных колебаний в толще ограждений с равным R_0 . С повышением D замедляется распространение тепловых волн и усиливается затухание их в толще и на внутренней поверхности ограждения. Вследствие этого для ограждающих конструкций, обладающих одинаковым значением сопротивления теплопередаче R_0 и находящихся под одинаковым периодическим температурным воздействием окружающей среды, значения минимальной температуры $t_{\text{в}}$ на внутренней поверхности ограждения будут различны. Другими словами, эти ограждения обладают различной теплоустойчивостью. Наиболее низкое значение $t_{\text{в}}$ имеет место на поверхности ограждения с меньшим показателем тепловой инерции D .

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям значение $t_{\text{в}}$ на внутренней поверх-

ности ограждения в зимних условиях должно иметь определенное значение независимо от расчетной температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$ и величины показателя тепловой инерции ограждения D .

Равенство $t_{\text{в}}$ на внутренней поверхности ограждений с различными значениями D , находящихся под одинаковым периодическим температурным воздействием наружной среды, возможно лишь в том случае, если ограждающие конструкции будут обладать различным значением R_0 .

Как известно, при стационарной теплопередаче сопротивление теплопередаче R_0 можно выразить в следующем виде:

$$R_0 = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\tau_{\text{в}}} R_{\text{в}}$$

В правой части этого равенства такие члены как $t_{\text{в}}$, $R_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{в}} = t_{\text{в}}$ имеют неизменные величины. Изменение величины R_0 в этом случае возможно лишь за счет изменения величины расчетной температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$, т. е. за счет изменения продолжительности интервала времени с наиболее низкой температурой наружного воздуха, среднее значение которой принимается за расчетную температуру наружного воздуха.

При сохранении равенства $t_{\text{в}}$ на внутренней поверхности ограждения повышение $t_{\text{н}}$ приводит к понижению R_0 и, наоборот, понижение $t_{\text{н}}$ увеличивает значение R_0 . При равных значениях $t_{\text{в}}$ на внутренней поверхности ограждений, находящихся под одинаковым температурным воздействием окружающей среды, расчетная температура наружного воздуха $t_{\text{н}}$ зависит от показателя тепловой инерции ограждения D . Ограждающие конструкции с малым значением D рассчитываются по более низким значениям расчетной температуры наружного воздуха, чем ограждения с большим значением D . Следовательно, для одной и той же местности в зависимости от D ограждения расчетная температура наружного воздуха $t_{\text{н}}$ должна иметь различные значения.

В соответствии с этим для теплотехнического расчета СНиП подразделяет ограждающие конструкции на три вида: массивные ($D > 7$), средней массивности ($4 < D < 7$) и легкие ($D \leq 4$).

Каждому из этих видов ограждения соответствуют определенные интервалы времени, средние температуры которых приняты за расчетную температуру наружного воздуха (табл. III.8).

Таблица III.8

Стационарные расчетные температуры наружного воздуха в зависимости от D ограждения для зимних условий

Тепловая инерция ограждения	Стационарная расчетная температура наружного воздуха
При $D > 7$,	Средняя температура наиболее холодной пятидневки t_n^V
$D < 4$	То же, однодневки t_n^I
$4 < D < 7$	Полусумма средних температур наиболее холодных пятидневки и однодневки $0,5 (t_n^V + t_n^I)$

4. Требуемое сопротивление теплопередаче ограждения

Основным показателем теплозащитных качеств ограждающих конструкций является R_0 ограждения (III.39). Сопротивление теплопередаче, обеспечивающее нормируемый температурный перепад Δt^n , называется требуемым сопротивлением теплопередаче ограждения $R_0^{тр}$ и является минимальной допустимой величиной R_0 ограждения. Величина $R_0^{тр}$ определяется по формуле

$$R_0^{тр} = \frac{(t_b - t_n)nb}{\alpha_n \Delta t^n} \text{ или } R_0^{тр} = \frac{(t_b - t_n)n}{\Delta t^n} R_n, \quad (\text{III.75})$$

где t_b — расчетная температура внутреннего воздуха;

t_n — расчетная зимняя температура наружного воздуха;

Δt^n — нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждения (табл. III.7);

α_n — коэффициент теплоперехода у внутренней поверхности ограждения (табл. III.9).

n — коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху;

b — коэффициент, учитывающий качество теплоизоляции наружного ограждения.

Коэффициент n имеет следующие значения: для наружных стен бесчердачных покрытий

Таблица III.9

Значения коэффициента тепловосприятности α_n и сопротивления тепловосприятности R_b внутренней поверхности ограждения

Род поверхностей	α_n в $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{град}$	R_b в $\text{м}^2 \cdot \text{град/ккал}$
Внутренние поверхности стен, полов, а также потолков, гладких или со слабо выступающими редко расположенными ребрами, отношение высоты h которых к расстоянию между гранями соседних ребер составляет $\frac{h}{a} < 0,2$	7,5	0,133
Потолки, имеющие ребристую поверхность при отношении $\frac{h}{a}$ от 0,2 до 0,3	7	0,143
Потолки, имеющие выступающие часто расположенные ребра при отношении $\frac{h}{a} > 0,3$	6,5	0,154
При потолках с кессонами с отношением $\frac{h}{a} < 0,3$, где a — меньшая сторона кессона	6	0,167

над проездами I; для чердачных перекрытий 0,9; для перекрытий над холодными подвалами 0,75.

Величину коэффициента качества теплоизоляции b надлежит принимать равной:

а) для наружных ограждений, утепленных теплоизоляционными материалами с объемным весом $\gamma \leq 400 \text{ кг/м}^3$ $b = 1,1$;

б) для наружных ограждений, утепленных материалами, подверженным уплотнению, деформации при усадке (например, стиропор, минераловатные плиты, войлок и т. п.) — $b = 1,2$.

В остальных случаях величина коэффициента b принимается равной единице.

Пример 10. Определить требуемое сопротивление теплопередаче и соответствующую толщину трехслойной наружной стены здания, возводимого в районе Барнаула.

А. Исходные данные.

1. Расчетная температура:

а) наружного воздуха: $t_n^V = -38^\circ$; $t_n^I = -40^\circ$;

б) внутреннего воздуха $t_b = 18^\circ$.

Конструкция стены (см. л. XLVIII, рис. 3)
и теплотехнические показатели материала
ограждения

№ слоев	Наименование материалов	δ в см	γ в кг/м ³	λ в ккал/м ч град	$\alpha_{ст}$ в ккал/м ² ч град	R в м ² ч град/ккал	D
1	Сухая штукатурка (древесно-воло- книстые плиты)	1	700	0,15	4,05	0,037	0,27
2	Фибролит цемент- ный	—	350	0,1	2,3	$R_{ут}$	—
3	Железобетонная плита	4	2500	1,2	12,5	0,033	0,41

Б. Теплотехнический расчет

1. Требуемое сопротивление теплопередаче $R_0^{тр}$:

а) задаемся ориентировочно показателем тепловой инерции ограждения $D < 4$;

б) согласно СНиП при $D < 4$ за расчетную температуру наружного воздуха принимаем $t_n^I = -40^\circ$;

в) при $b=1,2$ и $n=1$ имеем (III.75)

$$R_0^{тр} = \frac{18 - (-40)}{7,5 \cdot 6} \cdot 1,2 \cdot 1 = 1,55 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал.}$$

2. Фактическое сопротивление теплопередаче ограждения должно быть $R_0 \geq R_0^{тр}$.

По формуле (III.39) имеем

$$R_0 = 0,133 + 0,037 + R_{ут} + 0,033 + 0,05 = 0,233 + R_{ут}$$

3. Решая уравнение $R_0 = R_0^{тр}$, находим

$$R_{ут} = 1,55 - 0,233 = 1,267.$$

4. Толщина слоя утеплителя находится из уравнения (III.36):

$$b_{ут} = R_{ут} \lambda_{ут} = 1,267 \cdot 0,1 = 0,127 = 13 \text{ см.}$$

5. Показатель тепловой инерции ограждения

$$D = 0,27 + \frac{0,13}{1} \cdot 2,3 + 0,41 = 3,68 < 4.$$

6. Фактическое сопротивление теплопередаче ограждения

$$R_0 = 0,283 + 1,3 = 1,583 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал.}$$

7. Общая толщина ограждения

$$\Delta = 1 + 13 + 4 = 18 \text{ см.}$$

Солнце излучает в мировое пространство огромное количество лучистой энергии в виде электромагнитных волн различной длины. В зависимости от длины волны составные части спектра солнечного излучения обладают различными свойствами. Часть спектра солнечного излучения, оказывающая тепловое действие на облучаемую поверхность, называется солнечной радиацией.

Интенсивность солнечной радиации измеряется по ее тепловому действию и в метеорологии выражается в тепловых единицах (кал), приходящихся на 1 см² поверхности в течение 1 мин., что соответствует 600 ккал/м²час.

При прохождении земной атмосферы солнечная радиация частично поглощается и отражается составными компонентами атмосферы и только часть ее достигает поверхности земли в виде прямых параллельных лучей (прямая солнечная радиация).

Прямая и рассеянная радиация, достигшая поверхности земли, составляет суммарную радиацию. Интенсивность суммарной солнечной радиации зависит от высоты солнца над горизонтом и прозрачности атмосферы.

Падающая на поверхность земли суммарная солнечная радиация частично поглощается, а частично отражается поверхностью земли и различными предметами. Поглощенная лучистая энергия превращается в тепловую, которая в свою очередь с поверхности посредством конвекции и теплопроводности передается воздуху и нижележащим слоям земли, а также затрачивается на испарение влаги и радиационное излучение поверхности земли.

6. Воздействие солнечной радиации на ограждающие конструкции

В южных районах нашей страны преобладающее влияние на внутренний режим здания через его ограждающие конструкции при отсутствии искусственного регулирования микроклимата оказывает тепловое воздействие наружной среды. Это тепловое воздействие является настолько значительным, что может нарушить тепловой комфорт здания из-за его перегрева.

Воздействие солнечной радиации на поверхность ограждения зависит от угла падения солнечных лучей на ее поверхность и от ее способности поглощать тепло солнечной радиации.

Угол падения солнечных лучей на поверхность ограждения зависит от ориентации

ограждения по странам света и положения относительно горизонта, а также от широты местности. Наибольшее количество солнечной радиации в данной местности приходится на поверхность, расположенную перпендикулярно падающим на нее солнечным лучам. В соответствии с этим вертикальные поверхности ограждений, обращенные на восток и запад, могут получать большее количество солнечной радиации, чем подобные поверхности ограждений, обращенные на юг. Еще большее количество радиационного тепла получают на юге крыши и бесчердачные перекрытия.

Однако это положение относится к зданиям, расположенным на открытой местности. Совсем иное положение имеет место в южных районах для зданий, расположенных в условиях городской застройки. В этом случае солнечные лучи, диффузно отражаясь от поверхностей соседних зданий, особенно от окрашенных в белый цвет, не только увеличивают яркость освещения, но весьма значительно могут изменять качественно и количественно облучение стен. Некоторые данные о количестве солнечной радиации в летний период года, падающей на различно ориентированные поверхности, приводятся в табл. III.10.

Рассеянная радиация от небесного свода на горизонтальную поверхность учтена на 100%; рассеянная радиация на вертикальные поверхности, «видящие» только половину небесного свода, учтена в размере 50%.

Как уже говорилось, падающая на поверхность солнечная радиация частично поглощается поверхностью ограждения и частично отражается от нее.

Количество тепла, поглощаемого поверхностью от падающей на нее солнечной радиации, зависит от цвета и состояния поверхности и характеризуется коэффициентом поглощения солнечной радиации.

Весьма часто коэффициенты поглощения солнечной радиации выражаются через коэффициенты отражения (альбедо) солнечных лучей, т. е. через величину $(1-p)$, где p — коэффициент поглощения поверхностью падающей на нее солнечной радиации.

Численные значения коэффициентов отражения (альбедо) солнечных лучей поверхностями ограждений приводятся в табл. III.11.

Количество тепла, поглощаемое поверхностью ограждения при падении на нее солнечной радиации

$$Q = p J, \quad (\text{III.76})$$

где p — коэффициент поглощения тепла солнечной радиации поверхностью ограждения;

J — количество солнечной радиации, падающей на поверхность ограждения, в $\text{ккал/м}^2 \text{ ч}$.

7. Теплотехнический расчет ограждения на летние условия

В летнее время тепловое воздействие наружной среды на ограждающие конструкции здания складывается из двух факторов:

а) воздействия температуры наружного воздуха;

б) воздействия солнечной радиации.

Эти воздействия носят периодический характер и имеют свой максимум и минимум в течение дня.

Теплотехнический расчет ограждающих конструкций на летние условия производится с учетом совместного теплового воздействия температуры наружного воздуха и солнечной радиации на наружную поверхность здания.

Посредством теплотехнического расчета определяются теплоустойчивость ограждения (III.70), амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности ограждения (III.71) и теплоступления внутрь здания (III.72).

Исходными данными для теплотехнического расчета ограждающих конструкций на летнее условие являются температура наружного воздуха t_n и количество падающей солнечной радиации на поверхность ограждения (табл. III.10), а также максимальная амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха и солнечной радиации.

За расчетную температуру наружного воздуха t_n для летних условий принимается средняя температура наружного воздуха самого жаркого месяца в 13 ч.

При теплотехническом расчете ограждающих конструкций весьма затруднительно учесть совместное тепловое воздействие наружного воздуха и солнечной радиации на поверхность ограждения. В этом случае для упрощения расчета тепловое действие солнечной радиации на поверхность ограждения заменяется дополнительной температурой наружного воздуха, действие которой на поверхность ограждения подобно (эквивалентно) действию солнечной радиации на эту поверхность. Эта дополнительная температура называется эквивалентной температурой солнечного облучения $t_{\text{эка}}$ и определяется по формуле

$$t_{\text{эка}} = \frac{pJ}{\alpha_n}, \quad (\text{III.77})$$

где α_n — коэффициент теплоперехода у наружной поверхности ограждения в $\text{ккал/м}^2 \text{ ч град}$.

Таблица III.10

Количество среднесуточной и максимальной суммарной падающей солнечной радиации ($J_{\text{макс}}$ и $J_{\text{ср}}$) в ккал/м^2 и часы суток Z максимальной радиации для летнего времени при безоблачном небе и коэффициенте прозрачности атмосферы 0,75 (по данным СНиП II-A.7-62)

Поверхности и ориентация их по странам света	Географическая широта в град											
	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60
Горизонтальная: максимальная суммарная среднесуточная	819 296	813 296	804 296	783 296	766 296	759 296	759 296	744 296	726 296	714 296	700 296	675 296
Вертикальные, обращенные на юг: $J_{\text{макс}}$ $J_{\text{ср}}$	241 60	264 68	288 76	312 83	334 91	360 98	384 105	403 112	428 119	450 125	470 132	488 142
на восток и запад: $J_{\text{макс}}$ $J_{\text{ср}}$	558 127	561 129	564 132	567 135	569 137	574 141	579 141	581 146	587 149	592 153	595 158	598 164
Часы суток максимальной радиации Z	8—16	8—16	8—16	8—16	8—16	8—16	7—17	7—17	7—17	7—17	7—17	7—17

Примечание. Для горизонтальных поверхностей и вертикальных, обращенных на юг, $Z = 12$ ч.

Таблица III.11

Значения альбедо солнечных лучей

Род поверхности	Наименование материала и обработка	Характер и состояние поверхности	Цвет	Альбедо в %
Стена	Дерево крашеное	Новая	Темно-желтый	27,5
	То же	Гладкая	Светло-желтый	40
	Дерево некрашеное	Новая	Зеленый	27,4
	Кирпич оппукатуренный	Гладкая	Желтый	40,1
	То же	Гладкая	Белый	71
Кровля	Бетон	Новая	Темно-розовый	30,7
	Черепица	Новая	Светло-голубой	44,2
	Волнистая асбофанера	Новая	Темно-серый	26,8
	Руберойд	Новая	Светло-красный	41,6
	То же	Новая	Серый	38,5
Подстилающая поверхность	Толь	Блестящая	Светло-серый	27,8
	Асфальт	Гладкая	Черный	14
	То же	Гладкая	Серый	20
	Земля	Гладкая	Светло-серый	18,5
	Черное шоссе	Гладкая	Серый	37
Зелень	Декоративная зелень	Свежая	Светло-желтый	8,7—12,1
	Скошенный луг (люцерна)	Свежая	Черный	23
	То же	Свежая	Зеленый	20,4

Суммарная величина, состоящая из температуры наружного воздуха t_n и эквивалентной температуры солнечного облучения $t_{\text{экв}}$, называется суммарной температурой наружного воздуха

$$t_{\text{сумм}} = t_n + \frac{pJ}{\alpha_n} \quad (\text{III.78})$$

При совместном тепловом воздействии на ограждающие конструкции здания температуры наружного воздуха и солнечной радиации

суммарная температура наружного воздуха рассматривается как расчетная температура наружного воздуха для летних условий.

Суммарная температура наружного воздуха зависит от ориентации поверхности ограждения относительно стран света и горизонта, а также от способности поверхности ограждения поглощать падающую на них солнечную радиацию. Вследствие этого суммарная температура наружного воздуха для различно ориентированных ограждений одного и того же здания имеет различные значения.

При периодических тепловых воздействиях температуры наружного воздуха и солнечной радиации на ограждающие конструкции наряду с суммарной температурой наружного воздуха необходимо также знать и максимальную амплитуду колебания суммарной температуры наружного воздуха.

Амплитуда колебания суммарной температуры наружного воздуха складывается из амплитуды колебания температуры наружного воздуха и амплитуды колебания эквивалентной температуры солнечной радиации.

Максимальная суточная амплитуда колебания температуры наружного воздуха для летних условий определяется по метеорологическим данным.

При отсутствии этих данных максимальная суточная амплитуда колебания температуры наружного воздуха определяется приближенно.

К. Ф. Фокин рекомендует для этой цели пользоваться формулой

$$A_t = 2(t_{13} - t_m), \quad (\text{III.79})$$

где A_t — максимальная амплитуда колебания температуры наружного воздуха для летних условий;

t_{13} — средняя температура наружного воздуха в 13 ч самого жаркого месяца;

t_m — средняя месячная температура наружного воздуха самого жаркого месяца.

При периодическом колебании солнечной радиации амплитуда ее колебания $A_{\text{рад}}$ определяется как разность между максимальной $J_{\text{макс}}$ и средней $J_{\text{ср}}$ величинами солнечной радиации за сутки

$$A_{\text{рад}} = J_{\text{макс}} - J_{\text{ср}}.$$

В свою очередь амплитуда колебания солнечной радиации, поглощаемой поверхностью ограждения, может быть выражена посредством амплитуды эквивалентной температуры солнечной радиации

$$A_{\text{экв}} = \frac{P(J_{\text{макс}} - J_{\text{ср}})}{\alpha_n}, \quad (\text{III.80})$$

Максимумы амплитуд колебания A_t и $A_{\text{экв}}$ не совпадают по времени. Поэтому максимальную амплитуду колебаний суммарной температуры наружного воздуха $A_{\text{сумм}}$ определяют приближенно по формуле

$$A_{\text{сумм}} = (A_{\text{экв}} + A_t) \psi, \quad (\text{III.81})$$

где ψ — коэффициент, учитывающий несовпадение (сдвиг фаз) максимумов $J_{\text{макс}}$ и t_n .

Коэффициент ψ зависит:

а) от разности времени максимумов солнечной радиации и температуры наружного воздуха ($Z_1 - Z_2$);

б) от соотношения амплитуд ($A_{\text{экв}} : A_t$).

Численные значения ψ приводятся в табл. III.12.

Амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности ограждения определяется по формуле (III.71).

8. Нормирование теплоустойчивости ограждающих конструкций

Теплоустойчивость ограждающих конструкций нормируется как для зимних, так и для летних условий эксплуатации здания.

В соответствии с этим ограждающие конструкции здания, расположенного в районах с летней температурой самого жаркого месяца в 13 ч выше 24° , наряду с теплотехническим расчетом по зимним условиям подлежат дополнительной проверке по формуле (III.70) на теплоустойчивость в летних условиях (на воздействие солнечной радиации).

Для зимних условий теплоустойчивость ограждающих конструкций нормируется посредством $R_{\text{н}}^{\text{т}}$, где колебание температуры внутренней поверхности ограждения $t_{\text{в}}$ ограничивается нормируемым температурным перепадом $\Delta t''$.

Нормирование теплоустойчивости ограждающих конструкций при взаимодействии на них солнечной радиации заключается в ограничении амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения с учетом климатических особенностей местности и расположения наружных поверхностей ограждения по отношению к горизонту и странам света.

В соответствии с этим степень затухания амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения по сравнению с амплитудой колебания температуры наружной среды должна быть не менее значений γ , приведенных в табл. III.13.

Интенсивность затухания температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения при воздействии на ограждение солнечной радиации зависит от теплозащитных качеств и массивности ограждений, а также от порядка расположения отдельных слоев в ограждении. Повышение теплозащитных качеств и массивности ограждения и расположение в слоистых ограждениях более массивных материалов ближе к их внутренней поверхности приводят к более интенсивному затуханию

Значения коэффициента ψ

$\frac{A_{\text{экв}}}{A_t}$	Различия времени максимумов $J_{\text{макс}}$ и t_n в ч									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,99	0,96	0,92	0,87	0,79	0,71	0,61	0,5	0,38	0,26
2	0,99	0,97	0,93	0,88	0,82	0,75	0,66	0,57	0,49	0,41
3	0,99	0,97	0,94	0,90	0,85	0,79	0,73	0,66	0,6	0,55
5	1	0,98	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,76	0,73	0,69

Таблица III.13

Минимальная величина затухания ψ амплитуды колебания температуры наружного воздуха в ограждающих конструкциях

Наименование ограждения	Значение величины ψ при летних температурах t_n	
	от 25 до 29°	30° и выше
Бесчердачные покрытия	25	35
Чердачные перекрытия и наружные стены, ориентированные на юг, восток и запад	15	25

температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения.

Дополнительные мероприятия по защите зданий от теплового воздействия солнечной радиации следующие:

а) снижение коэффициента поглощения солнечной радиации наружных поверхностей ограждения окраской их в светлые тона;

б) устройство вентилируемых воздушных прослоек в наружных ограждающих конструкциях;

в) экранирование наружных ограждений от солнечной радиации устройством навесов, веранд, зеленых насаждений и т. п. возле стен здания;

г) проветривание помещений в вечернее и ночное время.

Пример 11. Проверить теплотехнические качества ограждения из примера 7 на летние и зимние условия эксплуатации здания, а также определить амплитуду колебания температуры на внутренней поверхности ограждения под воздействием солнечной радиации по следующим исходным данным:

1. Местонахождение объекта: Волгоград.

2. Географическая широта $\varphi = 49^\circ$.

3. Расчетная температура:

а) для зимних условий $t_n = 18^\circ$; $t_n^v = -25^\circ$; $t_n^l = -30^\circ$;

б) для летних условий $t_{12} = 24,2^\circ$; $t_{13} = 28,6^\circ$.

4. Коэффициент теплоперевода α_n при наличии слабого ветра $\alpha_n = 15 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч град}$.

5. Количество падающей солнечной радиации на поверхность стены, ориентированной на запад:

а) максимальной — $J_{\text{макс}} = 576 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}$;

б) среднесуточной $J_{\text{ср}} = 143 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}$.

6. Время максимальной температуры:

а) наружного воздуха $Z_1 = 15 \text{ ч}$;

б) солнечной радиации $Z_2 = 17 \text{ ч}$.

7. Конструкция и теплотехнические показатели ограждения (см. пример 7):

а) сопротивление теплопередаче

$R_0 = 1,596 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч град}$;

б) затухание амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения $\psi = 19,2$ раза.

8. Коэффициент поглощения солнечной радиации светлой поверхностью $\rho = 0,4$.

9. Требуемое сопротивление теплопередаче ограждения

$$R_0^{\text{тр}} = \frac{18 - (-25)}{7,5 \cdot 6} \cdot 1,2 = 1,15 \text{ м}^2 \text{ ч град/ккал}.$$

Данное ограждение по своим теплотехническим показателям удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ограждающим конструкциям зданий, возводимых в районе Волгограда

($R_0 > R_0^{\text{тр}}$; $\psi = 19,2 > 15$).

Дальнейший расчет сводится к определению амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения.

Решение.

1. Расчетная разность (амплитуда) между максимальной и среднесуточной температурой наружного воздуха (III.79)

$$A_t = 2(28,6 - 24,2) = 8,8^\circ.$$

2. Амплитуда колебания солнечной радиации

$$A_{\text{рад}} = 576 - 143 = 433 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}.$$

3. Амплитуда колебания эквивалентной температуры солнечной радиации (III.80)

$$A_{\text{экв}} = \frac{0,4 \cdot 433}{15} = 11,5^\circ.$$

4. Амплитуда колебания суммарной наружной температуры (III.81) при $\frac{A_{\text{экв}}}{A_t} = \frac{11,5}{8,8} = 1,3$ и $Z_1 - Z_2 = 17 - 15 = 2 \text{ ч}$.

Из табл. (III.12) находим $\psi = 0,96$.

По формуле (III.81) получаем

$$A_{\text{сумм}} = (11,6 + 8,8)0,96 = 19,6^\circ.$$

5. Амплитуда колебания температуры на внутренней поверхности ограждения

$$A_{\text{в.п.}} = \frac{A_{\text{сумм}}}{19,2} = 1^\circ.$$

6. Максимальное количество тепла, отдаваемое внутренней поверхностью внутри помещений в результате периодических температурных воздействий наружной среды на ограждение

$$q_{\text{макс}} = \alpha_n A_{\text{в.п.}} = 7,5 \cdot 1 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч}.$$

ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИИ

1. Значение влажностного режима ограждающих конструкций

Влажностное состояние материала оказывает большое влияние на эксплуатационные качества ограждения. Повышение содержания влаги в материале ограждения выше «нормального» (расчетного) ее значения приводит к снижению теплозащитных качеств ограждения. В зависимости от количественного содержания влаги в материале ограждения снижение его теплозащитных качеств незамедлительно может отразиться на температурно-влажностном режиме внутренней среды здания. В этом случае может иметь место повышение теплопотерь здания, понижение температуры на внутренней поверхности ограждения и внутреннего воздуха, сопровождаемые повышением влажности воздуха и появлением сырости на наиболее охлаждаемых участках внутренней поверхности ограждения.

Наряду с нарушением нормального температурно-влажностного режима внутри здания повышение влажности материала ограждения может также оказать большое влияние на долговечность ограждения как в части морозостойкости материала, так и его влагостойкости и биостойкости.

Изменение влажностного состояния ограждения в процессе эксплуатации здания может происходить в результате сорбционного и конденсационного увлажнения материала ограждения.

Процесс сорбции и конденсации водяных паров воздуха на поверхности и в толще ограждения неразрывно связан с температурно-влажностным состоянием окружающей среды. Эти процессы имеют свои физические закономерности, знание которых позволит заранее посредством расчета устанавливать влажностное состояние, в котором будет находиться ограждение при эксплуатации здания.

2. Влажностное состояние воздуха

Влажностное состояние воздуха определяется абсолютной и относительной влажностью воздуха.

Абсолютная влажность воздуха — количество водяного пара в граммах, содержащегося в 1 м^3 воздуха, и обозначается $f \text{ г/м}^3$. Абсолютная влажность воздуха может быть также выражена через парциальное давление водяного пара воздуха.

Парциальное давление водяных паров воздуха является составной частью атмосферного давления влажного воздуха, которое складывается из парциального давления сухого воздуха и парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе.

Парциальное давление водяного пара воздуха, обычно называемое упругостью водяного пара и обозначаемое e , измеряется.

а) в строительстве в *мм рт. ст.*;

б) в метеорологии в миллибарах (1 миллибар равен $0,75 \text{ мм рт. ст.}$).

Влагопоглощающая способность воздуха ограничивается температурой воздуха. Каждому значению температуры воздуха соответствует свое предельное значение упругости водяного пара, которое называется максимальной упругостью водяного пара для данной температуры воздуха и обозначается $E \text{ мм рт. ст.}$

Влагоемкость воздуха, а вместе с ней и максимальная упругость водяного пара воздуха, возрастает с увеличением температуры воздуха. Следовательно, при одном и том же влагосодержании воздуха последний в зависимости от температуры будет иметь различную степень насыщения водяным паром.

Степень насыщения воздуха водяным паром определяется относительной влажностью

воздуха, которая выражается как процентное отношение действительной упругости водяного пара при данной температуре к максимальной упругости водяного пара при этой же температуре, т. е.

$$\varphi = \frac{e}{E} 100\%. \quad (\text{III.82})$$

Относительная влажность воздуха зависит от температуры и влагосодержания воздуха. При неизменном влагосодержании воздуха повышение температуры его приводит к уменьшению относительной влажности воздуха, а понижение температуры воздуха вызывает повышение его относительной влажности.

При некотором понижении температуры воздуха действительная упругость водяного пара воздуха может стать равной максимальной упругости водяного пара при данной температуре, т. е. будет иметь место полное насыщение воздуха водяными парами. В этом случае относительная влажность воздуха будет иметь значение $\varphi = 100\%$.

Температура, при которой воздух достигает полного влагонасыщения, называется температурой точки росы и обозначается τ_p .

Дальнейшее понижение температуры воздуха ниже точки росы или же повышение его влагосодержания приведет к конденсации водяных паров воздуха, т. е. к выпадению их из воздуха в капельно-жидком состоянии в виде тумана.

3. Конденсация влаги на поверхности ограждения

Выпадение конденсата из воздуха может иметь место также при соприкосновении воздуха с поверхностями различных тел, имеющих температуру τ_n ниже точки росы τ_p , т. е. $\tau_n < \tau_p$.

Такое явление имеет место в зданиях, в которых температура поверхностей ограждающих конструкций ниже температуры точки росы соприкасающегося воздуха. В этом случае воздух, соприкасающийся с поверхностью этих стен, охлаждается, и на поверхности стены происходит образование конденсата.

Обычно появление конденсата имеет место ранее всего на поверхности с наиболее низкой температурой: углах наружных стен, а также участках внутренней поверхности стены с теплопроводными включениями.

Выпадение конденсата на внутренней поверхности ограждения может происходить вследствие повышения влажности внутренне-

го воздуха или же недостаточной теплозащитной способности ограждения. Для предотвращения образования конденсата возможны следующие мероприятия:

а) снижение влажности внутреннего воздуха посредством естественной или искусственной вентиляции;

б) повышение температуры внутренней поверхности ограждения увеличением сопротивления теплопередаче R_0 ограждения, уменьшения величины R_n или же повышения температуры внутреннего воздуха.

В помещениях с высокой влажностью внутреннего воздуха неизбежна конденсация водяного пара на внутренней поверхности ограждения. В этом случае основные мероприятия должны быть направлены к недопущению проникновения конденсирующейся на внутренней поверхности влаги в ее толщу (обработка внутренней поверхности ограждения водонепроницаемыми материалами).

4. Паропроницаемость строительных материалов и ограждающих конструкций

Ограждающие конструкции здания являются перегородками, разделяющими две воздушные среды, отличающиеся одна от другой температурой и упругостью водяного пара.

В наибольшей степени эти различия состояния воздушных сред проявляются зимой. В зимний период между воздушными средами, разделяемыми ограждением, температурный перепад может достигать 50° и больше, а разность упругостей водяного пара, содержащегося в воздухе, — свыше 10 мм рт. ст.

Суммарное парциальное давление всех газов, входящих в состав воздуха, одинаково для наружной и внутренней сред здания и равняется атмосферному давлению воздуха.

Уменьшение парциального давления водяного пара в наружной среде за счет конденсации и выпадения водяного пара из воздуха восполняется увеличением парциального давления у других газов, входящих в состав воздушной среды. Поэтому в зимний период года наибольшее парциальное давление водяного пара имеет место во внутренней воздушной среде, а парциальное давление других газов (за исключением углекислого) — в наружной воздушной среде.

Вследствие различия парциальных давлений отдельных газов в воздушных средах, разделяемых ограждением, происходит диффузия их через ограждение из среды с большим парциальным давлением соответствующего газа в среду с меньшим парциальным давлением.

Таким образом, в зимнее время через ограждение происходит встречная диффузия: водяного пара из внутренней воздушной среды здания во внешнюю среду и остальных газов, входящих в состав воздуха, из внешней воздушной среды во внутреннюю воздушную среду.

Диффузию газов из внешней воздушной среды через ограждения не следует отождествлять с воздухопроницаемостью. Диффузия газа — молекулярное явление, при котором происходит перемещение лишь молекул определенного газа в сторону наименьшего его парциального давления.

Процесс диффузии водяного пара через слои строительного материала или же через ограждение в целом обычно в строительной теплотехнике называется паропроницанием. Процесс диффузии водяного пара и теплопередача через ограждение имеет закономерности, аналогичные выражаемые подобными математическими формулами.

При стационарном процессе диффузии количество водяного пара, проходящего через 1 м^2 однородного ограждения толщиной δ за 1 ч , равняется

$$p = \frac{\mu}{\delta} (e_a - e_n), \quad (\text{III.83})$$

где p — количество водяного пара в $\text{г/м}^2 \text{ ч}$;
 $e_a - e_n$ — разность упругости водяного пара внутреннего и наружного воздуха в мм рт. ст. ;

δ — толщина стенки в м ;

μ — коэффициент паропроницаемости материала стенки в г/м ч мм .

Паропроницаемость строительных материалов характеризуется коэффициентом паропроницаемости.

Коэффициент паропроницаемости строительных материалов зависит от температуры и влажности материала, а также от упругости водяного пара, проходящего через ограждение. Однако ввиду недостаточной изученности этой зависимости коэффициенты паропроницаемости строительных материалов принимаются условно независимыми от упомянутых выше факторов, т. е. рассматриваются как величины постоянные.

При прохождении толщину ограждения диффундирующие водяные пары на своем пути встречают сопротивление материала ограждения. Это сопротивление аналогично термическому сопротивлению ограждения при теплопередаче и называется сопротивлением паропроницанию R_n . Сопротивление паропроницанию R_n отдельного слоя материала или од-

нородного ограждения в целом выражается формулой

$$R_n = \frac{\delta}{\mu} \quad (\text{III.84})$$

и имеет размерность в $\text{мм ч м}^2/\text{г}$.

Сопротивление паропроницанию многослойного ограждения, выполненного из различных материалов, равняется сумме сопротивлений паропроницанию отдельных слоев

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + \dots + R_{nl} = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\delta_l}{\mu_l}, \quad (\text{III.85})$$

где R_{n1} ; R_{n2} ; R_{nl} — сопротивление паропроницанию отдельных слоев материала в $\text{мм рт. ст. ч/м}^2/\text{г}$.

Полное сопротивление паропроницанию ограждения равняется

$$R_{n.o} = R_{n.v} + R_n + R_{n.n}, \quad (\text{III.86})$$

где $R_{n.v}$; $R_{n.n}$ — сопротивление паропереходу между поверхностями ограждения и воздушной средой.

Ввиду малой величины $R_{n.v}$ и $R_{n.n}$ их значения можно не учитывать. В этом случае будем иметь

$$R_{n.o} = R_n, \quad (\text{III.87})$$

т. е. полное сопротивление паропроницанию ограждения можно принимать равным сопротивлению паропроницанию материала ограждения.

Пример 12. Определить сопротивление паропроницанию трехслойной наружной среды примера 10 (л. XLVIII, рис. 3) и распределение водяного пара в ограждении по следующим данным:

1) сухая штукатурка (древесно-волокнистые плиты) $\delta_1 = 1 \text{ см}$; $\mu_1 = 0,01$;

2) фибролит на цементе $\delta_2 = 13 \text{ см}$; $\mu_2 = 0,035$;

3) железобетонная плита $\delta_3 = 4 \text{ см}$; $\mu_3 = 0,004$.

Решение.

По формуле (III.84) находим сопротивление паропроницанию отдельных слоев материала ограждения:

$$R_{n1} = \frac{0,01}{0,01} = 1 \text{ м}^2 \text{ ч мм рт. ст./г};$$

$$R_{n2} = \frac{0,013}{0,035} = 3,7 \text{ м}^2 \text{ ч мм рт. ст./г};$$

$$R_{n3} = \frac{0,04}{0,004} = 10 \text{ м}^2 \text{ ч мм рт. ст./г}.$$

По формуле (III.85) находим сопротивление паропроницанию всего ограждения.

$$R_n = 1 + 3,7 + 10 = 14,7 \text{ м}^2 \text{ ч мм рт. ст./г}.$$

Диффундирующий через толщу ограждения водяной пар, преодолевая сопротивление материала паропроницанию, снижает свою упругость от величины e_b до величины e_n .

При диффузии водяного пара через толщу однородного ограждения изменение его упругости происходит по прямой линии

$$e_x = e_b - \frac{e_b - e_n}{R_n} R_{n,x}, \quad (\text{II.88})$$

где R_n — сопротивление паропроницанию всего ограждения;

$R_{n,x}$ — сопротивление паропроницанию слоя материала толщиной x ;

e_x — упругость водяного пара на расстоянии x от внутренней поверхности.

Для графического изображения изменения упругости водяного пара по толщине однородного ограждения достаточно знать значение упругости водяного пара окружающей воздушной среды. Откладывая эти значения в определенном масштабе на поверхностях ограждения и соединяя их верхние точки на разрезе ограждения прямой линией, получаем графическое изображение изменения упругости водяного пара по сечению однородного ограждения.

Изменение упругости водяного пара в толще многослойного ограждения определяется путем вычисления упругости водяного пара на границах слоев ограждения по следующей формуле:

$$e_{n,l} = e_b - \frac{e_b - e_n}{R_n} \sum R_{n,l}, \quad (\text{II.89})$$

где $e_{n,l}$ — упругость водяного пара на наружной поверхности l -го слоя;

e_b — упругость водяного пара внутреннего воздуха;

e_n — упругость водяного пара наружного воздуха;

$\sum R_{n,l}$ — суммарное сопротивление паропроницанию l первых слоев материала ограждения.

5. Сорбционное увлажнение материала

Сорбционное увлажнение — молекулярное явление, представляющее собой поглощение поверхностью материала молекул водяного пара, содержащегося в воздухе. В этом случае материал под действием молекулярных сил притягивает к себе отдельные молекулы водяного пара, которые обволакивают поверхности частиц материала и поверхности его пор и капилляров равномерным слоем толщиной, не превышающей диаметра нескольких молекул.

В отличие от процесса конденсации на поверхности материала водяных паров воздуха процесс сорбционного увлажнения не требует разности температуры между материалом и воздухом, содержащим водяной пар. Процесс сорбции происходит при одинаковой температуре материала и соприкасающегося с ним воздуха.

Степень сорбционного увлажнения зависит от вида материала, упругости водяного пара и температуры. Наибольшей сорбционной способностью обладают органические материалы.

Процесс сорбционного увлажнения материала продолжается до достижения равновесного состояния между сорбированной влагой и упругостью водяных паров воздуха при неизменной температуре. При равновесном состоянии определенной сорбционной влажности материала соответствует определенная температура и упругость водяного пара в его порах. Изменение температуры и упругости водяного пара изменяет и равновесное влажностное состояние материала. Повышение относительной влажности или понижение температуры воздуха повышает сорбционную способность материала. Полное сорбционное насыщение материала при неизменной температуре достигается при максимальной относительной влажности воздуха. Понижение абсолютной влажности воздуха при постоянной его температуре или повышение температуры воздуха при неизменной его абсолютной влажности снижает сорбционную способность материала и может вызвать обратный процесс — десорбцию, т. е. удаление из материала сорбционной влаги.

Степень сорбционного увлажнения при данной температуре определяется для каждого материала экспериментальным путем (табл. III.14) и для каждой температуры может быть изображена графически в виде кривых, выражающих зависимость между влажностью материала и относительной влажностью воздуха. Эти кривые называются изотермами сорбции и могут быть графически изображены для любого материала (л. XLIX, рис. 3). Посредством изотерм сорбции возможно устанавливать сорбционную влажность соответствующего материала при известной относительной влажности воздуха, заключенного в порах материала, а также и относительную пароемкость материала.

Пароемкость материала при данной его сорбционной влажности — способность материала дополнительно сорбировать определенное количество водяного пара при повышении фактической относительной влажности воздуха ϕ до предельного ее состояния $\phi_{100} = 100\%$.

Относительная пароемкость материала ξ

Сорбционное увлажнение строительных материалов

Наименование материала	Объемный вес в кг/м³	Температура в град	Весовая влажность ω_v в % при относительной упругости водяного пара φ в %						
			40	50	60	70	80	90	100
Дерево	500	0	8,1	10,2	12	14	16,7	21,9	31,3
Древесно-волоконистые плиты	200	20	5	5,7	7	8,9	11,5	15,8	26
Кирпич:									
красный	1700	0—35	0,055	0,07	0,1	0,16	0,245	0,365	0,53
силикатный	1780	—	0,3	0,35	0,4	0,45	0,55	0,7	0,7
Минеральные плиты	350	20	0,25	0,3	0,4	0,55	0,75	1,1	1,9
Мипора	13	20	8,8	10	10,9	12,5	16,1	24,5	35,5
Пенобетон	345	0—35	2,55	3,05	3,6	4,2	5,2	6,5	8,3
" "	600	20	2	2,3	2,85	3,6	4,75	6,2	10
" "	850	20	3,5	4,05	4,7	5,5	6,5	8,1	13,5
Пеностекло	375	20	0,05	0,03	0,11	0,15	0,3	0,8	3,9
Фиролит	325	0—35	7,7	9,4	11,4	14,2	18,8	25,4	34,8
Шлакобетон	920	0	1,25	1,47	1,7	1,95	2,25	2,75	3,65
" "	—	35	1,03	1,25	1,48	1,73	2,03	2,53	3,43

в г/кг представляет собой отношение приращения весовой влажности 1 кг материала в граммах при повышении фактической относительной влажности воздуха φ_x до $\varphi_{100}=100\%$ к разности между фактической и максимальной относительной влажностью воздуха, т. е.

$$\xi_0 = \frac{\omega_{100} - \omega_x}{\varphi_{100} - \varphi_x} 1000. \quad (\text{III.90})$$

Относительная пароемкость материала является величиной переменной, зависящей от температуры и упругости водяного пара в порах материала. Формула (III.90) может быть представлена в виде

$$\xi_0 = m (\omega_{100} - \omega_x), \quad (\text{III.91})$$

где m — величина, зависящая от разности $\varphi_{100} - \varphi_x$

при $\varphi_x = 50\%$	$m = 20$
" $\varphi_x = 60\%$	$m = 25$
" $\varphi_x = 70\%$	$m = 33$

6. Сорбционное увлажнение материала ограждения при стационарной диффузии водяного пара

Стационарная диффузия водяного пара имеет место в ограждающих конструкциях при установившемся равновесном сорбционном увлажнении материала. При прохождении толщи ограждения водяного пара, преодолевая сопротивление материала ограждения, понижает свою упругость и приобретает температуру в соответствии с распределением ее в ограждении.

При стационарной температуре и упругости водяного пара окружающей воздушной

среды изменение температуры и упругости водяного пара по толщине ограждения происходит с различной интенсивностью в зависимости от вида материала и конструктивного решения ограждения. Вследствие этого при равновесном влажностном состоянии материала во всех слоях по толщине ограждения диффундирующий водяной пар имеет различную температуру и относительную упругость.

Расчет влажностного состояния ограждения при стационарных условиях диффузии водяного пара через ограждение заключается в определении распространения сорбционной влаги в материале ограждения при стационарных значениях температуры и влажности наружного воздуха. В этом случае надежность расчета зависит от правильности принятых расчетных значений температуры и влажности наружного и внутреннего воздуха.

В зимних условиях эксплуатации отапливаемого здания температура и влажность внутреннего воздуха изменяются незначительно и могут быть приняты постоянными, т. е. расчетные значения температуры и влажности внутреннего воздуха принимаются те же самые, что и при теплотехническом расчете ограждения.

Процесс диффузии водяного пара и установления равновесного влажностного состояния в ограждении протекает весьма медленно. Для установления стационарного потока диффундирующего водяного пара требуется более длительное время, чем для теплового потока при теплопередаче. Вследствие этого при влажностном расчете ограждения в качестве расчетных параметров

наружного воздуха принимаются средние значения температуры и влажности наружного воздуха холодного периода года. За холодный период года принимается период времени года со среднемесячной температурой наружного воздуха $t_n < 0^\circ$.

При известных значениях сопротивления теплопередаче R_0 и сопротивления паропрооницанию R_n ограждения по формулам (III.41) и (III.89) определяется распределение температуры и фактической упругости водяного пара в толще ограждения, а также в этих же слоях определяются значения максимальной и относительной упругости водяного пара. Затем по изотерме сорбции материала в соответствии с относительной упругостью водяного пара устанавливается и степень сорбционного увлажнения каждого слоя материала ограждения.

7. Конденсационное увлажнение материала ограждения диффундирующими водяными парами

К концу теплого периода ($t_n \leq 0^\circ$) в зависимости от влажностного режима здания в ограждающих конструкциях сохраняется определенное влажностное состояние материала, которое приблизительно соответствует сорбционной влажности материала по изотерме сорбции при следующих значениях:

- а) для сухого режима $\varphi = 50\%$
- б) „ нормального „ $\varphi = 60\%$
- в) „ влажного „ $\varphi = 70\%$

Процесс увлажнения материала ограждения после теплого периода начинается со времени понижения температуры наружного воздуха. При понижении температуры наружного воздуха изменяется распределение температуры в ограждении и нарушается влажностное равновесие в материале ограждения, т. е. снижается температура, повышается относительная упругость водяного пара в порах материала и происходит дальнейшее сорбционное увлажнение материала до равновесного состояния с упругостью водяного пара в его порах.

В зимних условиях материал в ограждении обладает различной степенью сорбционного увлажнения, отсюда и различной пароемкостью ξ_0 . Предельное равновесное сорбционное увлажнение материала ограждения имеет место при максимальной упругости водяного пара в порах материала. Незначительное превышение диффундирующим водяным паром этого равновесного состояния вызывает выпадение конденсата в плоскости, где $\xi_0 = 0$. Эта плоскость называется плоскостью вероятной

конденсации водяных паров в ограждении и местоположение ее зависит от конструктивного решения ограждения (т. XLIX, рис. 4).

При наличии конденсации влаги в ограждении процесс диффузии водяных паров через ограждение имеет нестационарный характер, вследствие чего формула (III.90) является неприемлемой для влажностного расчета ограждения.

Точный расчет влажностного состояния ограждения при наличии конденсации водяного пара в нем весьма затруднителен. Обычно для практических целей расчет производится приближенным способом, посредством которого определяется влажностное состояние материала к концу зимнего периода, а также потребность в дополнительных конструктивных мероприятиях по ограничению увлажнения материала конденсирующимся водяным паром в ограждении.

При стационарных температурно-влажностных условиях окружающей воздушной среды и установившемся равновесном сорбционном увлажнении материала за пределами плоскости вероятной конденсации количество конденсирующегося водяного пара в ограждении выражается разностью между количеством водяного пара, поступающего в ограждение и выходящего из него. В этом случае количество конденсирующейся влаги в ограждении к концу зимнего периода будет

$$Q = \left(\frac{e_n - E_x}{R_{п.в}} - \frac{E_x - e_n}{R_{п.н}} \right) \Delta Z \cdot 24, \quad (\text{II.92})$$

где Q — количество конденсата в $г/м^2$;

e_n — упругость водяного пара внутреннего воздуха в $г/м^3$ и $мм$;

e_n, E_x — средняя суточная за время ΔZ упругость водяного пара наружного воздуха и максимальная упругость водяного пара в плоскости вероятной конденсации в $г/м^3$ и $мм$;

$R_{п.в}; R_{п.н}$ — сопротивление паропрооницанию частей ограждения, расположенных с внутренней и наружной сторон плоскости вероятной конденсации водяного пара в ограждении в $м^2$ и $мм/г$;

ΔZ — продолжительность зимнего периода после наступления равновесного сорбционного увлажнения материала в ограждении в сутках.

К концу зимнего периода материал ограждения повысит свою весовую влажность за счет конденсата на величину, равную

$$\Delta \omega_{в.к} = \left(\frac{e_n - E_x}{R_{п.в}} - \frac{E_x - e_n}{R_{п.н}} \right) \frac{\Delta Z \cdot 24}{\gamma \delta}, \quad (\text{III.93})$$

где $\Delta \omega_{в.к}$ — конденсационная влажность материала в %;

γ — объемный вес материала в кг/м³;

δ — толщина слоя материала в м.

Степень конденсационного увлажнения материала ограждения за зимний период зависит от длительности процесса установления равновесного сорбционного увлажнения материала в ограждении и интенсивности поступления водяных паров в толщу ограждения. Чем больше длительность процесса установления предельного равновесного сорбционного увлажнения материала в ограждении, тем меньший период времени происходит накопление влаги в ограждении.

Процесс установления предельного сорбционного увлажнения материала водяным паром, т. е. до $\xi_0 = 0$ в плоскости вероятной конденсации, имеет различную длительность в зависимости от вида материала, его начальной влажности и конструктивного решения ограждения.

Продолжительность периода, в течение которого происходит увлажнение материала до предельного состояния, после чего начинается образование конденсата в плоскости вероятной конденсации водяных паров в ограждении, В. М. Ильинский предлагает определять по следующей формуле:

$$\bar{Z} = \frac{k \gamma \delta \xi_0 \bar{n}}{e_n - E_x} R_{п.н.} \quad (\text{III.94})$$

периода года, принимаемый равным 0,006 — для сухого, 0,005 — для нормального и 0,004 — для влажного режима эксплуатации помещений;

ξ_0 — относительная пароемкость материала в г/кг, определяемая по формуле (III.90);

$\bar{n}$ — величина, показывающая, во сколько раз общее количество водяного пара, поступающее в ограждение, превышает количество водяного пара, остающегося в ограждении.

Величина $\bar{n}$ зависит от соотношения $\frac{R_{п.н.}}{R_{п.в}}$

и от влажностного режима помещения (табл. III.15).

Процесс конденсации влаги в ограждении возникает после установления в нем равновесного влажностного состояния и продолжается до конца холодного периода

$$\Delta Z = Z_0 - \bar{Z}, \quad (\text{III.95})$$

где Z_0 — продолжительность всего зимнего периода в сутках;

ΔZ — продолжительность процесса конденсации влаги в ограждении в сутках.

Формулы (III.94) и (III.95) позволяют с учетом начального влажностного состояния материала ограждения установить длительность процесса конденсации влаги в ограждении, а также с помощью формулы (III.93) оп-

Таблица III.15

Коэффициенты $\bar{n}$

Вид конструкции	Влажностный режим помещения	Значения $\bar{n}$ при отношении $\frac{R_{п.н.}}{R_{п.в}}$						
		0,25	0,37	0,5	1	2	5	10
Покрытия и облегченные стены, утепленные снаружи, с защитным слоем	Нормальный	—	10	3	1,5	1,2	1,07	1
	Влажный	5	2,2	1,7	1,2	1,1	1,05	1
Стены однородные или утепленные изнутри	Нормальный	—	—	—	—	—	1,7	1,2
	Влажный	—	—	—	—	2	1,2	1,1

где $\bar{Z}$ — продолжительность в сутках периода со среднесуточными температурами воздуха ниже 0°, в течение которого происходит увлажнение материала до его предельного состояния;

k — коэффициент, зависящий от влажности материала к концу теплого

ределить конденсационное увлажнение материала в ограждении к концу зимнего периода.

В ограждающих конструкциях, в которых длительность процесса установления предельного равновесия влажностного состояния превышает продолжительность зимнего периода ($\bar{Z} \geq Z_0$), конденсация влаги в ограждении происходить не может.

8. Мероприятия против конденсации влаги в наружных ограждениях здания

При нормальных условиях эксплуатации здания степень увлажнения ограждения за зимний период года зависит от начального влажностного состояния материала ограждения и от конструктивного решения ограждения.

В соответствии с этим СНиП нормирует допустимую влажность материала в наружных ограждающих конструкциях перед началом и в конце зимнего периода при нормальных условиях эксплуатации здания. Это нормирование позволяет в процессе проектирования оценивать влажностное состояние ограждающих конструкций и устанавливать необходимые устройства дополнительной пароизоляции или принятия других конструктивных мер, обеспечивающих нормальный влажностный режим ограждения.

Количество конденсирующегося пара в ограждении зависит от соотношения величин $R_{п.в}$ и $R_{п.н}$. С увеличением $R_{п.в}$ или уменьшением $R_{п.н}$ уменьшается количество пара, конденсирующегося в ограждении, и, наоборот, уменьшение $R_{п.в}$ или повышение $R_{п.н}$ приводит к увеличению конденсата в ограждении.

Для уменьшения влагонакопления в ограждении надлежит ограничивать доступ водяного пара в толщу ограждения и облегчать выход его из ограждения в воздушную среду, а также следует смещать температурное поле в сторону наружной поверхности ограждения.

В этом случае плотные материалы, обладающие пониженным паропропусканием и повышенной теплопроводностью, располагаются у внутренней поверхности ограждения, а материалы с повышенным паропропусканием и пониженной теплопроводностью — с наружной стороны.

Такое распределение материалов в ограждении не всегда возможно. Весьма часто наиболее плотные материалы располагаются у наружной поверхности ограждения, а менее плотные — у его внутренней поверхности. В таких случаях прибегают к дополнительной пароизоляции, преграждающей или ограничивающей доступ водяного пара из внутренней среды в толщу ограждения.

Дополнительная пароизоляция у внутренней поверхности ограждения повышает $R_{п.в}$ и тем самым ограничивает поступление водяного пара в ограждение. При этом не следует, однако, забывать, что пароизоляция препятствует освобождению ограждения от производственной (строительной) влаги.

Для обеспечения нормального влажностного состояния ограждения, при котором повышение весовой влажности за счет конденсационного увлажнения не превышает допустимой его величины $\varphi_{в.к.}^{доп}$, требуемое сопротивление пароизоляции слоев наружных ограждающих конструкций, расположенных между помещением и плоскостью вероятной конденсации, включая пароизоляционный слой, СНиП рекомендует определять:

а) исходя из указания норм об ограничении накопления влаги к концу холодного периода по формуле

$$R_{п.в}^{тр} = \frac{2,4 Z_0 (e_n - E_0)}{\gamma_w \delta_w \Delta \omega_{ср} + \frac{2,4 (E_0 - e_{н.о})}{R_{п.н}} Z_0}; \quad (III.96)$$

б) при наличии данных о сорбционных свойствах материалов ограждения по формуле

$$R_{п.в}^{тр} = \frac{Z_0 (e_n - E_0)}{k \gamma_w \delta_w \xi_0 n}. \quad (III.97)$$

Из двух значений $R_{п.в}^{тр}$, полученных по формулам (III.96) и (III.97), следует принимать большее.

В формулах (III.96) и (III.97) приняты следующие обозначения:

e_n — упругость водяного пара внутреннего воздуха в мм рт. ст.;

Z_0 — продолжительность в сутках периода со среднесуточными температурами воздуха ниже 0° , определяемая по графе 24 табл. 1 главы СНиП II-A.6-62;

E_0 — максимальная упругость водяного пара в плоскости возможной конденсации в мм. рт. ст., определяемая по средней температуре $t_{ср}$ периода Z_0 . Значение $t_{ср}$ определяют как среднюю температуру для месяцев с отрицательными среднесуточными температурами наружного воздуха;

$e_{н.о}$ — средняя за период Z_0 упругость водяного пара наружного воздуха в мм. рт. ст., определяемая по графам 2—13 табл. 3 главы СНиП II-A.6-62, как средняя для месяцев с отрицательными среднемесячными температурами воздуха;

γ_w — объемный вес увлажняемого материала в $кг/м^3$;

δ_w — толщина увлажняемого слоя в м;

$\Delta \omega_{ср}$ — допустимое приращение влажности материала за период Z_0 , принимаемый по табл. 14 СНиП II-A. 7-62.

Формула (III.96) получена из (III.93), где период влагонакопления условно принят рав-

ным продолжительности периода со средними месячными температурами наружного воздуха ниже 0° , т. е. $\Delta Z = Z_0$.

При таком допущении процесс конденсации влаги в ограждении распространяется на весь холодный период, что приводит к завышению количества конденсирующейся влаги в ограждении (III.93) и величины $R_{п.в}^{тр}$.

Формула (III.97), полученная из (III.94), учитывает начальное влажностное состояние материала ограждения и продолжительность процесса конденсации влаги после установления равновесного влажностного состояния материала с диффундирующим водяным паром.

Согласно СНиП дополнительного пароизоляции слоя не требуется, если расчетное сопротивление паропропусканию $R_{п.в}$ части ограждения, расположенной между помещением и плоскостью возможной конденсации водяного пара в толще ограждения, превышает значение $R_{п.в}^{тр}$. В противном случае требуется дополнительная пароизоляция, сопротивление паропропусканию которой должно быть

$$\Delta R_n > R_{п.в}^{тр} - R_{п.в}, \quad (III.98)$$

где ΔR_n — сопротивление паропропусканию дополнительного пароизоляционного слоя.

Обычно пароизоляция располагается на внутренней поверхности ограждения отапливаемых зданий или же за ней (например, под внутренней штукатуркой). В качестве пароизоляции употребляются тонкие листовые и рулонные материалы, а также покрасочные и обмазочные материалы, обладающие малой паропропускной способностью. Эффективность пароизоляции пропорциональна ее сопротивлению паропропусканию (табл. III.16). При наличии в

Таблица III.16
Сопротивление паропропусканию R_n некоторых пароизоляционных материалов

Вид пароизоляции	Толщина слоя в мм	R_n в мм $\text{см}^2/\text{с}$
Окраска горячим битумом за один раз	—	2
Окраска масляной краской за два раза со шпаклевкой и грунтовкой	—	4,8
Тщательное покрытие поверхности поливинилхлоридным лаком	—	29
Строительный пергамин	0,4	2,5
Руберойд одинарный	1,5	8,3
Двухслойный водонепроницаемый кровельный ковер (пергамин и руберойд на мастике)	6	12,8
Рулонный ковер трехслойный (1 слой руберойда и 2 слоя пергамина на битумной мастике)	10	18,6

ограждении производственной влаги или повышенной влажности материала (выше нормальной) устройство дополнительной пароизоляции возможно производить лишь после просушки материала в ограждении до нормального его влажностного состояния.

9. Влажностное состояние материала ограждения к концу холодного периода года

Среднее влажностное состояние материала ограждения к концу холодного периода года складывается из сорбционного и конденсационного увлажнения материала

$$\omega_{ср} = \omega_{срб} + \omega_{конд}. \quad (III.99)$$

Сорбционное увлажнение зависит от вида материала и относительной упругости водяного пара в ограждении и определяется по изотерме сорбции.

Конденсационное увлажнение материала, зависящее от температурно-влажностного режима ограждения, теплофизических свойств его и длительности холодного периода года, определяется по формуле (III.93).

Наибольший интерес представляют материалы, выполняющие теплозащитные функции ограждения: эффективные теплоизоляционные материалы, употребляемые в многослойных ограждающих конструкциях. В однородных ограждающих конструкциях материал наряду с несущими функциями выполняет также и теплозащитные. В этом случае необходимо рассматривать влажностное состояние всего однородного массива ограждения.

Для определения сорбционного увлажнения материала необходимо иметь данные о распределении температуры и упругости водяного пара в толще увлажняемого слоя.

Температура на поверхности утепляющего слоя многослойного ограждения определяется по формуле (III.41)

$$t_1 = t_b - \frac{t_b - t_n}{R_0} (R_b + \Sigma R);$$

$$t_2 = t_b - \frac{t_b - t_n}{R_0} (R_b + \Sigma R + R_{ут}),$$

где t_1, t_2 — температура на поверхностях утепляющего слоя;

ΣR — термическое сопротивление слоев материала, расположенных с внутренней стороны утепляющего слоя;

$R_{ут}$ — термическое сопротивление утепляющего слоя.

Распределение температуры внутри утепляющего слоя определяется по формуле (III.18):

$$\tau_x = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\delta} x,$$

где τ_x — температура на расстоянии x от внутренней поверхности утепляющего слоя;

δ — толщина утепляющего слоя.

При наличии плоскости вероятной конденсации упругость водяного пара на поверхности утепляющего слоя, соприкасающейся с плоскостью вероятной конденсации, равняется E .

Упругость водяного пара на внутренней поверхности утепляющего слоя равняется по (III.89):

$$e_{n.1} = e_n - \frac{e_n - E}{R_{n. n}} \Sigma R_n,$$

где ΣR_n — сопротивление паропроницаемости слоев материала, расположенных перед утепляющим слоем материала.

Упругость водяного пара в толще утепляющего слоя на расстоянии x от его внутренней поверхности равняется по (III.88)

$$e_x = e_{n.1} - \frac{e_{n.1} - E}{\delta} x.$$

По температуре и упругости водяного пара в толще утепляющего слоя находится относительная упругость водяного пара, а затем по изотерме сорбции определяется и сорбционное увлажнение материала утепляющего слоя.

Среднее сорбционное увлажнение материала утепляющего слоя равняется

$$\omega_{\text{сorb}} = \frac{0,5 \omega_1 + \omega_2 + \dots + 0,5 \omega_n}{n-1}, \quad (\text{III.100})$$

где ω_n — сорбционная влажность материала n -го слоя в %.

Складывая значения $\omega_{\text{конд}}$ и $\omega_{\text{сorb}}$, получаем среднее значение влажности материала утепляющего слоя к концу холодного периода года.

10. Графоаналитический метод расчета влажностного режима ограждения при наличии конденсации влаги (по К. Ф. Фокину)

При стационарных температурно-влажностных условиях окружающей воздушной среды и наличии конденсации водяных паров в ограждении возможно графическим способом установить месторасположение плоскости вероятной конденсации влаги и распределение сорбционной влаги в ограждении. Для этого многослойное ограждение из различных материалов приводится к виду однородного по па-

ропроницаемости материала посредством графического изображения разреза ограждения в масштабе сопротивления паропрооницанию всех слоев материала (л. XLIX, рис. 5).

На этом разрезе изображаются распределение температуры τ (III.18) и соответствующая ей максимальная упругость водяного пара $E=f(\tau)$ в ограждении по слоям Δx .

Затем на поверхности ограждения наносятся в том же масштабе, что и E , значения e_n и $e_{n.1}$. Соединяя эти точки прямой линией ($e_n - e_{n.1}$), получим:

1) прямая ($e_n - e_{n.1}$) не пересекает $E=f(\tau)$, что показывает на отсутствие конденсации влаги в ограждении, т. е. имеет место лишь сорбционное увлажнение материала;

2) прямая ($e_n - e_{n.1}$) пересекает $E=f(\tau)$; в этом случае имеет место конденсация влаги в ограждении.

Точки пересечения прямой ($e_n - e_{n.1}$) с кривой $E=f(\tau)$ не определяют плоскости конденсации влаги в ограждении. Для определения плоскости вероятной конденсации водяного пара в ограждении надлежит из точек e_n и $e_{n.1}$ провести прямые линии, касательные к кривой $E=f(\tau)$. Точки касания этих линий с кривой E определяют границы зоны конденсации влаги в ограждении. Эти данные могут быть использованы для определения $R_{n. n}$ ограждения. Прямые линии $e_n - E$ и $E - e_{n.1}$ показывают распределение упругости водяного пара за пределами плоскости вероятной конденсации водяного пара в ограждении.

Для определения сорбционного увлажнения материала в ограждении (или в отдельных его слоях) вычисляется и графически изображается на разрезе ограждения относительная упругость водяного пара $\varphi=f\left(\frac{e}{E}\right)$ в ограждении, а затем по изотерме сорбции определяется сорбционная влажность материала.

Среднее влажностное состояние материала ограждения к концу холодного периода года определяется по формулам (III.93), (III.99) и (III.100).

Пример 13. Спроектировать наружные стены жилого здания из примера 10 для климатических условий Барнаула; накопление конденсата в утеплителе за зимний период допускается не более 5% его веса.

А. Исходные данные

1. Продолжительность холодного периода $Z_0=5$ месяцев.
2. Среднесуточная за холодный период температура и влажность наружного воздуха: $t_n = -13,4^\circ$; $\varphi_n = 90\%$; $e_n = 1,28$.
3. Температура и влажность внутреннего воздуха: $t_v = 18^\circ$; $\varphi_v = 55\%$; $e_v = 8,5$.

Таблица 1

Конструктивное решение ограждения и его
теплотехнические показатели

№ слоев	Наименование материала	γ в кг/м ³	δ в см	R в м ² ч град/ккал	μ в м/ч мм	$R_{п.в}$ в м ² ч мм/г
1	Сухая штукатурка	700	1	0,067	0,01	1
2	Фибролит	350	13	1,30	0,035	3,7
3	Железобетонная плита	2500	4	0,033	0,004	10
—	$R_n + R_{п.в}$	—	—	0,183	—	—
—	R_n	—	—	1,583	—	—
—	$R_{п.в}$	—	—	—	—	14,7

Б. Определение $R_{п.в}$

Для обеспечения нормального влажностного режима ограждения сопротивление паропроонианию части ограждения, расположенной между его внутренней поверхностью и плоскостью вероятной конденсации водяного пара, должно быть не менее величины, определяемой по формулам (III.96) и III.97).

Плоскость вероятной конденсации располагается между утеплителем и железобетонной плитой (рис. III.14,б) $R_{п.в}=4,7$ и $R_{п.в}=10$ м² ч мм/г.

1. Требуемое сопротивление паропроонианию $R_{п.в}^{тр}$ при условии допущения накопления конденсата в утеплителе к концу холодного периода года в количестве, не превышающем $\Delta \omega = 5\%$ веса утеплителя (III.96):

$$R_{п.в}^{тр} = \frac{2,4 \cdot 150 (8,5 - 1,67)}{350 \cdot 0,13 \cdot 5 + 2,4 \frac{1,67 - 1,23}{10}} = 10,2 \text{ м}^2 \text{ ч мм/г.}$$

2. Требуемое сопротивление паропроонируемости $R_{п.в}^{тр}$ при учете начального влажностного состояния материала (III.97).

$$\text{При } \frac{R_{п.н}}{R_{п.в}} = \frac{10}{4,7} = 2,12 \text{ имеем } \bar{n} = 1,2 \text{ (табл. III.15).}$$

По изотерме сорбции фибролита (рис. III.16) находим

$$\xi_0 = \frac{\omega_{100} - \omega_{85}}{\varphi_{100} - \varphi_{85}} = \frac{34,8 - 10}{100 - 55} = 0,45; \quad k = 0,0055,$$

откуда

$$R_{п.в}^{тр} = \frac{150 (8,5 - 1,67)}{0,0055 \cdot 350 \cdot 0,13 \cdot 550 \cdot 1,2} = 6,24 \text{ м}^2 \text{ ч мм/г.}$$

В обоих случаях (III.96) и (III.97) имеет место $R_{п.в}^{тр} > R_{п.в}$, т. е. требуется дополнительная пароизоляция, сопротивление паропроонианию ΔR_n которой должно быть не менее:

а) по формуле (III.96) $\Delta R_n = 10,2 - 4,7 = 5,5$;

б) по формуле (III.97) $\Delta R_n = 6,24 - 4,7 = 1,54$.

Первая величина $\Delta R_{п.в}$ превышает вторую в 3,5 раза.

Это различие обусловлено различными исходными данными для расчета в части начального влажностного состояния материала, вследствие чего формула (III.96) дает завышенные значения $R_{п.в}^{тр}$ и ΔR_n .

Более достоверные эти величины дает формула (III.97). Однако согласно СНиП в качестве окончательного решения надлежит принимать наибольшее значение $R_{п.в}^{тр}$, т. е. результат формулы (III.96)

В. Влажностный режим ограждения

1. Конденсационное увлажнение фибролита:

а) при $R_{п.в}^{тр} = 10,2$ м² ч мм/г (III.96) $\Delta \omega_k = 5\%$;

б) при $R_{п.в}^{тр} = 6,24$ м² ч мм/г (III.97) продолжительность периода времени сорбционного увлажнения фибролита в ограждении до равновесного состояния с упругостью диффундирующих водяных паров составляет

$$\bar{Z} = \frac{0,0055 \cdot 350 \cdot 0,13 \cdot 550 \cdot 1,2}{8,5 - 1,67} \cdot 6,24 = 150 \text{ суток,}$$

т. е. занимает весь холодный период года района Барнаула ($Z_0 = \bar{Z}$). В этом случае отсутствует конденсация влаги в ограждении ($\Delta \omega = 0$).

При отсутствии дополнительной пароизоляции ($R_{п.в} = 4,7$) продолжительность периода $\bar{Z} = 150 \frac{4,7}{6,24} = 113$ суток.

По (III.95) находим:

$$\Delta Z = Z_0 - \bar{Z} = 150 - 113 = 37 \text{ суток.}$$

Количество конденсирующегося водяного пара в ограждении к концу холодного периода года будет

$$\Delta \omega_k = \left(\frac{8,5 - 1,67}{4,7} - \frac{1,67 - 1,23}{10} \right) \frac{37 \cdot 2,4}{350 \cdot 0,13} = 2,73\% < 5\%.$$

При расчете ограждения с учетом начального влажностного состояния и длительности процесса сорбционного увлажнения его материала до равновесного состояния с диффундирующим водяным паром не требуется дополнительной пароизоляции и количество конденсирующихся водяных паров к концу холодного периода года не превышает допустимую их величину. Однако согласно требованиям СНиП за окончательный результат расчета надлежит принимать большее $R_{п.в}^{тр}$ из полученных значений по формулам (III.96) и (III.97).

2. Сорбционное увлажнение фибролита:

а) температура на поверхностях утеплителя (III.41)

$$t_1 = 18 - \frac{18 + 13,4}{1,583} \cdot 0,2 = 14^\circ;$$

$$t_2 = 18 - \frac{18 + 13,4}{1,583} \cdot 1,5 = -11,8^\circ;$$

б) упругость водяного пара на поверхности фибролита при $R_{п.в} = 10,2$ м² ч мм/г.

Со стороны плоскости вероятной конденсации $E = 1,67$ мм рт. ст.

С внутренней стороны утеплителя (III.89)

$$e_{n1} = 8,5 - \frac{8,5 - 1,67}{10,2} \cdot 6,5 = 8,5 - 4,4 = 4,1 \text{ мм рт. ст.};$$

в) распределение температуры и упругости водяного пара в толще утепления определяется по формулам (III.18) и (III.88):

г) по температуре и упругости водяного пара в толще утеплителя определяются соответствующие им

значения максимальной и относительной упругости водяного пара (табл. III.17);

д) сорбиционное увлажнение материала при известных значениях относительной упругости водяного пара φ определяется по изотерме сорбции данного материала (см. л. XLIX, рис. 6);

е) среднее сорбиционное увлажнение материала определяется по формуле (III.100).

Таблица д

Результаты произведенного расчета

Расположение слоев от внутренней поверхности утеплителя	Значение температуры (t_n), упругостей водяного пара (e_n ; E_n , φ_n) и сорбиционной влажности материала (ω_n , $\omega_{ср}$)					
	t_n	e_n	E_n	φ_n	ω_n	$\omega_{ср}$
x/δ						
$x_1 = 0$	14	4,1	12	34	7,6	14,4
$x_2 = 0,2$	8,9	3,62	8,55	42,5	8,2	
$x_3 = 0,4$	3,7	3,13	5,97	58,5	9,8	
$x_4 = 0,6$	-1,45	2,64	4,06	65	12	
$x_5 = 0,8$	-6,6	2,16	2,63	820	21	
$x_6 = 1$	-11,8	1,67	1,67	100	34,8	

3. Влажностное состояние утепляющего слоя к концу холодного периода года при $R_{п.в}^p = 10,2$ и $R_{в.п}^p = 150$ суток: $\omega_{ср} = 5 + 14,4 = 19,4\%$.

Г. Определение влажностного режима ограждения графоаналитическим способом К. Ф. Фокина (л. XLIX, рис. 5).

Ограждение с дополнительным пароизоляционным слоем изображается графически в масштабе сопротивления паропрооницанию.

2. Слой утеплителя расчленяется на пять равных частей, на поверхностях которых определяются значения t и соответствующие им значения максимальной упругости водяного пара E , которые графически изображаются также на разрезе ограждения.

3. Из точек e_n и e_n , расположенных на поверхности ограждения, проводятся касательные линии к кривой E . Точки касания этих линий определяют расположение плоскости (зону) конденсации водяного пара в ограждении.

4. По значениям e_n и E_n определяется относительная упругость водяного пара в ограждении и графически изображается по сечению ограждения в виде кривой $\varphi = f\left(\frac{e}{E}\right)$.

5. По графику относительной упругости водяного пара в толще ограждения и изотермы сорбции водяного пара для фибролита определяется и графически изображается кривая сорбиционного увлажнения фибролита в ограждении.

6. По кривой $\varphi = f(\varphi)$ определяется среднее сорбиционное увлажнение фибролита

$$\omega_{ср} = \int \varphi(\varphi) d\varphi = \frac{0,5 \cdot 7,6 + 8,2 + 9,8 + 12 + 21 + 0,5 \cdot 34,8}{5} = 14,4\%.$$

7. Среднее конденсационное увлажнение утеплителя $\omega_{конд} = 5\%$.

8. Средняя весовая влажность фибролита к концу холодного периода

$$\omega_{ср} = 14,4 + 5 = 19,4\%.$$

Таблица III.17

Значения максимальной упругости водяного пара E в мм рт. ст. для различных температур при $B=755$ мм

А. Для температур от 0 до $-20,5^\circ$ (над льдом)

t°	E	t°	E	t°	E	t°	E
-0	4,58	-6	2,76	-12	1,63	-18	0,94
-0,4	4,44	-6,4	2,67	-12,4	1,57	-18,4	0,9
-0,8	4,3	-6,8	2,58	-12,8	1,52	-18,8	0,84
-1,2	4,15	-7,2	2,49	-13,2	1,46	-19,2	0,83
-1,6	4,01	-7,6	2,41	-13,6	1,41	-19,6	0,8
-2	3,88	-8	2,32	-14	1,36	-20	0,77
-2,4	3,75	-8,4	2,24	-14,4	1,31	-20,5	0,74
-2,8	3,63	-8,8	2,17	-14,8	1,26	-21	0,7
-3,2	3,51	-9,2	2,09	-15,2	1,22	-21,5	0,67
-3,6	3,39	-9,6	2,01	-15,6	1,17	-22	0,64
-4	3,23	-10	1,95	-16	1,13	-22,5	0,61
-4,4	3,17	-10,4	1,88	-16,4	1,09	-23	0,58
-4,8	3,06	-10,8	1,81	-17	1,05	-23,5	0,55
-5,2	2,96	-11,2	1,75	-17,2	1,01	-24	0,52
-5,6	2,86	-11,6	1,69	-17,6	0,97	-	0,45

Продолжение табл. III.17

Б. Для температур от 0 до $24,8^\circ$ (над водой)

t°	E при t°				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
0	4,58	4,65	4,72	4,79	4,86
1	4,93	5	5,06	5,14	5,22
2	5,29	5,37	5,45	5,53	5,61
3	5,69	5,77	5,85	5,93	6,02
4	6,1	6,19	6,27	6,36	6,45
5	6,54	6,64	6,73	6,82	6,92
6	7,01	7,11	7,21	7,31	7,41
7	7,51	7,62	7,72	7,83	7,94
8	8,05	8,16	8,27	8,38	8,49
9	8,61	8,73	8,85	8,97	9,09
10	9,21	9,33	9,46	9,59	9,71
11	9,84	9,98	10,11	10,24	10,38
12	10,52	10,66	10,8	10,94	11,09
13	11,23	11,38	11,53	11,68	11,83
14	11,99	12,14	12,3	12,46	12,62
15	12,79	12,95	13,12	13,29	13,46
16	13,63	13,81	13,99	14,17	14,35
17	14,53	14,72	14,9	15,09	15,28
18	15,48	15,67	15,87	16,07	16,27
19	16,48	16,67	16,89	17,11	17,32
20	17,54	17,75	17,97	18,2	18,42
21	18,67	18,88	19,11	19,32	19,59
22	19,83	20,07	20,32	20,57	20,82
23	21,07	21,32	21,53	21,85	22,11
24	22,38	22,65	22,92	23,2	23,48

Л И Т Е Р А Т У Р А

по разделу «Архитектурная светотехника»

Глава первая

1. Мешков В. В., Соколов И. И. Курс осветительной техники. Госэнергоиздат, 1960.
2. Епанешников М. М. Электрическое освещение. Госэнергоиздат, 1962.
3. Федоров Б. Ф. Общий курс светотехники. Госэнергоиздат, 1944.
4. Гусев Н. М. Архитектурная светотехника. Архитектурное изд-во, 1949.
5. Справочная книга по светотехнике, т. II, Изд-во АН СССР, 1958.
6. Мешков В. В. Основы светотехники. Госэнергоиздат, 1957.
5. Справочная книга по светотехнике, т. I. Изд-во АН СССР, 1956.
6. I. E. S. Lighting Handbook—London 1959.

Глава шестая

1. Справочная книга по светотехнике, т. II. Изд-во АН СССР, 1958.
2. I. E. S. Lighting Handbook London 1959.
3. «Светотехника» № 6 и 8, 1961.
4. Вопросы освещения городов. Доклад к освещению по градостроительству. Госстройиздат, 1959.
5. Illuminating Engineering 1954, 1959, 1960, 1961.
6. Lichttechnik 1959, 1960, 1961.
7. Кнорринг Г. М. Светящие потолки и полосы, «Светотехника» № 4, 1962.

Главы вторая, третья и четвертая

1. Гусев Н. М. Естественное освещение зданий. Госстройиздат, 1960.
2. Строительные нормы и правила, ч. II, раздел А, гл. 8. Естественное освещение. Нормы проектирования. Госстройиздат, 1962.
3. Дунаев Б. А. Инсоляция жилых зданий. Госстройиздат, 1962.
4. Уманский Н. Г. Солнцезащитные устройства в зданиях. Госстройиздат, 1962.
5. Временные указания по проектированию естественного освещения экспозиционных помещений. Госстройиздат, 1961.
6. Инструкция по расчету и проектированию естественного освещения зданий. Госстройиздат, 1960.
1. Кнорринг Г. М. Справочник для проектирования электрического освещения. Госэнергоиздат, 1960.
2. Епанешников М. М. Электрическое освещение. Госэнергоиздат, 1962.
3. «Светотехника» 1961, № 6; 1962, № 1 и № 6.
4. Волоцкий Н. Ц. Светотехника. Л., 1961.
5. Гусев Н. М. Архитектурная светотехника. Архитектурное изд-во, 1949.
6. Гусев Н. М., Островский М. А. Отчет о командировке в Италию. Издательство ГИТК, 1962.
7. Островский М. А. Номенклатура и размерные ряды светильников для освещения, улиц. «Светотехника» 1961, № 9.

Главы седьмая и восьмая

Глава пятая

1. Мешков В. В., Соколов М. В. Курс осветительной техники. Госэнергоиздат, 1960.
2. Епанешников М. М. Электрическое освещение. Госэнергоиздат, 1962.
3. Волоцкий Н. В. Светотехника. Л., 1961.
4. Вопросы светотехники за рубежом. Госэнергоиздат, 1959.
1. Гусев Н. М. Естественное освещение зданий. Госстройиздат, 1960.
2. Каталог отделочных материалов и изделий. Госстройиздат, 1962.
3. Инструкция по проектированию и устройству железобетонных ограждений. Госстройиздат, 1959.
4. Справочник проектировщика. Железобетонные конструкции. Госстройиздат, 1959.

Глава девятая

ЛИТЕРАТУРА
к разделу «Архитектурная акустика»

Главы первая, вторая и третья

1. Строительная физика. Состояние и перспективы развития. Раздел «Строительная и архитектурная акустика». Госстройиздат, М. 1961.
2. Горелик Г. С. Колебания и волны, Гостоптехиздат, 1950.
3. Красильников В. А. Звуковые волны, Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры. М., 1954.
4. Фурдуев В. В. Обзор методов оценки и измерения диффузности звукового поля. Акустический журнал, 1955 № 4.
5. Sabine Collected papers on Acoustics Harvard University Press 1923.
6. Ингерслев Ф. Акустика в современной строительной практике. Госстройиздат, 1957.
7. Релина Е. В. Акустический анализ современных зрительных залов. Диссертация, 1961.
8. O. Knudsen, Acoustical designing in architecture M. Harris } London, 1950.
9. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. Гос. изд-во литературы по вопросам радио и связи. 1960.

Глава четвертая

1. Заборов В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций. Госстройиздат, 1962.
2. Сборник «Архитектурная акустика». Под ред. проф. Фурдуева В. В. Госстройиздат, 1961.
3. Юдин Е. Я. Глушение шума вентиляционных установок. Госстройиздат, 1958.
4. Славин Н. Н. Производственный шум и борьба с ним. Профиздат, 1955.

5. Лейзер Н. Г. Борьба с шумом в вентиляционных системах. Сборник «Звукоизоляция в жилых домах». Изд-во Академии архитектуры СССР, 1952.
6. Алексеев С. П., Воробьев С. Н., Жаринов В. Д. Звукоизоляция в строительстве. Стройиздат, 1949.
7. Ингерслев Ф. Акустика в современной строительной практике. Госстройиздат, 1957.
8. Целлер В. Техника борьбы с шумами. Под ред. С. П. Алексеева. Госстройиздат, 1958.

Главы пятая и шестая

1. Ингерслев Ф. Акустика в современной строительной практике. Госстройиздат, 1957.
2. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. Гос. изд-во лит-ры по вопросам радио и связи, 1960.
3. Труды научно-технического совещания в Москве. Под ред. В. В. Фурдуева. Госстройиздат, 1961.
4. O. Knudsen, Acoustical designing in architecture M. Harris } London, 1950.
5. Сборник «Архитектурная акустика». Под ред. В. В. Фурдуева. Госстройиздат, 1961.
6. OUE Brand Akustik planering Stockholm, 1958.
7. Карл Ганус. Архитектурная акустика. Госстройиздат, 1963.
8. Быков В. Е. Архитектура открытых театров. Госстройиздат, 1954.
9. Борьба с шумом. Под ред. проф. Юдина Е. Я. Стройиздат, 1964.
10. Никольский В. Н., Заборов В. И. Звукоизоляция крупнопанельных зданий. Стройиздат, 1964.

ЛИТЕРАТУРА
к разделу «Строительная теплотехника»

Глава первая

1. Гребер Г., Эрк С. и Григуль У. Основы учения о теплотехнике. Изд-во иностранной лит-ры, 1958.
2. Кауфман Б. Н. Теплопроводность строительных материалов. Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1955.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1952.
4. Михеев В. А. «Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1949.
5. Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1954.
6. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. Гос. изд-во физико-математической лит-ры, М., 1962.
7. Шорин С. Н. Теплопередача. Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре. М.—Л. 1952.

Глава вторая

1. Власов О. Е. Основы строительной теплотехники. Изд-во Военно-инженерной академии рабоче-крестьянской Красной Армии, 1938.
2. Ивашкова В. В. Исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций зданий методом электро моделирования. Научное сообщение, вып. 1. Госстройиздат. М., 1961.
3. Исследования по строительной физике. Сб. статей. Госстройиздат, М., 1959.
4. Климов П. П. Теплозащитные качества крупноблочных стен со щелевидными пустотами. Изд-во НИИ Мосстроя, 1958.
5. Фокин К. Ф. Влияние металлических включений на температуры внутренней поверхности стен. Сборник ЦНИПС «Вопросы строительной физики в проектировании». Госстройиздат, 1941.
6. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания. Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1954.

7. Власов О. Е. Плоские тепловые волны. Известия теплотехнического ин-та, 1927, № 3/26.
8. Ильинский В. М. Проектирование ограждающих конструкций с учетом физико-климатических воздействий. Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1955.
9. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. Изд-во АН БССР, Минск, 1961.
10. Фокин К. Ф. Расчетные температуры наружного воздуха. Стандартиздат, 1946.
11. Шкловер А. М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. Госэнергоиздат, 1961.
12. Строительная климатология и геофизика. СНиП II-A.6-62.
13. Строительная теплотехника СНиП II-A.7-62.

Глава четвертая

1. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания. Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре, 1954.
2. Шкловер А. М., Васильев Б. Ф., Ушков Ф. В. Основы строительной теплотехники. Гос. изд-во по архитектуре и строительству, 1956.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Раздел первый

АРХИТЕКТУРНАЯ СВЕТОТЕХНИКА

Глава первая. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ	5
Глава вторая. ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ЗДАНИЙ	16
Глава третья. НОРМИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ	24
Глава четвертая. ИНСОЛЯЦИЯ ЗДАНИЙ	39
Глава пятая. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СВЕТА	48
Глава шестая. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	58
Глава седьмая. НОРМИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ	69
Глава восьмая. АРХИТЕКТУРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ГОРОДОВ	79
Глава девятая. СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	89

Раздел второй

АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

Введение	101
Глава первая. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ВЕЛИЧИНЫ, ЕДИНИЦЫ	102
Глава вторая. ОСНОВЫ АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ	106
Глава третья. АКУСТИКА ЗАЛОВ РАЗНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	120
Глава четвертая. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ	134
Глава пятая. АКУСТИКА ОТКРЫТЫХ ТЕАТРОВ	142
Глава шестая. ТЕХНИКА БОРЬБЫ С ШУМАМИ	148

Раздел третий

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Общая часть	173
Глава первая. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЕЛИЧИНЫ	174
Глава вторая. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	183
Глава третья. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ	203
Глава четвертая. ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	212
Литература	224

Гусев Николай Михайлович,
Климов Павел Петрович

**СТРОИТЕЛЬНАЯ
ФИЗИКА**

Тем. план 1964 г. № 8

* * *

Стройиздат
Москва, Третьяковский проезд, д. 1

* * *

Редактор издательства А. Н. Шеманова
Переплет художника А. С. Зубова
Художественная и техническая редакция
А. А. Головкиной
Корректор М. А. Шифрина

Сдано в набор 4/VII-1964 г.
Подписано к печати 22/XII-1964 г.
Т-17838 Бумага 84×108¹/₄ — 7,125 бум. л.
23,37 усл.-печ. л. (уч.-изд. 25,6 л.).
Тираж 14 000 экз. Изд. № 1-5880. Зак. № 656. Цена 1 руб.

Подольская типография Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР
по печати
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

VII-12411