

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА
СВЕТОТЕХНИКА И АКУСТИКА
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
для студентов специальности 1-69 01 01 «Архитектура»

Составители
Н. В. Ощепкова, М. Н. Войтик, О. И. Ковальчук

Под общей редакцией Н. В. Ощепковой

Новополоцк 2007

УДК 72.01:53(075.8)

ББК 38.113я73

А 87

Рекомендован к изданию методической комиссией
инженерно-строительного факультета

Рецензенты:

И. Г. МАЛКОВ, д-р архитектуры, проф., зав. каф. архитектуры промышленных
и гражданских сооружений Белорусского государственного университета транспорта;

В. А. ГРУЗДЕВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики УО «ПГУ»;

Г. И. ЗАХАРКИНА, канд. архитектуры, доцент, зав. каф. архитектуры УО «ПГУ»

Архитектурная физика : Светотехника и акустика : учеб.-метод. ком-
плекс для студ. спец. 1-69 01 01 «Архитектура» / сост. Н. В. Ощепкова,
А 87 М. Н. Войтик, О. И. Ковальчук; под общ. ред. Н. В. Ощепковой. – Новополоцк :
ПГУ, 2007. – 264 с.

ISBN 978-985-418-612-2.

Состоит из двух учебных модулей, изучаемых в пятом семестре: «Архитектурная светотехника» и «Архитектурная акустика». Объединение содержательного материала этих модулей в одну книгу объясняется единой расчетно-графической базой и общими физическими законами и обусловлено рабочей программой дисциплины на один семестр.

Основой создания УМК является концепция междисциплинарных связей. Разработана кафедрой физики УО «ПГУ» и кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции БНТУ. Продолжает серию «Интегративное образование», издаваемую в УО «ПГУ».

Предназначен для студентов, аспирантов и специалистов архитектурно-строительного профиля.

УДК 72.01:53(075.8)

ББК 38.113я73

ISBN 978-985-418-612-2

© Ощепкова Н. В., Войтик М. Н.,
Ковальчук О. И., составление, 2007
© Оформление. УО «ПГУ», 2007

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурная физика изучает теоретические основы и практические методы формирования архитектуры под воздействием солнечного и искусственного света, цвета, тепла, движения воздуха и звука, а также природу их восприятия человеком с оценкой социологических, гигиенических и экономических факторов. Эта наука является фундаментом, на котором базируются важнейшие положения основных строительных документов – СНиПов и ГОСТов, регламентирующих комфортность, плотность и экономичность застройки.

Традиционное образование, ориентированное на предметное изучение и блочное построение дисциплины, в условиях быстро развивающихся и высокотехнологических производств требует обновления содержания и разработки новых методов изложения инженерных дисциплин. Благодаря великим открытиям второй половины XX века в области естественных наук созданы условия для развития интегративных процессов, синтеза научных знаний, а также комплексного исследования объектов. Поэтому при изучении курса «Архитектурная физика» используются все компоненты научного познания и реализуются междисциплинарные связи различных форм и типов. Архитектурная физика находится на стыке таких наук, как астрономия, метеорология, климатология, тепло- и светотехника, и тесно связана с эстетикой, психологией, гигиеной, социологией и экономикой. В системе современных знаний постоянно увеличивается значение и роль физических знаний. С одной стороны, знание концептуальных проблем естествознания и законов физики является общенаучной теоретической базой, без которой невозможна деятельность современного специалиста. С другой стороны, владение основными физическими понятиями, законами и принципами способствует развитию интеллектуальных качеств студента, формированию его мировоззрения, привитию навыков творческой работы.

Дисциплина «Архитектурная физика» имеет своей *целью*:

- формирование представлений об актуальности проблемы экологизации современной архитектуры;
- изучение основных понятий и законов архитектурной климатологии, теплотехники архитектурной светологии и цветоведения, а также архитектурной акустики;
- подготовка специалиста, способного успешно реализовать современный уровень знаний при проектировании, строительстве и реконструкции зданий различного назначения;
- ознакомление с архитектурными и физическими методами модельного и натурального исследования, формирование умения выделить конкретное физическое содержание в прикладных задачах и проблемах.

Задачи изучения дисциплины «Архитектурная физика» следующие:

- создание теоретической подготовки, позволяющей будущим архитекторам ориентироваться в потоке научной и технической информации;
- овладение методами решения и оценки качества архитектурного проекта на всех стадиях его разработки;
- информация о новейших открытиях и перспективах их использования в профессиональной деятельности архитектора;

Для адаптации традиционного изложения курса «Архитектурная физика» к современным условиям в рабочую программу введен раздел «Формальная аналогия оптических и акустических явлений» что позволило избежать повторений и систематизировать учебный материал по темам «Колебания», «Волны», «Способы описания взаимодействия изучения с веществом».

Учебно-методический комплекс (УМК) разработан как система взаимосвязанных и взаимодополняющих средств и способов обучения на основе учебной программы и дидактических приемов высшей школы, необходимых и достаточных для реализации требований образовательного стандарта.

Предполагается, что УМК по дисциплине «Архитектурная физика» будет способствовать системному решению *задач*:

- осуществление необходимых технологий организации процесса обучения;
- организация системы контроля результатов обучения;
- обновление содержания и разработка новых методов изложения курса.

Для реализации педагогической системы в данный УМК заложены следующие *функции*:

- методическое обеспечение курса «Архитектурная физика» (разделы «Архитектурная светотехника», «Архитектурная акустика»);
- дидактические средства обучения, объединенные конечными целями обучения;
- реализация междисциплинарных связей различных форм и типов;
- предъявление знаний концептуальных проблем естествознания и фундаментальных законов физики с целью развития интеллектуальных качеств студента, формирование его мировоззрения, привитие навыков творческой работы.

Основой УМК является образовательный стандарт (РД РБ 02100.5.033-98) специальности Г.11.15.00 «Архитектурная физика» (№ ТД – J.008/тип) и рабочая программа дисциплины «Архитектурная физика» для специальности 1-69 01 01 «Архитектура».

В качестве базового учебника был выбран новейший учебник по архитектурной физике, подготовленный коллективом МАрХИ под редакцией проф. Н.В. Оболенского [1].

Для *студентов* УМК предлагает:

- рекомендации по выбору учебников и методических пособий, необходимых для достижения целей обучения при минимизированном бюджете времени;
- рекомендации по самоорганизации и содержанию самостоятельной работы, как наиболее эффективной формы обучения;
- методические материалы для различных форм учебного процесса;
- критерии оценки знаний по 10-бальной системе;
- положение рейтинговой системы текущего и итогового контроля знаний.

Для *преподавателей* УМК может оказаться полезным при адаптации курса «Архитектурная физика» к учебным программам других специальных дисциплин в связи с развитием интегративных процессов и синтеза научных знаний. УМК может избавить от рутинной работы по подготовке индивидуальных заданий и материалов контроля, а так же позволит унифицировать оценку знаний, умений и навыков.

УМК построен по модульно-блочному принципу. Учебный модуль представляет собой единицу курса, основанную на рассмотрении физической модели или на совокупности физических явлений, относимых к единому классу. В свою очередь учебный модуль состоит из учебных блоков, формируемых на тех же принципах, но с большей детализацией. Как и УМК, каждый модуль и блок представляют собой завершённый элемент в структуре учебного курса. В каждом из них указаны цели обучения, приведено технологическое и методическое обеспечение, указаны формы текущего и итогового контроля с элементами самоконтроля.

В данном УМК рассматриваются электромагнитные волны и волновые процессы в упругих средах. Объединение механических и световых волн в одном УМК обусловлено возможностью единого подхода их описания, несмотря на различие их физической сути. Это позволяет значительно сократить бюджет времени для изучения волновых процессов.

Настоящее издание охватывает два модуля: «Архитектурную светотехнику» и «Архитектурную акустику». Каждый из них содержит учебную и методическую программы, перечень рекомендуемой литературы с указанием рекомендуемых разделов; краткое содержание теоретического материала, примеры решения проектировочных и расчетно-графических задач; методическое руководство к выполнению курсовой работы, составленное по разделам учебника [1], а так же варианты исходных данных для расчетной части курсовой работы.

В рамках УМК издание дополнено методическими указаниями к выполнению и оформлению курсовой работы по дисциплине «Архитектурная физика» и методическими указаниями и расчетными заданиями к курсовой работе по разделу «Архитектурная акустика».

МОДУЛЬ 1. АРХИТЕКТУРНАЯ СВЕТОТЕХНИКА

В современной архитектуре выразительные решения достигаются профессиональным сочетанием естественного и искусственного света, применением новейших светотехнических и строительных материалов и конструкций, разработкой оригинальных оптических систем, новых архитектурных форм и, в конечном итоге, рождением характерных образов.

В данном учебном модуле рассматриваются основные законы, закономерности и принципы архитектурной светологии – науки о цветоцветовой среде как основе восприятия архитектуры.

Модуль содержит три учебных блока, связанных единством метода изложения.

В первом блоке рассматриваются физические основы фотометрии. Приводятся характеристики глаза как зрительного анализатора. Показана органическая взаимосвязь света и архитектурной формы [2 – 5].

Во втором блоке излагаются основы архитектурной светотехники – науки о проектировании, расчетах и нормировании световой среды в городах и отдельных зданиях разного назначения [1, 6].

В третьем блоке рассматриваются особенности светового климата, вопросы о единстве и взаимодействии утилитарных, эстетических и гигиенических функций света. В этом – же блоке излагаются теоретические основы и практика проектирования световой архитектуры с учетом взаимодействия света с пространством, формой, пластикой и цветом [1, 7].

Для приобретения запланированных в модуле навыков в учебных блоках даны примеры решения типовых расчетно-графических задач.

Учебно-методическая структура модуля

Модуль 1. «Архитектурная светотехника»		
Учебный блок «Световая среда»	Учебный блок «Инсоляция и светозащита»	Учебный блок «Световой климат»
- Светоцветовая среда и ее характеристики	- Инсоляция. Оптическая теория естественного освещения	- Световой климат.
- Цель и задачи архитектурной светотехники	- Системы естественного освещения помещения	- Нормирование и проектирование естественного освещения.
- Основы фотометрии и светотехники	- Методы расчета естественного освещения помещения	- Искусственное освещение. Осветительные приборы нового поколения.
- Шкала электромагнитных волн	- Солнцезащита и методы светорегулирования	- Комбинированное и совмещенное освещение.

Методическая программа модуля

Тема занятия	Тип занятия	Вид занятия	Часы
1. Световая среда – основа восприятия архитектора. Свет, зрение, архитектура	формирование новых знаний	лекция лабор. работа	1
2. Основные величины, единицы и законы фотометрии. Методы фотометрии.	формирование новых знаний	лекция лабор. работа	1
3. Цель и задачи архитектурной светотехники. Солнечная радиация. Санитарно-гигиенические требования	формирование новых знаний	лекция	1
4. Анализ продолжительности инсоляции территории в зависимости от ориентации зданий	формирование новых знаний	лекция	1
5. Оценка инсоляции помещений зданий на фасадах различной ориентации	формирование новых знаний	лекция	1
6. Выбор формы и размеров окна. Солнцезащитные системы.	формирование новых знаний	лекция	1
7. Классификация солнцезащитных и светорегулирующих средств.	формирование новых знаний	лекция	1
8. Расчет солнцезащитных устройств.	углубление и систематизация навыков	лекция лабор. работа	1
9. Метод проекции Калотты.	формирование новых знаний и углубление знаний	лекция	1
10. Световой климат. КЕО.	формирование новых знаний	лекция	1
11. Проектирование естественного освещения. Метод А.М.Данилюка.	формирование новых знаний	лекция лабор. работа	1
12. Светотехнические характеристики бокового освещения.	формирование новых знаний	лекция	1
13. Особенности проектирования системы естественного освещения помещений промышленных и общественных зданий.	формирование новых знаний	лекция	1
14. Моделирование солнцезащитных устройств в условиях Беларуси.	занятие – проверка результатов обучения	Итоговое занятие	1

УЧЕБНЫЙ БЛОК «СВЕТОВАЯ СРЕДА»

ВВЕДЕНИЕ

В учебном блоке «Световая среда» рассматриваются физические основы светотехники и некоторые физиологические аспекты зрения. Термины и определения светотехнических величин приведены в глоссарии.

В современной фотометрии применяются различные методы измерения характеристик электромагнитного излучения и световых величин, в том числе измерения интенсивности излучений и потоков заряженных частиц. При этом используются два вида величин: энергетические величины, которые характеризуют энергетические параметры оптического излучения по его действию на технические приемники излучения (фотоэлементы и т.д.); визуальные величины, которые характеризуют физиологические действия света и оцениваются по воздействию на глаз (исходят из так называемой средней чувствительности глаза) либо по действию на селективные приемники излучения с заданной спектральной чувствительностью.

Для успешного изучения учебного материала данного блока студент должен в рамках программы средней школы:

- *иметь представление:*
 - об электромагнитной природе света;
 - об основных фотометрических единицах;
- обладать навыками:
 - фотометрических измерений;
 - математической обработки результатов измерений.

Учебная программа блока

Содержание блока	Форма подготовки	Литература
1. Светоцветовая среда и ее характеристики. Цель и задачи архитектурной светотехники.	лекция самостоятельная	[1, 2, 4 – 6, 8]
2. Основы фотометрии и светотехники. Шкала электромагнитных волн.	лекция самостоятельная	[1, 2, 5]

Цели обучения

Студент должен знать	Студент должен уметь
– критерии оценки световой функции света	– определять спектральный состав искусственных источников света
– основные фотометрические единицы	– рассчитывать значение фотометрических величин для ламп накаливания и источников света нового накопления
– распределение световых потоков при отражении, поглощении и пропускании	– пользоваться люксметром и монохроматорами

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1. Свет, зрение и архитектура [1, §3.1]

Свет – излучение оптической области спектра, которое вызывает биологические, главным образом зрительные реакции.

Цвет – особенность зрительного восприятия, позволяющая наблюдателю распознавать цветовые стимулы (излучения), различающиеся по спектральному составу.

Световая среда – совокупность ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных излучений, генерируемых источниками естественного и искусственного света; это важнейшая составляющая жизненной среды живых организмов и растений, определяемая световыми потоками источников света, трансформируемыми в результате взаимодействия с окружающей предметной средой, которая воспринимается по распределению света и цвета в пространстве.

Рассматривание цветных поверхностей при изменении уровня яркости в пределах, соответствующих области дневного зрения, сопровождается изменением цветового ощущения, которое особенно заметно при солнечном освещении поверхностей (фасадов, деталей). Это явление архитектуры определяют словами «солнечный свет съедает цвет».

Зрение чрезвычайно сложный процесс. Химические и электрические явления в сетчатке глаза, передача нервных импульсов по зрительному нерву, деятельность клеток в зрительных зонах мозга – все это составные части процесса, называемого зрением.

Человеческому глазу присущи дефекты и ограничения, свойственные всякой оптической системе. Однако широкие пределы чувствительности глаза, его способность приспосабливаться к различным условиям распределения яркости в поле зрения позволяют оценивать глаз как наиболее совершенный орган чувств. Способность глаза реагировать как на весьма слабые, так и на интенсивные раздражители объясняется наличием в сетчатке глаза двоякого рода элементов – колбочек и палочек, воспринимающих световые раздражения (табл. 1).

Глаз, подобно оптической системе, дает наилучшие изображения для точек, которые расположены близко к оптической оси.

Центральное зрение отличается от периферического тем, что оно позволяет судить о спектральном составе света. Это свойство глаза обогащает возможности архитектора оценивать пространство распределения света с помощью не только количественных, но и качественных характеристик, определяемых спектральным составом света.

Таблица 1

Характеристики зрительного анализатора

Характеристика глаза	Дневное (центральное) зрение	Сумеречное зрение	Ночное (периферическое) зрение
Светочувствительные элементы	Колбочки	Колбочки + палочки	Палочки
Способность реагировать на яркость	Высокие яркости, $L > 10$ кд/м ²	Малые яркости, $0,01 < L < 10$ кд/м ²	Очень малые яркости, $L < 0,01$ кд/м ²
Спектральная чувствительность к излучениям	Максимальная к желто-зеленому [$\lambda = 555$ нм, $V(\lambda) = 1,0$] с уменьшением к красному [$\lambda = 710$ нм, $V(\lambda) = 0,0021$] и фиолетовому [$V(\lambda) = 0,0012$ при $\lambda = 410$ нм]	Максимальная к голубовато-зеленому ($\lambda = 520$ нм) с уменьшением в длинноволновой и коротковолновой частях спектра	Максимальная к зеленовато-голубому [$\lambda = 510$ нм, $V(\lambda) = 1,0$] с уменьшением к красно-оранжевому [$V(\lambda) = 0,00737$ при $\lambda = 620$ нм] и фиолетовому [$V(\lambda) = 0,0022$ при $\lambda = 390$ нм]
Способность к восприятию цветов	Хорошее различие цветов	Голубые и зеленые светлеют, красные темнеют	Цвета не различаются, черно-белое видение
Способность к различению деталей	Высокая разрешающая способность	Малая разрешающая способность	Отсутствует

Периферическое зрение с более высокой (в тысячи раз) чувствительностью к свету обладает меньшей четкостью видимости. Максимум чувствительности при сумеречном зрении сдвинут из желто-зеленой части спектра (при центральном зрении) в сине-зеленую при почти полной потере чувствительности палочек в красной части спектра. Такое изменение чувствительности глаза к излучениям различных участков спектра при переходе от больших яркостей к малым известно под названием эффекта Пуркинье.

Эффект Пуркинье имеет большое практическое значение при выборе уровня освещенности на улицах городов и в зданиях, а также при отделке зданий и интерьеров, освещаемых источниками с различной цветностью излучения.

Субъективная (воспринимаемая глазом) яркость зависит не только от действительной яркости и яркостных контрастов, но и от условий адаптации глаза.

Различают темновую адаптацию, наблюдаемую при переходе от большой яркости к малой, и световую – при обратном переходе.

Египетские мастера Нового царства ввели в архитектуру движение, открыли красоту световых контрастов и полутонов. Прием световой адаптации широко использовался в архитектуре барокко. Отчетливо выраженная тенденция к яркостным контрастам особенно характерна для этого стиля в решении интерьера. Используя в соборах и церквях контраст ярких поверхностей центральных нефов и алтарей с сумраком боковых нефов, зодчие барокко добились впечатления движения и беспредельности пространства.

Глаз не только реагирует на высокие яркости и сопутствующие им контрасты, но и «охотится» за ними, выделяя наиболее яркие и контрастные участки поля зрения. Этим свойство глаза следует учитывать в архитектурной композиции. Световая композиция русского храма как бы «втягивает» посетителя в него, ведет его к центру и заставляет затем поднять голову кверху – к светоносному куполу, внутренняя поверхность которого, наиболее яркая, являет собой и живописную кульминацию интерьера.

Появление, изменение и исчезновение раздражителя – главный источник зрительного ощущения. Установлено, что к постоянно действующим раздражителям глаз привыкает настолько, что их не замечает. Это испытываешь, например, идя вдоль улицы, освещенной типовыми фонарями.

Когда в окружающем пространстве отсутствуют архитектурные доминанты, а также резко контрастирующие с фоном или друг с другом объекты, зрительная ориентация человека затрудняется.

Различают две задачи, связанные с учетом оптических свойств глаза человека. Первая задача – не допустить всякого рода оптические обманы, которые искажают художественный образ, масштаб, пропорции и архитектуру интерьеров зданий и сооружений; вторая – использовать оптические иллюзии для архитектурных целей (увеличение или уменьшение глубины пространства, использование живописных средств светочвета для изменения пластической отделки фасадов, интерьеров, устранение геометрива в архитектуре и др.).

Опыт показывает, что степень оптических искажений и иллюзий во многом предопределяется условиями освещения здания или интерьера и яркостью поля адаптации и позиции наблюдателя.

Задачи освещения не могут быть решены без творческого учета особенностей преобладающего в данной местности природного освещения, которое наиболее привычно и комфортно для человека.

В современной световой архитектуре зданий и интерьеров часто встречаются оптические искажения, возникающие вследствие иррадиации.

Особенность вечернего освещения – его высокая контрастность, которая возникает из-за отсутствия рассеянного света неба. Так, например, даже

днем при контрастном солнечном освещении искажается восприятие колонны. На основании сопоставления кривых видимости и освещенности цилиндра было доказано, что возникают зрительные эффекты уплощения и излома цилиндрической колонны. Подобные оптические искажения присущи вечернему освещению, обладающему, как правило, резкими светотеневыми контрастами. Отсутствие полутеней и рефлексов приводит к тому, что цилиндрическая поверхность, освещенная сбоку, воспринимается ломаной; освещенная же лучами, направление которых совпадает с направлением зрения наблюдателя, такая поверхность воспринимается плоской.

Чтобы приблизить светотеневой контраст вечернего освещения фасада к привычным контрастам, характерным для естественного освещения, следует световые приборы разделить на две группы: первая из них должна быть подобна солнцу, заливающему детали им светом; вторая выполняет роль рассеянного света неба, смягчающего контраст светотени. Первую группу приборов располагают выше освещаемых зданий; вторую группу можно располагать на земле. При обозрении предмета различают две стадии: первую называют видимостью объекта; эта стадия характеризуется 75 % вероятностью увидеть предмет без возможности различения его формы; вторая стадия – различимость – характеризуется способностью глаза видеть форму предмета.

Первое, что мы замечаем, – яркость, цвет и светотень, которые, по существу, определяют первое впечатление и позволяют нам оценивать окружающую обстановку, здание и его детали. Рассматривая одно и то же здание на различных естественных фонах (небо, деревья) и в разную погоду, мы убеждаемся в том, что восприятие его резко изменяется при переходе от ясного солнечного дня к пасмурному, исчезают определяющие форму контрасты светотени, искажаются глубинность пейзажа и объемность здания, пропадает пластика.

Глаз – не только оптический прибор, позволяющий видеть предметы, но и анализатор, дающий возможность получать впечатления, возбуждающие мысли и эмоции, на основании которых рождаются суждения и оценки. Как оптический прибор глаз человека обладает рядом особенностей. Так, зона бинокулярного видения в вертикальной плоскости приблизительно равна 120° , в горизонтальной – 180° , зона монокулярного видения по горизонтали составляет 40° (справа и слева).

Порог видимости наблюдаемого предмета оценивают минимальной разностью яркостей фона и предмета, которую называют *разностным порогом ΔL* . В отличие от разностного порога относительное значение пороговой яркости, определяющее порог различимости, называют *пороговым контрастом предмета с фоном*. Величину, обратную этому порогу, называют *контрастной чувствительностью глаза*.

Согласно закону, открытому Вебером и уточненному Фехнером, субъективное восприятие любого увеличения яркости определяется числом разностных порогов в оцениваемом приросте яркости. Закон говорит о том, что едва ощутимый прирост зрительного восприятия ΔA есть функция разностного порога [$\Delta A = f(\Delta L/L)$], а субъективное восприятие увеличения яркости какой-либо поверхности оценивается числом разностных порогов, укладываемым в рассматриваемом приросте яркости.

Яркость, субъективно воспринимаемая глазом, то есть количественное выражение уровня зрительного ощущения, называют *светлотой*.

Светлота пропорциональна яркости, то есть по Веберу – Фехнеру:

$$B = c \lg L,$$

где B – светлота;

L – фотометрическая величина яркости;

c – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц.

Отношение минимальной разности яркостей (определяющей порог различения предмета) к яркости фона и называют *пороговым контрастом*. Значение порогового контраста, так же как и разностного порога, зависит от яркости поля адаптации, углового размера и формы предмета и времени наблюдения.

При высоких освещенностях глаз способен различать яркости, отличающиеся одна от другой на 1 – 2 % (например, глаз может различать яркости, равные 33 и 35 кд/м²), а при низких контрастная чувствительность резко уменьшается (например, в темную звездную ночь для различения яркости двух смежных поверхностей необходимо, чтобы перепад между ними был не менее 55 %; яркости поверхностей должны отличаться более чем в 1,5 раза одна от другой).

При малых яркостях закон Вебера – Фехнера не соблюдается.

При заданном контрасте объекта с фоном порог различимости этого объекта определяется минимальным угловым размером (разрешающим углом). Значение, обратное разрешающему углу, называют *остротой различения* (в медицине – остротой зрения).

Условно считают разрешающую способность глаза нормальной, если он видит предмет с угловым размером, равным 1 мин; это соответствует отношению абсолютного размера к расстоянию до глаз 1 : 3450.

Архитектору при решении пространственных задач важно знать порог глубины, характеризуемый минимальной разностью параллактических углов между зданиями, которые обеспечивают заданную вероятность различения их при различной удаленности от наблюдателя.

Значение глубины выражается в угловых секундах по формуле:

$$\delta_{\text{пор}} = b \Delta l / l,$$

где b – расстояние между центрами зрачков глаз наблюдателя (основание стереоскопического зрения);

l – расстояние от ближайшего здания до наблюдателя;

Δl – максимальное расстояние между двумя зданиями, видимыми как различно удаленные от наблюдателя.

2. Основные величины, единицы и законы [1, §3.2]

Фотометрией называется раздел оптики, в котором рассматриваются измерения энергии, которую переносят электромагнитные световые волны. В архитектурной светологии рассматриваются действия на глаз и другие оптические приборы электромагнитных волн видимого диапазона. Для характеристики этого действия вводятся следующие величины, характеризующие свет с точки зрения переносимой им энергии: световой поток, сила света, освещенность.

Световым потоком Φ называется мощность видимого излучения, которая оценивается по действию этого излучения на нормальный глаз. Иными словами, Φ есть энергия световых электромагнитных волн, переносимая в единицу времени через некоторую площадь поверхности и оцениваемая по зрительному ощущению. Для монохроматического света, соответствующего максимуму спектральной чувствительности глаза ($\lambda = 5500 \text{ \AA}$), световой поток равен 683 люменам (лм) если мощность излучения равна одному ватту.

Точечным источником света называется источник, линейные размеры которого значительно меньше, чем расстояние от него до точки наблюдения. Такой источник излучает сферические электромагнитные волны.

Силой света (силой излучения) I точечного источника называется величина, численно равная световому потоку, который этот источник создает в единичном телесном угле.

Если точечный источник равномерно излучает свет по всем направлениям, то:

$$I = \Phi_{\text{полн}} / 4\pi,$$

где $\Phi_{\text{полн}}$ есть *полный световой поток* источника света, то есть мощность излучения, создаваемая источником по всем направлениям, – энергия света, которая за единицу времени переносится сквозь произвольную замкнутую поверхность, охватывающую источник света (рис. 1).

Освещенностью E некоторой поверхности называется отношение светового потока $\Delta\Phi$, которая падает на площадь ΔS поверхности, к величине этой площади:

$$E = \Delta\Phi / \Delta S.$$

Освещенность E в каждой точке экрана, на который падает свет, пропорциональна интенсивности электромагнитной световой волны в этой точке.

Освещенность, которую создает точечный источник с силой света I на поверхности, удаленной на расстояние r от источника, описывается *законом освещенности от точечного источника*:

$$E = I \cos i / r^2,$$

где i – угол падения лучистого потока, отсчитанный от нормали к поверхности.

Оптическая часть электромагнитного спектра лучистой энергии включает в себя области ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения. Шкалу электромагнитных волн в приложении студенту предлагается изучить самостоятельно.

Ультрафиолетовым является излучение, длины волн λ монохроматических составляющих которого меньше длин волн видимого излучения и больше 1 нм. По данным Международной комиссии по освещению (МКО), различают следующие области ультрафиолетового излучения: УФ-А с длинами волн 315 – 400 нм; УФ-В с длинами волн 280 – 315 нм; УФ-С с длинами волн 100 – 280 нм.

Видимое излучение (свет) непосредственно вызывает зрительные ощущения. Нижняя граница спектральной области видимого излучения лежит между 380 и 400 нм, верхняя – между 760 и 780 нм.

Инфракрасным называют излучение, длины волн монохроматических составляющих, которого больше длин волн видимого излучения и меньше 1 мм. По данным МКО, различают следующие области инфракрасного излучения: ИК-А с длинами волн 780 – 1400 нм; ИК-В с длинами волн 1,4 – 3 мкм; ИК-С с длинами волн 3 мкм – 1 мм.

Различают монохроматическое и сложное видимое излучение.

Монохроматическое излучение характеризуется очень узкой областью частоты (или длин волн), которая может быть определена одним значением частоты (или длины волны). Сложное излучение характеризуется совокупностью монохроматических излучений разных частот. Пример сложного излучения – дневной свет.

Под спектром излучения понимают распределение в пространстве сложного излучения в результате его разложения на монохроматические составляющие.

Действуя на глаз, излучения, имеющие разную длину волны, вызывают ощущение того или иного цвета. Приблизженные границы цветных полос видимого излучения студенты определяют экспериментально в лабораторной работе «Изучение дисперсного спектра на двойном монохроматоре».

Для представления о распределении светового потока, излучаемого источником в пространстве, пользуются кривыми распределения силы света (рис. 2). Эти кривые строятся обычно в полярных координатах следующим образом: сила света в разных направлениях откладывается в принятом масштабе на радиусах-векторах, проведенных из центра. Концы векторов, соответствующих значениям силы света в разных направлениях, соединяют и таким образом получают замкнутую поверхность; часть пространства, ограниченная этой поверхностью, называется *фотометрическим телом силы света*.

Для большинства источников света и осветительных приборов фотометрическое тело симметрично относительно некоторой оси. Такие источники света и осветительные приборы называют *симметричными*. Кривые силы света в плоскостях, проходящих через ось симметрии, называют *продольными кривыми силы света*. Для симметричных источников света и осветительных приборов обычно строят половину продольной кривой силы света (от 0 до 180°). Классификация светильников по кривым силы света приведена в лабораторной работе «Измерение силы света и светового потока электрических источников света».

При оценке качества световой среды решающее значение имеет яркость свечения источника света и освещаемых им поверхностей. Яркость – световая величина, которая непосредственно воспринимается глазом; она представляет собой поверхностную плотность силы света в заданном направлении, которая определяется отношением силы света к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению.

Различают два частных случая определения яркости L :

1) яркость в точке M поверхности источника в направлении светового луча, определяется по формуле:

$$L = I / A \cos \theta,$$

где I – сила света в направлении I ;

A – элемент светящей поверхности, содержащей точку M ;

$A \cos \theta$ – сила света, приходящаяся на единицу площади проекции;

2) яркость в точке M поверхности приемника (например, глаза или фотоэлемента) в направлении I представляет собой отношение освещенности E , создаваемой в этой точке приемника в плоскости, перпендикулярной направлению I , к телесному углу Ω , в котором заключен световой поток, создающий эту освещенность (нормальная освещенность, приходящаяся на единицу телесного угла) (рис. 1):

$$L = E / \Omega.$$

Единица яркости – кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$).

В общем случае яркость светящей поверхности различна в разных направлениях, поэтому яркость, подобно силе света, характеризуется значением и направлением.

Поверхности, обладающие одинаковой яркостью по всем направлениям, называются равнорядкими излучателями. К ним относятся, например, оштукатуренные и матовоокрашенные поверхности потолка и стен, осветительные приборы в виде шара из молочного стекла и др.

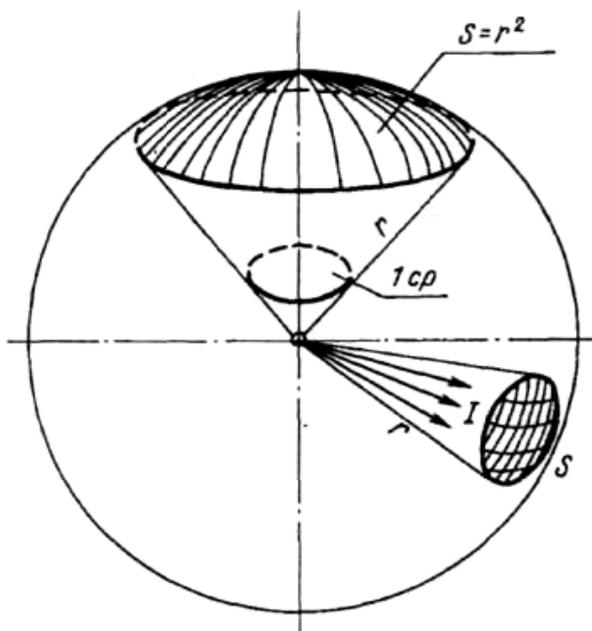


Рис. 1. Схема к определению телесного угла света

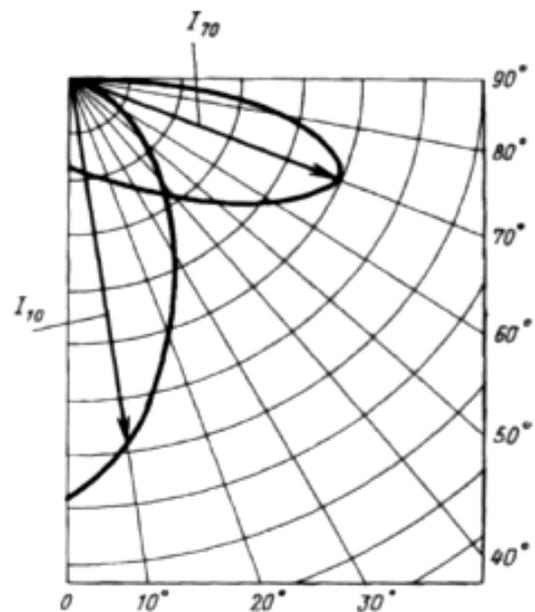


Рис. 2. Продольные кривые силы света источников

Для плоской равнорядкой во всех направлениях поверхности (при $I_\theta = I \cos\theta$) справедливо соотношение:

$$L = \frac{I_\theta}{A \cos\theta} = I / A = \text{const.}$$

Сравним значения яркости для некоторых светящихся элементов.

Луна при полнолунии	2500 кд/м ² ;
Небо в зените в полдень (при различной облачности)	2500 – 8000 кд/м ² ;
Солнце в зените	1,5 · 10 ⁹ кд/м ² ;
Пламя стеариновой свечи	5000 – 7500 кд/м ² ;
Люминесцентные лампы	5000 – 10000 кд/м ² ;
Лампы накаливания (100 Вт)	(0,5 – 15) · 10 ⁶ кд/м ² ;
Ксеноновые лампы	1,5 · 10 ⁶ – 1,8 · 10 ⁹ кд/м ² .

Между яркостью и освещенностью поверхности, равномерно рассеивающей падающий на нее свет, существует важная зависимость:

$$L = E\rho/\pi,$$

где ρ – коэффициент отражения.

При световом потоке, проходящем через рассеивающее стекло с коэффициентом пропускания τ , яркость стекла определяется по формуле:

$$L = E\tau/\pi.$$

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

а) рассеянное (диффузное) отражение от оштукатуренной поверхности потолка и стен или пропускание света молочным стеклом (рис. 3);

б) направленное отражение или пропускание, например, при отражении света от зеркал и полированных поверхностей металла или пропускание света через оконное стекло (рис. 4);

в) направленно-рассеянное отражение, например от поверхностей, окрашенных масляной краской, или пропускание света матированным стеклом.

Более детально распределение световых потоков описано в глоссарии «Архитектурная светотехника».

При направленном и направленно-рассеянном отражении света характеристикой распределения яркости в различных направлениях служит коэффициент яркости, определяемый из соотношения:

$$r_\alpha = L_\alpha / L_o,$$

где L_α – яркость поверхности под углом к перпендикуляру на эту поверхность;

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

В общем случае для поверхностей, диффузно отражающих свет, коэффициент яркости равен коэффициенту отражения:

$$r_{\alpha} = L_{\alpha} \pi / E$$

или

$$L_{\alpha} = r_{\alpha} E / \pi.$$

Освещенность поверхности представляет собой плотность светового потока, то есть отношение светового потока Φ , падающего на элемент поверхности, содержащей данную точку, к площади этого элемента A :

$$E = \Phi / A.$$

Рис. 3. Схема, характеризующая диффузное отражение (а) и диффузное пропускание (б) света

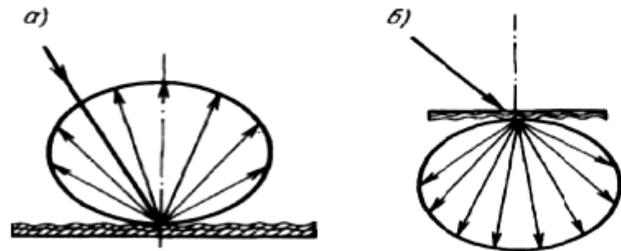
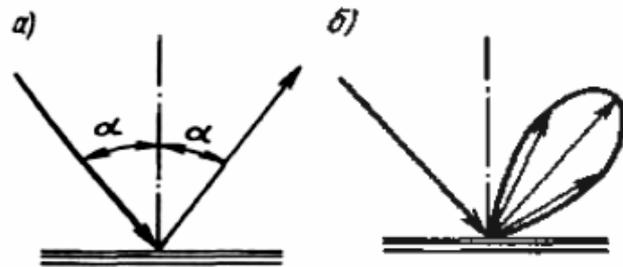


Рис. 4. Виды отражения света зеркальными (а) и блестящими (б) поверхностями



Единица освещенности – люкс (лк); 1 лк равен освещенности, создаваемой световым потоком в 1 лм, равномерно распределенным на поверхности площадью 1 м.

Об освещенности, равной 1 лк, можно судить по следующим примерам: освещенность горизонтальной поверхности при лунном освещении (полнолуние) составляет 0,2 лк; минимальная освещенность на проезжей части улиц (посередине между фонарями) равна 1 – 0,5 лк.

Освещенность, создаваемая точечным излучателем (рис. 5) с заданным распределением силы света, определяется по формуле:

$$E_M = I \cos \alpha / d^2,$$

где I – сила света, кд;

d – расстояние от источника света до точки M , в которой определяется освещенность.

Если излучателем является светящая линия, например, ряд люминесцентных ламп, то освещенность на расстоянии d пропорциональна d^{-1} , а не d^{-2} , как в случае точечного излучателя.

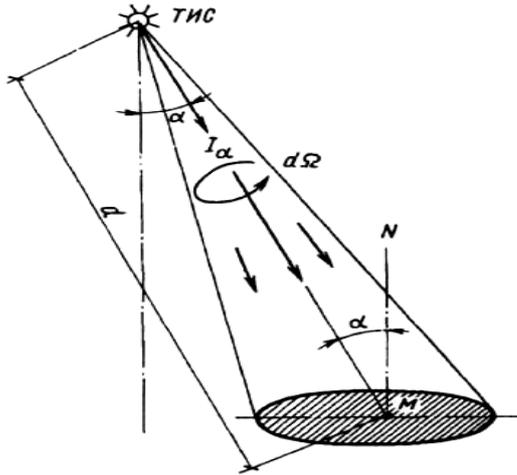


Рис. 5. Схема к определению освещенности от точечного источника света

Студенту предлагается самостоятельно изучить шкалу электромагнитных волн (табл. 2). Следует обратить внимание на параметры видимой области и сравнить их с значениями, полученными в лабораторной работе «Изучение дисперсионного спектра на двойном монохроматоре».

Таблица 2

Шкала электромагнитных излучений

Характеристика	Тип излучения		
	γ-излучение	рентгеновское излучение	ультрафиолетовое излучение
1	2	3	4
Длина волны λ , м	10^{12}	$10^{11} - 10^{10}$	$10^9 - 10^8$
Волновое число, $1/\lambda$, см^{-1}	10^{10}	$10^9 - 10^8$	$10^7 - 10^6$
Частота $\nu = c/\lambda$, Гц $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света	10^{21}	$10^{20} - 10^{19}$	$10^{18} - 10^{17}$
Энергия кванта, $E = h\nu$, эВ, h – постоянная Планка, $h = 6,026 \cdot 10^{-34}$ Джс	10^7	$10^6 - 10^5$	$10^4 \cdot 10^3 \cdot 10^2$
Характеристическая температура, $^\circ\text{K}$ $\theta = h\nu / K$, $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К, постоянная Больцмана	10^{10}	$10^9 - 10^8$	$10^7 \cdot 10^6$
Источник излучения	Ядерная реакция превращения элементарных частиц	Переходы внутренних электронов. К-захват. Атомные процессы при взаимодействии элементарных частиц.	Переходы электронов на K, L уровнях. К-захват. Процессы при взаимодействии элементарных частиц. Переходы в молекулах.
Способ получения излучения	Радиоактивный распад, космические процессы, ускорители	Рентген. трубка. Космические процессы, ускорители плазмы.	Дуговой и искровой разряды. Раскаленные тела.
Метод регистрации	Гейгеровские и сцинтилляционные счетчики, ионизационные камеры, камера Вильсона, пузырьковая, фотографический метод.	Глаз, фотоэлементы и фотоумножители, фотографический метод	

Окончание табл. 2

5	6	7	8	9
видимая область	инфракрасное излучение	микроволновое излучение	радиочастотное излучение	низкочастотное излучение
$(7,4-4,0) \cdot 10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^{-4} - 10^{-3} - 10^{-2}$	$10^{-1} - 10$	$10^2 - 10^1$
$(1,35-2,5) \cdot 10^5$	$10^4 - 10^3$	$10^2 - 1$	0,1 – 0,001	0,0001 – 10^{-9}
$(4-7,5) \cdot 10^{14}$	$10^{15} - 10^{14}$	$10^{13} - 10^{12} - 10^{11}$	$10^{10} - 10^8$	$10^7 - 10^2$
1,7-3,1	$10^{-4} - 10^{-2}$	10^{-5}	$10^{-4} - 10^{-6}$	10^{-8} и менее
$(2,0-3,6) 10^4$	10^3	$10^2 - 10^1$	10^{-1}	10^{-2} и менее
Переходы валентных электронов в атомах и молекулах	Колебание молекул и атомов (в близкой ИК). Вращение молекул (в далекой ИК).	Вращение молекул.	Переворот спина электрона.	Переворот спина ядра.
	Раскаленные тела.	Горячие нити.	Магнетроны, клистроны, трубки с бегущей волной.	Эл. контуры, генераторы переменного тока.
	Фотоэлементы. Металлические и полупроводниковые болометры. Фоторезисторы.	Болометры, термомостолбики, СВЧ-диоды.	Радио- и телекоммуникационные устройства.	Радиотехнические устройства.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛЕКЦИОННЫМ ЗАНЯТИЯМ

Вопросы лекции	Форма обучения	Лит.	Вопросы для самоконтроля
1. Светоцветовая среда и ее характеристики	Лекция самостоятельное изучение	[1 §3.1]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дайте определение световой среды. 2. Перечислите функции света. 3. Что такое цветовая среда? Приведите примеры различных приемов освещения. 4. Что такое яркость в точке источника света? 5. Что такое яркость в точке приемника света? Приведите примеры яркости некоторых освещенных и самосветящихся поверхностей.
2. Основы фотометрии и светотехники	Лекция Лабораторная работа	[1 §3.2]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Что называется лучистой энергией? В каких единицах она измеряется? 2. Что называется лучистым потоком? 3. Перечислите составляющие оптического спектра. 4. Какими способами изучается спектральный состав излучения? 5. Дайте определение силы света и определение фотометрическому телу силы света. 6. Как связаны яркость и сила света равнояркой поверхности? 7. Приведите примеры диффузного, направленного и направленно – рассеянного отражения.

УЧЕБНЫЙ БЛОК «ИНСОЛЯЦИЯ И СВЕТОЗАЩИТА»

ВВЕДЕНИЕ

Учебный блок «Инсоляция и светозащита» является одним из важнейших в курсе архитектурной физики. Это обусловлено, во-первых, неразрывностью связи человека с окружающей средой. Во-вторых, этот раздел является основой при изучении других дисциплин. Поэтому материал этого блока, по сравнению с первым блоком, предлагается на лекции и не выносится на самостоятельное изучение. Закрепить теоретический материал предлагается в курсовой работе. В рамках программы средней школы материал не изучался.

Вместе с тем для изучения этого блока требуется наличие у студентов необходимых знаний и умений. Студенты:

- должны знать:
 - законы освещенности;
 - понятие телесного угла и единицу его измерения;
 - законы геометрической оптики, понятие светового луча;
- иметь представление:
 - о небесном своде и горизонте;
 - о солнечной радиации и ее зависимости географической от широты, времени года и прозрачности воздуха;
 - о спектральном составе солнечного излучения.

Учебная программа блока

Содержание блока	Форма подготовки	Литература
1. Оптическая теория естественного светового поля.	лекция, самост.	[1, 8]
2. Системы естественного освещения помещений.	лекция	[1, 9, 10]
3. Методы расчета естественного освещ. помещения.	лекция, самост.	[1]
4. Солнцезащита и светорегулирование в городской застройке и помещении.	лекция	[1, 6, 11]
5. Моделирование инсоляции. Новейшие технологии светорегулирования.	лекция	[1, 6]
«Естественное освещения помещения»	Курсовая работа	

Цели обучения

студент должен знать	студент должен уметь
<ul style="list-style-type: none">– закон проекции телесного угла;– закон светотехнического подобия;– способ светотехнического моделирования– принцип нормирования КЕО	<ul style="list-style-type: none">– решать комплексные задачи;– рассчитывать освещенность поверхностей в определенное время года на заданной широте;– определять КЕО и времени использования естественного света для проектируемого помещения;– определять требуемую площадь и расположение светопроемов;– пользоваться нормированными документами.

В лабораторный практикум данного учебного блока включены работы «Исследование условий инсоляции городской застройки и зданий» и «Экспериментальное определение и проверочный расчет коэффициента естественной освещенности» (КЕО)».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Введение

Естественное и искусственное освещение городов и отдельных зданий и сооружений может и должно быть только «архитектурным», то есть выполнять одновременно экологическую, эстетическую и экономическую функции.

Широкое понятие комфортности освещения связано главным образом с обеспечением благоприятной видимости и восприятия архитектурных форм, пространства и объектов человеком.

При выборе приемов и систем освещения в процессе разработки архитектурного проекта можно условно выделить два этапа.

На первом этапе решают следующие задачи:

- в соответствии с нормами выбирают необходимые уровни освещенности с учетом особенностей зрительной работы (размер объектов различения, светлота фона, контраст между объектами и фоном и т.п.);
- обеспечивают неравномерность, контрастность и направленность освещения, способствующие наилучшей видимости объектов различения и светомоделировке их формы;
- определяют спектр и динамику освещения, обеспечивающие требуемую цветопередачу и эмоциональную атмосферу;
- устраняют или ограничивают ослепленность и дискомфорт, возникающие при попадании в глаза прямых или отраженных лучей солнца, неба или источников искусственного света;
- выбирают расположение световых проемов, осветительных приборов и отделочных материалов, обеспечивающее комфортное распределение яркостей и цвета в пространстве.

Второй этап проектирования включает решение архитектурной сверхзадачи – создание архитектурного светового образа, который возникает в результате взаимодействия архитектуры и света. В интерьерах этот образ зависит от назначения помещений. Так, в зрительных залах архитектурный световой образ должен создавать впечатление праздничности и торжественности; в музеях и картинных галереях – ощущение отрешенно-

сти от внешнего мира и сосредоточенности; в производственных помещениях – иллюзию естественности световой среды.

В современной архитектуре выразительные решения достигаются искусным сочетанием естественного и искусственного света, применением новейших светотехнических и строительных материалов и конструкций, разработкой оригинальных оптических систем, новых архитектурных форм и, в конечном итоге, рождением характерных образов.

1. Системы естественного освещения помещений [1, §4.6]

Существуют три системы естественного освещения помещений: боковое, верхнее и комбинированное освещение. Эта классификация положена в основу нормирования естественного освещения.

Система бокового освещения подразделяется на одно-, двух-, трехстороннее и круговое освещение.

Система верхнего освещения может быть обеспечена различными устройствами – от полностью светопропускающего покрытия до точечных фонарей и световых шахт.

Система комбинированного естественного освещения представляет собой комбинацию бокового и верхнего освещения. Если любая из этих систем не обеспечивает требуемого уровня освещения и его качества (комфортности), то она может быть дополнена искусственным освещением. Такая система получила название совмещенной.

Выбор архитектором систем освещения определяется, прежде всего, назначением помещения.

Основными задачами проектирования естественного освещения зданий являются:

1) выбор типа, размеров и расположения световых проемов (в стенах и покрытиях), при которых в помещениях обеспечиваются нормированные показатели освещения;

2) защита рабочих зон помещения от слепящей яркости прямых и отраженных лучей солнца;

3) согласование выбранных светопроемов и их расположения с архитектурными требованиями к освещению, способствующими выявлению пространства, тектоники, ритма, цветового решения и характерного образа сооружения.

При выборе типов окон и фонарей и их расположения в пространстве цеха необходимо учитывать большую архитектурную роль этих деталей интерьера, которые вносят свой ритм в членение пространства, способст-

вуют выявлению его глубины, а также во многом определяют художественную тектонику помещений.

По характеру распределения прошедшего в помещение светового потока окна и фонари подразделяются на три вида (рис. 6):

– первый вид (рис. 6, *a*) характеризуется отчетливо выраженной направленностью светового потока, который четко выделяет формы рассматриваемой детали благодаря образующимся собственной и падающей теням, то есть обладает наилучшим светомоделирующим эффектом;

– световые проемы второго вида (рис. 6, *б*) создают в помещениях так называемое бестеневое освещение благодаря двустороннему или многостороннему освещению объектов в интерьере или применению в светопроемах светорассеивающих материалов (стекла, пленки, решетки и т.п.; обозначены штриховыми линиями);

– для третьего вида естественного освещения (рис. 6, *в*) характерно использование отраженного света, который создается скрытыми от наблюдателя окнами; этот прием освещения создает иллюзию открытого проема и зрительно увеличивает глубину пространства.

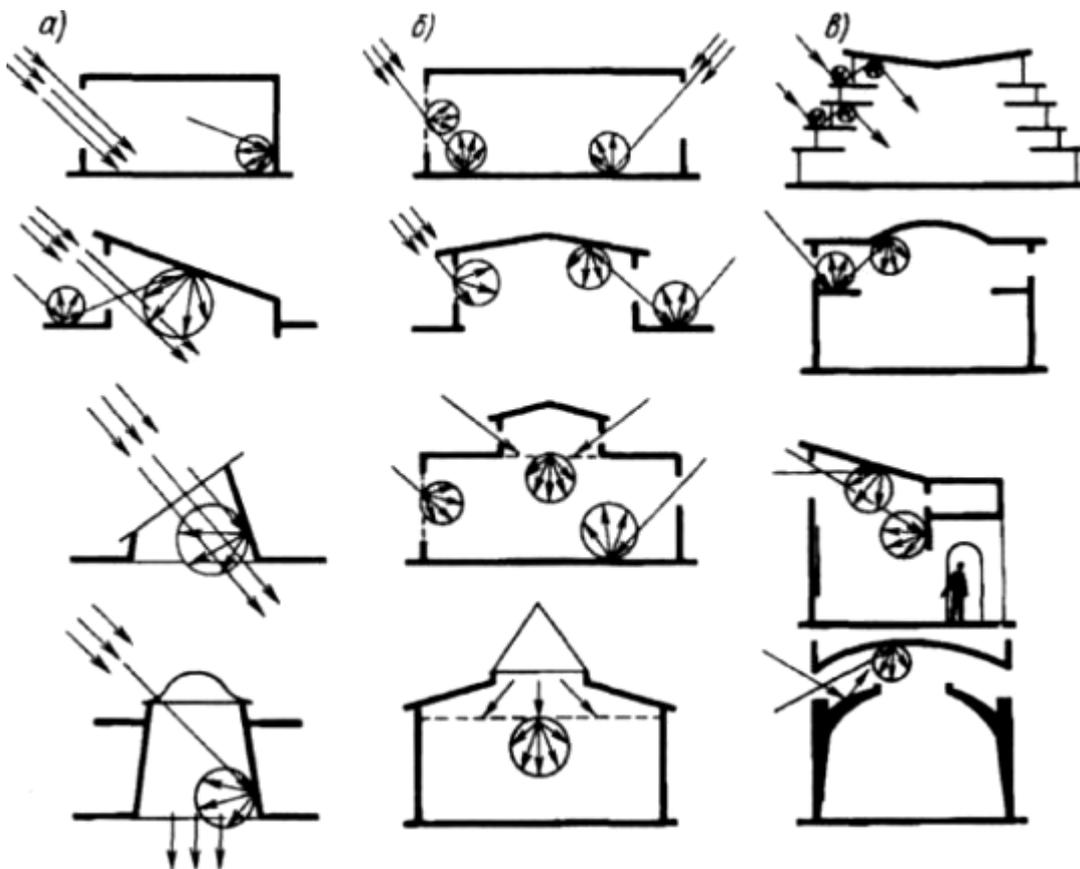


Рис. 6. Классификация приемов естественного освещения по характеру светораспределения

Примеры использования отраженного света в архитектуре показаны на рис. 7.

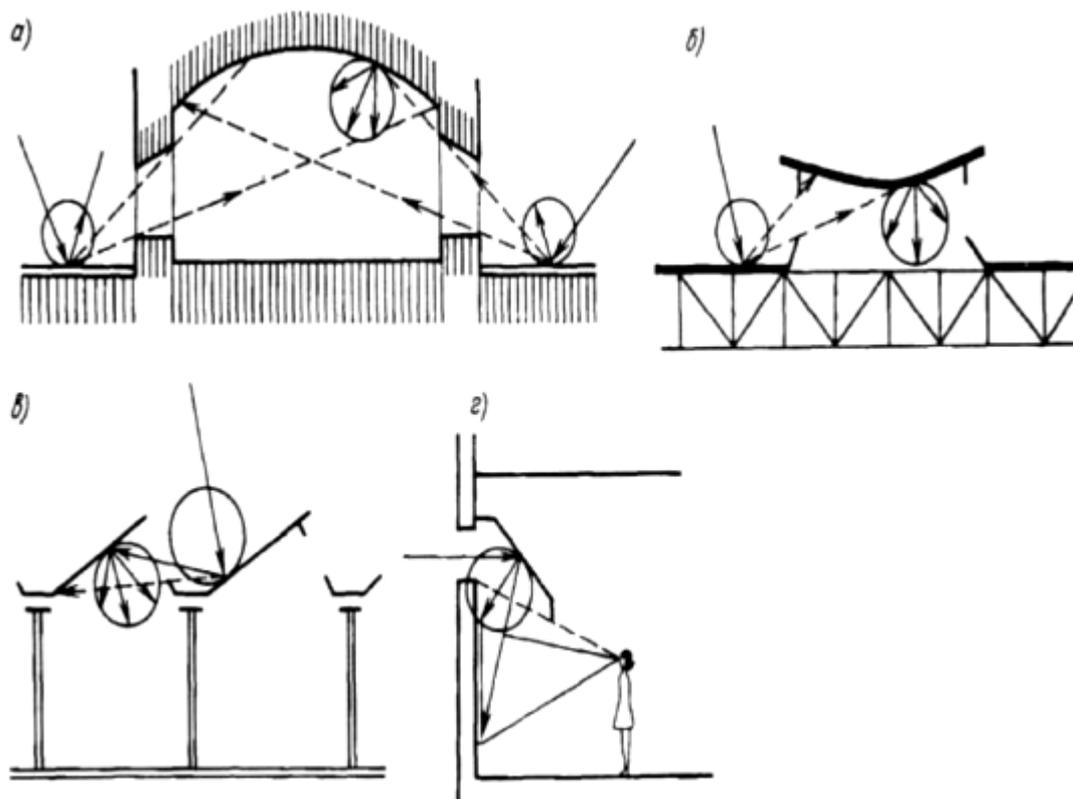


Рис. 7. Приемы использования отраженного света: *а* – в трапезной Симонова монастыря (Москва); *б, в* – в промышленных зданиях; *г* – в картинной галерее

Задачи проектирования естественного освещения зданий определяются их художественным образом и назначением. Классификация зданий в зависимости от требований к световой среде приведена в табл. 3.

Естественное освещение зданий, относящихся к I группе, целесообразно решать так, чтобы свет подчеркивал архитектурное значение центральных (главных) помещений, акцентировал оси и членение пространства, служил своеобразным гидом при движении посетителей от вестибюля к центру здания.

В основных помещениях зданий II группы свет используется как эффективное средство акцентирования внимания на объекте восприятия (картине, скульптуре, сценической или спортивной мизансцене, панораме и т.д.), то есть как бы без персонификации его роли в окружающем архитектурном пространстве. Для этого применяется неравномерное распределение света в помещении и используется эффект темновой адаптации глаз наблюдателей, располагающихся в зоне пониженной яркости.

Таблица 3

Классификация зданий по требованиям к световой среде

Группа зданий	Требования к световой среде	Примеры
I	Определяются в основном идейно-художественными задачами	1. Здания мемориальной архитектуры. 2. Здания парламентов, судов, власти. 3. Дворцы культуры, науки и искусства. 4. Культовые сооружения.
II	Функциональные с учетом зрительной адаптации посетителей	1. Панорамы, диорамы. 2. Картинные галереи и музеи. 3. Выставочные здания. 4. Спортивные залы.
III	Определяются высокими требованиями к обеспечению условий зрительной работоспособности в сочетании с эстетическими и гигиеническими требованиями	1. Здания высших и средних учебных заведений. 2. Школы. 3. Здания проектных и научно-исследовательских институтов. 4. Производственные здания и офисы.
IV	Определяются в основном психологическими, эстетическими и гигиеническими требованиями	1. Здания лечебных учреждений, санаториев и домов отдыха. 2. Здания детских учреждений. 3. Жилые дома.

Демонстрационные залы в зависимости от экспозиции подразделяются на два вида: в первых преобладают плоскостные экспонаты (картины, гобелены и т.п.), во вторых – объемные (скульптура, оборудование).

При проектировании картинных галерей необходимо предусматривать выполнение следующих требований:

а) обеспечение достаточно интенсивной освещенности картин, которая характеризуется средним значением КЕО на плоскости картины в пределах 1,5 – 2 %;

б) соблюдение определенного отношения среднего КЕО на плоскости картины e_k к значению КЕО на вертикальной плоскости, проходящей через глаз наблюдателя, e_v ; численное значение отношения e_k / e_v должно быть больше единицы и не превышать 10;

в) соблюдение определенного отношения среднего значения КЕО на горизонтальной плоскости в зале e_z на уровне глаз наблюдателя к среднему значению КЕО на поверхности картины e_k ; численное значение отношения должно быть меньше единицы;

г) полное устранение инсоляции помещений во избежание разрушительного действия на картины прямого солнечного света, особенно его ультрафиолетовой составляющей;

д) искусственное освещение картинных галерей должно дополнять и продолжать естественное освещение как по уровню освещенности, так и по распределению света в помещении, соотношению яркостей (освещенностей) и спектральному составу света.

К группе II общественных сооружений относятся спортивные залы, в которых высокая освещенность спортивной арены должна сочетаться с пониженной яркостью (освещенностью) в зоне расположения зрителей. Неравномерность освещения с минимумом в зоне зрителей и максимумом на арене не должна быть более 0,3.

Световая среда в основных помещениях III группы должна удовлетворять комплексу функциональных и гигиенических требований, имеющих конечной целью создание комфортных условий зрительной работы.

К важнейшим критериям качества световой среды в учебных помещениях относятся следующие:

а) соотношения между яркостями основных поверхностей интерьера; при этом целесообразно исходить из соотношений яркостей, наблюдаемых в природе;

б) неравномерность освещения помещения и насыщенность интерьера светом; насыщенность определяется в основном значением цилиндрической освещенности, выбираемой по СНиП;

в) направленность света, которая в помещениях для чтения, письма, рисования, лепки и тому подобное должна быть слева; опыт показывает, что при расположении окон и фонарей надо отдавать предпочтение верхнебоковому направлению светового потока под углом 30° к горизонту и более;

г) зрительный дискомфорт, возникающий при попадании в поле зрения учащихся поверхностей с чрезмерно высокой яркостью: от прямых и отраженных лучей солнца, от неба, а также от осветительных приборов. Критерием его оценки служит показатель дискомфорта. Численное значение этого показателя составляет при искусственном освещении 40, при естественном освещении 24–30, при применении средств солнцезащиты (жалюзи и др.) – 20.

К IV группе относятся помещения, световая среда в которых в основном определяется психологическими, эстетическими и гигиеническими требованиями; к ним относятся палаты больниц, основные помещения детских учреждений, жилые помещения. Совокупность этих требований, изложенных частично в СНиП.

2. Количественные и качественные характеристики освещения [1, § 4.3]

Качество освещения принято оценивать по его характеристикам исходя из функций света в архитектуре. Важнейшими функциями света являются следующие:

1. Информативные зрительные, обеспечивающие человека информацией о предметно-пространственной среде и характеризующиеся возникновением зрительных образов.

2. Морфофункциональные, к которым относятся влияния на человека ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных излучений, не связанных с возникновением зрительных образов, но оказывающих действие на человека либо непосредственно через кожный покров, либо через органы зрения.

3. Косвенные, характеризующие воздействия света на материальную среду, на ее физические (температура, влажность), биологические (содержание вредных бактерий) и химические (фотосинтез, выцветание красок) параметры, которые в свою очередь нередко определяют состояние человека, его ощущение комфортности.

Функции света позволяют классифицировать количественные и качественные характеристики освещения. К количественным характеристикам относятся освещенность, яркость, коэффициент естественного освещения (КЕО).

К качественным характеристикам, определяющим комфорт и эстетичность световой среды, а также экологическую эффективность светового решения, относятся: распределение яркости в поле зрения и неравномерность освещенности на поверхностях объектов и в пространстве; насыщенность пространств светом; ослепленность и дискомфортная блескость; контрастность освещения, контраст светотени; направление световых потоков; спектральный состав излучения источников света, их цветопередача; динамика освещения.

Деление характеристик освещения на количественные и качественные и рассмотрение их в отдельности достаточно условно, так как все они взаимосвязаны и взаимозависимы

Необходимо еще раз подчеркнуть, что эмпирически найденная в прошлом органичная взаимосвязь света и архитектурной формы не утрачена и в наши дни в лучших произведениях современного зодчества.

Формообразующее действие света в новейшей архитектуре представлено такими интересными примерами сооружений, как проект универмага «Галерея Лафайет» в Берлине с оригинальной системой «световых воронок» для естественного освещения помещений (рис. 8, 9) или как проекты зданий,

где применена новая технология освещения интерьеров с использованием прямого солнечного света – гелиоосветительные установки (рис. 10).

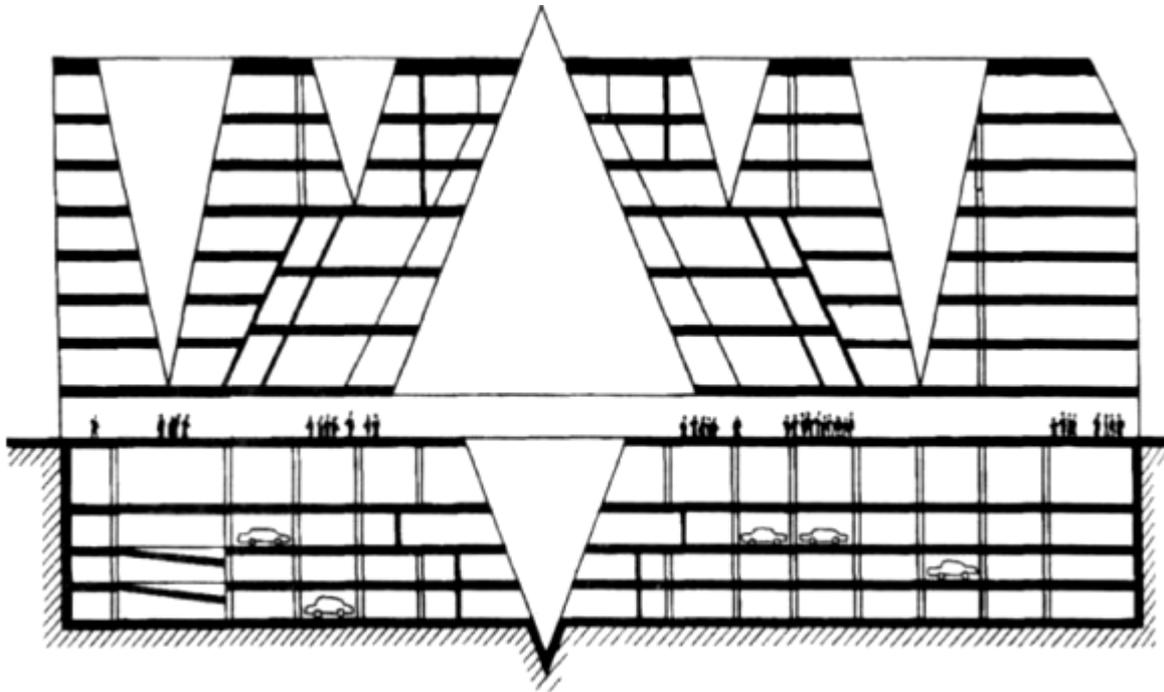


Рис. 8. Проект универсального магазина «Галерея Лафайет» в Берлине: Схематический разрез здания. Архитекторы Ж. Нувель, Е. Катани. Для естественного освещения помещений в массиве многоэтажного здания использован принцип световых воронок или конусов, раскрытых к небу или к центру объема, что дает доступ природному свету в интерьеры надземных торговых залов и офисов и частично в помещения подземного гаража

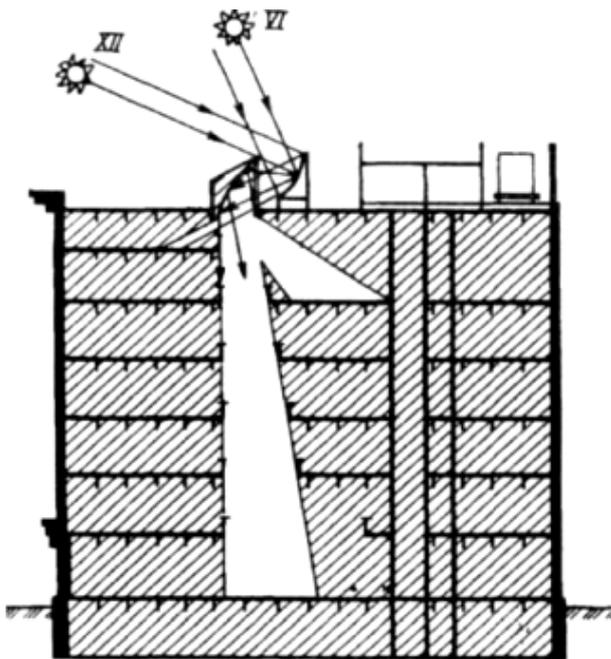
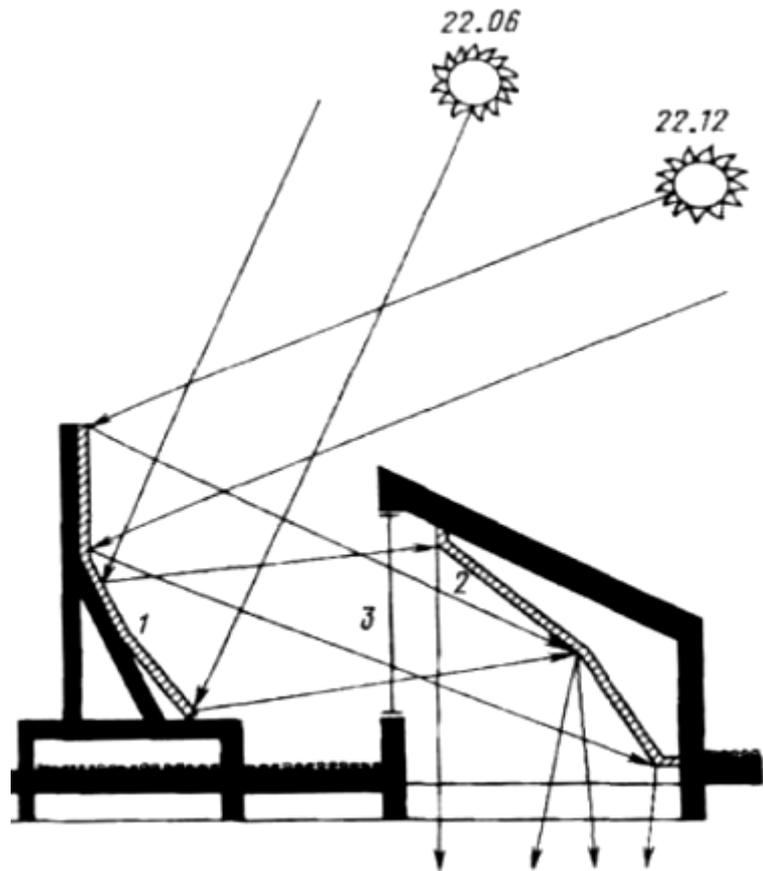


Рис. 9. Разрез реконструированного здания в Миннеаполисе, США, оборудованного системой пассивной солнечной оптики (архит. Д. Кеннет, 1985). Солнечные лучи «прорисовывают» форму атриума

Рис. 10. Схема системы пассивной солнечной оптики:
 1 – внешний конденсор (гелиостат); 2 – внутренний отражатель; 3 – защитное прозрачное стекло



Архитектурные формы в этих сооружениях (фонари, световые шахты и воронки, светящие подвесные потолки и т.д.) являются не только выразительными элементами композиции, а служат конкретным функциональным целям. Основная светотехническая задача в таких случаях – поиск наиболее рациональной оптической схемы концентрации естественного света, ввода его внутрь здания и распределения в помещениях. Главной архитектурной задачей при этом является выбор выразительных и конструктивно оправданных форм здания и элементов осветительной установки, рациональное объемно-планировочное решение.

Гелиоосветительные установки можно условно разделить на два типа – одноступенчатой и двухступенчатой трансформации солнечного света внутри здания. Оба типа имеют приемно-концентрирующее устройство, состоящее из гелиостата (подвижного в системах активной солнечной оптики и неподвижного в пассивной оптике) и зеркального отражателя, который в установках первого типа направляет прямой солнечный свет непосредственно в архитектурное пространство интерьера, а в установках второго типа эта трансляция света осуществляется в световых шахтах, у которых выходное отверстие, как правило, снабжено устройством вторичной трансформации солнечного света. В частности, это может быть плоский

клиновидный световод в виде светового потолка с зеркалированной отражающей (невидимой в интерьере) и светорассеивающей (светящей) поверхностью (рис. 11).

В конструкции этого световода система прямого солнечного освещения совмещена с установкой искусственного освещения с автоматическим регулированием, которая из-за непостоянства солнечного освещения является основной, а естественное освещение рассматривается как дополнительное. Исследования эффективности таких систем показали, что использование солнечного света позволяет сэкономить 40 – 70 % электроэнергии, затрачиваемой на освещение.

Оптические установки являются постиндустриальной технологией. С их помощью не только прямой солнечный свет, но и диффузный свет от наиболее яркой зенитной части неба может концентрироваться, расширяться, преломляться, трансформироваться и делиться до бесконечности, направляться в заданное место, обеспечивая при этом более интенсивное естественное освещение локализованного объекта, чем если бы оно создавалось прямым светом неба.

В оптических установках может использоваться и электрическое освещение, получаемое с помощью фотоэлектрических батарей, заряжаемых солнечной энергией. Если управляемое фотоэлектрическое освещение объединить с оптически управляемым естественным освещением, то в результате получится полностью децентрализованная эффективная система. Остается только одно важное ограничение, связанное с необходимостью накопления электроэнергии.

Оно может быть устранено, например, использованием ветровых двигателей при отсутствии солнца. Комбинация фото- и ветроэлектрического и оптического естественного освещения является преддверием надежной системы энергонезависимого освещения, не требующей централизованной сети питания и не причиняющей вреда окружающей среде.

Новая энергосберегающая технология естественного освещения может составить реальную альтернативу привычному электрическому освещению. Она основана не на потреблении невозобновляемых природных ресурсов и связанном с ним экологическом загрязнении среды обитания, а использует естественные возможности. По зарубежным данным, значительно более экономично передавать дневной свет во внутренние (в том числе подземные) помещения, чем создавать для них электрическое освещение. Наибольшую выгоду от применения новых гелиоосветительных систем получают наименее развитые в индустриальном отношении страны.

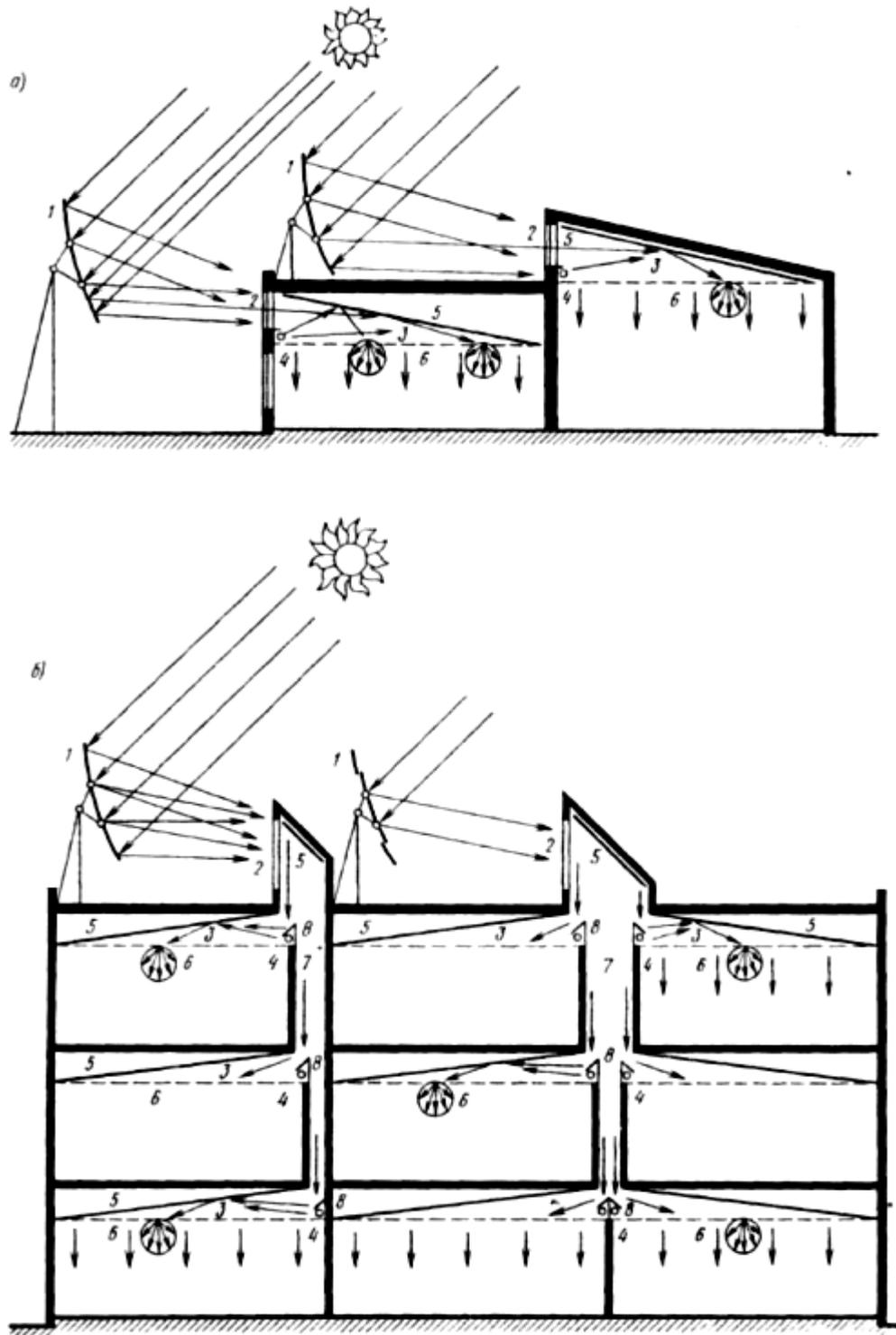


Рис. 11. Схемы гелиосветильных установок со световодами (разрезы зданий):
а – установка оконного и шедового типов; *б* – установки шахтного типа (одно- и двух-
 плечевые) в многоэтажных зданиях; 1 – факетный гелиостат с автоматической систе-
 мой слежения за Солнцем; 2 – прозрачное стекло в окне или фонаре; 3 – плоский кли-
 новидный световод; 4 – источники искусственного света; 5 – зеркальная поверхность;
 6 – светопропускающая и диффузно рассеивающая поверхность – световой потолок;
 7 – световая шахта; 8 – зеркальные отсекатели света

3. Инсоляция и солнцезащита

Инсоляция (лат. *insolatio*, от *insolo* – выставляю на солнце) – суммарное солнечное облучение поверхностей и пространств – важнейший фактор формирования климата (табл. 4).

Таблица 4

Единство положительных и отрицательных
воздействий инсоляции в архитектуре

Аспект воздействия инсоляции	Положительные эффекты	Отрицательные эффекты
Биологический	Общеоздоровительный эффект (загар, образование витамина D, обогрев), saniрующий эффект, улучшение функций зрения при повышенной освещенности и контрастности освещения.	Фотохимическая токсичность отработанных газов в городах, переоблученность и канцерогенность, перегрев (общий и местный) и световой дискомфорт, разрушающее действие на живую клетку, материалы.
Психологический	«Солнечность» освещения, динамика распределения яркостей и цветностей в поле зрения, связь с внешним пространством.	Снижение активности и настроения при световом дискомфорте и перегреве.
Эстетический	Выявление пространства, формы, пластики, силуэта и цветовых соотношений, ритма элементов архитектуры и «живописности» композиционных решений.	Снижение восприятия формы и ощущения насыщенности цвета при чрезмерных яркостях, выцветание поверхностей.
Экономический	Природный источник дополнительного обогрева помещений, сокращение площади светопроемов, повышение производительности труда и работоспособности.	Повышение расходов на вентиляцию и кондиционирование воздуха, снижение производительности труда и работоспособности при тепловом и световом дискомфорте.

Комплекс факторов, который положен в основу критериев оценки и нормирования инсоляции в архитектуре, показан на рис. 12.

Одной из наиболее распространенных ошибок в солнцезащите является применение массивных и теплоемких затеняющих экранов, монолитно связанных с основной ограждающей конструкцией. Такие экраны аккумулируют солнечное тепло и путем теплообмена со стеклом и стеной передают его в помещение.

Другую ошибку допускают при применении солнцезащитных изделий из стекла, пластмасс и пленок, когда весь светопроем заполняется этими изделиями. В таких случаях ограничивается связь с внешним пространством, а яркость заполнения при инсоляции нередко превышает допустимую.

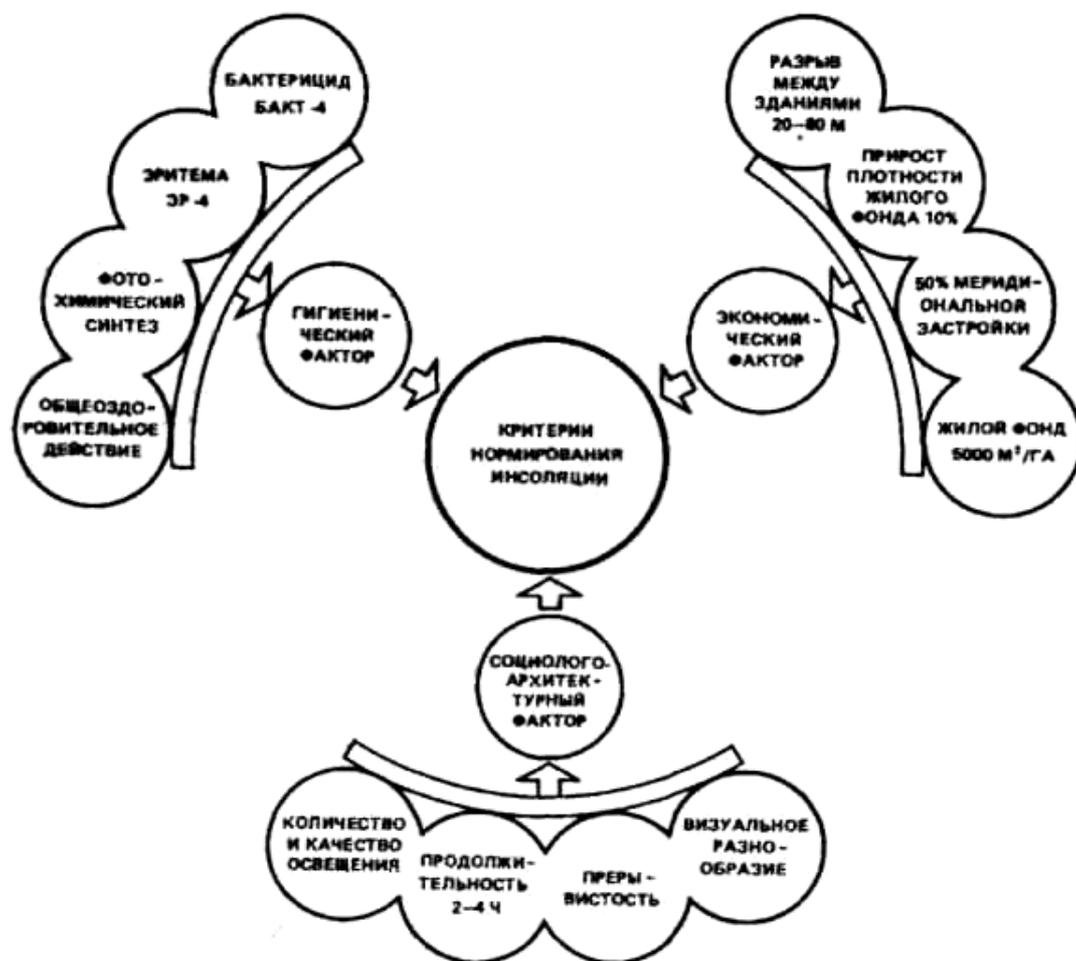


Рис. 12. Многокритериальная система оценки инсоляции застройки

4. Нормирование и проектирование инсоляции застройки [1, §5.2]

Нормы распространяются на проектирование новой и реконструируемой застройки городов, поселков и сельских населенных пунктов. Требования к инсоляции не распространяются на проектирование застройки промышленных зон и производственных зон сельскохозяйственных предприятий.

Помещения жилых и общественных зданий и участки территорий внутриквартальных пространств подразделяются по требованиям инсоляции на группы, указанные в СНиП 2.07.01-89 «Планировка и застройка городских и сельских поселений». Так, согласно нормам:

– в жилых и общественных зданиях (за исключением детских дошкольных учреждений, общеобразовательных школ, школ-интернатов) необходимо обеспечивать непрерывную продолжительность инсоляции жи-

лых помещений и территорий: для 58° с. ш. и южнее – не менее 2,5 ч в день на период с 22 марта по 22 сентября; для северной зоны (севернее 58° с.ш.) – не менее 3 ч в день на период с 22 апреля по 22 августа.

– в условиях многоэтажной застройки (9 и более этажей) допускается одноразовая прерывность инсоляции жилых помещений при условии увеличения суммарной продолжительности инсоляции на 0,5 ч в течение дня соответственно для каждой зоны.

– в жилых домах меридионального типа, где инсолируются все комнаты квартиры, а также при реконструкции жилой застройки или при размещении нового строительства в сложных градостроительных условиях (исторически ценная городская среда, дорогостоящая подготовка территории, зоны общегородского и районных центров) допускается сокращение продолжительности инсоляции на 0,5 ч соответственно для каждой зоны

– ориентация и размещение детских дошкольных учреждений, общеобразовательных школ, школ-интернатов должны обеспечивать непрерывную трехчасовую продолжительность инсоляции в помещениях, указанных в нормах и правилах обеспечения инсоляцией жилых и общественных зданий и территорий жилой застройки, утвержденных в установленном порядке.

Архитекторам полезно знать, однако, что ныне в наиболее развитых странах мира последнего требования нет, так как оно приводит к резкому световому и тепловому дискомфорту при напряженной зрительной работе, отрицательно отражающемуся на зрении детей и их самочувствии. Поэтому подобные помещения ориентируются на запад – северо-запад, что обеспечивает инсоляцию среды в отсутствие детей. В учебное же время в помещении, применяется комфортное рассеянное освещение, не требующее солнцезащиты. Это значительно упрощает градостроительное проектирование.

Чтобы представить себе видимое «движение» Солнца по небосводу и определить его координаты (высоту над горизонтом h_0 и азимут A) на определенной географической широте, следует обратиться к «солнечному стереону», как это сделал в свое время Витрувий.

Траектория Солнца в характерные для летнего солнцестояния, весенне-осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния для географической широты Минска ($\varphi = 55^\circ$ с.ш.) показаны на рис. 13. Важно понимать, что склонение Солнца δ весной-осенью равно нулю и определяет высоту Солнца h_0 в полдень. Летом и зимой склонение Солнца в полдень равно соответственно $+23,5^\circ$ и $-23,5^\circ$.

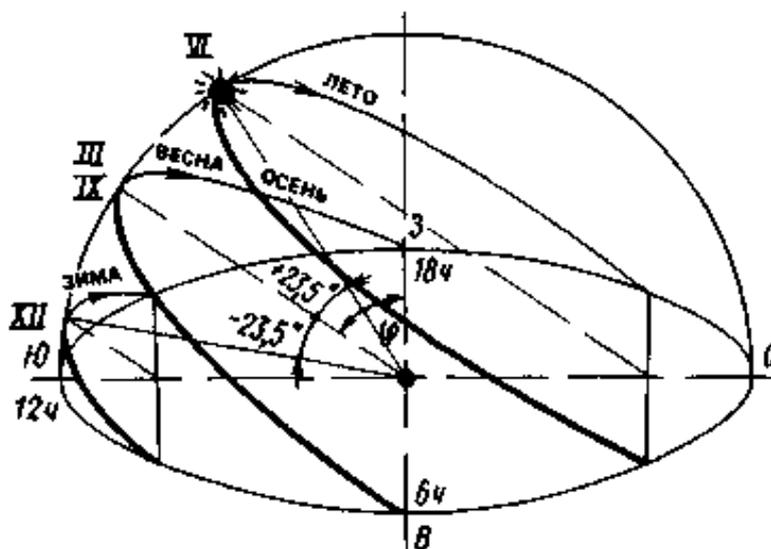


Рис. 13. Траектория Солнца в течение характерных дней года и способ определения положения Солнца в полдень в дни летнего и зимнего солнцестояния при заданной географической широте

Для определения координат Солнца на различных широтах и в требуемое время дня нужны сложные астрономические расчеты. Для архитектурной практики разработаны так называемые солнечные карты, по которым без труда можно получить координаты Солнца по проекциям его траекторий на горизонтальную плоскость: по точкам пересечения траекторий с концентрическими окружностями – высоту h_0 , а по лимбу – азимут A_0 .

Здесь необходимо вспомнить о разнице между солнечным временем (астрономическим) и декретным на Земле, которая может достигать почти до 1,5 ч. При выборе ориентации зданий по сторонам горизонта архитектору надо уметь определять эту разницу в любом городе земного шара. Кроме того, существуют понятия поясного и сезонного времени.

Расчеты инсоляции и солнцезащитных устройств производятся по так называемому расчетному времени суток и года, устанавливаемому в зависимости от географического района строительства.

За расчетное время принимается:

а) при необходимости устранения перегрева помещений – средний период жарких месяцев года при среднемесячной температуре наружного воздуха $t_H = 22^\circ\text{C}$,

б) при определении максимальных теплоступлений в помещениях с кондиционированием воздуха – наиболее жаркий месяц года (по среднемесячной температуре наружного воздуха);

в) при устранении ослепляющего действия инсоляции – рабочее время суток и года в зависимости от назначения помещения.

Порядок определения разницы между солнечным и декретным временем следующий:

- находим разницу n° между долготами данного пункта и среднего меридиана часового пояса, определяемого по карте часовых поясов;

- находим разницу в минутах между местным солнечным и поясным временем, для чего полученную разницу в долготах n° умножаем на 4 (угловая скорость движения Солнца по небосводу – 1° за 4 мин).

- находим декретное время, прибавив к поясному один час. определяем поясное время данного пункта, для чего полученную разницу прибавляем (отнимаем) к расчетному солнечному времени, если долгота данного пункта меньше (больше) долготы среднего меридиана часового пояса.

Условия инсоляции определяются методом проекций с числовыми отметками. Расчеты следует производить непосредственно на плане застройки с помощью накладного инсографика, показанного на рис. 14.

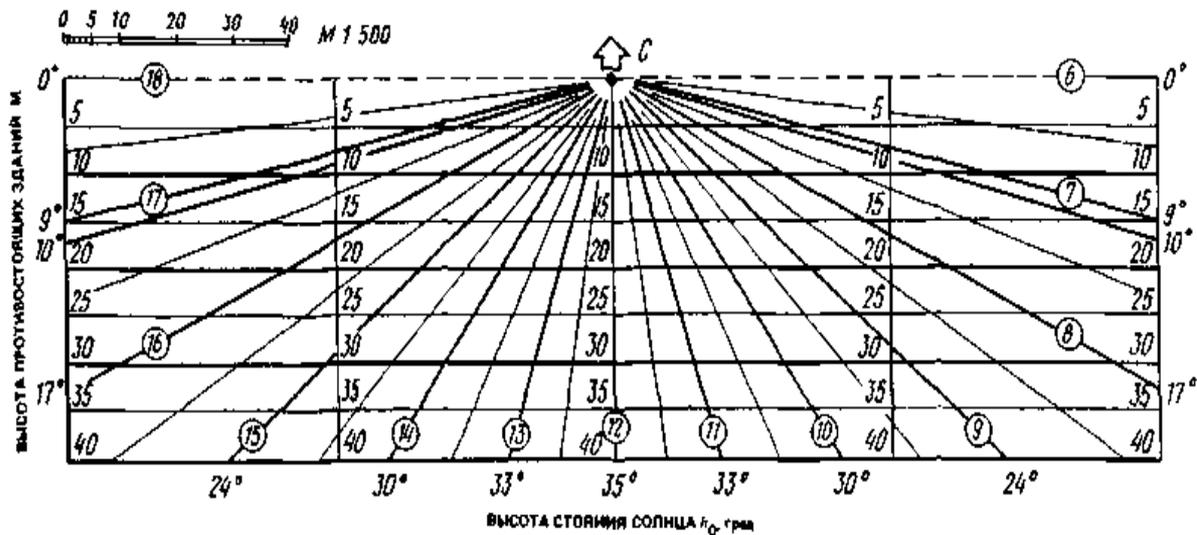


Рис. 14. Инсоляционный график для расчета продолжительности инсоляции и построения теней

Инсографик представляет собой горизонтальную проекцию наклонной плоскости сектора небосвода. Параллельные линии на графике являются горизонталями этой плоскости, превышения которых отсчитываются от нулевой горизонтали, проходящей через расчетную точку 0. Сходящиеся в этой точке, азимутальные линии есть проекции секторальных углов наклонной плоскости.

Построение инсографика для дня равноденствия нужно производить следующим образом (рис. 15, а).

Провести две взаимно перпендикулярных линии mn и kl и вокруг точки их пересечения 0 описать полуокружности радиусом 6 – 10 см. Через

точку O провести прямую AS под углом φ (географическая широта, град) к прямой mn . Из точки A пересечения прямой AS с полуокружностью опустить перпендикуляр AB на прямую kl и из точки O описать четверть окружности BMc радиусом OB .

На четверти окружности kNn нанести шкалу секторальных углов с градацией через 5° . На отрезках радиальных прямых, заключенных между дугами kNn и BMc , построить прямоугольные треугольники вида MNR .

Вертикальные катеты треугольников проводятся из точек внешней дуги kNn , горизонтальные – из точек внутренней дуги BMc . Через вершины прямых углов треугольников и точку O провести азимутальные линии графика.

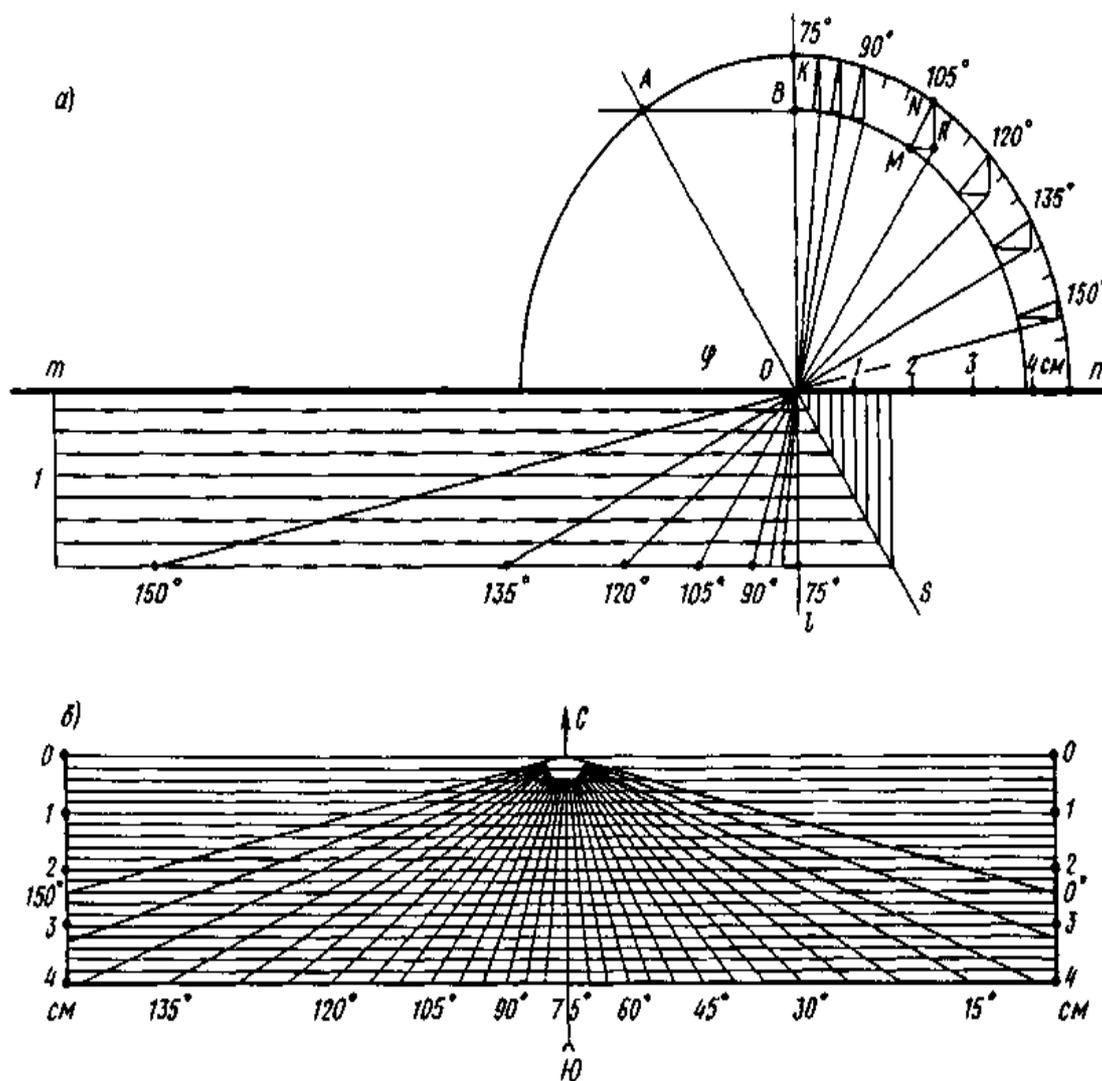


Рис. 15. Построение инсографика (а) и вид графика (б)

На линии mn начиная от точки O нанести метрическую шкалу превышений горизонталей наклонной плоскости с градацией через 1 см. Шка-

лу спроектировать на прямую OS и через полученные на ней засечки параллельно линии mn провести горизонталы графика. Цена делений горизонталей назначается в соответствии с масштабом чертежа генплана.

Правая часть графика будет симметрична построенной. График следует скопировать на кальку или какой-либо иной прозрачный материал (рис. 15, б).

Второй способ построения ингаляционного графика, основанный на графической модели небосвода для дней равноденствия и угла φ с.ш., заключается в следующем:

1. Изобразить разрез небосвода по меридиану С – Ю как полусферу радиусом $R = 1$ ($ЛГ$ – линия горизонта) (рис 16, а).

2. От вертикали, проходящей через центр полусферы O и зенит Z в сторону юга, отложить угол φ° , обозначающий географическую широту места. На пересечении проведенной из точки O наклонной линии с полуокружностью находится положение Солнца в 12 ч в дни равноденствия. Наклонная линия является вертикальной проекцией полуденного солнечного луча, лежащего в плоскости солнечной траектории, а угол между ней и линией горизонта показывает высоту стояния Солнца h_0 в этот момент.

3. Изобразить план небосвода как окружность с $R = 1$ с центром O . Указать стороны горизонта – В, Ю, З, С. Спроецировать на южный меридиан с разреза на план положение полуденного Солнца и через эту точку провести окружность радиусом r (рис. 16, б).

4. Разделить сектор ЮВ горизонтальной проекции небосвода на 6 равных частей по 15° (угловая скорость движения Солнца – 15° в час, время с восхода до полудня – 6 ч) и провести радиальные линии (для крупномасштабного графика ЮВ – сектор можно разделить на 12, 15 или 24 части соответственно через 30, 20 или 15 мин).

5. Из точек пересечения этими радиусами внешней и внутренней окружностей провести линии, параллельные линиям С – Ю и З – В, построив таким образом небольшие прямоугольные треугольники. Вершины прямых углов являются горизонтальными проекциями Солнца через каждый час.

Все эти построения вспомогательные и выполняются тонкими линиями.

6. Через полученные точки проекций Солнца и центр O провести жирные линии, которые являются горизонтальными почасовыми проекциями солнечных лучей, необходимых для построения графика.

Для упрощения построений разрез и план небосвода можно совместить (рис. 16, в).

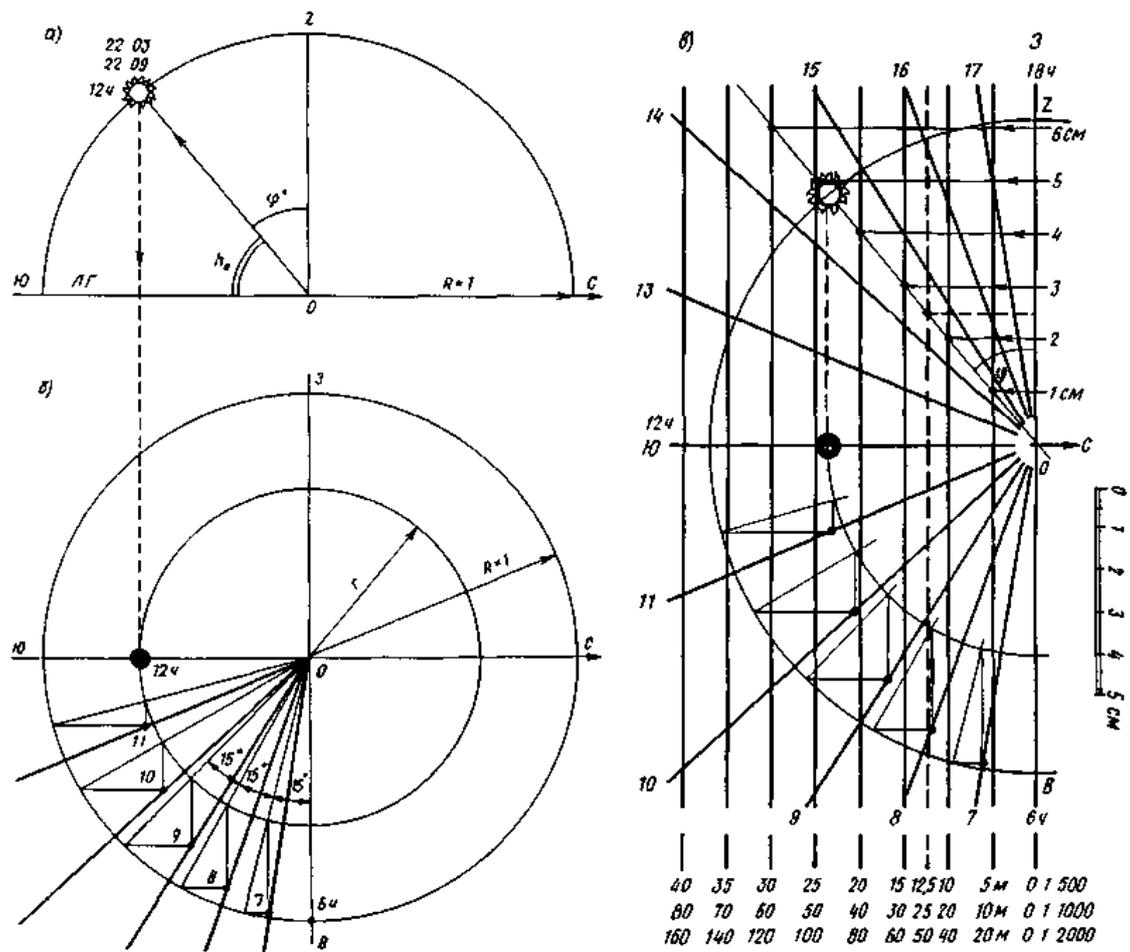


Рис. 16. Вариант построения инфляционного графика для широты ϕ_0
 (а – разрез небосвода; б – план небосвода; в – вид инсографика)

7. На линии OZ разметить деления через 1 см (для подробного графика – через 1 или 2 мм) и провести горизонтальные линии до пересечения с проекцией полуденного луча. Через точки пересечения провести линии, параллельные направлению В – 3 на плане небосвода. Эти параллели являются метрической шкалой превышений вспомогательных горизонталей наклонной плоскости солнечной траектории над исследуемой точкой на данной широте и служат для определения длины теней. Цена расстояний между параллелями назначается в соответствии с масштабом архитектурного чертежа.

8. Горизонтальные проекции дополуденных солнечных лучей (с 6 до 12 ч) зеркально перенести в послеполуденную область (сектор ЮЗ плана небосвода) и обозначить часы дня (с 12 до 18 ч).

График выполняется тушью на кальке или прозрачной пленке, вспомогательные линии построений стираются.

На рис. 17, а показан пример определения продолжительности инсоляции точки на горизонтальной поверхности.

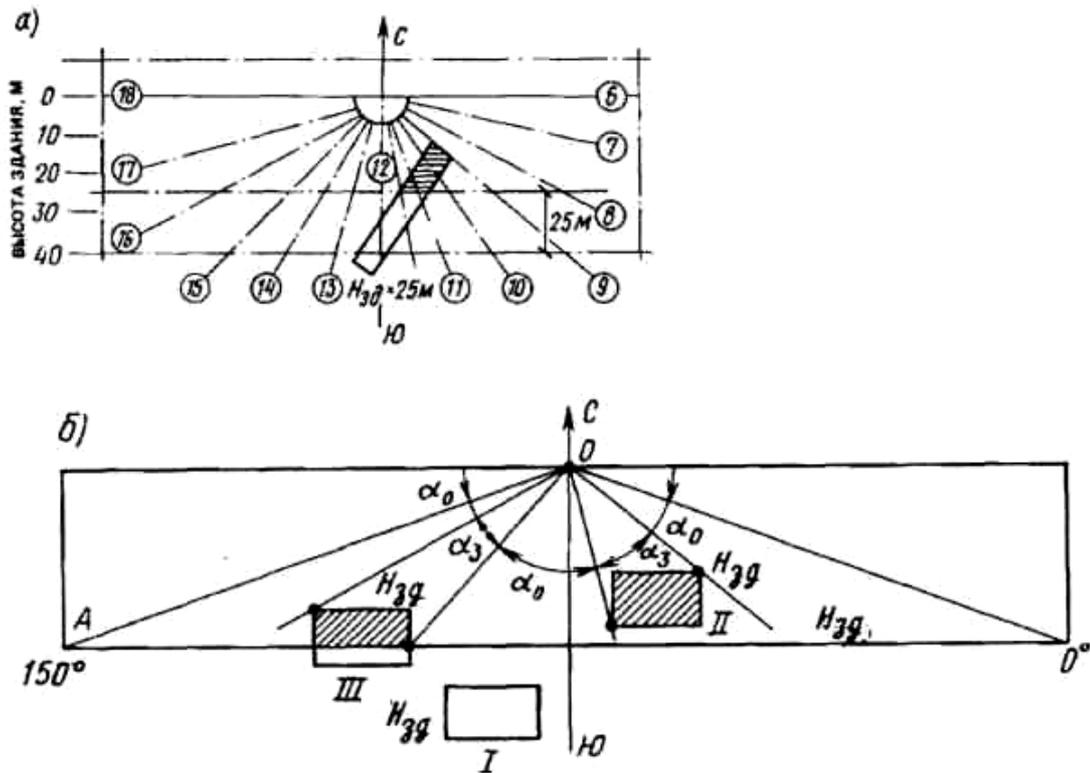


Рис.17. Основные случаи расположения зданий относительно затененной точки и линии ограничения, соответствующей превышению их над расчетной точкой: а – одно затеняющее здание; б – два затеняющих здания из трех; α_3 и α_0 – азимуты (углы) затенения и инсоляции соответственно

Точка 0 графика совмещается с заданной точкой, а сам график ориентируется по направлению север – юг. Высота затеняющего здания $H_{зд}$, то есть превышение его карниза над заданной точкой, составляет 25 м. Затенение заданной точки 0 всегда происходит только от той части здания, которая находится между горизонталью и этой точкой (на схеме заштрихована). В данном случае точка 0 будет затемнена с 9 до 11 ч. 30 мин.

Следовательно, заданная точка в дни равноденствия будет инсолироваться дважды: с 7 до 9 час и с 11 ч. 30 мин до 17 час (по нормам инсоляции первый час после восхода солнца и последний час перед его заходом в расчет не принимаются).

На рис. 17, б инсоляция точки 0 осуществляется трижды в течение дня в пределах углов α_0 , так как дома II и III оказывают на нее затеняющее действие (в пределах угла α_3).

5. Солнцезащита и светорегулирование в городах и зданиях [1, §4.6]

Архитектор-профессионал всегда стремится к достижению комфортных условий жизни и труда в помещениях и выразительности объемно-планировочных и конструктивных решений. Одним из главных факторов, способствующих этому, являются солнцезащитные средства (СЗС). Наиболее распространенные СЗС – конструктивные солнцезащитные устройства (СЗУ) (рис. 18).

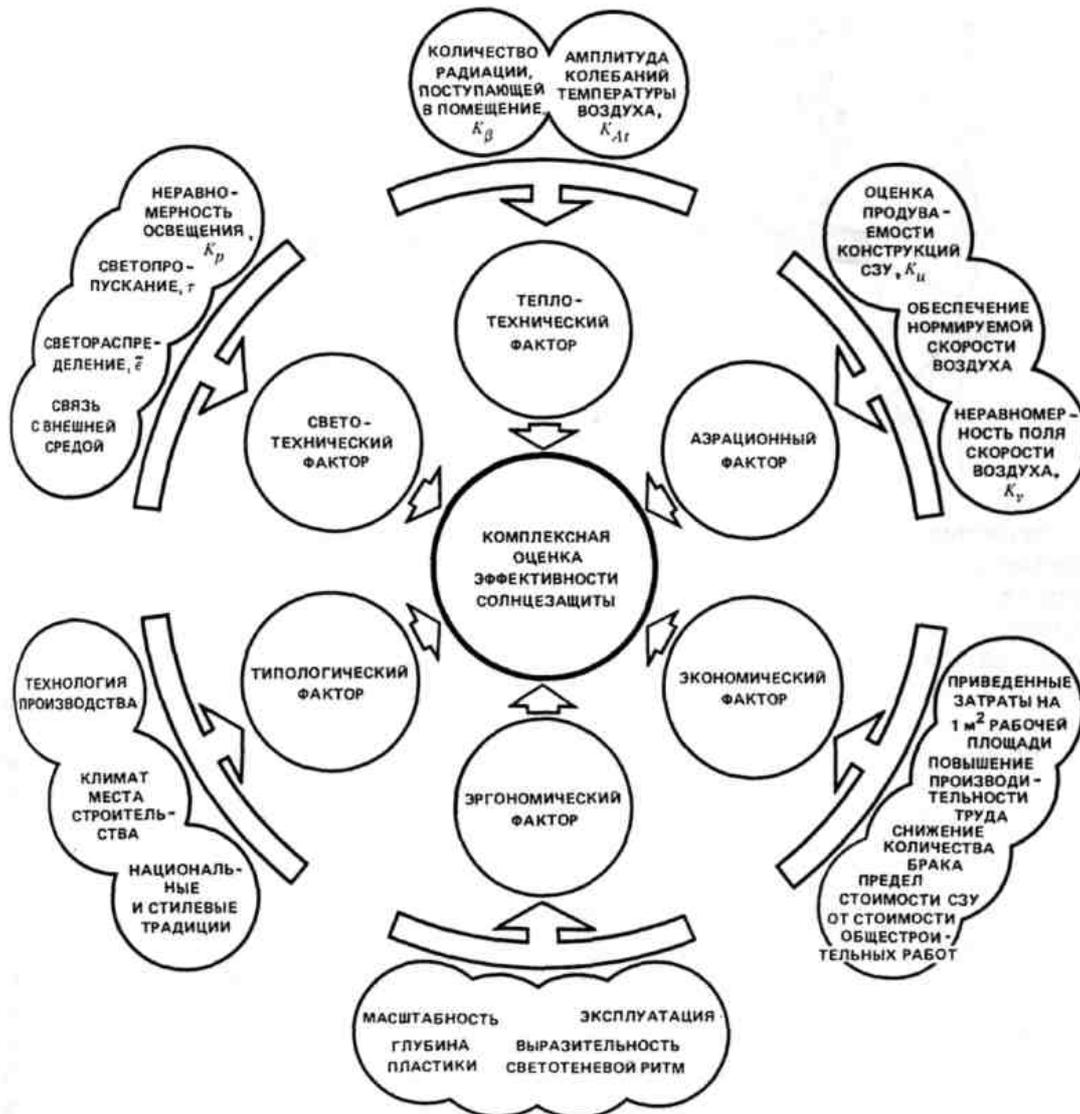


Рис. 18. Многокритериальная система оценки солнцезащиты

Однако стационарные СЗУ далеко не всегда оптимальны, несмотря на большие преимущества в пластической выразительности. Недостаточно продуманные решения стационарных СЗУ приводят к отрицательному эффекту. Экраны или лоджии, монолитно связанные с фасадом, превращаются из затеняющего средства в дополнительный источник перегрева помещений. К сожалению, этот вид ошибок весьма распространен в практике.

Если архитектор применяет СЗУ, не считаясь с климатическими условиями и ориентацией зданий, то такие решения подвергаются резкой критике.

В последние годы даже в северных районах получило распространение применение бесполезных наружных дорогостоящих экранов в виде откровенной декорации, не соотносящейся даже с ориентацией фасадов.

Но наиболее отрицательная тенденция последних лет – это вновь распространившееся во всех климатических районах увлечение большими площадями остекления, что является настоящим бедствием современного строительства, которое стремится к уменьшению теплопотерь и экономии энергетических ресурсов.

Это увлечение объясняется следующими основными причинами. Первая заключается в несовершенстве норм естественного освещения, устанавливающих определенные значения КЕО при боковом освещении вне зависимости от глубины помещений.

Вторая причина объясняется модой, которой нередко увлекаются архитекторы вслед за западными образцами.

Если за рубежом «остекленные небоскребы» воздвигаются с применением различных солнцезащитных стекол в комплексе с действующей системой искусственного регулирования микроклимата, то при этом применяются высококачественные регулируемые СЗУ, так как даже эффективные солнцезащитные стекла не решают проблемы слепимости от прямых солнечных лучей (в том числе и «фототропные», или «фотохромные», стекла, так как при инсоляции они приобретают яркость, превышающую яркость неба).

Из солнцезащитных стекол наибольший интерес представляют теплоотражающие стекла с оловянно-сурьмяным покрытием и стекла типа «кудоаурезин» (ФРГ). Они значительно задерживают ИК-радиацию (от 50 до 80 %) и сохраняют высокое светопропускание. К сожалению, в России до сих пор не налажено производство таких стекол.

Металлизированные стекла используют и при изготовлении стеклопакетов (фирма «Детаг», ФРГ, и др.), которые обеспечивают не только защиту от перегрева летом, но и снижение теплопотерь зимой, так как их коэффициент теплопередачи на 25 – 30 % меньше, чем у стеклопакетов из обычных стекол.

Наиболее перспективны в строительстве регулируемые солнцезащитные устройства и изделия, выпускаемые в комплексе с промышленными ограждающими конструкциями полной заводской готовности.

Таким образом, все солнцезащитные средства подразделяются на три основные группы: 1) архитектурно-планировочные; 2) конструктивные (СЗУ); 3) технические.

Первая группа объединяет средства, относящиеся к композиции застройки на генеральном плане, планировке зданий и благоустройству территорий. Вторая группа включает четыре подгруппы конструктивного характера: 1) затеняющие элементы зданий; 2) солнцезащитные изделия из стекла и пленок; 4) солнцезащитные устройства для территорий. Третья группа относится к средствам обеспечения искусственного микроклимата технического характера.

Итак, со всех точек зрения (гигиенической, функциональной, эстетической и экономической) солнцезащита является неотъемлемым и эффективным элементом архитектуры, поэтому массовый выпуск отечественной промышленностью рациональных солнцезащитных средств следует признать необходимым, а архитекторы-профессионалы должны всячески содействовать этому.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛЕКЦИОННЫМ ЗАНЯТИЯМ

Вопросы лекции	Форма обуч.	Лит.	Вопросы для самоконтроля
1	2	3	4
1. Оптическая теория естественного светового поля	Лекция самостоятельно	[1 §4.6]	1. Сформулируйте закон проекции телесного угла. 2. Перечислите и поясните виды действия естественного освещения на человеке. 3. Укажите основные компоненты дневной освещенности на открытой местности и помещения.
2. Система естественного освещения помещения	лекция	[1 §4.1]	1. Приведите приемы естественного освещения различного светораспределения. 2. Как вычислить распределение яркостей и светлоты в интерьере? 3. Перечислите меры ограничения ослепленности и неравномерности распределения световых потоков.
3. Методы расчета естественного освещения	лекция лабораторные занятия	[1 §4.5]	1. Как вычисляются необходимые размеры светопроемов при системе верхнего освещения? 2. Как воспользоваться графиками Данилюка при расчете бокового освещения? 3. Каким образом при расчете КЕО учитывается затенение светопроема противостоящими зданиями?

1	2	3	4
4. Солнцезащита и светорегулирование в городской застройке и помещении	лекция	[1 §4.4 – 4.5]	<p>1. Что такое инсоляция? От каких факторов она зависит? Укажите положительное и отрицательное воздействие инсоляции. Укажите градостроительные правила ориентации зданий различного назначения.</p> <p>2. Как выбрать тип секций с учетом и ориентации зданий?</p> <p>3. Перечислите способы светорегулирования в городской застройке.</p> <p>4. Перечислите причины нормирования инсоляции в зданиях различного назначения.</p>
5. Моделирование инсоляции. Новейшие технологии светорегулирования	лекция	[1 §4.5]	<p>1. Схема системы пассивной солнечной оптики (на примере здания Миннеаполисс).</p> <p>2. Принципы работы световых воронок и световых шахт.</p> <p>3. Приведите несколько схем гелиосветильных установок.</p>

ВОПРОСЫ К КОЛЛОКВИУМУ

1. Что является характеристикой естественной освещенности помещения.
2. Дайте определение и объясните физический смысл КЕО.
3. Как выбираются расчетные точки в помещении?
4. Как влияет общий коэффициент светопропускания на степень освещенности в помещении?
5. Принцип нормирования КЕО.
6. Какие факторы влияют на наружную освещенность. Что такое критическая наружная освещенность?
7. Перечислите известные Вам способы освещения и дайте определения каждому из них.
8. Географические факторы освещенности.
9. Основные компоненты дневной освещенности.
10. Компьютерный расчет светорегулирования.

УЧЕБНЫЙ БЛОК «СВЕТОВОЙ КЛИМАТ»

ВВЕДЕНИЕ

Учебный блок «Световой климат» завершает модуль «Архитектурная светотехника». Это наиболее физический раздел модуля. В нем изучаются явления и закономерности, связанные с возникновением, распространением и воздействием с веществом световых электромагнитных волн.

Теоретической основой блока является геометрическая оптика.

В геометрической оптике рассматриваются законы распространения света в прозрачных средах на основе представления о свете как о совокупности световых лучей – линий, вдоль которых распространяется энергия световых электромагнитных волн. В геометрической оптике не учитываются волновые свойства света и связанные с ним дифракционные явления.

Этот блок основан в основном на материале, который изучался в школьном курсе физики. Однако, поскольку архитектурная подготовка требует навыков работы с светоотражающими материалами и оптическими приборами, то некоторые вопросы вынесены для самостоятельного изучения (повторения).

При изучении данного блока студенты:

- должны знать:
 - основные законы геометрической оптики;
 - способы построения изображения в плоских и сферических зеркалах;
- иметь представление:
 - об устройстве и характеристиках электрических ламп накаливания;
 - об параметрах сферических зеркал (полюс, фокус, радиус кривизны).

Учебная программа блока

Содержание блока	Форма подготовки	Литература
1. Световой климат и его характеристики.	самостоятельная	[1, 9 – 11]
2. Нормирование и проектирование искусственного освещения.	лекция	[1,12,13]
3. Источники искусственного света, характеристики. Использование новейших видов источников света.	лекция	[1,14]
4. Приемы комбинированного и совмещенного освещения.	курсовая работа (творческая)	[1,6,14]

Цели обучения

Студент должен знать	Студент должен уметь
<ul style="list-style-type: none"> – количественные критерии освещения (коэффициент естественного освещенности, геометрический коэффициент естественной освещенности); – световые величины, лучистая энергия, световой поток, сила света, освещенность, яркость; – факторы качества искусственного освещения (ослепленность, направленность света, спектральный состав, пульсация); – способы устранения блескости и светового дискомфорта. 	<ul style="list-style-type: none"> – выполнять световые измерения с помощью люксметра типа Ю-110; – проектировать естественное и искусственное освещение гражданских и производственных зданий различного назначения; – производить расчет освещения по удельной мощности и коэффициенту использования; – объяснять особенности архитектурных сооружений с точки зрения световых законов;

КРАТКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1. Световой климат [1, §4.2]

Совокупность ресурсов природной световой энергии, характерная для того или иного района, получила название *светового климата* данного района.

Основные компоненты естественной освещенности на открытой местности – прямой солнечный свет E_c , рассеянный (диффузный) свет неба E_n и отраженный от земли свет E_3 .

Суммарная (общая) освещенность E_0 в ясный день при полностью открытом горизонте

$$E_0 = E_c + E_n + E_3.$$

Солнечное излучение, падающее на землю, претерпевает изменения вследствие его отражения, рассеяния и поглощения атмосферой и подстилающим слоем земной поверхности.

Световая солнечная постоянная E_e представляет собой освещенность плоскости, расположенной перпендикулярно солнечным лучам и удаленной от Солнца на расстояние, равное астрономической единице. Приближенное значение солнечной световой постоянной на границе атмосферы составляет 135000 – 137000 лк. Соответствующая этой освещенности средняя яркость Солнца $L_c = 2 \cdot 10^9$ кд/м.

Продолжительность солнечного сияния в разных пунктах на территории страны определяется по картам климатических атласов, которые составляются в результате обобщения многолетних измерений, проведенных метеорологическими станциями.

Наружная освещенность от диффузного неба зависит в основном от высоты стояния Солнца и характера облачности. Существенное влияние на освещенность, создаваемую диффузным светом неба, оказывают также прозрачность воздуха и состояние земного покрова. Освещенность от облачного неба определяется фотометрическим, а также расчетным путем по многолетним средним характеристикам солнечной радиации с помощью так называемого светового эквивалента, который выражает отношение между освещенностью и интенсивностью солнечной радиации на данной поверхности.

Световой эквивалент солнечной радиации зависит от высоты стояния Солнца, характера облачности и коэффициента отражения подстилающей поверхности (*альбедо*). Поэтому суммарный световой эквивалент определяется с учетом различных условий облачности для периодов со снежным покровом и без него.

Критической наружной освещенностью $E_{кр}$ называется освещенность, наблюдаемая в моменты выключения (утром) и включения (вечером) искусственного освещения в помещении; она вычисляется по формуле:

$$E_{кр} = E_u / e,$$

где e – нормированное значение КЕО;

E_u – освещенность при искусственном освещении помещения (по СНиП Н-4-79).

Существенную роль при решении таких архитектурных задач, как выбор объемной композиции, пластики фасадов, ритма членений, а также фактуры отделочных материалов, играет контрастность освещения, которая учитывается в ее динамике в течение дня и сезонов года.

В общем случае контрастность освещения выражается отношением:

$$K_0 = \frac{E_c}{E_n + E_z} = \frac{\text{суммарная освещенность}}{\text{Освещенность от неба + освещенность от земли}}$$

Контрастность естественного освещения изменяется в разных районах в зависимости от высоты стояния Солнца, характера облачности и состояния подстилающего слоя земли. Характеристикой контрастности освещения может служить отношение абсолютных величин освещенности, наблюдаемых при солнечном и диффузном освещении.

Удачное взаимодействие света и цвета приводит к ощущению комфорта окружающей среды. Это явление известно как эффект Крюйгоффа – явление восприятия, обуславливающее зону комфортных сочетаний уровней освещенности и цветности излучений. Дискомфортны условия, при которых в осветительных установках применяются либо лампы «холодного» света, создающие низкие значения освещенности, что вызы-

вает неприятное ощущение «сумеречности, пасмурности», либо лампы «теплого» света, используемые в помещениях с очень высоким уровнем освещенности, что приводит к ощущению неестественной оживленности и болезненного возбуждения.

Голландский ученый А. Крюйтгофф построил графики, характеризующие зону благоприятных сочетаний уровней освещенности – от 0,5 до 50000 лк – и цветовой температуры – от 1800 до 10000 K_l (рис. 19). На основании его исследований, имеющих принципиальное значение для решения практических задач, можно сделать следующие выводы: если в двух одинаковых помещениях имеются одинаковые уровни освещенности, например 200 лк, и в одном из них освещение производится лампами накаливания ($T_{цв} = 2854$ К), а в другом – люминесцентными лампами дневного света ($T_{цв} = 6500$ К), то в последнем не может быть создано ощущение комфортного освещения. Из графика видно, что нижний дискомфортный уровень освещенности для ламп накаливания не превышает 100 лк, в то время как для люминесцентных ламп ЛБ ($T_{цв} = 3500$ К) и ЛЕ ($T_{цв} = 4000$ К) он составляет 200 лк, а для ламп ЛДЦ ($T_{цв} = 6000$ К) и ЛД ($T_{цв} = 6500$ К) повышается до 500 лк.

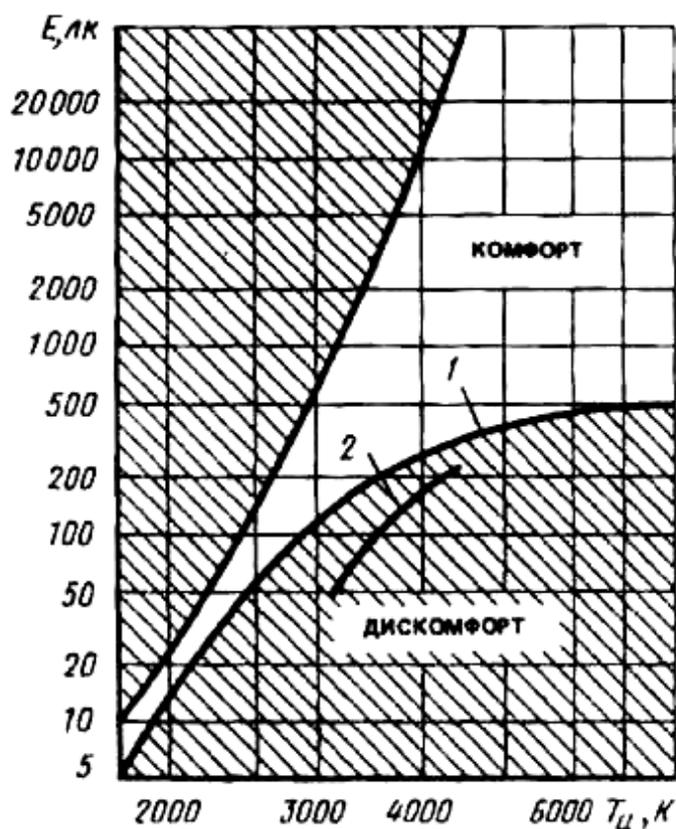


Рис. 19. Зависимость ощущения комфорта от уровня освещенности и цветности излучения источников света по Крюйтгоффу (1) и по Лебедевой (2)

Критерием оценки переменного естественного освещения служит коэффициент естественной освещенности (КЕО), который представляет собой отношение естественной освещенности E_M , создаваемой в точке M на заданной (рабочей) поверхности внутри помещения светом неба (непосредственно или после отражения), к одновременному значению наружной горизонтальной освещенности под открытым небосводом E_H . КЕО выражается в процентах. Участие прямого солнечного света в определении E_M и E_H исключается. Значение КЕО, обозначаемого в формулах как e , находится из выражения:

$$e_n = \frac{E_M}{E_H} 100\%.$$

Наряду с КЕО в расчетах естественного освещения применяется геометрический КЕО, обозначаемый ξ . Он отличается от e тем, что не учитывает влияние остекления и отделки в помещении, а также неравномерной яркости небосвода. Геометрический КЕО определяется по закону проекции телесного угла.

При оценке качественной стороны освещения применяются следующие понятия:

– *прямая блескость*, проявляющаяся при наличии светящихся поверхностей (окон, светильников и др.) в направлениях, близких к направлению зрения;

– *периферическая блескость* от светящихся поверхностей в направлениях, не совпадающих с направлением зрения;

– *отраженная блескость*, вызванная наличием в поле зрения зеркальных отражений от светящихся источников и поверхностей.

Различают два вида блескости: а) *дискомфортную*, связанную с неприятным ощущением, но не всегда ухудшающую видимость; б) *слепящую*, сопровождающуюся резким нарушением видимости.

При падении светового потока Φ на тело часть этого потока отражается от него (Φ_ρ), часть проходит через тело (Φ_τ) и, наконец, часть поглощается телом (Φ_α). На основании закона сохранения энергии имеем:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha.$$

Разделив обе части этого равенства на Φ , получим:

$$I = \rho + \tau + \alpha,$$

где ρ – коэффициент отражения тела; определяется из отношения Φ_ρ/Φ ;
 τ – коэффициент пропускания тела; определяется из отношения Φ_τ/Φ ;
 α – коэффициент поглощения; определяется из отношения Φ_α/Φ .

Усредненные значения коэффициентов ρ , τ и α для некоторых строительных материалов приводятся в табл. 1.

Таблица 5

Значения коэффициентов ρ , τ и α

Материал	Толщина, мм	Коэффициенты, %		
		ρ	τ	α
Листовое оконное стекло	2 – 3	8	90	2
Узорчатое прокатное стекло	3 – 6	20	70	10
Молочное стекло	2 – 3	–	60	–
Матированное стекло	2 – 3	–	65	–
Зеркало посеребренное	3 – 6	85	–	15
Тонкие белые мраморные плиты	8 – 9	55	5	40
Материал с белой окраской	–	80	–	20

Значение КЕО показывает, какую долю составляет освещенность в данной точке M помещения от одновременно измеренной освещенности горизонтальной поверхности на открытом месте при диффузном свете неба.

В основу расчета и моделирования естественного освещения помещений положены два закона.

Закон проекции телесного угла говорит, что освещенность E_m в какой-либо точке поверхности помещения, создаваемая равномерно светящейся поверхностью неба, прямо пропорциональна яркости неба L и площади проекции σ телесного угла, в пределах которого из данной точки виден участок неба, на освещаемую рабочую поверхность. При этом принято три допущения: 1) яркость неба во всех точках одинакова; 2) не учитывается влияние отраженного света; 3) не учитывается остекление светопроема (рис. 20).

Практическое значение этого закона очень велико. Пользуясь им, можно определить относительную световую активность различных светопроемов или сравнивать освещенности, создаваемые одним и тем же светопроемом, расположенным различно относительно рабочей плоскости, а также определять светотеневой рисунок на объемных объектах и деталях под открытым небосводом в пасмурный день.

Другой закон – *закон светотехнического подобия*. Освещенность в точке M помещения создается через окна, обладающие яркостью L_1 и L_2 .

Различная яркость может создаваться, например, применением различных сортов стекла (прозрачного, молочного, контрастного, матированного и т.д.). Однако при различных размерах окон (I и II), но с одинаковым остеклением, освещенность в точке M создается одним и тем же телесным углом с вершиной в этой точке (рис. 21).

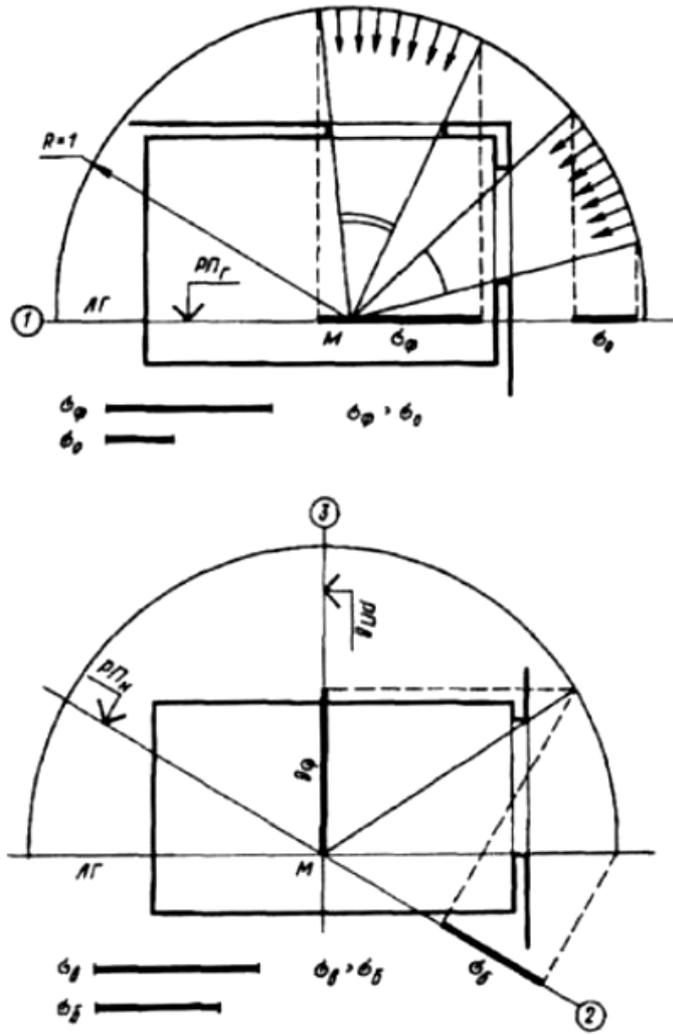


Рис. 20. Определение относительной световой активности светопроемов с помощью закона проекции телесного угла при расположении точки на горизонтальной (1), наклонной (2) и вертикальной (3) плоскостях

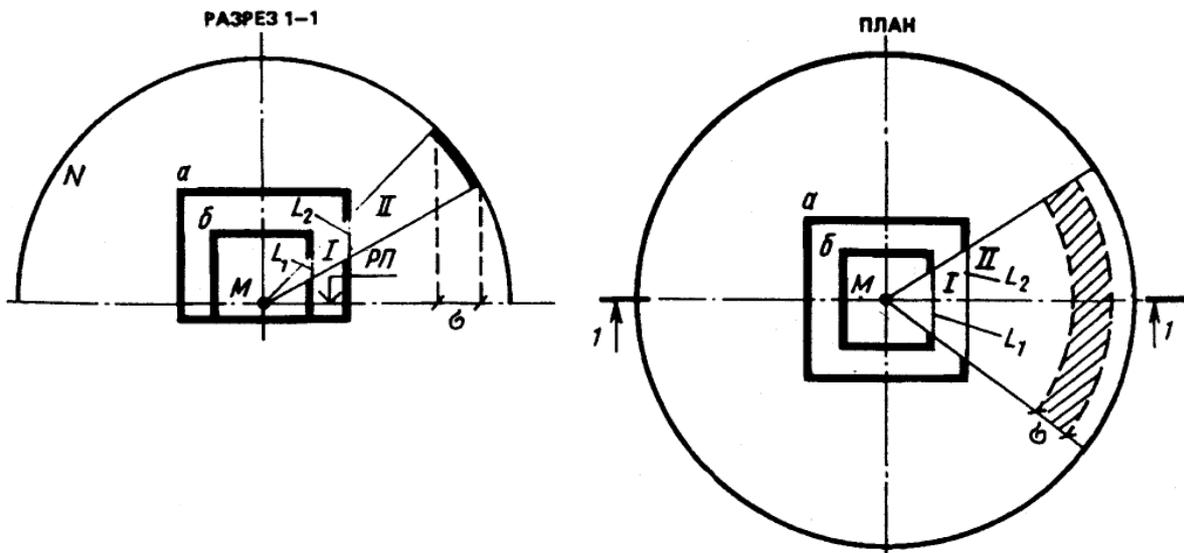


Рис. 21. Схемы к закону светотехнического подобия: Модели помещения в масштабе 1:10 (а) и 1:20 (б) на разрезе I-I и плане (N – условный небосвод)

Из закона проекции телесного угла следует, что освещенность в точке M остается постоянной при условии, если $L_1 = L_2 = L_n = \text{const}$. Следовательно, освещенность в какой-либо точке помещения зависит не от абсолютных, а от относительных размеров помещения.

Большое практическое значение этого закона заключается в том, что он позволяет решать задачи естественного освещения, пользуясь методом моделирования, то есть оценивать условия освещения помещений на моделях. Для этого изготавливаются модели в масштабе не менее чем 1:20. При этом тщательно соблюдаются все геометрические и светотехнические параметры (отделка, пропорции, детали и др.) интерьера.

2. Источники искусственного света и осветительные приборы [1, §4.7, 4.8]

Средства искусственного освещения – источники света и осветительные приборы являются элементами архитектуры и выполняют разнообразные функции. Во многих случаях свет этих источников заменяет или дополняет естественный свет и создает среду, отвечающую высоким требованиям эстетики и комфорта.

Искусственное освещение, не зависящее от времени дня, сезона, погоды, обеспечивает возможность нормальной жизнедеятельности человека в условиях отсутствия или недостатка естественного света. Более того, с помощью искусственного света решается ряд задач, вообще недоступных для естественного освещения.

Существуют две системы искусственного освещения помещений: общее (равномерное или локализованное) и комбинированное, когда общее освещение помещений дополняется местным на рабочих местах.

Нормы промышленного освещения составлены с учетом дифференциации зрительных работ и предусматривают нормирование освещенности при общей и комбинированной системах освещения. Согласно СНиП И-4-79 и 23-05-95 все виды работ разбиты на разряды исходя из размеров объектов различения и расстояния от глаза до объекта, равного 0,5 м, и на подразряды с учетом контраста объекта с фоном и светлоты объекта

По условиям зрительной работы помещения общественных зданий принято классифицировать на 4 группы. К помещениям I группы относятся рабочие помещения с напряженной зрительной работой и фиксированной линией зрения. Это административно-конторские помещения, классы, читальные залы, проектные и конструкторские бюро и другие. Помещения, в которых зрительная задача состоит в различении объекта и обзоре окружаю-

щего пространства, относятся ко II группе (торговые залы магазинов, музеи и выставки, конференц-залы и залы заседаний, спортзалы и т.д.). Помещения, где преобладают архитектурно-художественные требования к световой среде, восприятию пластика, цвета, где обзор окружающего пространства – основная зрительная задача, относятся к III группе. Это зрительные залы, фойе, станции метрополитена, зимние сады, рекреации и т.п. Значительные площади в современных зданиях занимают коридоры, лестничные клетки и другие вспомогательные помещения, относящиеся к помещениям IV группы

Разработка проекта осветительной установки – сложная задача, успешное решение которой предопределяет качество световой среды помещений. Уже на стадии эскизного проекта архитектор должен привлекать к работе светотехника, который раскрывает перед ним возможности новой техники искусственного освещения. Многие вопросы, такие как выбор экономичной системы освещения, эксплуатационных характеристик осветительной установки, рассмотрение нормативных требований и показателей, необходимый светотехнический расчет и другие, относятся к компетенции светотехника. Поэтому только совместная творческая работа архитектора и светотехника является условием полноценной реализации творческого замысла.

3. Нормирование и проектирование искусственного освещения помещений [1 §4.8]

Сводить содержание проектирования освещения к решению лишь функциональной задачи неправильно: такой односторонний подход неизбежно приводит к случайному распределению яркостей, отсутствию органичной связи освещения с архитектурой интерьера. Только на основе гармонии функциональных, психологических и эстетических аспектов формируется световая архитектура интерьера. Трудности ее проектирования заключаются не в расчете числа источников света, а в проектировании и реализации в натуре задуманных в проекте светлотных соотношений, которые и определяют архитектурный световой образ интерьера.

Зависимость между яркостью и светлотой при различной яркости адаптации приведена на рис. 22.

Пользуясь номограммой Гусева – Хорошилова, можно определять светлоты поверхностей (или их соотношения) по заданным значениям яркости поверхностей (или их соотношений) и яркости поля адаптации. Номограмма состоит из четырех шкал. На шкале *I* отложены значения яркости, кд/м, или в том же масштабе отношения яркостей двух поверхностей.

На шкале *II* отложены светлоты или в том же масштабе отношения светлот двух поверхностей. На шкалах *III* и *IV* отложены значения яркостей, к которым адаптируется глаз наблюдателя. На шкалах *I*, *II* и *III* соответствующие значения яркости объекта наблюдения L_i , светлоты объекта B_i и яркости адаптации L_a ложатся на одну прямую. На шкалах *I*, *II* и *IV* на одну прямую ложатся соответствующие значения L_2/L_1 ; B_1/B_2 и L_a .

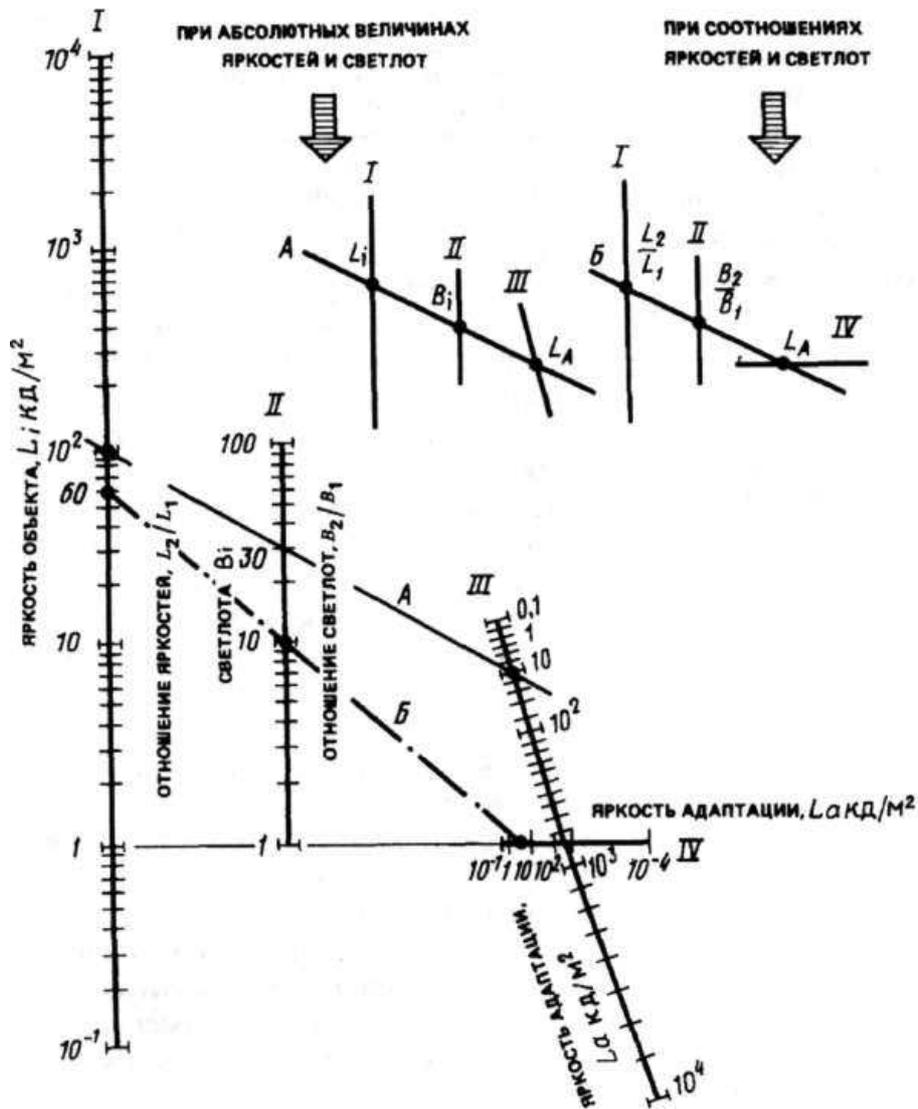


Рис. 22. Номограмма Гусева – Хорошилова, выражающая зависимость между яркостью и светлотой при различной яркости поля адаптации

Примеры пользования номограммой.

1. Задаются яркость адаптации L_a – 10 кд/м² и яркость стены 100 кд/м². Требуется определить светлоту стены. Накладываем линейку на показатель 10 кд/м на шкале *III* и показатель яркости стены на шкале *I* и определяем по шкале *II*, что светлота стены составляет 30 единиц (прямая *A*).

2. Задаются яркость адаптации $L_a - 10$ кд/м² и соотношения светлот поверхностей интерьера $B_2/B_1 - 10:1$. Требуется найти соответствующие соотношения яркостей. Откладываем L_a на шкале *IV* и B_2/B_1 на шкале *II*. Соединяем прямой эти точки и по шкале *I* находим $L_2/L_1 = 60$ (прямая *Б*).

Проектирование освещения интерьера сводится к решению следующих взаимосвязанных задач:

- выбору и распределению светлот в интерьере в соответствии с художественным замыслом архитектора;
- определению допустимых яркостей (окон, фонарей, светильников) и согласованию их с требованиями ограничения блескости и устранения дискомфорта;
- выбору цветового решения интерьера, увязанного со спектральным составом света и общими требованиями к насыщенности помещения светом и цветопередаче;
- выбору направления и соотношения световых потоков для наилучшего восприятия формы, пластики и фактуры отделки интерьера;
- выбору технических средств освещения, удовлетворяющих эстетическим и функциональным требованиям.

При решении задачи освещения интерьера архитектор решает вопрос, что же должно служить основой, прообразом при выборе приема освещения интерьера. Так, ориентиром при проектировании искусственного освещения может быть природное освещение, преобладающее в заданном районе строительства.

Ритмическое расположение на плоскости «размытых» светлых и темных полос придает ей вид волнистой поверхности. Постоянное уменьшение яркости на плоской поверхности может создать иллюзию цилиндрической поверхности. Для устранения этих иллюзий, возникающих при неправильно выбранном приеме освещения, необходимо соблюдение допустимой неравномерности между максимальной и минимальной яркостями плоских деталей.

При освещении помещений отраженным светом с помощью светящихся карнизов неравномерность освещения потолка может вызвать иллюзию его провисания.

При неправильно выбранном приеме освещения в меньшей степени искажается восприятие поверхностей сводов и куполов, широко применяемых, например, в метрополитене, крытых рынках и др. Если такие пространственные формы освещать равномерно, то зрительно такой прием уплощает свод (купол). Для придания своду большой глубины предпочтителен прием освещения, при котором его яркость повышается от перифе-

рии к центру свода. При применении в сводчатых или купольных конструкциях светящихся карнизов наиболее яркими обычно бывают прилегающие к карнизу части свода, а наименее яркими – центральные их части. Это иногда порождает иллюзию уплощения свода.

Наиболее часто встречающиеся в интерьерах архитектурные членения (кессоны, балки, ребра) целесообразно выявлять светоцветовым рисунком, подчеркивающим тектонические качества потолка. Это обеспечивается таким расположением светящего плафона в центре кессона, при котором нижний уровень плафона выше уровня ребер.

Колонны круглого сечения лучше воспринимаются при неравномерном освещении, когда соотношение световых потоков, освещающих колонны с разных сторон, составляет не менее 1:3. Объемность колонн квадратного или прямоугольного сечения может быть подчеркнута различной цветностью освещения смежных поверхностей. Применение направленного освещения колонн (особенно с каннелюрами) в сочетании с рассеянным придает им большую выразительность благодаря возникновению градаций светотени.

Важную роль при восприятии интерьера играет фактура отделочных материалов. Шероховатые плоскости (штукатурка, гранит или мрамор «под бучарду», бетон и др.) кажутся равномерными с любых точек наблюдения; зеркальные плоскости (стекла, металл, пластики) теряют свою форму и выразительность, так как кажутся неравномерными.

Отблески, возникающие на полированных плоскостях, неприятны тем, что выявляют малейшие неровности, обнаруживая все дефекты производства и строительства; они «разрушают» форму, тектонику, пространство. Освещение поверхностей со смешанным или зеркальным отражением требует большого внимания и изобретательности.

Большое значение в восприятии интерьера имеет удачно выбранное соотношение световых потоков, излучаемых в верхнюю и нижнюю зоны полусферы. Оно может служить не только характеристикой светотени, но и способствовать восприятию пространства интерьера.

При отраженном освещении интерьера тени не имеют четких границ и кажется, что они отсутствуют. В эстетическом плане такое распределение света в интерьере может придать ему монотонность, зрительно нарушить его тектонику и пластическую выразительность.

В противоположность отраженному прямое освещение благодаря контрастности способствует лучшему выявлению тектоники и пластики интерьера. Однако при этом приходится заботиться об устранении дискомфорта и резкого контраста между светящимися и глухими поверхностями потолка, а также о создании светотени, придающей выразительность объемным деталям.

Равномерное освещение помещений лишает необходимой выразительности лица зрителей. Поэтому в интерьерах следует разнообразить светлотную композицию включением пятен повышенной яркости, расположенных в определенном ритме на стенах и потолке.

При восприятии интерьера большое значение имеет психологический фактор, проявляющийся, в частности, в том, что мы узнаем знакомые нам предметы по характерным линиям.

Видимость фактуры и текстуры материала оказывает существенное влияние на оценку глубины пространства: когда фактура или текстура поверхности отчетливо видна, у зрителя возникает иллюзия, что поверхность находится на близком от него расстоянии, и наоборот. Это явление наблюдается обычно в диапазоне средних яркостей (определяемых с учетом условий адаптации глаза). Так, например, освещенный потолок кажется нам более удаленным, если его фактура не видна; стоит только применить скользящий свет, выделяющий фактуру поверхности, как эта иллюзия исчезнет. Подобную иллюзию можно наблюдать и при отделке стен.

При формировании световой архитектуры ансамбля интерьеров не следует выделять и обособленно решать световую задачу только центрального помещения. Подобно симфонии, световая архитектура имеет свой лейтмотив, ведущий посетителя к парадному залу здания и связывающий помещения в цельную светодинамическую композицию.

Для этого архитектор намечает порядок возрастания и спада яркостей, используя адаптацию как средство, повышающее восприимчивость к свету и организующее зрительное поведение человека.

Проектирование любой осветительной установки представляет собой творческий процесс. Стремление создать в помещении иллюзию дневного освещения и появление люминесцентных ламп в 60-е годы XX ст. вызвало к жизни новые приемы искусственного освещения: светящиеся потолки, панели, полосы. Применение новых светотехнических изделий, например, металлогалогенных ламп или световодов, дает очередной толчок для поиска оригинальных светокомпозиционных решений.

В современной практике при устройстве светящихся потолков широко распространен прием «светящихся точек». «Светящиеся точки» могут быть выполнены из люминесцентных ламп круглой формы или ламп накаливания. Защитный угол при применении «светящихся точек» с лампами накаливания должен быть не менее 30°. Обращенное в помещение отверстие встроенного светильника часто снабжается кольцевой решеткой. Светящиеся потолки и панели обеспечивают равномерное распределение яркости на рабочих поверхностях.

Переход к трехмерной оценке освещения интерьеров, логически вытекающей из понятия архитектуры, требует применения светопрозраст-вен-

ных понятий и критериев. А. А. Гершун ввел понятие светового поля, для оценки качества которого предложил две величины: скалярную (диффузную) – в виде пространственной освещенности, и направленную – в виде светового вектора. Световой вектор характеризуется максимальной плотностью светового потока в данной точке; направление вектора перпендикулярно плоскости, через которую проходит световой поток наибольшей плотности.

Правильно выбранное соотношение между скалярной и векторной составляющими предопределяет восприятие объемной формы интерьера, пластики архитектурной отделки и лица человека.

Существуют простые способы обнаружения бликов на стадии эскизного проектирования. Определение дискомфортных точек или участков помещения, отделанного материалом с зеркально отражающими свет поверхностями, основано на построении мнимых изображений источников света, при этом объект наблюдения считается зеркалом. На рис. 23 и 24 приведены примеры графического построения бликов в помещениях разного назначения.

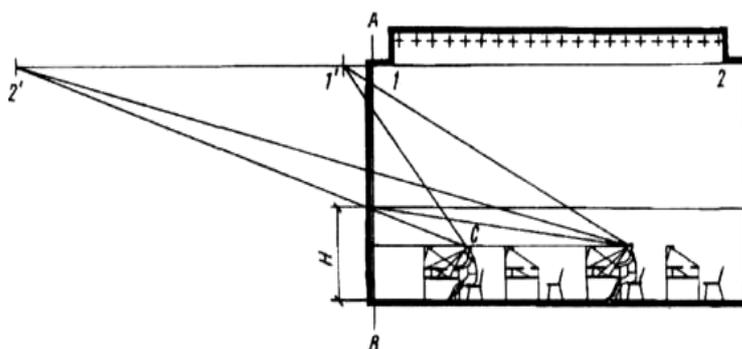


Рис. 23. Определение высоты полированной панели, не дающей бликов в помещении читального зала

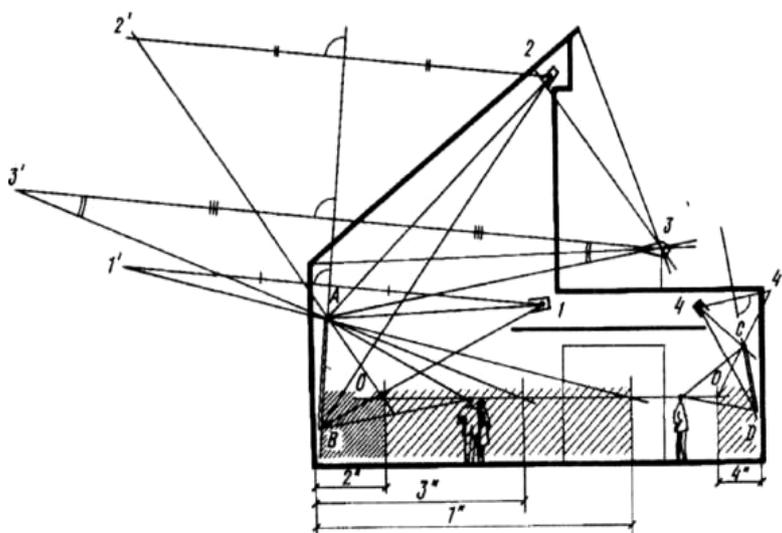


Рис. 24. Определение комфортных и дискомфортных зон наблюдения в зале картинной галереи

Расчет освещенности в точке A на горизонтальной поверхности (рис. 25, a) от точечного источника света производится по формуле:

$$E_2 = \frac{I_\alpha}{H_p^2} \cos^3 \alpha,$$

где I_α – сила света светильника по направлению к точке, в которой определяется освещенность, для этого пользуются кривой распределения силы света светильника;

H_p – расчетная высота подвеса светильника над уровнем горизонтальной плоскости;

α – угол между направлением силы света к расчетной точке и оптической осью светильника.

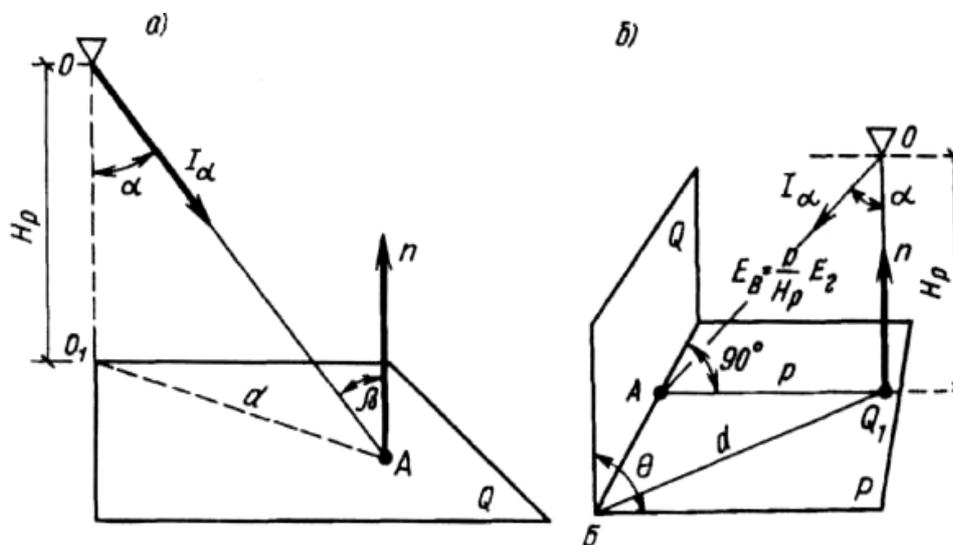


Рис. 25. Схемы к расчету освещенности от точечного источника света на горизонтальной (a) и вертикальной ($б$) поверхностях

Если освещаемая поверхность вертикальна, то ее освещенность от точечного источника света в точках A или B определяется из выражения:

$$E_в = \frac{p}{H_p} E_r,$$

где $E_в$ – вертикальная освещенность;

p и H_p – геометрические параметры, принимаемые по рис. 25, $б$.

Если плоскость падения луча перпендикулярна вертикальной плоскости, то $p = d$.

4. Совмещенное освещение помещений [1, §4.9]

Совмещенное освещение помещений является разновидностью естественного освещения: при его применении сохраняется доминирующая роль естественного света в интерьере. Оно используется как в многоэтажных, так и в одноэтажных промышленных и общественных зданиях, имеющих широкие корпуса и глубокие помещения, и характеризуется постоянным (в течение всего рабочего времени) дополнительным искусственным освещением, которое создается в зонах помещений с недостаточным естественным светом.

Особенность совмещенного освещения состоит в том, что создаваемое в помещениях постоянное дополнительное освещение обеспечивается, как правило, светящими поверхностями (панелями, полосами, нишами и др.), имитирующими окна и фонари естественного света. Яркость этих поверхностей, равно как и спектр, а в наиболее удачных решениях и динамика излучаемого ими света, близки к характеристикам рассеянного света неба, поэтому при совмещенном освещении необходимо применять люминесцентные лампы типа ЛДЦ, ЛД, ЛЕ, ЛЕЦ и т.п., спектральный состав которых близок к спектру естественного света. В некоторых случаях это могут быть маломощные металлогалогенные лампы, а также лампы ДРЛ делюкс в сочетании с лампами накаливания. В качестве светорассеивающего материала применяется, как правило, молочное оргстекло.

Дополнительное искусственное освещение в рабочей зоне должно функционировать в течение всего рабочего времени, то есть и днем. В общем случае дополнительная освещенность, создаваемая источниками искусственного света, определяется по формуле:

$$E_{\partial} = 0,12L_0\langle e\rangle\tau_1,$$

где L_0 – яркость участка неба, видимого через остекление из данной точки помещения;

$\langle e\rangle$ – среднее значение КЕО в рабочей зоне B_2 помещения; это значение КЕО при выбранной отделке интерьера определяет яркость окружающих рабочих поверхностей в этой зоне помещения;

τ_1 – коэффициент светопропускания стекла.

В последние годы значительно возросли требования к качеству световой среды в интерьерах, особенно в зданиях с большой глубиной заложения ($3h$ и более, h – высота перемычки окна над полом). В таких помещениях невозможно создать комфортную световую среду без верхнего естественного света только за счет боковых светопроемов. Более того, при инсоляции таких

помещений создается резкий дискомфорт, который можно ограничить с помощью рациональных солнцезащитных устройств в сочетании с системой совмещенного освещения, что позволяет достигнуть единства функциональных и эстетических качеств световой среды в интерьере.

5. Нормирование и проектирование освещения городов [1, §4.10]

Современный город, как и интерьер, сегодня не мыслится без искусственного освещения. В развитых странах не только все города, но и населенные пункты, и многие загородные магистрали имеют стационарное электрическое освещение.

Необходимость освещения городских пространств и объектов вызвана, прежде всего, функциональными потребностями. Жизнь города с наступлением темноты не прекращается. Часы пик со все более интенсивным транспортным движением и свободное время для большинства горожан приходятся на вечер.

Мероприятия по проектированию световой среды относятся сегодня к области благоустройства городов, поселков и сельских населенных пунктов, а конкретно – к проектированию систем и установок наружного освещения. Их принято подразделять на установки утилитарного (уличного) освещения и установки архитектурного освещения (зданий и сооружений). Такое разделение, обусловленное организацией проектных работ и специализацией проектировщиков, разумеется, условно, так как в реальных условиях параметры световой среды определяются совместным действием всех осветительных установок. Разные группы установок играют различную по значению роль в каждом градостроительном ансамбле: в одних случаях превалирует утилитарное освещение, в других – главным является архитектурное освещение. В конечном счете, любое качественно решенное освещение должно отвечать как функциональным и экологическим, так эстетическим требованиям.

Оба вида установок проектируются на основе норм.

Особую группу составляют установки световой рекламы, информации и сигнализации и освещения витрин. Уровни архитектурного освещения фасадов с диффузным отражением регламентируются средней яркостью, а фасадов зданий, сооружений и памятников с диффузно-направленным отражением – наименьшей средней освещенностью в зависимости от яркости фона (высокая – свыше 5 кд/м, средняя – 1 – 5 кд/м, низкая – менее 1 кд/м соответственно на улицах категорий А, Б и В) и коэффициента отражения материала фасада.

Методически более удобно рассматривать эти две группы установок как установки для освещения городских пространств (или горизонтальной поверхности земли) и установки для освещения объектов (вертикальных поверхностей).

Осветительные установки являются не только носителями света, но и частью материальной структуры ансамблей и объектов. Их форма, размеры, материал, размещение непосредственно связаны с планировкой улиц, площадей и зеленых насаждений, с выбором материала дорожных покрытий, с композицией, масштабом и стилем застройки, с решением пластики и цвета фасадов зданий и сооружений. В техническом отношении установки освещения нередко комбинируются с другими видами инженерного оборудования и благоустройства, с малыми формами. Поэтому важно решать комплекс всех этих вопросов на первых же этапах проектирования. При разработке градостроительных проектов можно выделить две наиболее крупные задачи освещения: зрительное выявление функционально-планировочной структуры и светокомпозиционная организация городского пространства.

Первая задача может быть решена с помощью светоцветового зонирования за счет создания воспринимаемых глазом различий в интенсивности и цветности освещения и рисунке освещаемых зон и территорий, отличающихся по своей функции и градостроительной значимости или по другим признакам. Свет может выявить и такие важные элементы, как основные структуроформирующие системы магистралей, общественных центров и озеленения, а также такие характеристики, как размеры города, плотность застройки и коммуникаций, соотношение старой и новой застройки и т.п.

Решение второй задачи связано с созданием системы световых архитектурных ансамблей в расчете на восприятие их с дальних, средних и ближних дистанций при разной скорости движения пешехода или пассажира. В соответствии с этим должны разрабатываться как крупномасштабные эстетические категории – вечерний силуэт, светопанорамы, глубокие перспективы, так и соразмерные человеку параметры ближайшего окружения. В этой масштабной шкале разное значение приобретают световые доминанты и акценты, контрастные и нюансные сочетания светоцветовых и светопространственных форм, абсолютные и относительные размеры и форма освещаемых участков и объектов, светоцветовая динамика.

Условия восприятия архитектурных объектов с разных расстояний можно охарактеризовать тремя категориями масштаба восприятия: ландшафтный, ансамблевый, камерный.

Широкое применение стекла в архитектуре привело к функционально оправданному и художественно убедительному использованию проходящего через него из интерьеров света и формированию приема светящихся фасадов, с которыми в большой мере связаны представления о современной архитектуре как «архитектуре света» и рождение термина «световая архитектура». Прием придает новые визуальные качества тектоническому облику сооружения за счет выявления невидимых днем внутренней структуры и происходящих в здании процессов. Негативное преобразование фасадов и изменение воспринимаемых размеров и пропорций их элементов также существенно трансформирует облик здания. Поэтому форма, размер и расположение светящихся поверхностей остекления зависят от программирования внутреннего освещения, от наличия специальных затеняющих устройств (жалюзи, шторы, цветное или зеркальное стекло), способных автоматически или по команде создавать на фасаде определенный рисунок.

Прием «световой графики» можно отнести как к системам освещения зданий, так и к световой информации. Этот прием включает, например, контурное освещение, известное как вид праздничного оформления городов, или современные способы группировки светильников, образующих тот или иной светографический рисунок в виде сплошных линий, штрихов, точек и т.п. Сюда относятся и рекламно-информационные установки на зданиях в виде светящихся панно, надписей, знаков и символов, а также знаки сигнализации движения, то есть системы визуальных коммуникаций.

Прием «световой живописи» – это светоцветовые проекции, применяемые пока лишь в системах зрелищного освещения, например для театрализованных представлений «Звук и Свет». Относительная простота и эффективность этого приема не препятствуют его применению и в массовом строительстве. К «световой живописи» можно отнести игру света и цвета на фасадах, облицованных по принципу светящего потолка светорассеивающими панелями или пленками, за которыми спрятаны источники света, способные работать в цветодинамическом режиме.

Нередко для освещения объектов применяется комбинация нескольких приемов.

Естественно, что приемы освещения не исчерпывают всех композиционных средств световой архитектуры. В реальных условиях их палитра включает и все традиционные средства гармонизации архитектурно-пространственной формы – симметрию и асимметрию, пропорции и ритм, контраст и нюансы, единство и соподчиненность светоформ и т.п.

6. Моделирование архитектурного освещения [1, §4.11]

Моделирование – одна из основных категорий теории познания: на идее моделирования по существу базируется любой метод научного исследования – как теоретический, при котором используются различного рода знаковые, абстрактные модели, так и экспериментальный, использующий предметные модели.

В проектировании световой среды как естественной, так и искусственной применяются оба метода. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки и выбирается исходя из поставленных задач и имеющихся возможностей. Выбор наиболее эффективного метода имеет большое значение.

Теоретический метод применяется в архитектурном проектировании освещения городов, ансамблей, интерьеров в виде концептуальных моделей для решения функциональных и художественно-образных задач с использованием определенного набора критериев оценки. Концептуальные модели, излагаемые обычно в пояснительной записке к архитектурному проекту, в процессе его детальной разработки конкретизируются экспериментальным (графическим, макетным) и расчетным (светотехническим) методами.

Светотехнический расчетный метод основан на использовании математических моделей и формул, полученных эмпирическим или аналитическим путем, и применяется для определения выбранных (нормируемых) параметров освещения.

В проектной практике широко распространены табличные способы светотехнического расчета прямого и отраженного света (например, расчет КЕО), которые для стандартных помещений дают хорошие результаты, но для помещений сложной формы трудоемки или недостаточно точны. Этот недостаток светотехнического моделирования успешно преодолевается с помощью ЭВМ, что делает расчетный метод все более перспективным в связи с совершенствованием методик расчета и возможностей ЭВМ, их широким внедрением в практику, то есть получившееся распределение яркостей (или светлот), которым определяются зрительное впечатление и оценка качества освещения объекта. Однако современная техника позволяет преодолеть и этот недостаток: на экране дисплея может быть воспроизведен результат светотехнического расчета в виде яркостного (черно-белого или цветного) перспективного изображения освещаемого объекта, и в этом случае можно говорить о непосредственном переходе от теоретического к экспериментальному методу моделирования.

В архитектурном проектировании освещения экспериментальный метод нашел более широкое применение благодаря определенным преимуществам перед теоретическим, в первую очередь наглядности процесса моделирования и его результата, которым является изображение (плоскостное или объемное), подобное проектируемому объекту по зрительному ощущению. Экспериментальный метод позволяет произвести поиск и сопоставление вариантов светового решения, исследовать, например, правомерность постановки и реализации задачи образной ассоциативности этих вариантов с природными аналогами солнечного и пасмурного освещения или с представлениями о праздничности и будничности, раскрытости и замкнутости, статичности и динамичности световой композиции.

Экспериментальный метод моделирования освещения основан на использовании плоскостных и объемных моделей, а также на их комбинациях. Все плоскостные модели двухмерны, поэтому моделирование третьего, очень важного в реальной действительности измерения – глубины архитектурного пространства – носит иллюзорный, а потому не вполне достоверный характер. Даже в объемных моделях, особенно моделях интерьеров или многоплановых ансамблей, на восприятие глубины пространства, как и других параметров, влияют масштабные искажения, определяемые относительными и абсолютными размерами модели, а также положение наблюдателя в пространстве по отношению к объекту.

Плоскостное моделирование архитектурного освещения может осуществляться графическим или светопроекционным способами.

Моделирование, плоскостное или объемное, в котором основным элементом является управляемый свет, в целом наиболее эффективно с точки зрения достоверности результата и может быть объединено по этому признаку термином «светомоделирование».

Графический способ моделирования освещения наиболее привычен для архитектора. Он применяется в различных вариантах – от условных черно-белых ортогональных изображений на темном фоне до перспектив, выполненных светящимися красками.

Определенным неудобством, ограничивающим применение этого способа, является необходимость выполнять и рассматривать изображение под лампой, излучающей ультрафиолетовый свет, небезопасный для зрения. Преимущество рисунка, исполненного светящимися красками, перед обычным (тушь, акварель, гуашь и т.п.) в том, что диапазон яркостей первого значительно превышает диапазон яркостей второго, ограниченный отражательной способностью самого светлого (бумага, белила, $\rho = 0,8$) и самого темного (черная краска, $\rho = 0,05$) материала.

Поэтому на обычном графическом рисунке освещение решается условно, в первую очередь из-за сложности воспроизведения светящихся элементов; здесь нередко для достижения необходимого эффекта применяются иллюзорные приемы, позаимствованные у живописцев. Однако и в этом ограниченном диапазоне яркостей возможно выразить замысел архитектора в виде светлотной композиции, воспроизводящей соотношение светлот. Критерием подобия в этом случае может служить постоянство отношения светлотных контрастов в натуре и на изображении.

Расширенный диапазон яркостей светящегося рисунка вызывает иллюзию его большего правдоподобия и позволяет непосредственно на нем измерить яркомером величины и распределение яркостей, необходимые для расчета осветительной установки. Этот способ дает хорошие результаты в особенности при моделировании освещения фасадов зданий и панорам, то есть при низких уровнях яркости и значительных расстояниях наблюдения, когда стереоскопическое восприятие глубины пространства понижено и форма воспринимается за счет геометрии изображения и распределения яркостей.

Вариантом плоскостного светомоделирования как результата проведенного на ЭВМ светотехнического расчета является изображение освещаемого объекта на экране дисплея. Возможность обратной связи с компьютером и изменения параметров изображения (величин и распределения яркостей, цветовых характеристик, а также «перемещения» наблюдателя в архитектурном пространстве и связанные с этим изменения перспективы в зрительном кадре) непосредственно по визуальному впечатлению значительно упрощает выбор окончательного решения. В недалеком будущем, с появлением голографического телевизионного изображения, очевидно, будет преодолен недостаток компьютерного светомоделирования, связанный с физическим отсутствием глубинности пространства на телеэкране, и этот способ может стать преобладающим в архитектурном проектировании световой среды.

Все светотехнические макеты можно разбить на три группы.

Первая группа предполагает создание геометрически и светотехнически подобных проектируемому объекту макетов этого объекта и его осветительной установки в случае, если расчетный и графический способы не дали достаточно ясной картины. По существу этот метод является методом масштабного светомоделирования. Изготовление уменьшенных моделей осветительных приборов, например, представляет определенные трудности, поэтому подобный метод применяется в основном для моделирования естественного освещения помещений под искусственным небосводом, а также для моделирования условий инсоляции и солнцезащиты помещений и застройки на установках различного типа.

Ко второй группе можно отнести модели уменьшенного масштаба, создающие изображение, подобное по зрительному ощущению проектируемому объекту. На этих моделях осуществляется, как правило, эмпирический творческий поиск предпочтительного варианта освещения (рис. 26).

Методы объемного и плоскостного моделирования освещения, а также их комбинации по принципу диорамы (предметный первый план и изображенные дальние планы), усиливают иллюзорный эффект многоплановости.

Процесс светомоделирования и предпочтительные варианты могут быть зафиксированы фото-, видео- и киносъемкой, в том числе цветной и стереографической, с разных точек наблюдения.

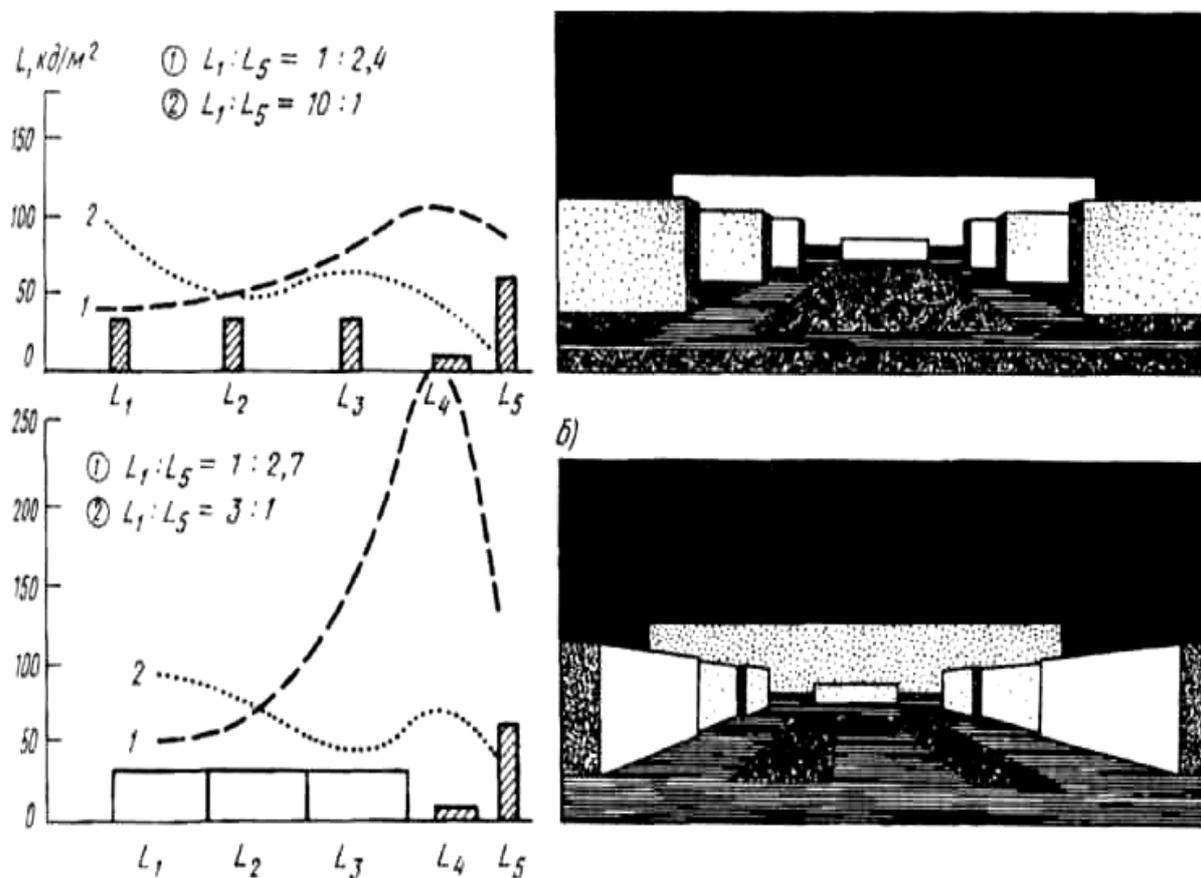


Рис. 26. Установка моделирования световой композиции городской застройки. Статистическое исследование закономерностей зрительной трансформации глубины пространства изменением яркости фасадов зданий при разных приемах планировки в условиях искусственного освещения: а – фронтальная композиция (показан вариант 1 светомоделирования – «укороченное» пространство); б – глубинная композиция (показан вариант 2 – «удлиненное» пространства); 1 – увеличение яркости фасадов по мере их удаления от зрителя (прием яркостной инверсии) ведет к иллюзорному сокращению глубины пространства; 2 – уменьшение яркости удаляющихся фасадов приводит к зрительному увеличению глубины пространства

Метод объемного светомоделирования, помогая решить многие творческие задачи, требует немалых затрат труда и специального оборудования. Если руководствоваться при оценке результатов требованиями строгой науки и светотехническими критериями, то надо отметить, что зрительные впечатления от освещенного макета и освещенного реального объекта не будут тождественны по трем причинам: из-за уменьшенной величины макета, несоответствия восприятия глубины макета и глубины объекта, отсутствия равенства или прямого подобия уровней яркости макета и натуры.

В этом может помочь третья группа светотехнических макетов, к которым относятся модели объектов в натуральную величину (или сами реальные объекты), освещаемые с помощью реальных светильников и источников света. На них проверяется правильность принятого конструктивного и светотехнического решения, оценивается распределение светового потока и яркости, определяется более точное значение КПД отдельных частей осветительной установки, удобство и приемлемость размещения осветительных приборов с точки зрения их обслуживания и размещения в архитектурном ансамбле.

Такой способ моделирования, по существу являющийся частным случаем метода масштабного светомоделирования, целесообразен, например, для исследования и разработки элементов светящихся потолков со сложной конфигурацией отражающих поверхностей и недиффузными покрытиями, для выбора приема освещения скульптур, малых архитектурных форм, зелени или фрагментов пластически сложных фасадов, для отработки программ цветодинамического освещения объектов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛЕКЦИОННЫМ ЗАНЯТИЯМ

Вопросы лекции	Форма обучения	Лит.	Вопросы для самоконтроля
1	2	3	4
1. Световой климат и его характеристики. Виды освещения.		[1, 6, 7]	1. Дайте определение коэффициента естественного освещения (КЕО). 2. Дайте определение геометрического (КЕО). 3. Перечислите функции светового климата и укажите их взаимодействие с архитектурой. 4. Поясните утилитарные функции естественного света (освещенность, яркость неба, контрастность, спектр).

1	2	3	4
2. Количественные и качественные характеристики освещения. Методы расчета освещенности помещений.		[1, 10, 14]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дайте определение коэффициента неравномерности освещения. 2. Что такое прямая блескость? 3. Что такое периферическая блескость? 4. Что такое отражательная блескость?
3. Источники искусственного света и осветительные приборы. Использование новейших видов источников света	лекция самостоятельная	[1, 6, 12]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Перечислите параметры ламп накапливания. Чем объясняется уменьшение светового потока таких ламп в процессе эксплуатации? 2. Газоразрядные источники света и их характеристики. 3. Приведите несколько схем светораспределения светильников. 4. Перечислите типы мобильных светильников и приведите примеры их использования в архитектуре. 5. Опишите принцип карнизного освещения. 6. Приведите несколько схем архитектурно-строительных решений светящихся потоков. 7. Применение светодиодов и световодов в архитектуре.
4. Нормирование и проектирование освещения. Примеры совмещенного и комбинированного освещения.	лекция самостоятельно	[1, 2, 6]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Расчет необходимой мощности источника света в соответствии с нормированной освещенностью. 2. Расчет освещенности на горизонтальной поверхности от точечного источника света. 3. Приведите примеры и архитектурно-строительные решения искусственного освещения (общее, равномерное или локализованное) 4. Рассмотрите несколько приемов освещения интерьеров. 5. Примите метод Данилюка к расчету освещенности интерьера. 6. Как отделить светлоту при помощи номограммы Гусева – Хорошилова? 7. Перечислите последовательность разработки и этапы светотехнического задания.

ГЛОССАРИЙ АРХИТЕКТУРНАЯ СВЕТОТЕХНИКА

ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Излучение – форма существования материи в виде электромагнитного поля. Характерной особенностью излучения является корпускулярно-волновой дуализм.

Фотон – элементарная частица излучения, энергия которой (квант) ϵ равна $h\nu$, где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ν – частота излучения, Гц.

В вакууме фотоны движутся со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света).

Монохроматическое излучение – это совокупность испускаемых источником излучения фотонов, обладающих практически одинаковой частотой.

Сложное излучение – совокупность монохроматических излучений.

Фотометрия – раздел светотехники, в котором рассматриваются измерения энергии, которую переносят электромагнитные световые волны. В архитектурной светологии рассматриваются действия на глаз и другие оптические приборы электромагнитных волн видимого диапазона. Для характеристики этого действия вводятся следующие величины, характеризующие свет с точки зрения переносимой им энергии: световой поток, сила света, освещенность.

Оптическое излучение – электромагнитное излучение с длинами волн примерно от 1 нм до 1 мм, лежащими в области между рентгеновскими лучами и радиоизлучением.

Ультрафиолетовое излучение – оптическое излучение, длины волн монохроматических составляющих которого лежат в пределах от 100 нм до 380 нм.

Видимое излучение (свет) – излучение, которое, попадая на сетчатую оболочку глаза, может вызвать зрительное ощущение (ощущение – превращение энергии внешнего раздражителя в факт сознания). Видимое излучение имеет длины волн монохроматических составляющих в пределах 380 – 780 нм.

Инфракрасное излучение имеет длины волн монохроматических составляющих, большие длин волн видимого излучения (от 780 нм до 1 мм).

Спектр излучения – совокупность монохроматических излучений, входящих в состав сложного излучения. Спектр излучения может описываться графической, аналитической или табличной зависимостями.

Сплошной спектр – спектр, у которого монохроматические составляющие заполняют без разрывов интервал длин волн, в пределах которого происходит излучение.

Полосатый спектр – спектр, монохроматические составляющие которого образуют дискретные группы (полосы), состоящие из множества тесно расположенных монохроматических излучений.

Линейчатый спектр – спектр, состоящий из отдельных, не примыкающих друг к другу монохроматических излучений.

Поток излучения Φ_e – мощность излучения, то есть:

$$\Phi_e = dQ_e / dt; \quad \Phi_e(\lambda, d\lambda) = Q_e(\lambda, d\lambda) / dt,$$

где $Q_e, Q_e(\lambda, d\lambda)$ – энергии сложного и монохроматического излучений, испускаемые за время dt ;

$\Phi_e, \Phi_e(\lambda, d\lambda)$ – потоки сложного и монохроматического излучений, Вт.

Монохроматический поток излучений иногда измеряется также числом квантов в единицу времени.

Спектральная плотность потока излучения характеризует распределения потока излучения по спектру

$$\Phi_{e\lambda} = \Phi_e(\lambda, d\lambda) / d\lambda.$$

Точечный источник излучения – это источник, размеры которого настолько малы по сравнению с расстоянием до приемника, что ими можно пренебречь при расчетах. Такой источник излучает сферические волны.

Телесный угол Ω – часть пространства, ограниченное коническими поверхностями.

Физический приемник излучения – прибор, в котором под действием поглощенного излучения изменяется один из его параметров, поддающихся измерению.

Чувствительность приемника S_n характеризует реакцию приемника на падающий на его приемную поверхность поток излучения.

Световой поток Φ – мощность видимого излучения, которая оценивается по действию этого излучения на нормальный глаз. Иными словами, Φ есть энергия световых электромагнитных волн, переносимая в единицу времени через некоторую площадь поверхности и оцениваемая по зрительному ощущению. Для монохроматического света, соответствующего максимуму спектральной чувствительности глаза ($\lambda = 550$ нм), световой поток равен 683 люменам (лм) если мощность излучения равна одному ватту.

Сила излучения (энергетическая сила света) I – пространственная плотность потока излучения, численно равная отношению потока излучения $d\Phi$ к телесному углу $d\Omega$, в пределах которого поток распространяется и равномерно распределяется:

$$I = d\Phi / d\Omega.$$

Сила излучения определяет пространственную плотность излучения точечного источника, расположенного в вершине телесного угла. За направление I принимают ось телесного угла $d\Omega$, ориентированную углами α и β в продольной и поперечной плоскостях.

Сила света I точечного источника – величина, численно равная световому потоку, который этот источник создает в единичном телесном угле.

Если точечный источник равномерно излучает свет по всем направлениям, то:

$$I = \Phi_{\text{полн}} / 4\pi,$$

где $\Phi_{\text{полн}}$ есть *полный световой поток* источника света, то есть мощность излучения, создаваемая источником по всем направлениям, – энергия света, которая за единицу времени переносится сквозь произвольную замкнутую поверхность, охватывающую источник света.

Фотометрическое тело – часть пространства излучения, характеризует распределение в пространстве потока излучения источника, ограниченного поверхностью, проведенной через концы радиусов-векторов силы излучения.

Кривая силы света источника для данной плоскости сечения – это сечение фотометрического тела плоскостью, проходящей через начало координат и точечный источник. Если фотометрическое тело имеет ось симметрии, источник излучения характеризуют кривую силу света в продольной плоскости.

Светимость (энергетическая светимость, излучательность) – отношение потока излучения, исходящего из рассматриваемого малого участка поверхности, к площади этого участка:

$$M = d\Phi / dA; \quad \langle M \rangle = \Phi / A,$$

где $d\Phi$ и Φ – потоки излучения, испускаемые участком поверхности dA или поверхностью A .

Освещенность E некоторой поверхности – отношение светового потока $\Delta\Phi$, который падает на площадь ΔA поверхности, к величине этой площади:

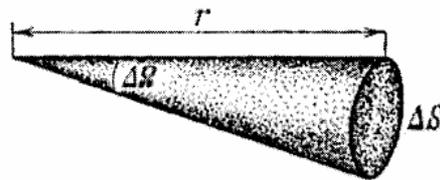
$$E = \Delta\Phi / \Delta A.$$

Освещенность E в каждой точке поверхности, на который падает свет, пропорциональна интенсивности электромагнитной световой волны в этой точке.

Освещенность от точечного источника – это освещенность, которую создает точечный источник с силой света I на поверхности, удаленной на расстояние r от источника, описывается законом:

$$E = I \cos i / r^2,$$

где i – угол падения лучистого потока, отсчитанный от нормали к поверхности.



Энергетическая освещенность – плотность лучистого потока по облучаемой поверхности:

$$E_e = d\Phi_e / dA; \quad \langle E_e \rangle = \Phi_e / A,$$

где $E_e, \langle E_e \rangle$ – соответственно облученность участка поверхности dA и средняя облученность поверхности A .

Энергетическая яркость тела или участка его поверхности в направлении α – отношение силы излучения в направлении α к проекции излучающей поверхности на плоскость, перпендикулярную этому направлению:

$$L_{e\alpha} = dI_{e\alpha} / dA \cos \alpha; \quad \langle L_{e\alpha} \rangle = I_{e\alpha} / \sigma,$$

где $L_{e\alpha}$ и $\langle L \rangle$ – энергетические яркости участка поверхности dA и поверхности A в направлении α , проекции которых на плоскость перпендикулярную этому направлению, соответственно равны $dA \cos \alpha$ и σ ; $dI_{e\alpha}$ и $I_{e\alpha}$ – соответственно силы излучения, испускаемые dA и A в направлении α .

Яркость в направлении α тела или участка его поверхности равна отношению силы света в этом направлении к проекции поверхности:

$$L_\alpha = dI_\alpha / dA \cos \alpha; \quad \langle L_\alpha \rangle = I_\alpha / \sigma,$$

где I_α и $\langle L_\alpha \rangle$ – яркости участка поверхности dA и поверхности A в направлении α , проекции которых на плоскость, перпендикулярную этому направлению, соответственно равны $dA \cos \alpha$ и σ ; dI_α, I_α – соответственно силы света, испускаемые поверхностями dA и A в направлении α .

Яркость
$$L = I / S \cos \varphi,$$

где I – сила света, излучаемого поверхностью;

S – площадь этой поверхности;

φ – угол между направлением распространения света и нормалью к освещаемой поверхности. Величину иногда называют *удельной силой света*.

Преломлением излучения называется изменение его направления при переходе из одной прозрачной среды в другую.

Показатель преломления n среды относительно вакуума называют абсолютным показателем преломления среды. Он равен отношению скоростей распространения света в вакууме c_0 , и в данной среде v : $n = c_0 / v$.

Относительный показатель преломления n_{21} выражается через абсолютные показатели преломления первой и второй сред n_1 и n_2 .

Отражение – возвращение излучения объектом без изменения длин волн составляющих его монохроматических излучений.

Виды отражений:

а) *зеркальное без рассеяния* отраженного потока (лучистого, светового) (рис. 27, а); при зеркальном отражении: 1) падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром к элементу отражающей поверхности в точке падения луча; 2) угол падения луча равен углу его отражения; 3) закон квадратов расстояний для отраженного пучка соблюдается от источника света, а не от отражающей поверхности ($\Delta\Omega_i = \Delta\Omega_p$);

б) *равномерно диффузное*, при котором отраженный поток излучения (световой) рассеивается так, что энергетическая яркость (яркость) во всех направлениях полупространства одинакова (рис. 27, б);

в) *диффузное (смешанное)*, при котором наблюдается частично зеркальное и частично диффузное отражение (рис. 27, в);

г) *направленно-рассеянное*, при котором фотометрическое тело отраженных от участка поверхности сил света можно приближенно описать вытянутым эллипсоидом вращения (рис. 27, г), большая ось которого располагается в направлении зеркального отражения.

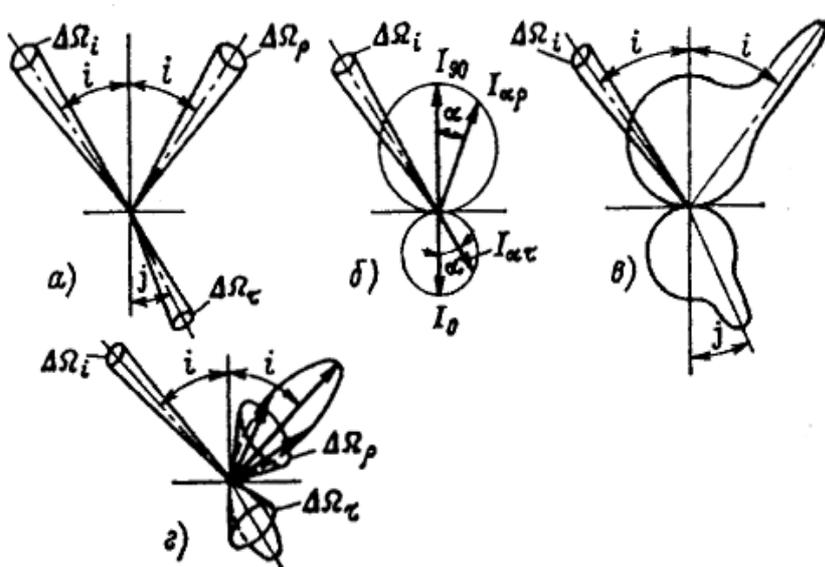


Рис. 27. Виды отражения и пропускания света различными материалами: а – зеркальное; б – равномерно диффузное; в – смешанное диффузное; г – направленно-рассеянное

Полное внутренне отражение – зеркальное отражение света от границы двух сред при падении света из более оптически плотной среды (например, стекла) в менее оптически плотную (воздух). При полном внутреннем отражении угол i превосходит предельный угол i_{np} , определяемый из соотношения $\sin i_{np} = n_{21}$.

Коэффициент яркости – отношение яркости освещенной поверхности к яркости идеального рассеивателя ($\langle L_{ид} \rangle - 1$), находящегося в тех же условиях освещения.

Индикатриса – функция, выражающая зависимость относительных значений фотометрической величины от направления.

Пропускание – прохождение излучения (света) сквозь среду без изменения длин волн составляющих его монохроматических излучений. Наблюдаются следующие виды пропускания: а) направленное без рассеяния; б) равномерно диффузное, при котором прошедший поток излучения (световой) рассеивается так, что энергетическая яркость (яркость) во всех направлениях полупространства одинакова (см. термин «отражение»).

Угол Брюстера (I_B) – угол i , при котором происходит полная поляризация отраженного света.

Световое поле – область пространства, в которой имеет место перенос световой энергии данного источника света (излучения).

Световой вектор E определяет в точке поля значение и направление переноса световой энергии в единицу времени через единицу площади, расположенной перпендикулярно световому вектору.

Модуль светового вектора численно равен максимальной разности освещенности двух сторон площадки, расположенной в данной точке светового поля; проекция этого вектора на любое направление численно равна разности освещенности двух сторон площадки, помещенной в данной точке поля перпендикулярно этому направлению.

Адаптация – приспособление глаза к изменившимся условиям освещения.

Темновая адаптация – приспособление глаза к работе в условиях низких яркостей поля зрения.

Световая адаптация – приспособление глаза к работе в условиях высокой яркости поля зрения.

Зрительная индукция – это действие побочных световых раздражителей, приводящее к усилению или ослаблению эффекта прямого раздражителя.

Вуалирующая пелена – это снижение зрительных функций при повышенной яркости периферии поля зрения по сравнению с яркостью его центральной части.

Коэффициент ослепленности – отношение пороговых разностей яркостей при наличии в поле зрения блёского источника $(\Delta L_{\text{нор}})_s$ и при равномерном распределении яркости в поле зрения $\Delta L_{\text{нор}}$.

Дискомфорт – ощущение неудобства или напряженности, возникающее при неудовлетворительном распределении яркости в освещаемом пространстве. При этом снижение зрительных функций необязательно, нарушаются только условия комфортности зрения, наиболее проявляющиеся со временем.

Зрительная работоспособность – способность выполнять зрительную работу и поддерживать высокую степень мобилизации зрительных функций. Зрительная работоспособность определяет возможность органа зрения совершать какую-либо работу за определенный промежуток времени и влияет на производительность труда и качество работы.

Блеск точечного источника – величина, применяемая при визуальном наблюдении источника света, когда наблюдатель непосредственно рассматривает его с такого достаточно большого расстояния, что источник не имеет заметного кажущегося диаметра. Блеск измеряется освещенностью, которую создает источник в плоскости, находящейся на месте зрителя и перпендикулярной к направлению лучей.

Световая экспозиция (количество освещения):

$$H = E \cdot T,$$

где E – освещенность ($E = \text{const}$);

T – время действия света.

Объемная плотность энергии излучения (лучистой энергии):

$$w = W / V,$$

где W – энергия излучения, равномерно распределенная по объему V .

Интенсивность света (интенсивность излучения) – часто применяемая на практике количественная характеристика света, не имеющая точного определения. Термин интенсивность света применяют вместо терминов световой поток, яркость, освещенность и других в тех случаях, когда несущественно их конкретное содержание, а нужно подчеркнуть лишь большую или меньшую их абсолютную величину. Кроме того, интенсивностью света иногда называют некоторые количественные характеристики мощности излучения, например, энергию излучения, проходящую за единицу времени через поверхность единичной площади. Последнюю величину часто называют интенсивностью излучения.

Оптическая плотность $D = -\lg \tau$,

где τ – коэффициент пропускания;

D – величина безразмерная.

Прозрачность

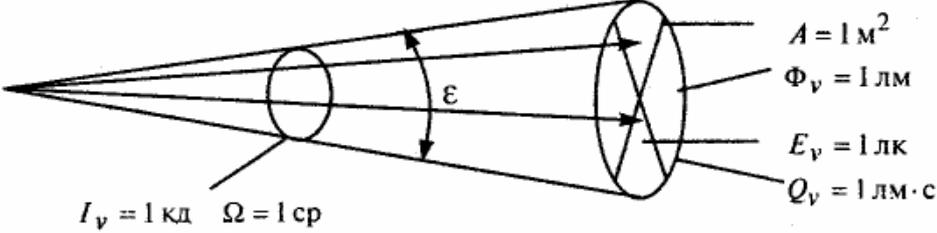
$$\Theta = \Phi_{\text{прош}} / \Phi_{\text{над}},$$

где $\Phi_{\text{прош}}$ – поток излучения, прошедший в веществе без изменения направления путь, равный единице;

$\Phi_{\text{над}}$ – поток излучения, вошедший в вещество в виде параллельного пучка.

Таблица 6

Световые величины и единицы

Величина	Сила света	Яркость	Световой поток	Световая энергия	Освещенность
1	2	3	4	5	6
Единица	Кандела	Кандела на квадр. метр	Люмен	Люмен-секунда	Люкс
Сокращенное обозначение	кд	кд·м ⁻²	лм	лм·с	лк
Определение	Кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частоты 540·10 ¹² Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср	Кандела на квадратный метр – яркость равномерно светящейся плоской поверхности площадью 1 м ² в перпендикулярном ей направлении при силе света 1 кд (этапный излучатель)	Люмен – световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд	Люмен-секунда – испускаемая или получаемая световая энергия в течении 1 с при световом потоке, равном 1 лм	Люкс – освещенность поверхности площадью 1 м ² при равномерно распределенном по ней световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм
Символ	I_v	L_v	Φ_v	Q_v	E_v
Соотношение с другими величинами	Основная величина	$L_v = \frac{I_v}{A}$	$\Phi_v = I_v \Omega$	$Q_v = \Phi_v \tau$	$E_v = \frac{\Phi_v}{A}$
Пояснения	<p>Ω – телесный угол: ε – угол конуса светового потока; индекс v означает «визуальный»</p> 				

МОДУЛЬ 2. АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

ВВЕДЕНИЕ

Звуки постоянно окружают человека. Во многом именно звуки определяют эмоциональное состояние человека – его радость, беспокойство, страх. Звуки являются основой речи и служат средством общения между людьми. Такая форма звуков как шум, вызывает раздражение, затрудняет восприятие речи и музыки, а в ряде случаев приводит к болезням и глухоте.

Архитектор обязан иметь представление о физических и физиологических характеристиках звука, закономерностях его распространения в городских территориях и в помещениях, и способами регулирования звука и шумозащиты. Именно архитектору предстоит решать две противоположные задачи:

- создать условия для наилучшего восприятия речи и музыки;
- всемерно подавить шум.

Раздел архитектурной физики, в котором рассматриваются свойства звуковых волн, закономерности их возбуждения, распространения и действия на встречные препятствия, называются *акустикой*. Звуковые волны с частотами от 16 до $2 \cdot 10^4$ Гц воздействуют на органы слуха человека, вызывают слуховые ощущения и называются слышимыми звуками. Звуковые волны с частотами менее 16 Гц называются *инфразвуками*, а с частотами более 16 до $2 \cdot 10^4$ Гц – *ультразвуками*. Восприятие звука органами слуха зависит от того, какие частоты входят в состав звуковой волны. *Шумами* называются звуки, образующие набор частот, непрерывно заполняющих некоторый интервал (*сплошной спектр частот*). *Музыкальные (тональные) звуки* обладают линейчатым спектром частот. Частоты, входящие в состав музыкальных звуков, образуют ряд дискретных (прерывных) значений. Музыкальным звукам соответствуют периодические или почти периодические колебания.

При изучении данного блока студенты должны:

- иметь представление:
 - о способах описания колебательного и волнового движения;
 - об основных физических характеристиках и свойствах веществ;
- обладать навыками:
 - определения механических характеристик движения (скорости, ускорения, импульса, энергии) по заданному уравнению колебания.

Учебно-методическая структура модуля

Учебный блок «Акустика помещений»	Учебный блок «Шум города»
<ul style="list-style-type: none"> – звук, его характеристики и величины измерения; – время реверберации и его расчеты; – основы геометрической акустики; – акустическое проектирование помещений. 	<ul style="list-style-type: none"> – источники шума и их характеристики; – архитектурно-планировочные меры борьбы с шумом; – звукопоглощение. Ограждающие конструкции; – оценка шумового режима селитебных территорий.

Методическая программа модуля

Тема занятия	Тип занятия	Вид занятия	Часы
1. Звуковые колебания и волны. Основные определения, величины и единицы.	систематизация и формирование новых знаний	самостоятельно	
2. Акустические процессы в закрытых помещениях. Время реверберации и его расчет .	формирование новых знаний	лекция	2
3. Основы геометрической акустики. Требования к звуковому полю помещения.	формирование новых знаний	лекция	2
4. Акустическое проектирование помещения. Акустические недостатки и способы их устранения.	формирование новых знаний	лекция	2
5. Источники шума и их характеристики. Распространение шума в городской среде и способы борьбы с ним..	формирование новых знаний	лекция	2
6. Архитектурно-планировочные меры борьбы с шумом.	формирование новых знаний	лекция	2
7. Экранизирующие сооружения. Их расчет.	формирование новых знаний	лекция	2
8. Оценка шумового режима селитебных территорий. Составление шумовой карты территории.	углубление и систематизация навыков	лекция	2
9. Изучение акустических стоячих волн	формирование новых знаний и углубление знаний	лабораторная работа	
10. Шумовой режим застройки.	Систематизация и формирование новых знаний	лекция, курс. работа	2
11. Акустика помещений.	Систематизация и формирование новых знаний	курсовая работа	

В учебный модуль «Архитектурная акустика» включена лабораторная работа «Изучение акустических стоячих волн» и методические указания к курсовой работе по теме «Шумовой режим застройки».

УЧЕБНЫЙ БЛОК «АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ»

ВВЕДЕНИЕ

Зрительный зал театра или кинотеатра, учебная аудитория или концертный зал имеет всегда только два назначения: в нем надо хорошо видеть происходящее и хорошо слышать. Если отсутствует один из этих факторов, все сооружение теряет смысл.

Акустика зала неразрывно связана с его архитектурой. Размеры зала, форма, отделка поверхностей – элементы, в равной мере влияющие на архитектурный вид и акустические свойства. Очевидно, что только в результате совместной работы архитектора с акустиком можно удовлетворительно решать сложные задачи, связанные с сооружением современного зала.

Учебная программа блока

Содержание блока	Форма подготовки	Литература
1. Звуковые колебания и волны. Основные определения, величины и единицы.	самостоятельно	[1, 4, 15]
2. Время реверберации и его расчет.	лекция	[1, 15, 16]
3. Основы геометрической акустики.	лекция	[4, 5]
4. Акустическое проектирование помещения.	лекция	[15 – 19]
5. Источники шума и их характеристики.	лекция	[6, 16]
6. Архитектурно-планировочные меры борьбы с шумом.	лекция	[20, 21]
7. Звукоизоляционные материалы и экранизирующие сооружения.	лекция	[1, 6]
8. Оценка шумового режима селитебных территорий.	лекция	[1]
9. Изучение акустических стоячих волн.	самостоятельно	
10. Шумовой режим застройки.	лекция	[1, 17, 21]
11. Акустика помещений.	самостоятельно	[15]

Цели обучения

Студент должен знать	Студент должен уметь
– основные акустические величины и единицы измерения;	– рассчитать эквивалентную площадь звукопоглощения поверхности;
– процессы нарастания звукового давления и реверберации в закрытом помещении;	– рассчитать время реверберации для различных залов и вводить необходимые поправки;
– уравнения Сэбина и Эйринга для времени реверберации;	– анализировать структуру первых отражений;
– законы геометрической акустики закрытых помещений;	– геометрически находить место расположения фокуса и звуковой тени
– формулу для расчета разборчивости речи в залах;	– выполнять акустическое проектирование залов
– механизм звукопоглощения (на примере резонатора Гельмгольца);	
– акустические требования к современным зрительным залам и открытым театрам.	

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1. Основные понятия [5,17]

С физической точки зрения звук – это колебательное движение в любой материальной, то есть обладающей упругостью и инерционностью, среде.

Звуковой волной называют процесс распространения колебательного движения в среде.

При распространении звуковой волны следует различать два совершенно разных явления: движение частиц среды в волне и перемещение самой волны в среде. Обычно колебательные скорости частиц среды в несколько тысяч раз меньше скорости звука.

Фронтом звуковой волны называют поверхность, проходящую через частицы среды, совершающие колебания в одной и той же фазе. Направление распространения звука в каждой точке фронта является нормалью к его поверхности. Различают три типа звуковых волн, отличающихся друг от друга формой фронта: *плоские*, имеющие фронт в виде плоскости, нормальной к направлению распространения, *шаровые* с фронтом в виде сферы и *цилиндрические*, форма фронта которых имеет вид боковой поверхности цилиндра.

Звуковые волны, распространяющиеся в воздухе, называют воздушным звуком, а колебания звуковых частот, распространяющиеся в достаточно протяженных твердых телах, – структурным звуком.

Область пространства, в которой наблюдаются эти волны, называется **звуковым полем**. Физическое состояние среды в звуковом поле или, точнее, изменение этого состояния, обусловленное наличием волн, характеризуется обычно звуковым давлением p – разностью между мгновенным значением полного давления и средним давлением, которое наблюдается в среде при отсутствии звукового поля (единица измерения – Н/м). В фазе сжатия звуковое давление положительно, а в фазе разрежения – отрицательно.

Длиной звуковой волны λ называют расстояние, измеренное вдоль распространения звуковой волны между двумя ближайшими точками звукового поля, в которых фаза колебания частиц среды одинакова (измеряется в метрах).

В изотропных средах длина волны связана с частотой f и скоростью звука c простой зависимостью:

$$\lambda = c/f.$$

Любой источник звука может характеризоваться звуковой мощностью P – количеством звуковой энергии в ваттах, излучаемой в единицу времени. Звуковая мощность является основным параметром, характеризующим источник звука или шума.

В качестве основного параметра звукового поля используется звуковая энергия, содержащаяся в единице объема среды. Она называется плотностью звуковой энергии D и связана с звуковым давлением p формулой:

$$D = p^2 / \rho c^2,$$

где ρ – плотность среды;

c – скорость звука в среде.

Плотность звуковой энергии – величина скалярная. Она характеризует энергию звукового поля в случае неопределенного направления звуковых волн (например, в помещениях).

Интенсивность звуковой энергии, распространяющейся через единицу площади звукового поля (перпендикулярно направлению распространения волн в том случае, если поле недиффузно) в единицу времени, различна для различных типов звуковых полей. Для свободного звукового поля, в котором звуковые волны приходят только в одном направлении от источника, интенсивность звука I определяется формулой:

$$I = p^2 / \rho c.$$

Для диффузного звукового поля, которое имеет место в идеальной реверберационной камере, где равновероятен приход звуковых волн из любого направления, общая интенсивность равна нулю. Однако интенсивность звука, проходящего через единицу плоской поверхности только с одной стороны, равна:

$$I = p^2 / 4\rho c,$$

где ρc – акустическое сопротивление среды (импеданс) при температуре 20 °С, равное для воздуха 407 рел ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$).

Значения звукового давления, интенсивности звука и звуковой мощности источников шума могут изменяться в широких пределах, например от $2 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м² для звукового давления, то есть в 10^9 раз.

Уровень интенсивности звука определяют по формуле:

$$L_I = 10 \lg (I / I_0),$$

Интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления. Уровень интенсивности звука можно определить также исходя из величины звукового давления по формуле

$$L_I = 10 \lg (I / I_0) = 10 \lg (p^2 / p_0^2) = 20 \lg (p / p_0) = L.$$

Вычисляемый по этой формуле уровень принято называть уровнем звукового давления. Для того чтобы уровни звукового давления соответствовали уровням интенсивности, нужно в качестве пороговой величины звукового давления принять значение $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$, соответствующее пороговой интенсивности 10^{-12} Вт/м^2 .

Логарифмические единицы уровней являются не абсолютными, а относительными и потому безразмерными единицами. Однако после того как пороговые значения I_0 и p_0 были стандартизованы, определяемые относительно них уровни интенсивности и уровни звукового давления приобрели смысл абсолютных, так как они однозначно определяют соответствующие абсолютные значения интенсивности и звукового давления.

Кроме уровней интенсивности и уровней звукового давления в последние годы широко применяется понятие уровня звуковой мощности источника шума, определяемого по формуле:

$$L_p = 10 \lg(P/P_0).$$

В качестве порогового значения звуковой мощности обычно выбирают $P_0 = 10^{-12} \text{ Вт}$.

Характеристики направленности излучения включают угловое распределение относительных уровней звукового давления или показатель направленности излучения $ПН$.

Неравномерность излучения источника шума в различных направлениях может быть выражена также показателем направленности:

$$ПН = L - \bar{L},$$

где L – уровень звукового давления, измеренный в заданном направлении на фиксированном расстоянии от источника, дБ;

\bar{L} – усредненный по всем направлениям уровень звукового давления на том же фиксированном расстоянии, дБ.

Разложение сложного колебательного процесса на простейшие составляющие называют частотным анализом шума, а величины, характеризующие распределение энергии шума по частотному диапазону, – его частотным спектром.

Частотный спектр обычно представляется в виде распределения уровней (звукового давления, звуковой мощности) по полосам частот. За среднюю частоту полосы обычно принимают среднегеометрическую частоту:

$$f_{cp} = \sqrt{f_1 f_2}$$

Частота f_1 называется нижней граничной частотой полосы спектра, а f_2 – верхней граничной частотой.

В практике измерения шумов и проведения акустических расчетов принято представлять спектры в полосах частот определенной ширины. Полоса частот, у которой отношение $f_2 / f_1 = 2$, называется октавой. Если $f_2 / f_1 = \sqrt[3]{2} = 1,26$, то ширина полосы равна 1/3 октавы. Чаще всего используются спектры шума в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц.

Часто бывает необходимо сложить уровни звукового давления двух или более источников звука или найти средние уровни звукового давления. Такое сложение уровней может быть осуществлено с помощью номограммы, приведенной в указаниях к курсовой работе.

Уровни шума различных источников суммируются последовательно. По разности уровней шума L_1 и L_2 двух источников с помощью номограммы определяется величина Δ в децибелах, которая добавляется к большему уровню L_1 , в результате чего получается суммарный уровень шума двух источников. Считая полученный уровень уровнем шума некоторого эквивалентного источника, его суммируют с уровнем шума третьего источника. Находят уровень шума источника, эквивалентного первым трем, и так далее до тех пор, пока не будет определен общий уровень шума всех источников.

2. Звук и слух [1, §7.2]

Человек воспринимает звук чаще всего посредством органа слуха. Органы слуха, то есть ухо и следующие за ним органы обработки сигнала на пути к мозгу, позволяют человеку воспринимать звуковой процесс в обширной области изменений звукового давления и частоты и различать его по силе, высоте тона и окраске, а также узнавать направление его прихода. Чувствительность этого органа превосходит во многих отношениях свойства лучшей электроакустической аппаратуры.

Порог слышимости, например, лежит так низко, что дальнейшее незначительное его снижение привело бы к восприятию шумов, сопровождающих пищеварение, тепловое движение молекул, а также шумов в системе кровообращения.

Ухо человека состоит из трех основных частей: наружного уха, среднего и внутреннего. Наружное ухо согласовывает импеданс (сопротивление) барабанных перепонок с импедансом воздуха; согласование очень хорошее при частоте колебаний 800 Гц, оставаясь достаточно хорошим и при частотах выше 800 Гц. И только при частотах ниже 400 Гц согласование несколько хуже.

Система кривых равной громкости, принятая в качестве стандартной в международном масштабе, (рис. 28), где показано изменение уровня громкости чистых тонов с частотой при постоянном уровне звукового давления.

Шкала уровней звукового давления в децибелах отложена по оси ординат. Эта шкала введена на основании фундаментального психофизического закона Вебера – Фехнера, который утверждает, что изменение чувствительности при изменении возбуждения обратно пропорционально значению абсолютного возбуждения, имевшему место до начала изменения. Кроме того, эта шкала удобна при большом динамическом диапазоне звуков, воспринимаемых человеком (1:1 000 000).

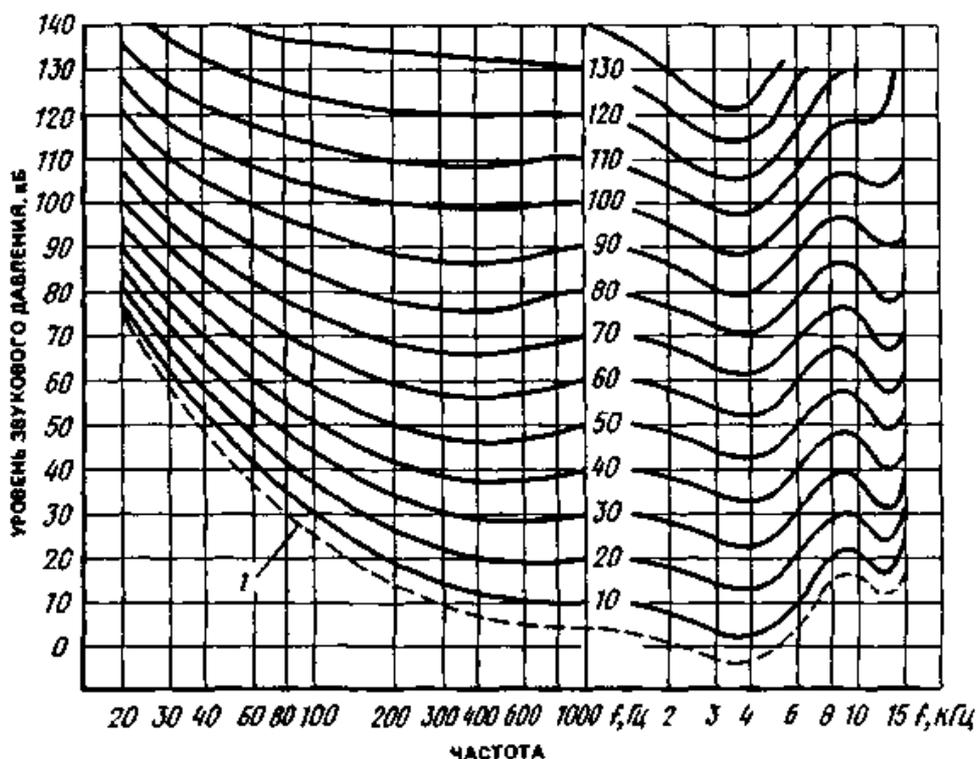


Рис. 28. Кривые равной громкости для чистых тонов:

1 – минимально слышимое поле при обычном бинауральном восприятии

Следует отметить, что если интенсивность звука увеличить так, что слушателю он покажется в 2 раза громче, то повышение уровня звукового давления не будет соответствовать удвоению. В большей части слышимого диапазона в этом случае наблюдается повышение уровня звукового давления примерно на 10 дБ.

Воспринимаемую человеком громкость измеряют в сонах, и двукратное изменение громкости эквивалентно изменению уровня громкости звука на 10 дБ (фон). Эта связь принята в качестве международного стандарта (рис. 29).

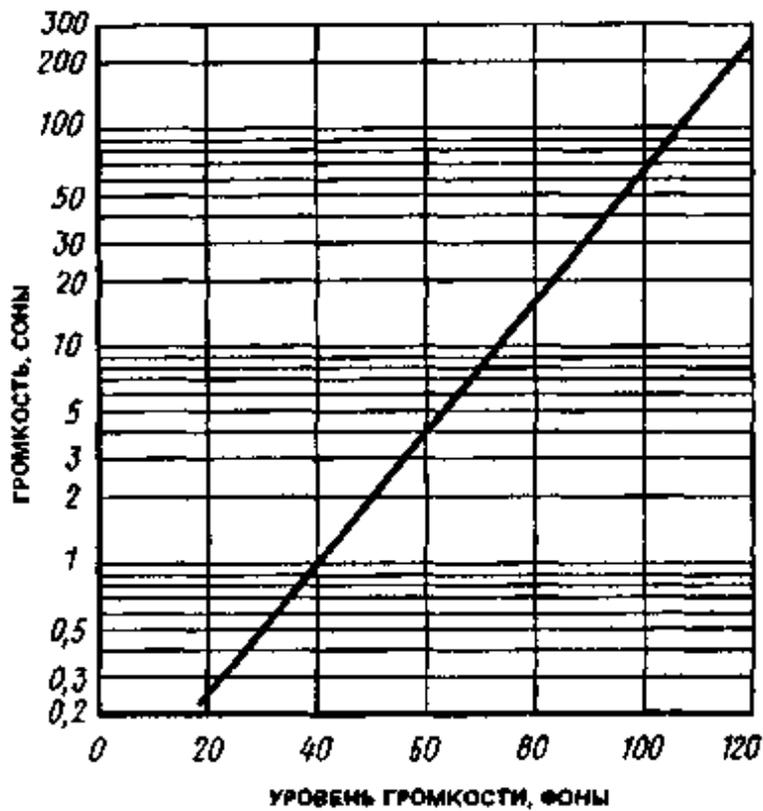


Рис 29. Соотношения между значениями громкости (в соннах) и уровнями громкости (в фонах)

На рис. 30 для наглядности показана частотная область восприятия звука ухом человека.

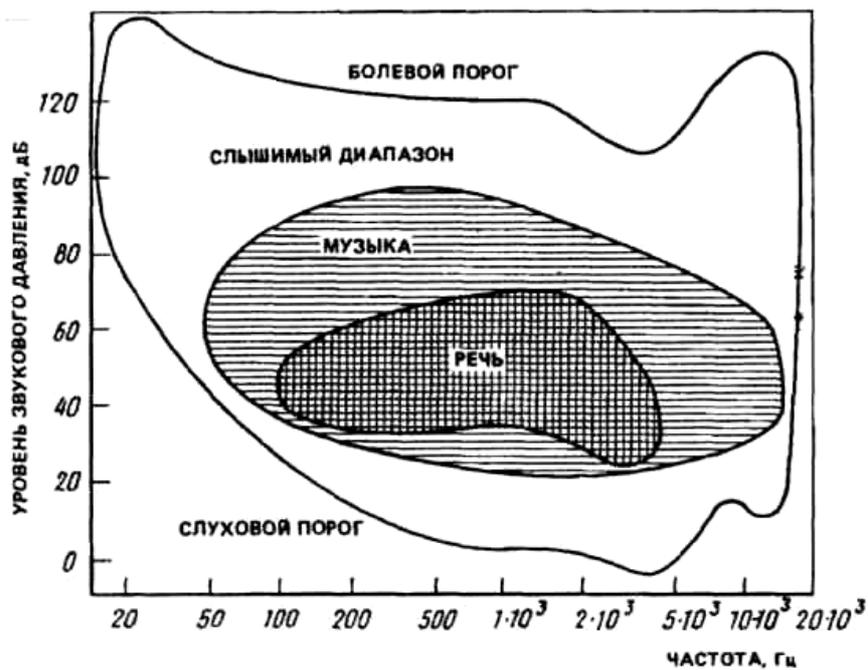


Рис. 30. Области слухового восприятия

Большинство шумов содержит звуки почти всех частот слухового диапазона, но они имеют разное распределение уровней звукового давления по частотам, а также характеризуется изменением их во времени. По характеру спектра шумы подразделяются на широкополосные и тональные. По распределению уровней по частотам шумы могут быть разбиты на низкочастотные – шумы с максимальными уровнями звукового давления в области частот ниже 300 Гц, среднечастотные – шумы с максимальными уровнями звукового давления в области частот 300 – 800 Гц и высокочастотные – шумы с максимумом звукового давления в области частот выше 800 Гц.

По временным характеристикам шумы подразделяются на постоянные, уровень звука которых изменяется во времени не более чем на 5 дБА, и непостоянные, уровень звука которых изменяется во времени более чем на 5 дБА.

К постоянным шумам можно отнести шум постоянно работающих насосных или вентиляционных установок, а также шум постоянно работающего оборудования промышленных предприятий (воздуходувки, компрессорные установки, различные испытательные стенды).

Методы оценки шума зависят в первую очередь от его характера. Постоянный шум оценивается по уровням звукового давления в децибелах (дБ) в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Этот метод оценки постоянного шума является основным.

Для оценки непостоянных шумов, а также для ориентировочной оценки постоянных используют «уровень звука» – общий уровень звукового давления, измеряемый шумомером на частотной коррекции A , характеризующей приближенно частотную характеристику восприятия шума человеческим ухом. Относительная частотная характеристика коррекции A (шкала A) показывает, на сколько децибел на каждой частоте чувствительность уха человека отличается от его чувствительности на частоте 1000 Гц. При проведении измерений на частотной коррекции A (шкала A) уровни на низких частотах уменьшаются по аналогии с уменьшением относительной чувствительности органа слуха, у которого на низких частотах слуховая чувствительность ниже, чем на средних и высоких. Так, при звуке с частотой 63 Гц измеренный уровень по шкале «Лин» с прямолинейной частотной характеристикой будет отличаться от уровня, измеренного по шкале A , на 26,2 дБ.

Непостоянные шумы принято оценивать эквивалентными (по энергии) уровнями звука. Эквивалентный уровень звука $L_{A \text{ экв}}$, дБА, данного непостоянного шума – это уровень звука постоянного широкополосного неимпульсного шума, связанный с изменяющимся уровнем звука непостоянного шума L_A , дБА, соотношением

$$L_{A \text{ экв}} = 10 \lg (1/T) \int_0^T 10^{0,1L} dt,$$

где T – время наблюдения;

t – текущее время, которое соответствует L_A .

В табл. 7 приведены данные о звуковой мощности и уровнях звуковой мощности различных источников шума.

Таблица 7

Шкалы звуковой мощности, уровни звуковой мощности и звуковая мощность источников шума

Звуковая мощность, Вт	Уровень звуковой мощности, дБ	Источник шума	Звуковая мощность источника шума, Вт
10^8	200	Ракета Сатурн	$5 \cdot 10^7$
10^4	160	Самолет с 4 реактивными двигателями	$5 \cdot 10^4$
100	140	Большой оркестр	10
1	120	Клепальный молоток	1
0,01	100	Громкий крик	10^{-3}
10^{-6}	60	Обычная беседа	$20 \cdot 10^{-6}$
10^{-10}	20	Шепот	10^{-9}

3. Основные закономерности распространения звука и шума [1, § 7.3]

а) *Распространение шума в открытом пространстве (свободное звуковое поле) и над поверхностью земли.* Источник звука можно рассматривать как точечный, если его размеры малы по сравнению с расстоянием до приемника звука. К точечным относят многие встречающиеся в практике источники шума, включая промышленные предприятия, самолеты, дорожные экипажи. Такие источники чаще всего излучают сферические звуковые волны.

В свободном звуковом поле звуковая энергия расходится во всех направлениях, и чем дальше от источника шума, тем больше сферическая поверхность, по которой она распределена. Если предположить, что затухание в среде отсутствует, излучаемая источником энергия распределяется

по поверхности сферы радиусом r . Поэтому интенсивность звука равна звуковой мощности источника P , деленной на площадь сферы:

$$I = P / 4\pi r^2.$$

Легко видеть, что интенсивность обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником шума и приемником (точкой наблюдения); таким образом, снижение уровня звукового давления составляет 6 дБ при удвоении расстояния от источника.

Протяженный в одном направлении источник шума, который имеет непрерывное излучение звука, например, трубопровод с турбулентным потоком, или источник шума, который может состоять из большого числа точечных источников шума, расположенных в ряд, например, транспортный поток достаточно большой интенсивности, железнодорожный состав или расположенное в ряд технологическое оборудование в цехе, называется линейным источником. Такие источники обычно излучают цилиндрические звуковые волны.

На рис. 31 показано распространение цилиндрических волновых фронтов от линейного источника, который имеет постоянную звуковую мощность на единицу длины. Энергия, излучаемая линейным источником, распределяется по цилиндрической поверхности (или полуцилиндрической поверхности в случае расположения источника на поверхности земли) радиусом r . Интенсивность звука на расстоянии r равна мощности источника на единичной длине P , деленной на площадь единичной цилиндрической поверхности:

$$I = P / 2\pi r$$

В этом случае интенсивность обратно пропорциональна расстоянию между источником шума и приемником (точкой наблюдения), то есть снижение уровня звукового давления составляет только 3 дБ при удвоении расстояния от источника.

Распространение шума на территории застройки – сложный процесс, характеризующийся такими явлениями, как дивергенция, интерференция, дифракция, рефракция, рассеяние, поглощение звука элементами внешней среды и др. Все эти явления оказывают существенное влияние на звуковое поле застройки и должны учитываться при его расчете. Особого рассмотрения требуют закономерности распространения звуковых волн таких наиболее типичных комплексных источников шума на территории жилой застройки, как транспортные потоки.

В реальных условиях застройки целесообразно использовать эмпирические зависимости, установленные на основе статистической обработки больших массивов результатов натурных исследований распространения шума на примагистральных территориях с типичными покрытиями.

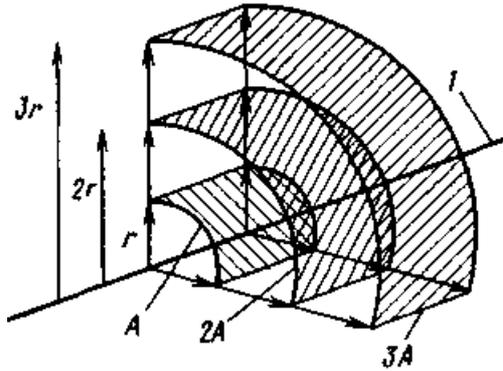


Рис. 31. Распространение звука от линейного источника: 1 – линейный источник мощностью P , деленной на длину. A – площадь

б) *Распространение шума в помещении.* В большинстве случаев источники шума установлены в закрытых помещениях. При излучении шума звуковые волны в помещении распространяются беспрепятственно только до ограждений, затем они многократно отражаются от них. Воздушный объем в помещении под действием прямых волн от источника и волн, отраженных от всех ограждений, приходит в колебательное движение.

С физической точки зрения замкнутый воздушный объем, ограниченный поверхностями, способными в той или иной мере поглощать падающую на них звуковую энергию, представляет собой линейную колебательную систему с определенным спектром собственных частот и с декрементами, характеризующими быстроту затухания каждого из собственных колебаний системы.

Если размеры помещения не слишком малы по сравнению с длиной волны, то собственные частоты располагаются настолько плотно, что любая составляющая спектра источника шума может возбудить целый ряд собственных колебаний объема.

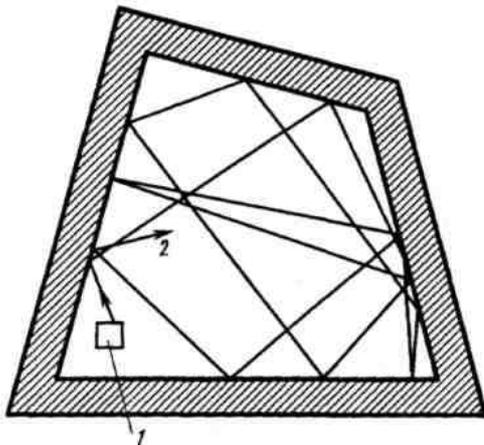


Рис. 32. Образование «диффузности» звукового поля: 1 – источник шума; 2 – путь звука

Основным понятием статистической теории является диффузное звуковое поле, которое характеризуется изотропностью и однородностью (рис. 32).

Первое свойство поля – равенство средних потоков энергии по различным направлениям, второе – равномерное распределение звуковой энергии по объему помещения.

Этот процесс можно охарактеризовать временем реверберации t , в течение которого плотность звуковой энергии уменьшается в 10^6 раз.

Из последней формулы легко найти, что время реверберации T , с, равно:

$$T = \frac{6 \ln 10 \cdot 4V}{cS \ln(1 - \alpha)}$$

Полагая $c = 340$ м/с и вычислив постоянную $6 \ln 10 \cdot 4/c$, можно написать:

$$T = 0,163V / -S \ln(1 - \alpha).$$

Эта формула была впервые выведена Эйрингом. При небольших значениях среднего коэффициента звукопоглощения ($\alpha < 0,2$) ее можно привести к более простому виду – формуле Сэбина:

$$T = 0,163 / \alpha S = 0,163V / A$$

На высоких частотах (выше 2000 Гц) нужно учитывать, что звуковая энергия поглощается не только при отражениях, но и на пути свободного пробега из-за вязкости и теплопроводности воздуха. Более общая формула времени реверберации имеет вид:

$$T = \frac{0,163V}{-S \ln(1 - \alpha) + 4mV},$$

где m – показатель затухания звука в воздухе.

Расчет уровней звукового давления в помещении с источником шума может ориентировочно проводиться по формуле:

$$L = L_p - 10 \lg A + 6,$$

где L_p – уровень звуковой мощности источника шума, дБ.

Эквивалентную площадь звукопоглощения в помещении можно определить, измерив время реверберации в помещении.

Предположение о диффузности звукового поля в закрытых помещениях является идеализированным; в большинстве практических случаев, когда источники шума установлены в обычных помещениях (цехах, стендах испытаний, мастерских и т.п.), звуковое поле не обладает в полной мере свойствами изотропности и однородности.

Плотность звуковой энергии в каждой точке помещения можно разложить на две части: $D = D_1 + D_2$. Первая из них – плотность энергии в прямой волне, приходящей от источника шума в точку приема, а вторая – плотность диффузной энергии, приносимой в эту точку всей совокупностью отраженных от ограждений *звуковых волн*.

Плотность звуковой энергии в помещении складывается из непосредственно излучаемой источником составляющей D_1 которая существовала бы и на открытом воздухе, и плотности энергии D_2 – реверберационного звука, созданного в результате многократного отражения от ограничивающих помещение поверхностей. Суммарная плотность энергии устанавливается по формуле:

$$D_0 = D_1 + D_2 = P / 4\pi r^2 c + 4P / cV,$$

где $V = A / (1 - \alpha / S)$ – постоянная помещения.

Как показывает эта формула, вблизи источника звука мощностью P уровень звука уменьшается на 6 дБ при увеличении расстояния в 2 раза.

Для расстояний, превышающих граничный радиус r_{cp} уровень звука должен был бы оставаться практически постоянным. Однако в реальных условиях часто наблюдается непрерывное уменьшение уровня также и при r , значительно превышающих r_{cp} как сделанное выше предположение о диффузности звукового поля оправдывается лишь в редких случаях и, кроме того, большинство источников излучают несферические волны (рис. 33).

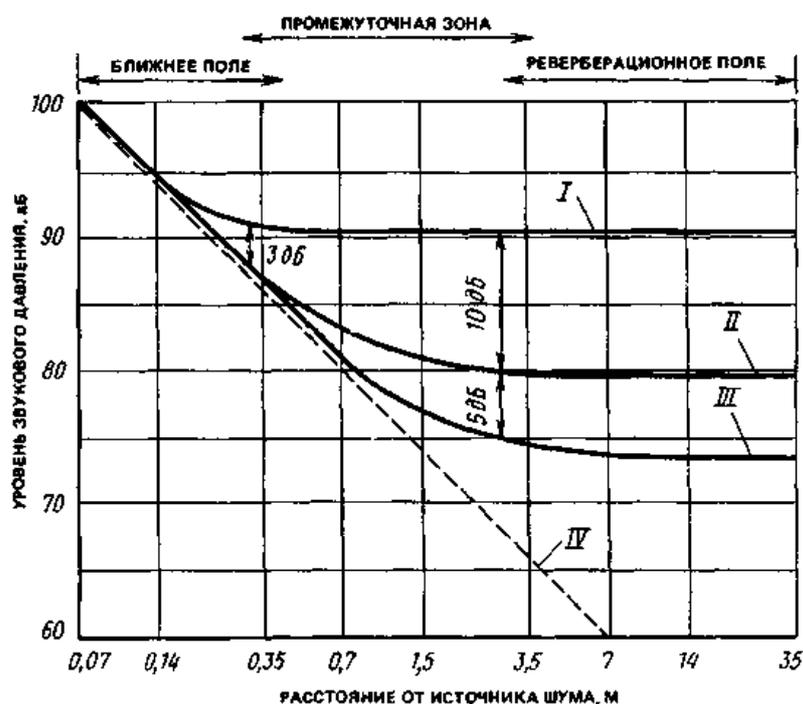


Рис. 33. Снижение шума при увеличении расстояния в реальных помещениях: I – помещение без звукопоглощающей облицовки; II – облицовка на потолке; III – облицовка на стенах и потолке; IV – свободное поле, снижение на 6 дБ при удвоении расстояния

4. Акустические характеристики залов [1, § 9.1, 15]

Акустическое качество зала или открытого театра полностью определяется его архитектурными параметрами: формой, размерами, очертанием и отделкой поверхностей. Правильный с точки зрения акустических требований выбор этих параметров является гарантией хорошей акустики будущего сооружения. Тесная связь архитектурных форм культурно-зрелищных сооружений с акустикой прослеживается на протяжении практически всей истории архитектуры.

Развитие архитектурной акустики как науки оказало весьма существенное влияние на проектирование зальных помещений. Широкое распространение получили формы залов, напоминающие рупор. Ширина таких залов увеличивается по мере удаления от сцены, а потолок формируется таким образом, чтобы большую долю отраженного звука направить на удаленные места. Такие формы с акустической точки зрения оказались более подходящими для многоцелевых залов и залов с речевыми программами (рис. 34, 35).

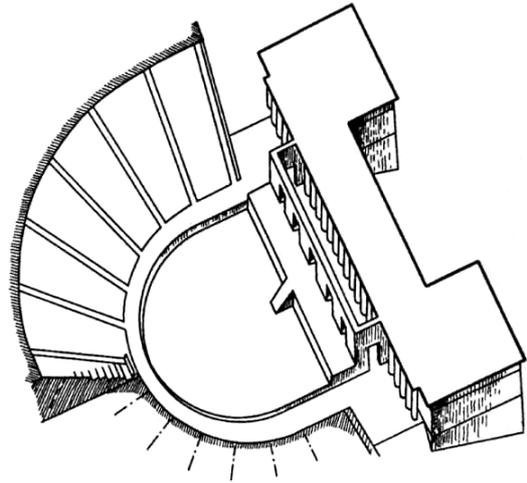


Рис. 34. Греческий театр Диониса в Афинах

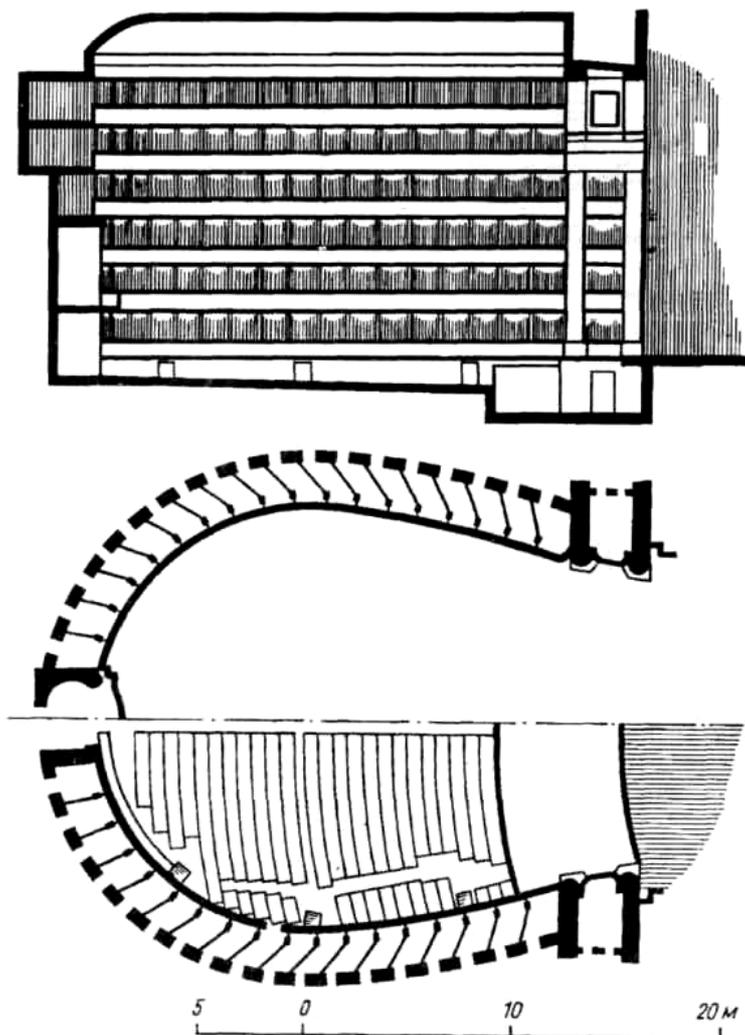


Рис. 35. Зал театра «Ла Скала» в Милане. Продольный разрез и план

На современном этапе развития архитектурной акустики основными акустическими характеристиками залов являются время реверберации, структура звуковых отражений и диффузность звукового поля. Эти характеристики имеют четкую связь как с архитектурно-строительными параметрами зала, так и с субъективной оценкой условий слухового восприятия звуковых программ.

Время реверберации. При условии диффузности звукового поля помещения процессы нарастания и спадания плотности звуковой энергии подчиняются определенным законам. Процесс спадания плотности звуковой энергии, называемый реверберацией, является в этом случае экспоненциальным. При переходе к уровню сигнала (уровню звукового давления) процесс спадания будет прямолинейным и более растянутым во времени, чем процесс нарастания. Для слухового восприятия более существенно изменение уровня сигнала, а не его интенсивности. Поэтому процесс реверберации играет в акустике залов особенно важную роль.

Для количественной оценки реверберации Сэбин еще в конце прошлого столетия предложил использовать время реверберации, которое до сих пор остается одним из важнейших критериев акустического качества закрытого помещения. Не давая достаточной информации об условиях слышимости на отдельных местах зала, время реверберации хорошо характеризует его общую гулкость. За годы развития архитектурной акустики установлены зависимости оптимума реверберации от объема и функционального назначения залов. Ценные свойства времени реверберации – практическая возможность проведения успешного расчета при акустическом проектировании и сравнительная простота измерения. Широкое использование времени реверберации в акустике помещений привело к стандартизации метода измерения этого параметра. Наряду с международным стандартом ИСО 3382-75 во многих странах имеются свои национальные стандарты. В нашей стране измерение времени реверберации также регламентировано стандартом (ГОСТ 24146-90).

Структура звуковых отражений. Время реверберации является общей акустической характеристикой зала. В то же время хорошо известно, что акустические условия в различных зонах зала далеко не одинаковы. Довольно часто залы с одним и тем же временем реверберации имеют совершенно различную акустическую репутацию. Это в первую очередь связано с тем, что начальный участок реверберационного процесса различен в разных точках одного зала и в разных залах. Данный участок, обычно называемый структурой звуковых отражений, определяется уровнями и запаздыванием отражений по отношению к прямому звуку, а также направлением их прихода в точку приема. Помимо взаимного положения источника и приемника

звука структура отражений самым тесным образом связана с размерами зала, а также с очертаниями и отделкой его внутренних поверхностей.

Формирование структуры звуковых отражений показано на рис. 36, а. К расположенному в зале слушателю сначала приходит прямой звук от источника (оратора, артиста). Путь этого звука самый короткий. Затем поступают однократные и многократные отражения от отдельных внутренних поверхностей зала. Время их запаздывания по отношению к прямому звуку определяется разностью путей, пройденных соответствующим отражением и прямым звуком. Разделив эту разность на скорость звука, мы получим время запаздывания отражения. Уровни отражений зависят от длины пройденного пути и от звукоотражающих свойств внутренних поверхностей зала. Чем больше пройденный путь и меньше коэффициент звукоотражения, тем меньше уровень отражения.

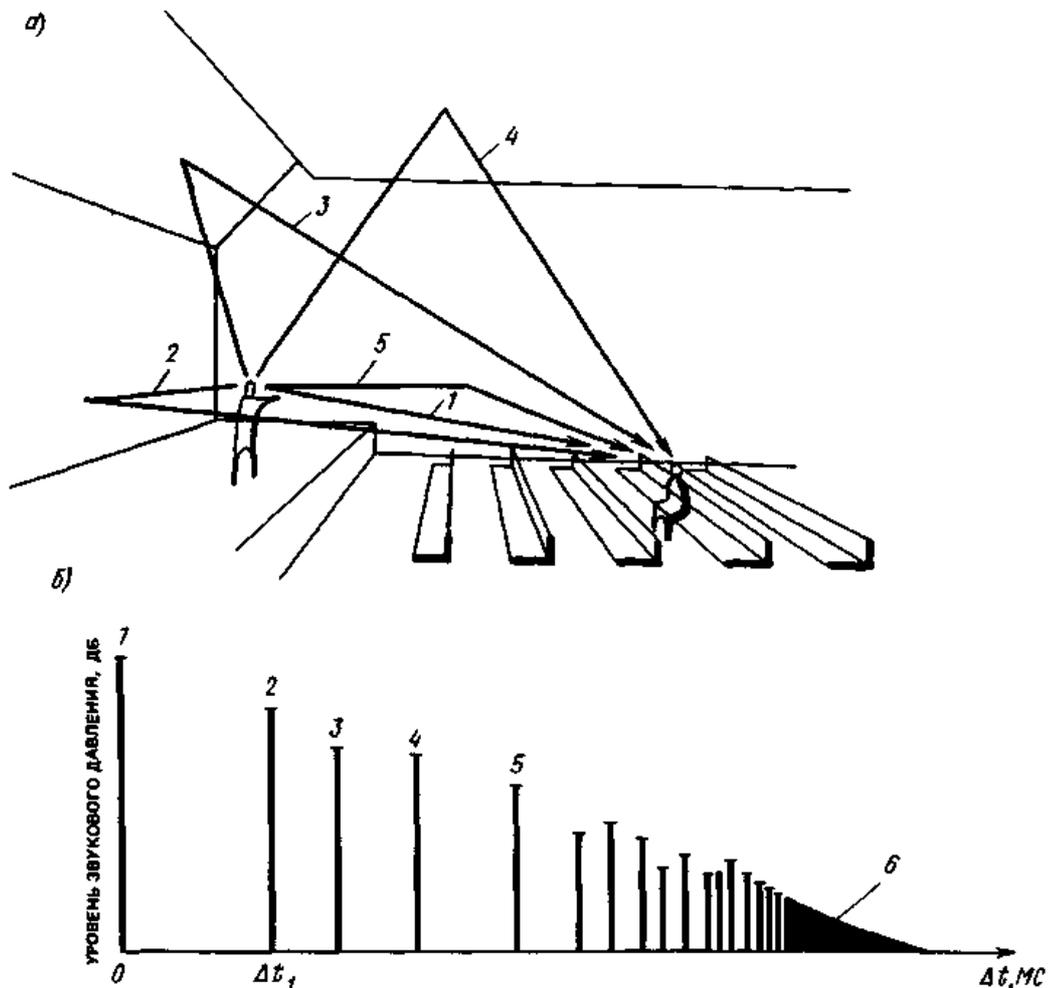


Рис. 36. Формирование структуры звуковых отражений в зале: а – отражение звука от поверхностей зала, б – структура звуковых отражений, 1 – прямой звук, 2 – отражения от передней стены, 3 – отражения от козырька, 4 – отражения от потолка, 5 – отражения от боковой стены, 6 – реверберационный «хвост», 7 – время запаздывания

Большое значение имеет время запаздывания первого отражения Δt_1 , поступающего к слушателю вслед за прямым звуком (рис. 36, б). Этот временной интервал обычно бывает самым значительным, хотя в некоторых случаях бывает велик интервал между последующими отражениями. С течением времени число отражений возрастает, интервал между ними уменьшается и, наконец, они сливаются в так называемый реверберационный «хвост». Этот «хвост» определяет время реверберации зала и является общим для всех его зон.

Диффузность звукового поля. Большое значение в акустике залов имеет понятие «диффузного звукового поля», характеризуемого тем, что во всех точках поля усредненные во времени уровень звукового давления и поток приходящей по любому направлению звуковой энергии постоянны. Постоянство уровня звукового давления называют однородностью поля, а постоянство потока звуковой энергии – изотропностью поля. Диффузное звуковое поле, в котором выполняются эти два условия, представляет собой идеализацию, которую нельзя полностью реализовать в залах. Тем не менее, для создания хорошей акустики важно обеспечить в зале достаточно высокую степень диффузности. Диффузное звуковое поле является, как указывалось, предпосылкой справедливости статистической теории реверберации, в частности экспоненциальности реверберационного процесса.

Слышимость речи. Основной субъективный фактор, определяющий качество передачи речи в помещении, – ее разборчивость. Для определения разборчивости речи применяются так называемые артикуляционные испытания, позволяющие получить разборчивость в процентах. В ходе испытаний в помещении с помощью диктора или фонограммы передается испытательный текст, а слушатели, находящиеся в помещении, записывают этот текст. Отношение правильно записанных на слух фонетических элементов к общему количеству переданных и определяет процент разборчивости.

Применительно к залам с естественной акустикой для оценки и прогнозирования разборчивости наиболее часто используется формула:

$$P_c = 96k_L k_R,$$

где P_c – слоговая разборчивость, %;

k_L – коэффициент, учитывающий влияние уровня речи и шума;

k_R – коэффициент, учитывающий влияние реверберации.

Звучание музыки. В отличие от речевых программ, основу субъективной оценки которых составляет разборчивость речи, оценка качества звучания музыки в зале осуществляется по целому ряду субъективных

критериев. Наиболее распространенными критериями являются реверберация (гулкость зала), ясность, пространственность, громкость и тембр звучания. Между этими критериями и параметрами звукового поля в настоящее время установлены определенные связи.

Гулкость зала – понятие, характеризующее длительность процесса затухания звука на месте прослушивания. Субъективная оценка зависит от вида музыки (органная, симфоническая, камерная) и ее стиля. Основным объективным показателем гулкости помещения является стандартное время реверберации T .

Ясность звучания характеризует разделение звуков отдельных инструментов или групп инструментов как во времени (особенно при быстрых пассажах), так и в звуке одновременно играющих инструментов.

Пространственность звучания – субъективный параметр, характеризующий ощущение закрытого пространства. Это ощущение ранее связывалось со временем реверберации или соотношением энергии ранних и поздних отражений в импульсном отклике. Увеличение времени реверберации или преобладание энергии поздних отражений сопровождается увеличением пространственного впечатления. Более поздние исследования выявили очень важную роль ранних боковых отражений в формировании пространственного впечатления. Было установлено, что ощущение пространства возрастает с увеличением энергии боковых отражений, причем отражения, приходящие по направлению оси уха слушателя, вызывают наибольшее пространственное впечатление. Пространственный эффект не меняется, если запаздывание отражений находится в пределах 8 – 100 мс, а также в том случае, когда небольшое число интенсивных отражений заменяется большим числом слабых отражений, имеющих такую же общую энергию.

Громкость звучания – субъективный критерий, характеризующий громкость источника музыки при игре фортиссимо по отношению к некоторой ожидаемой громкости на месте прослушивания. Субъективное ощущение силы звука (громкость) прямо пропорционально плотности звуковой энергии в стационарном состоянии.

Тембр звучания – понятие, характеризующее восприятие отдельных составляющих спектра звука музыкального источника на месте прослушивания. Речь идет о том, в какой степени свойства помещения изменяют типичный тембр данного источника. Тембр звучания до сих пор связывался только с частотной характеристикой времени реверберации $T(f)$, причем для музыкальных помещений считается весьма желательным подъем $T(f)$ в сторону низких частот.

Более целесообразно использовать для объективной оценки тембра частотную характеристику передачи (ЧХП) звука от источника к точке приема:

$$A(f) = L_i - L_{i0}$$

где L_i – уровень звукового давления в i -й полосе частот;

L_{i0} – опорный уровень звукового давления в i -й полосе частот, определенный путем усреднения по сфере радиусом 1 м, описанной вокруг источника.

Очень важным условием нормального восприятия как речи, так и музыки является отсутствие мешающих акустических факторов, к которым относятся эхо, порхающее эхо, нарушение локализации источника звука, тембровые искажения и шумы.

Эхо. Поздние звуковые отражения при определенных условиях могут вызвать эхо – заметное на слух повторение прямого звука. Заметность эха и его мешающее действие зависят от ряда объективных параметров. Наиболее важными из них являются время запаздывания и интенсивность отражения по отношению к прямому звуку, а также тип звукового сигнала. Взаимосвязь этих трех параметров характеризуют пороги заметности эха

Порхающее эхо. Многократное, или порхающее, эхо представляет собой периодическую последовательность эха. Порхающим обычно считается, по крайней мере, трехкратное эхо. Минимальный временной интервал (период), при котором возникает порхающее эхо, зависит от разницы в уровнях предыдущего и последующего отражений, а также от типа звукового сигнала. Для речи этот интервал близок к 50 мс, а для музыки – к 100 мс. Мешающее действие порхающего эха (как и однократного) уменьшается при наличии промежуточных отражений.

Нарушение локализации источника звука. Правильная локализация источника звука (совпадение зрительного образа со слуховым) особенно важна в речевых помещениях. В концертных залах требование правильной локализации не столь жесткое, некоторое «рассеяние» звукового образа иногда даже желательно. Тем не менее сильное нарушение локализации недопустимо и в этом случае.

Причиной нарушения локализации источника звука является, как правило, значительная концентрация отражений, направление прихода которых отличается от направления прихода прямого звука. При значительном запаздывании эти отражения могут также вызвать эхо. В залах, где эхо или концентрация отражений отсутствуют, нарушения локализации обычно не наблюдается.

Искажение тембра. Искажение первоначального звукового сигнала может возникнуть при наличии порхающего эха, если период последовательности отражений меньше 20 мс (частота более 50 Гц). В этом случае слушатель помимо основного сигнала воспринимает тон, частота которого равна частоте последовательности. Аналогичный эффект наблюдается при отражении звука от поверхностей, имеющих членения с мелким регулярным шагом. Свидетельством тембровых искажений являются также резкие пики и провалы в частотных характеристиках реверберации или звукопередачи.

Мешающие шумы. В условиях эксплуатации шумовой режим залов определяется шумом, создаваемым публикой, и проникающими шумами.

Шум, создаваемый людьми, находящимися внутри зала, не нормируется, так как в основном зависит от их дисциплинированности и физического состояния (например, большое число простуженных в зале) или может быть связан с жестким полом помещения (шорох), наличием жестких старых кресел (скрип), а также с плохой акустикой, вызывающей нервозность слушателей. Обычно уровень шума публики в паузах составляет 40 – 50 дБА.

5. Общие принципы акустического проектирования залов [1, § 9.3]

Акустическое решение вновь проектируемого или реконструируемого зала зависит от его назначения и вместимости. Однако арсенал методов, используемых при акустическом проектировании, является общим для залов различного профиля. В этот арсенал обычно входят требования к основным архитектурно-строительным параметрам зала, а также расчеты времени реверберации и геометрических отражений.

Основные архитектурно-строительные параметры зала. Размеры зала, зависящие от его вместимости и назначения, должны удовлетворять соответствующим нормам. По акустическим соображениям отношение длины зала к его средней ширине следует принимать более 1 и не более 2. В тех же пределах рекомендуется принимать и отношение средней ширины зала к его средней высоте.

Расчет времени реверберации. Оптимальное время реверберации на средних частотах (500 – 1000 Гц) для залов различного назначения в зависимости от их объема показано на рис. 37. Расчет времени реверберации позволяет установить, требуется ли для обеспечения оптимума реверберации в проектируемом зале изменить его объем или отделку. В практике акустического проектирования время реверберации рассчитывается, как правило, по классическим формулам, чаще всего по формуле Эйринга. Эти

формулы, как уже отмечалось, справедливы только тогда, когда звуковое поле зала можно считать достаточно диффузным.

Для расчета времени реверберации зала надо предварительно подсчитать его воздушный объем V , м^3 , общую площадь внутренних поверхностей $S_{\text{общ}}$, м^2 , и общую ЭПЗ (эквивалентную площадь звукопоглощения) $A_{\text{общ}}$, м^2 .

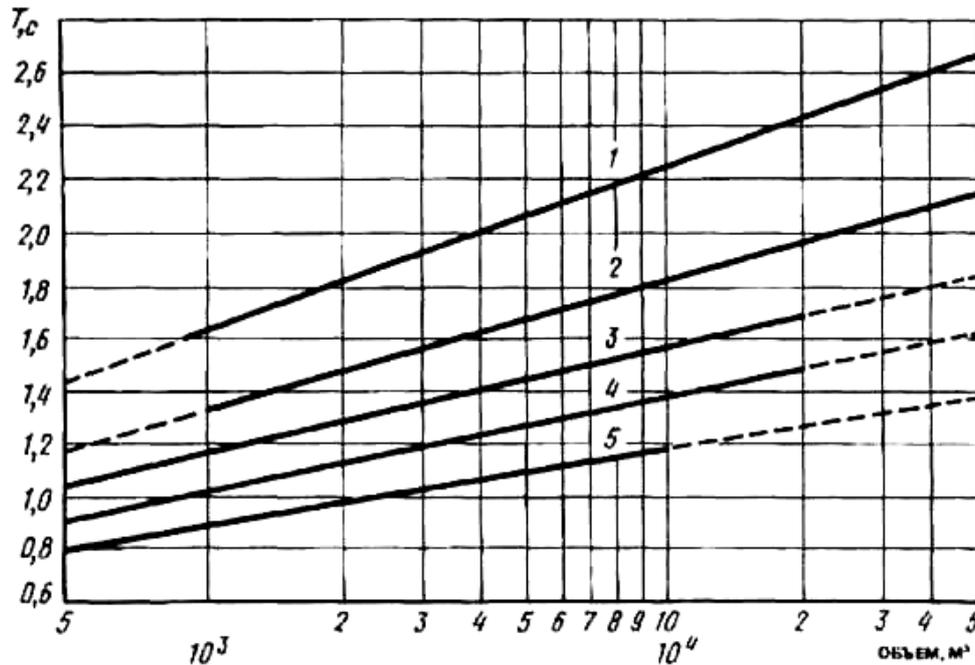


Рис. 37. Зависимость оптимального времени реверберации на средних частотах (500 – 1000 Гц) для залов различного назначения от их объема: 1 – залы для ораторий и органной музыки; 2 – залы для исполнения симфонической музыки; 3 – залы для исполнения камерной музыки, залы оперных театров; 4 – залы многоцелевого назначения, залы музыкально-драматических театров, спортивные залы; 5 – лекционные залы, залы заседаний, залы драматических театров, кинозалы

Расчет геометрических отражений. В инженерной практике расчет геометрических отражений (главным образом первых) является основным способом контроля правильности выбора формы зала и очертаний его внутренних поверхностей. Расчет включает проверку допустимости применения геометрических отражений, их построение, а также определение запаздывания Δt и уровня ΔL отражений по отношению к прямому звуку.

Данные расчета позволяют проанализировать как структуру первых отражений в отдельных точках (зонах) зала, так и распределение этих отражений по всей площади слушательских мест. Расчет геометрических отражений необходим также для оценки опасности возникновения эха и порхающего эха.

При определенных условиях, о которых говорится далее, можно вместо звуковых волн рассматривать звуковые лучи, в направлении которых распространяются эти волны. Распространение таких лучей аналогично распространению световых лучей в геометрической оптике. Построение геометрических (лучевых) отражений широко применяется в архитектурной акустике. Законы геометрического отражения хорошо известны из оптики:

1) падающий и отраженный от какой-либо точки поверхности лучи образуют равные углы (угол падения и угол отражения) с нормалью к отражающей поверхности в этой точке;

2) падающий и отраженный лучи лежат совместно с нормалью в одной плоскости (лучевая плоскость).

Допустимость применения геометрических отражений зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. При этом отражающая поверхность должна быть достаточно жесткой и иметь поверхностную массу не менее 20 кг/м в залах с музыкальными программами и не менее 10 кг/м в залах с речевыми программами. Коэффициент звукопоглощения поверхности для рассматриваемых частот не должен превышать 0,1. На рис. 38 отражающая поверхность взята в виде прямоугольного плоского отражателя со сторонами, равными la и lb . Центр его совпадает с точкой геометрического отражения O , а сторона la параллельна лучевой плоскости P , в которой лежат падающий луч QO , отраженный лучом OM , и нормаль ON ; R_0 – расстояние от источника Q до точки O ; R – расстояние от точки O до точки M ; γ – углы падения и отражения.

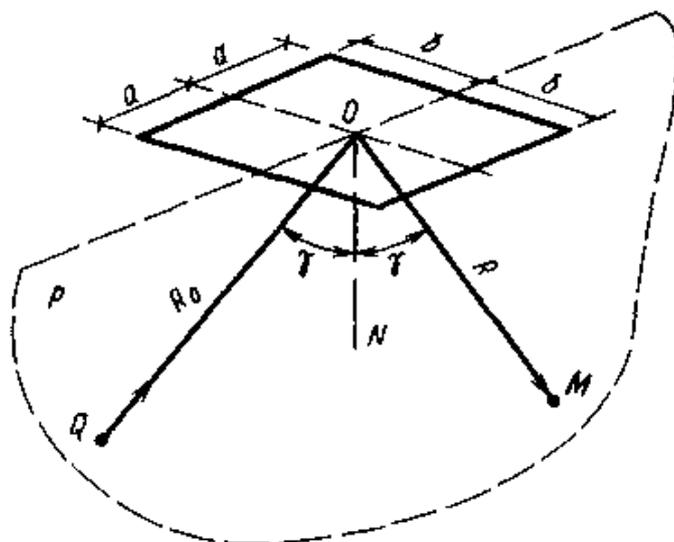


Рис. 38. Отражение звука от прямоугольного отражателя

Если ввести безразмерные величины:

$$\left. \begin{aligned} u &= a \cos \gamma \sqrt{2/\lambda(1/R_0 + 1/R)} \\ v &= b \sqrt{2/\lambda(1/R_0 + 1/R)} \end{aligned} \right\}$$

где λ – длина звуковой волны, то абсолютное отклонение фактического уровня звукового давления в точке приема M от уровня, соответствующего строго геометрическому отражению, не превысит, дБ:

$$\Delta L = 4,4 (1/u + 1/v).$$

Применение геометрических отражений можно считать допустимым, если ΔL не более 5 дБ, а наименьшая сторона отражателя не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны λ .

Поверхности, дающие направление отражения, следует проектировать таким образом, чтобы приведенные выше условия применимости геометрических отражений выполнялись, по крайней мере, для частот, превышающих 300 – 400 Гц (то есть для звуковых волн длиной примерно 1 м и менее). Если условия применимости геометрических отражений выполнены, то их построение допустимо не только от центра отражателя, но и от других точек его поверхности, удаленных от краев отражателя не менее чем на половину длины волны λ . При заданном требовании $\lambda \leq 1$ м это означает, что точки геометрического отражения должны браться не ближе 0,5 м от краев отражающей поверхности.

При построении геометрических отражений от плоскости удобен прием, показанный на рис. 39, 40. Здесь используется мнимый источник Q_1 , симметричный с действительным точечным источником Q по отношению к отражающей плоскости и находящийся по другую ее сторону. Для построения мнимого источника необходимо опустить из точки Q перпендикуляр QA на отражающую плоскость и на продолжении его отложить отрезок AQ_1 , равный отрезку QA . Прямые, проведенные из мнимого источника Q_1 , после пересечения ими отражающей плоскости удовлетворяют условию равенства углов падения и отражения, то есть являются искомыми отраженными лучами, создаваемыми действительным источником Q . Метод мнимых источников применим и при построении отражений от криволинейных поверхностей. Если требуется найти отражение от какой-либо точки O кривой поверхности C при заданном положении источника Q , то следует в точке O построить плоскость T_k , касательную к поверхности C . Мнимый источник в этом случае – точка Q_1 , симметричная источнику относительно касательной плоскости; продолжение OM прямой Q_1O после пересечения ее с поверхностью C является искомым отраженным лучом. Здесь для каждой точки отражающей поверхности приходится находить свой

мнимый источник Q_1 , в отличие от плоскости, у которой для отражения от любой ее точки мнимый источник один и тот же (при заданном положении источника Q).

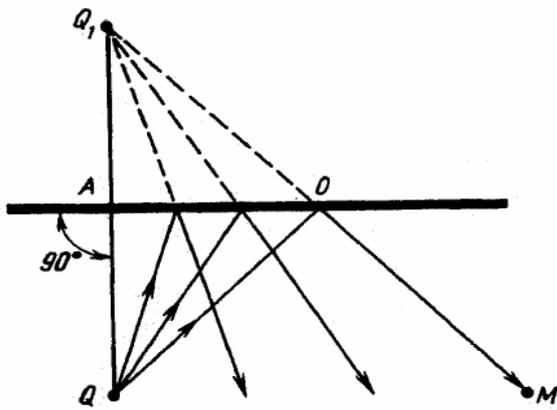


Рис. 39. Построение геометрических отражений от плоскости

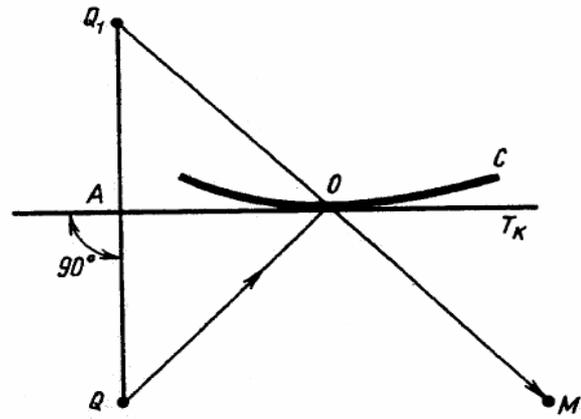


Рис. 40. Построение геометрического отражения от криволинейной поверхности

Рассмотренные приемы построения геометрических отражений относятся к случаям, когда лучевая плоскость параллельна одной из плоскостей проекций (вертикальной или горизонтальной). Не представляет трудности построение отраженного луча в тех случаях, когда лучевая плоскость не параллельна плоскости проекции, но ей параллельна нормаль к отражающей поверхности в точке отражения. Это равносильно тому, что касательная плоскость к отражающей поверхности (в той же точке) перпендикулярна плоскости проекции.

Для примера на рис. 41 дано построение геометрического отражения от отражателя в виде цилиндрической поверхности с произвольной криволинейной направляющей и с образующими, перпендикулярными к вертикальной плоскости проекции. Отражатель помещен над верхним порталом зала. Точечный источник звука задан его проекциями q и q' . Требуется найти геометрическое отражение от некоторой точки отражателя, имеющей проекции a и a' . В данном случае касательная плоскость к поверхности отражателя в этой точке перпендикулярна вертикальной плоскости проекции; вертикальная проекция этой касательной плоскости есть прямая $t't'$. Прямые $q'a$ и qa являются вертикальной и горизонтальной проекциями луча, исходящего из источника и достигающего точки отражения.

Вертикальную проекцию мнимого источника q'_1 находим, опустив из точки q' перпендикуляр $q'O'$ на прямую $t't'$ и отложив на его продолжении отрезок Oq'_1 , равный отрезку $q'O'$. Снося точку q'_1 на горизонтальную прямую, проходящую через точку q , находим горизонтальную проекцию мнимого источника q_1 . Продолжения прямых q_1a и q_1a' , лежащие вправо от

точек a' и a , являются соответственно вертикальной и горизонтальной проекциями отраженного луча.

Вертикальная проекция отраженного луча пересекает в точке e' поверхность слушательских мест, проходящую на 1,2 м выше пола зала. Снося точку e' на горизонтальную проекцию отраженного луча, находим горизонтальную проекцию e точки пересечения отраженного луча с поверхностью мест. Длина ломаной линии, имеющей проекции qae и $q'a'e'$, равна полному пути отраженного звука от источника до точки приема с проекциями e и e' . Эта длина равна расстоянию от мнимого источника до точки приема. Прямая с проекциями qe и $q'e'$ дает путь прямого звука. Как видно из рис. 41, длина пути отраженного звука (от источника до точки приема)

$$L_{omp} = \sqrt{\langle q_1e \rangle^2 + \langle f'q_1 \rangle^2},$$

где f' – точка пересечения горизонтальной прямой, проведенной через точку e' , с вертикальной прямой q_1q_1 .

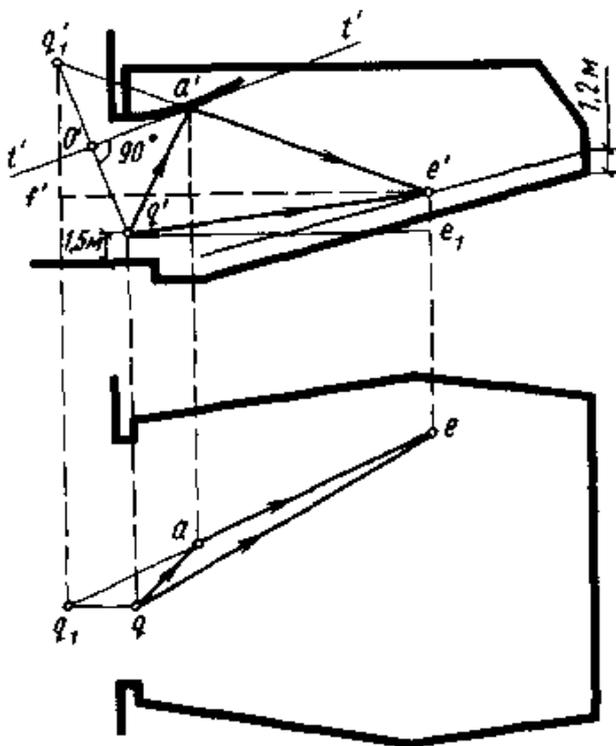


Рис. 41. Построение геометрического отражения при касательной плоскости, перпендикулярной к плоскости проекций

При отражении от выпуклой поверхности $\kappa < 1$, при отражении от вогнутой $\kappa > 1$, а при отражении от плоской $\kappa = 1$. Для расчета коэффициента κ в случае выпуклой или вогнутой отражающей поверхности может быть использован довольно простой прием. Путем графических построений выделяется (в зоне слушательских мест) площадь S , которую рассматриваемая криволинейная поверхность обеспечивает первыми отражениями и на которой находится наша расчетная точка (точка приема). Затем определяется площадь S_0 из условия, что рассматриваемая отражающая поверхность является при тех же ее размерах плоской. Отношение S_0/S и дает нам коэффициент κ .

Изменение геометрии вогнутой поверхности означает в основном изменение расположения центра ее кривизны по отношению к положению источника звука. В литературе обычно рекомендуется располагать центр

кривизны вогнутой поверхности на расстоянии от нее, превышающем, по крайней мере, в 2 раза расстояние от поверхности до источника звука

Ослабления концентрации отраженного звука можно также добиться путем использования звукопоглощающей отделки вогнутой поверхности. Однако применение звукопоглотителя может оказаться нежелательным, если оно приводит к уменьшению времени реверберации помещения по сравнению с оптимальным (рис. 42, 43).

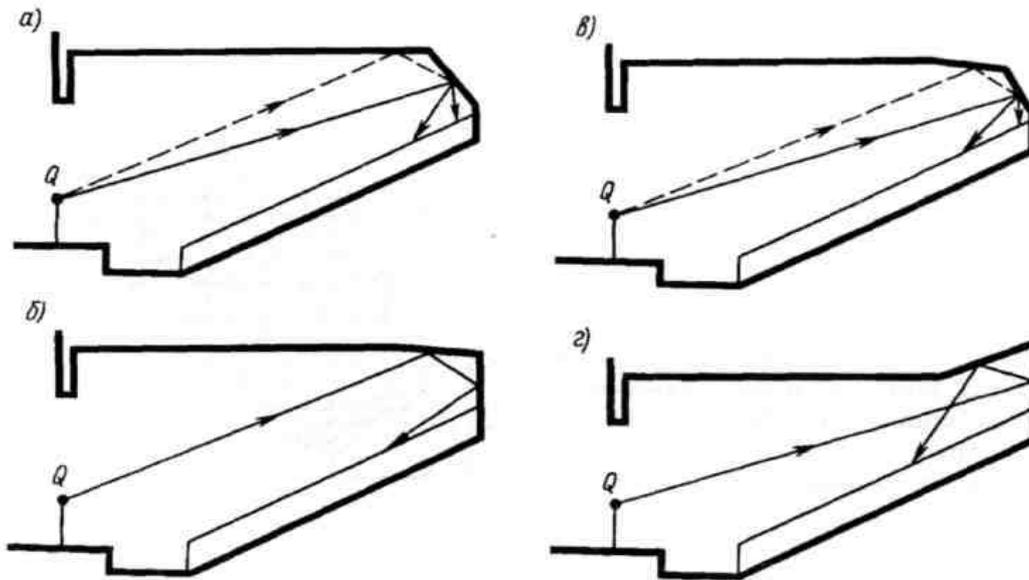


Рис. 42. Рациональные типы примыкания потолка к задней стене: *а* – наклон задней стены; *б* – наклон примыкающего к стене участка потолка; *в* – наклон участка потолка и задней стены; *г* – острый угол между потолком и задней стеной

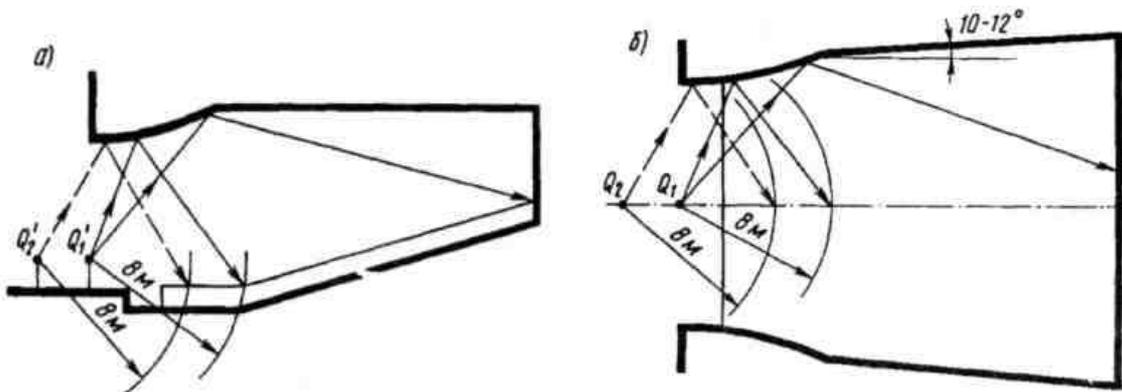


Рис. 43. Звукоотражающие поверхности в передней части потолка и боковых стен: *а* – продольный разрез; *б* – план

Достаточно эффективным средством ослабления концентрации является членение вогнутой поверхности. Выбирая членения, необходимо учитывать, что хорошо рассеиваются звуковые волны, длина которых близка к размерам детали. Особенно пригодны для этой цели элементы с криволинейным выпуклым сечением, которые рассеивают также и более короткие волны.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛЕКЦИОННЫМ ЗАНЯТИЯМ

Вопросы лекции	Форма обучения	Лит.	Вопросы для самоконтроля
1. Источники шума и его характеристики	лекция	[1, 5, 6]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Приведите примеры шума различной длительности с различным диапазоном спектра. 2. Как вычислить уровень звукового давления на заданном расстоянии от точечного и линейного источника. 3. Как пользоваться графическим методом сравнения расчетных и допустимых уравнений звукового давления? 4. Перечислите последовательность при оценке шума.
2. Архитектурно-планировочные меры борьбы с шумом.	лекция	[1, 18, 21]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Перечислите зоны города по степени шумности 2. Как вычислить снижение уровня звукового давления в полосе зеленых насаждений? 3. Что такое звуковая тень? 4. Как связаны размеры звуковой тени с длиной звуковой волны?
3. Звукоизоляция. Ограждающие конструкции.	лекция	[1, 5, 6]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Особенности звукоизоляции от воздушного, ударного и структурного звука. 2. Что такое показатель изоляции? Проанализируйте его значение для различных типов зданий и ограждающих конструкций. 3. Расскажите порядок проведения расчета изоляции от воздушного шума.
4. Оценка шумового режима селитебных территорий.	лекция	[1, 20, 21]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Объясните последовательность расчета эквивалентного уровня шума от транспортного потока с помощью номограммы. 2. Перечислите последовательность расчета снижения уровня звука экранами бесконечной длины. 3. Приведите примеры архитектурно-проектировочных мероприятия по шумозащите.

УЧЕБНЫЙ БЛОК «ШУМ ГОРОДА»

ВВЕДЕНИЕ

Распространение шума в городской застройке представляет собой комплексную физическую картину, складывающуюся из снижения уровней звука в свободном неограниченном и ограниченном пространстве (разрывы между зданиями), а также за экранирующими препятствиями, которыми являются здания. Для представления этой картины зашумления пространства архитектор обязан владеть различными методами оценки шумового режима на городских территориях. В настоящее время зашумленность городов является одним из наиболее неблагоприятных факторов окружающей среды. Города насыщены большим количеством источников шума, многие из которых – следствие ошибок, допущенных в архитектурно-строительном проектировании.

Учебная программа блока

Содержание блока	Форма подгот.	Литература
1. Источники шума и его характеристики	лекция	[1]
2. Архитектурно-планировочные меры борьбы с шумом	лекция	[1]
3. Звукопоглощение. Ограждающие конструкции	лекция	[1, 6, 14, 16]
4. Оценка шумового режима селитебных территорий. Составление шумовой карты территории.	лекция	[1, 6, 14, 16]
5. Шумовой режим застройки	самост. работа (курс. работа)	

Цели обучения

Студент должен знать	Студент должен уметь
– возможности и области применения инструментального, расчетного и графоаналитического методов;	– рассчитывать уровни шума создаваемых различными источниками;
– особенности воздействия на человека шума различного уровня, спектрального состава и длительности;	– оценивать категории шума;
– допускаемые уровни суммарные уровни звукового давления;	– производить расчет размеров и построение звуковой тени от зданий на внутриквартальную застройку;
– формулу для расчета звукового давления.	– производить расчет шумозащитных экранирующих элементов и определять комфортную зону.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1. Источники шума и их характеристики [1, § 8.1]

Защита от шума может осуществляться как в источнике возникновения шума, так и по пути его распространения. Для успешного принятия тех или иных мер необходимо знать шумовые характеристики источников.

Источники внешнего шума. Города насыщены многочисленными источниками шума, которые могут быть условно разбиты на две большие группы:

- отдельные источники;
- комплексные источники, состоящие из ряда отдельных источников.

К отдельным источникам шума относятся единичные транспортные средства, электрические трансформаторы, заборные или вытяжные отверстия систем вентиляции, установки промышленных или энергетических предприятий и др.

К комплексным источникам шума относятся транспортные потоки на улицах или дорогах, потоки поездов на железной дороге, промышленные предприятия с многочисленными источниками шума, спортивные или игровые площадки и др.

С физической точки зрения большая часть отдельных источников шума может быть представлена в виде точечных излучателей звуковой энергии. Наиболее универсальной шумовой характеристикой отдельных источников, создающих постоянный шум, являются октавные уровни звуковой мощности. В то же время в целях борьбы с шумом градостроительными методами допускается оценивать их суммарным уровнем звуковой мощности, скорректированным по частотной характеристике A . Однако при этом желательно знать и частотный спектр создаваемого ими шума.

Для унификации методов измерений и оценки шума в городской среде разработан международный стандарт ISO 1996/1 «Акустика. Описание и измерение шума окружающей среды. Часть I. Основные величины и методики». Этим стандартом установлено, что в качестве исходной величины для описания шумовых режимов в окружающей среде следует использовать эквивалентный уровень звука, выражаемый в дБА. Таким образом, наиболее целесообразно шумовые характеристики как отдельных, так и комплексных источников шума, если они создают непостоянный шум, представлять в виде эквивалентных уровней звука на определенном расстоянии от них либо в виде эквивалентных скорректированных по частотной характеристике A уровней звуковой мощности.

Важное условие для правильной оценки шумовой характеристики – выбор отрезка времени, за который определяются эквивалентные уровни звука источников шума. Если работа отдельного или комплексного источника шума имеет циклический характер, то целесообразно определение его шумовой характеристики за полный цикл работы, в течение которого происходит изменение уровней создаваемого им шума. Если работа отдельного или комплексного источника шума не имеет циклического характера, то наиболее целесообразно его шумовые характеристики относить к дневному и ночному периодам суток.

Промышленные предприятия чаще всего представляют собой комплексные источники шума, состоящие из отдельных условно точечных и пространственных источников шума, излучающих шум как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

К точечным источникам шума на промышленных предприятиях могут быть отнесены заборные и выхлопные отверстия систем вентиляции и кондиционирования воздуха, различных аэрогазодинамических установок, отдельное оборудование, агрегаты и средства транспорта, эксплуатируемые на открытом воздухе.

К пространственным источникам шума на промышленных предприятиях относятся отдельные здания, излучающие шум через наружные ограждения или отдельные его элементы. В некоторых случаях к пространственным источникам шума относят поверхностные источники шума, представляющие собой отдельное оборудование или агрегаты, установленные на малом расстоянии друг от друга.

В настоящее время разработан ряд методов определения шумовых характеристик промышленных предприятий, однако до сих пор не существует установившегося мнения о составе шумовых характеристик промышленных предприятий, методах их измерения или расчета, а также о классификации промышленных предприятий по шумовому фактору.

Прежде всего, рассмотрим состав шумовых характеристик промышленных предприятий. Если промышленное предприятие представляет собой отдельное здание или занимает относительно небольшую площадь либо имеет наибольшее число компактно расположенных источников шума, то наиболее целесообразно его шумовую характеристику выразить в октавных уровнях звуковой мощности или скорректированных по частотной кривой *A* уровнях звуковой мощности, а также в показателях направленности излучения. Если установки промышленных предприятий создают непостоянный шум, то указанные величины должны быть представлены в виде эквивалентных уровней шума. Эквивалентные уровни шума должны

быть установлены за дневной или ночной периоды или за цикл работы, характеризующий все шумовое явление (табл. 8).

Вентиляторы, насосы, лебедки лифтов и другое механическое оборудование зданий являются источниками как воздушного, так и структурного шума, возникающего в зданиях.

Таблица 8

Эквивалентные уровни звука бытовых шумов

Источник звука	Уровни звука, дБА	Примечание
Радиомузыка	83	
Радиоречь	70	
Разговоры людей	66	
Пылесосы	75	
Стиральные машины	68	
Холодильники	42	
Игра на пианино	80	
Электрополотеры	83	
Электробритвы	60	
Детский плач	78	
Слив воды из крана	44 – 50	Шум, проникающий в комнату
Наполнение ванны	36 – 58	То же
Наполнение бачка водой в туалете	36 – 67	То же
Удар крышки клапана мусоропровода	42 – 58	Шум, проникающий в квартиру
Проход кабины лифта	34 – 36	В смежных квартирах
Удар дверей лифта	44 – 52	То же

В зависимости от вида шума принимают различные меры по его снижению при распространении.

К основным методам, используемым при ограничении распространения шума, относятся: соответствующая внешняя и внутренняя планировка, устройство надлежащей звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий, звукопоглощение звуковой энергии вдоль путей ее распространения, надлежащий выбор оборудования, виброизоляция колебаний технического оборудования от сопрягающихся с ним ограждений или коммуникаций.

Рассмотрим подробнее средства, с помощью которых можно реализовать перечисленные методы шумоглушения.

Рационально решать планировку здания таким образом, чтобы все помещения, связанные с возникновением того или иного шума, были сосредоточены в одном месте и удалены от рабочих и жилых помещений.

Так, в жилых и общественных зданиях котельные, машинные отделения лифтов, лифтовые шахты и мусоропроводы, насосные, помещения с вентиляторами, столовые, буфеты и так далее не должны примыкать к жилым и рабочим помещениям.

Кухни, ванны и санузлы рекомендуется объединять в отдельные блоки, граничащие со стенами лестничных клеток или с такими же блоками соседних квартир.

Жилые комнаты многоэтажных жилых домов, общежитий и гостиниц, рабочие комнаты административных зданий, палаты больниц и санаториев, классы и аудитории учебных заведений должны быть отделены от лестничных клеток вспомогательными помещениями (кухнями, ванными, коридорами и т.п.). Гимнастические залы, мастерские и другие шумные помещения в учебных заведениях не должны располагаться в непосредственной близости от классов, аудиторий и лабораторий.

Основным средством для защиты помещений жилых и общественных зданий от шума является надлежащая звукоизоляция ограждающих конструкций, которая должна обеспечивать соблюдение нормативных требований по звукоизоляции.

Во многих помещениях общественных зданий целесообразно устройство звукопоглощающих облицовок, например в протяженных помещениях типа коридоров в школах, больницах, гостиницах, что предотвращает распространение шума вдоль них. Для снижения шума в машинописных бюро, счетных станциях, вычислительных центрах, административных помещениях, ресторанах, залах ожидания железнодорожных вокзалов и аэровокзалов, магазинах, столовых и так далее необходимо предусматривать звукопоглощающие покрытия стен и потолков.

В большинстве систем вентиляции общественных зданий необходимо применение глушителей шума.

2. Нормирование шума и звукоизоляции ограждений [1, § 8.2]

Степень шумозащищенности зданий в первую очередь определяется нормами допустимого шума для помещения данного назначения. Проникающие в помещения уровни шума от любых источников не должны превышать нормативных величин. Такие нормы устанавливаются в главах СНиП, стандартах или санитарных нормах.

Нормируемыми параметрами постоянного шума в расчетных точках являются уровни звукового давления L , дБ, в октавных полосах частот со

среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц. Для ориентировочных расчетов допускается использовать уровни звука L_a , дБА. Нормируемыми параметрами непостоянного шума в расчетных точках являются эквивалентные уровни звука $L_{a \text{ экв}}$, дБА, и максимальные уровни звука $L_{a \text{ макс}}$, дБА.

Допустимые уровни шума на рабочих местах в производственных и вспомогательных зданиях, на площадках промышленных предприятий, в помещениях общественных зданий приведены в методических указаниях к курсовой работе.

Следует учитывать, что допустимые уровни шума от внешних источников в помещениях устанавливаются при условии обеспечения нормативной вентиляции помещений (для жилых помещений, палат, классов – при открытых форточках, фрамугах, узких створках окон).

Методы расчета ожидаемых уровней шума в застройке. Многообразные способы снижения шума на территориях жилой застройки и в зданиях должны быть обязательно проверены акустическим расчетом. Исходными условиями для этих расчетов являются санитарные нормы допустимых уровней шума в различных помещениях и на территории жилых микрорайонов. Акустический расчет и выбор мероприятий по снижению шума должны включать следующие этапы:

- а) выявление источников шума и определение их шумовых характеристик;
- б) выбор точек в помещениях или на территориях, для которых производится акустический расчет (расчетных точек);
- в) определение допустимых уровней звука $L_{a \text{ доп}}$ (в дБА) или допустимых уровней звукового давления $L_{\text{доп}}$ (в дБА) для расчетных точек;
- г) определение путей распространения шума от источников до расчетных точек;
- д) определение ожидаемых уровней звука L_A или уровней звукового давления L в расчетных точках до проведения мероприятий по снижению шума с учетом снижения уровней звука ΔL_a или ΔL по пути распространения шума;
- е) определение требуемого снижения уровней звука $\Delta L_{a \text{ треб}}$ или уровней звукового давления $\Delta L_{\text{треб}}$ в расчетных точках;
- ж) выбор мероприятий для обеспечения требуемого снижения уровней звука или уровней звукового давления в расчетных точках;
- з) проверочный расчет акустической эффективности запроектированных мероприятий и конструкций.

Используя различные приемы планировки, застройки и благоустройства или шумозащитные устройства и проверяя их расчетом, проектировщик должен выбрать наиболее целесообразный вариант для конкретного решения и обосновать его применение в проекте нового или реконструируемого жилого района, микрорайона, квартала или здания.

Расчетные точки, для которых проводится расчет ожидаемого шума, следует выбирать для территорий с нормируемым шумом (площадки отдыха микрорайонов и жилых кварталов, территории больниц и санаториев) на расстоянии 2 м от границ территории и на высоте 1,2 м от поверхности земли; для зданий, имеющих помещения с нормируемым шумом, эти точки следует выбирать или на расстоянии 2 м от наружного ограждения здания, ближайшего к источнику шума, на уровне верхнего этажа здания, или в помещении, расположенном на верхнем этаже здания. Эквивалентные уровни звука $L_{a \text{ экв}}$ используются в качестве шумовой характеристики в акустических расчетах при определении уровней звука в расчетных точках от транспортных потоков, самолетов и других источников колеблющегося во времени шума, расположенных на территории городской застройки, а в некоторых случаях и для источников постоянного шума.

Для транспортных потоков шумовая характеристика – расчетный уровень звука на расстоянии 7,5 м от источника шума (крайней полосы движения) $L_A 7,5$ – ориентировочно определяется в зависимости от категории улиц и дорог по таблицам, приведенным в методических указаниях к курсовой работе «Шумовой режим застройки». При необходимости получить более точное значение расчетного уровня звука следует пользоваться номограммой.

Расчет ожидаемых уровней звука L_A в расчетных точках при различном их расположении производится в следующем порядке.

1. Если источник шума и расчетные точки расположены на территории, то расчет ожидаемых уровней звука (в дБА) производится по формуле:

$$L_{A \text{ тер}} = L_{A 7,5} - \Delta L_{A \text{ рас}} - \Delta L_{A \text{ зел}} - \Delta L_{A \text{ экр}},$$

где $L_{A 7,5}$ – расчетный уровень звука на расстоянии 7,5 м от источника шума, дБА;

$\Delta L_{A \text{ рас}}$ – снижение уровня звука над поверхностью земли за счет расстояния от источника шума до расчетной точки, дБА;

$\Delta L_{A \text{ зел}}$ – снижение уровня звука зелеными насаждениями, дБА;

$\Delta L_{A \text{ экр}}$ – снижение уровня звука экранирующими шум сооружениями, дБА (рис. 44).

2. Если источник шума расположен на прилегающей к защищаемому зданию территории, а шум проникает через ограждающие конструкции в изолируемое помещение, где расположены расчетные точки, то ожидаемые уровни звука в них определяют по формуле:

$$L_{Аном} = L_{Атер} - R_{Аок} ,$$

где $L_{Атер}$ – уровень звука на территории на расстоянии 2 м от ограждающих конструкций защищаемого от шума объекта, дБА, но без учета снижения уровня звука полосами зеленых насаждений;

$R_{Аок}$ – снижение уровня звука конструкцией окна защищаемого от шума объекта, дБА.

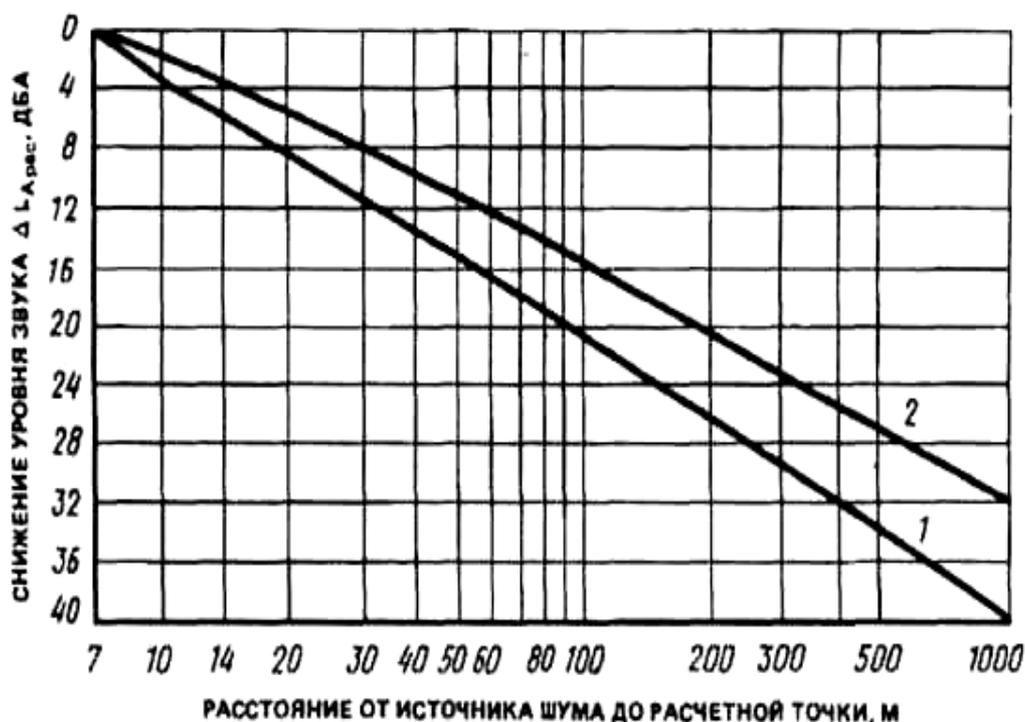


Рис. 44. Снижение уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой: 1 – источник шума внутри групп жилых домов; 2 – транспортные потоки, железнодорожные поезда

Звукоизоляция от воздушного шума. Для снижения шума, распространяющегося по воздуху (воздушного шума), наиболее эффективно устройство на пути его распространения звукоизолирующих преград в виде стен, перегородок, перекрытий, специальных звукоизолирующих кожухов, кабин, выгородок и т.д. Сущность звукоизоляции ограждения состоит в том, что большая часть падающей на него звуковой энергии отражается и лишь незначительная ее часть (1/1000 и менее) проникает через ограждение.

Звукоизоляционные качества какого-либо ограждения от воздушного шума определяются коэффициентом звукопроницаемости V – отношением звуковой мощности, прошедшей через ограждение, к звуковой мощности, падающей на него:

$$\tau = P_{np} / P_{пад} = p_{np}^2 / p_{пад}^2$$

где P_{np} и $P_{пад}$ – соответственно прошедшая и падающая звуковая мощность;
 p_{np} и $p_{пад}$ – соответственно звуковые давления в прошедшей и падающей волнах.

Величина $R = 10 \lg(1 / \tau)$ называется звукоизолирующей способностью ограждения от воздушного звука.

При этом предполагается, что имеется диффузное звуковое поле (падение звуковых волн под любыми углами на данное ограждение) и отсутствуют косвенные пути распространения звука.

Практически звукоизолирующая способность данного ограждения от воздушного шума R или R' , дБ (штрих означает, что кроме непосредственной передачи звука через ограждение, разделяющее два помещения, происходит еще косвенная передача звука через прилегающие ограждения), определяется по формуле:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg (S/A),$$

где L_1 – средний уровень звукового давления в помещении с источником звука, дБ;

L_2 – то же, в изолируемом помещении, дБ;

S – площадь ограждения, разделяющего помещение с источником звука и изолируемое помещение, м²;

A – общее звукопоглощение изолируемого помещения, м².

С точки зрения строительной акустики, ограждающие конструкции могут быть подразделены на однослойные, колеблющиеся как одно целое, и многослойные, способные колебаться с разными для каждого слоя амплитудами.

Акустически однородные однослойные ограждения могут состоять из однородного строительного материала или нескольких слоев различных, но по своим технико-акустическим свойствам родственных строительных материалов, полностью связанных между собой по всей поверхности (например, слой каменной кладки и слой штукатурки), а также имеющих небольшие пустоты.

Многослойные ограждения состоят из слоев, не имеющих друг с другом жесткой связи; между слоями может быть воздушный промежуток или могут располагаться мягкие изоляционные слои.

Механизм передачи звука через ограждение в общих чертах состоит в том, что звуковая волна, падающая на ограждение, приводит его в колебательное движение с частотой, равной частоте колебаний частиц воздуха в волне. В результате ограждающая конструкция сама становится источником звука и излучает его в изолируемое помещение. Однако излучаемая звуковая мощность в сотни и более раз меньше звуковой мощности, падающей на ограждение со стороны источника шума.

На частотах выше первых двух-трех частот собственных колебаний плоского ограждения его звукоизолирующие качества определяются массой единицы площади ограждений m . Жесткость конструкции играет при этом весьма малую роль, поэтому в качестве расчетной модели обычно принимают плиту, состоящую из системы не связанных одна с другой бесконечно малых масс. В этом случае звукоизоляция R подчинена так называемому закону массы:

$$R = 20 \lg(mf) - 47,5,$$

где f – частота колебаний, Гц.

Отсюда видно, что в диапазоне частот, в котором справедлив закон масс, значение звукоизоляции зависит только от массы и частоты, увеличиваясь при каждом удвоении этих параметров на 6 дБ.

Однако, начиная с определенной частоты характер звукоизоляции меняется, амплитуды колебаний возрастают, а в некоторой области частот становятся настолько велики, что значение звукоизоляции резко снижается. Возникает своеобразный пространственный резонанс. Явление резонанса в колебательной системе наступает, как известно, при совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний системы (например, плиты).

Наименьшая частота, при которой становится возможным явление совпадения, соответствует случаю падения звуковой волны вдоль плиты ($\theta = 90^\circ$) Эта частота f_{gp} называется граничной (критической). Ее находят из условия, что $\lambda_n = \lambda$, и для сплошных плит толщиной h , м:

$$f_{GP} = c^2 / 1,8c_n h,$$

где c – скорость звука в воздухе, м/с;

c_n – скорость продольной волны в плите, м/с.

Выше граничной частоты звукоизолирующие качества ограждений определяются явлением волнового совпадения, поскольку каждой частоте выше граничной соответствует свой угол падения волны, при котором возникает волновое совпадение и плита имеет наибольшую звукопроницаемость.

Изоляция воздушного шума между этажными перекрытиями в основном определяется несущей плитой. Конструкция пола практически всегда повышает звукоизоляцию, за исключением некоторых типов рулонных покрытий. Так, при настилке на железобетонную плиту толщиной 220 мм линолеума на войлочной подоснове индекс изоляции воздушного шума ухудшается на 1 – 3 дБ. Это объясняется тем, что слоистые линолеумы состоят из верхнего жесткого слоя износа и упругого слоя подосновы, и их можно рассматривать в виде системы «масса – упругость». В области частот собственных колебаний пола происходит довольно существенное ухудшение звукоизоляции, которое в резонансной области пропорционально потерям на внутреннее трение в упругом слое.

При проектировании ограждающих конструкций для обеспечения нормативной звукоизоляции необходимо выполнять ряд условий. Так, для снижения поверхностной плотности акустически однородных бетонных конструкций при заданной звукоизоляции следует использовать элементы из легких бетонов на пористых заполнителях и элементы с круглыми пустотами, в том числе заполненными сыпучими материалами.

Бетонные элементы ограждений рекомендуется проектировать из бетона плотной структуры, не имеющей сквозных пор. Элементы из бетона со сквозной пористостью, например крупнопористые, должны иметь наружные слои из плотного бетона или раствора. Внутренние стены и перегородки из кирпича и керамических мелких блоков рекомендуется проектировать оштукатуренными с двух сторон. Элементы ограждающих конструкций необходимо проектировать так, чтобы в них не было и в процессе эксплуатации не возникало щелей и трещин.

Звукоизоляционную прослойку перекрытий следует выполнять в виде сплошного слоя или полосовых прокладок. Полосовые прокладки обычно используют с целью уменьшения расхода звукоизоляционного материала. Их принимают шириной 10 – 20 см и располагают по контуру и по полю перекрытия параллельно одной из его сторон с шагом 30 – 70 см в зависимости от конструктивных особенностей несущей части и пола.

Пол на звукоизоляционном слое не должен иметь жестких связей с несущей частью перекрытия, стенами и другими конструкциями здания. Деревянный пол или бетонное основание пола должны быть отделены по контуру от стен и других конструкций здания зазором шириной 1 – 2 см, заполненным звукоизоляционным материалом, например мягкой древесноволокнистой плитой. Плинтусы или галтели следует крепить только к полу или только к стене.

При проектировании пола с основанием в виде монолитной стяжки следует располагать по звукоизоляционному слою сплошной слой водонепроницаемой бумаги или другого подобного материала с перехлестыванием в стыках не менее чем на 20 см.

При заданной конструкции несущей части для увеличения звукоизоляции перекрытий с полом на звукоизоляционном слое рекомендуются следующие меры:

- уменьшение динамической жесткости звукоизоляционного слоя путем его утолщения или применения материала с меньшим динамическим модулем упругости;
- увеличение поверхностной плотности пола;
- применение в составе звукоизоляционного слоя засыпок из песка, шлака и тому подобного в дополнение к основному звукоизоляционному материалу;
- увеличение средней толщины промежутка между несущей частью и полом.

Двойные стены обычно проектируют с жесткой связью между элементами по контуру ограждения (по периметру или в отдельных точках). Толщину промежутка между элементами следует принимать не менее 4 см.

Для увеличения звукоизоляции двойных стен при заданной конструкции их элементов принимают следующие конструктивные меры:

- увеличение толщины промежутка между элементами двойной стены;
- устранение жесткой связи между элементами двойной стены, а также между конструкциями, примыкающими к ним со стороны изолируемых помещений.

В конструкциях каркасно-обшивочных перегородок следует предусматривать точечное крепление листов обшивок к каркасу с шагом не менее 300 мм. Если применяются два слоя листов для обшивки, то они не должны быть склеены между собой. Шаг стоек или расстояние между горизонтальными связями каркаса рекомендуется принимать не менее 60 см.

Для увеличения изоляции воздушного шума стеной (перегородкой), выполненной из железобетона, бетона, кирпича и т.п., в отдельных случаях целесообразно использовать дополнительную обшивку на отnose. В качестве материала обшивки могут использоваться сухая гипсовая штукатурка, асбоцементные листы, твердые древесно-волокнистые плиты и другие листовые материалы, прикрепляемые к стене по каркасу (например, по деревянным рейкам). Воздушный промежуток между стеной и обшивкой целесообразно принимать толщиной 4 – 5 см и заполнять звукопоглощающим материалом (минераловатными или стекловолокнистыми плитами и т.п.).

Для обеспечения надлежащей звукоизоляции особое внимание следует уделять стыкам и узлам. Так, стыки между внутренними ограждающими конструкциями, а также между ними и другими примыкающими конструкциями должны быть устроены таким образом, чтобы в них отсутствовали и в процессе эксплуатации здания не возникали сквозные трещины, щели и неплотности, которые снижают звукоизоляцию ограждений.

Звукопоглощение. В помещениях за счет многократного отражения от внутренних поверхностей ограждений, а также находящихся в нем предметов интенсивность звука, создаваемая каким-либо источником, оказывается на 5 – 15 дБ более высокой, чем интенсивность, создаваемая тем же источником, находящимся на открытом воздухе, при этом существенно меняются тембр и качество звучания. Если в архитектурной акустике увеличение интенсивности уровня связано с регулированием условий хорошей слышимости в помещении и может в одинаковой мере рассматриваться и как полезное, и как вредное, то с позиций защиты от шума всякое увеличение звука в помещении является нежелательным.

Обычные строительные материалы – стекло, бетон, штукатурка и тому подобное в общем случае имеют ничтожно малые коэффициенты звукопоглощения (чаще всего в диапазоне 0,01– 0,05), то есть практически полностью отражают падающие звуковые волны. Поэтому для устранения отраженной части звукового поля требуется применение специальных материалов или конструкций, обладающих значительно более высокими коэффициентами звукопоглощения и получивших название звукопоглощающих.

Под звукопоглощающими конструкциями следует понимать устройства, которые служат для поглощения звука. Основное назначение звукопоглощающих конструкций заключается в снижении энергии отраженных звуковых волн при их падении на поверхность.

В соответствии с основным назначением звукопоглощающие конструкции могут служить для обеспечения надлежащего времени реверберации в помещениях различного назначения и надлежащего распределения уровней полезного сигнала по площади помещения зрелищного назначения, а также для снижения уровней шума в данном помещении и предотвращения распространения звука вдоль протяженных помещений, шахт и каналов.

Звукопоглощающими следует называть те конструкции, у которых коэффициент звукопоглощения α больше 0,2.

В настоящее время стандартизирована классификация звукопоглощающих материалов и изделий по величине коэффициента звукопоглощения в определенном диапазоне частот. Материалы и изделия с $\alpha > 0,8$ в

диапазоне низких (63, 125, 250 Гц), средних (500, 1000 Гц) и высоких (2000, 4000 и 8000 Гц) частот отнесены к первому классу звукопоглотителей, обеспечивающих максимальное снижение уровня звукового давления. Для второго класса в тех же диапазонах частот величина α лежит в пределах 0,4 – 0,8, а для третьего – 0,2 – 0,4.

Использование этого основного акустического признака позволило среди многообразия применяющихся сейчас конструкций звукопоглощающих облицовок выделить три основные группы, охватывающие все виды выпускаемых в нашей стране изделий и отличающиеся специфическими признаками как конструктивного, так и акустического характера.

К первой группе звукопоглощающих элементов, получивших наибольшее распространение и названных плоскими, относятся элементы, изготовленные из материалов полной заводской готовности (плиты типа «Акмигран», ПА/С, ПА/О и др.), а также выполненные в виде съемных кассет из перфорированных (металлических, асбестоцементных, гипсовых) покрытий со звукопоглощающими слоями из ультратонкого стекло- и базальтового волокна или минераловатных плит различных модификаций. Конструктивные элементы этой группы характеризуются коэффициентами звукопоглощения, как правило, не превышающими 0,8 – 0,9, и с учетом ограниченности занимаемой ими в помещении площади обеспечиваемый такой облицовкой средний коэффициент звукопоглощения в большинстве случаев не превышает 0,5.

Вторую группу звукопоглощающих элементов составляют так называемые объемные звукопоглощающие элементы, отличающиеся повышенным (по сравнению с плоскими элементами) на 50 – 70 % коэффициентом звукопоглощения за счет дополнительного поглощения вследствие явления дифракции звуковых волн и более развитой поверхности поглощения. Конструкция объемных элементов относительно проста. Каждый элемент состоит из металлического каркаса, обтянутого дюралюминиевой просечно-вытяжной сеткой и заполненного ультратонким стекловолокном в оболочке из стеклоткани. Два таких элемента длиной до 3 м, шириной 0,3 м и высотой сечения 0,25 – 0,35 м составляют панель потолка общей площадью около 1,5 м². Относительно небольшая масса панели (до 15 кг) позволяет легко осуществлять ее монтаж даже в условиях действующего цеха.

В последнее время разработана конструкция объемного элемента, в которой полностью отказались от каркаса, используя для его изготовления самонесущие декоративные минераловатные плиты в декоративной оболочке из стеклоткани, стеклохолста или стеклопластика.

Третья группа звукопоглощающих элементов, являющаяся по существу одной из новых форм объемного элемента, два размера которого значительно превосходят третий, была выделена в самостоятельную из-за исключительной простоты изготовления и монтажа, экономичности, удовлетворительного внешнего вида и высоких огнестойких качеств и получила название элементов кулисного типа.

Конструктивно звукопоглощающие элементы кулисного типа существуют в виде двух модификаций. Самонесущая конструкция выполняется из полужестких минераловатных плит в защитной оболочке из стеклоткани. Крепление и подвеска плит к потолку помещения осуществляются с помощью несложной проволочной системы крюков, пропущенных через специальную металлическую гильзу, запрессованную в тело плиты на определенных расстояниях от ее верхней кромки.

Во втором варианте используется сварной металлический каркас, обтянутый защитной пленкой или стеклотканью (иногда перфорированным павином – той же стеклотканью с нанесенными на нее чередующимися полосами пластмассы) и заполненный ультратонким стекловолокном.

Условный коэффициент звукопоглощения системы поглотителей кулисного типа (приведенная к 1 м^2 поверхности ограждения величина звукопоглощения) достигает 2 – 2,5, то есть они значительно превосходят по своей эффективности элементы первой группы.

Акустическая обработка проводится в производственных помещениях для снижения уровней шума за счет уменьшения интенсивности отраженных звуковых волн от ограничивающих эти помещения плоскостей, а в помещениях зданий общественного назначения – для снижения уровня шума, уменьшения гулкости, улучшения разборчивости речи и создания акустического комфорта.

Необходимость и целесообразность применения акустической облицовки помещений для снижения уровня шума выявляются акустическим расчетом. Наиболее целесообразно применять акустическую облицовку помещений там, где коэффициент звукопоглощения в октавной полосе с частотой 1000 Гц не превышает 0,15 – 0,2.

Звукопоглощающие облицовки, как правило, размещают на потолке помещения, а в некоторых случаях и на верхних частях стен. Для достижения максимального поглощения рекомендуется облицовывать не менее 60 % общей площади ограничивающих помещение поверхностей. При высоте помещения больше 6 м целесообразно предусматривать такое устройство подвесного потолка, чтобы звукопоглощающая облицовка находилась на минимальном удалении от источника шума.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛЕКЦИОННЫМ ЗАНЯТИЯМ

Вопросы лекции	Форма обучения	Лит.	Вопросы для самоконтроля
1. Источники шума и его характеристики	лекция	[1, §8.1]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Приведите примеры шума различной длительности с различным диапазоном спектра. 2. Как вычислить уровень звукового давления на заданном расстоянии от точечного и линейного источника? 3. Как пользоваться графическим методом сравнения расчетных и допустимых уравнений звукового давления? 4. Перечислите последовательность при оценке шума.
2. Архитектурно-планировочные меры борьбы с шумом	лекция	[1, §8.2, 24, 25]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Перечислите зоны города по степени шумности. 2. Как вычислить снижение уровня звукового давления в полосе зеленых насаждений? 3. Что такое звуковая тень? 4. Как связаны размеры звуковой тени с длиной звуковой волны?
3. Звукопоглощение. Ограждающие конструкции	лекция	[1, 6, 14, 16]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Особенности звукоизоляции от воздушного, ударного и структурного звука. 2. Что такое показатель изоляции? Проанализируйте его значение для различных типов зданий и ограждающих конструкций. 3. Расскажите порядок проведения расчета изоляции от воздушного шума.
4. Оценка шумового режима селитебных территорий	лекция	[1, 6, 14, 16, 22, 23]	<ol style="list-style-type: none"> 1. Объясните последовательность расчета эквивалентного уровня шума от транспортного потока с помощью номограммы. 2. Перечислите последовательность расчета снижения уровня звука экранами бесконечной длины. 3. Приведите примеры архитектурно-проектировочных мероприятий по шумозащите.

ГЛОССАРИЙ

АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Акустика – область естествознания, в которой изучаются звуковые волны.

Архитектурная акустика – наука, изучающая физические и физиологические характеристики звука и шума, закономерности их распределения на территориях и в помещениях, архитектурно-планировочные и конструктивные способы усиления и подавления звука и шума.

Звуковая волна – процесс распределения колебательного движения в среде.

Звуковые волны – упругие волны с частотами $f \sim 16 - 20000$ Гц, распространяющиеся в среде и воспринимаемые органами слуха человека. В жидкостях и газах волны только продольные, в твердых телах – только продольные и поперечные. Основное свойство всех волн – перенос энергии без переноса вещества.

Фронт звуковой волны – поверхность, проходящая через частицы среды, совершающие колебания в одной и той же фазе. Различают три вида фронта волны – плоский, шаровой (сферический) и цилиндрический.

Источник звука – любое тело, колеблющееся в упругой среде со звуковой частотой.

Скорость звука в твердых изотропных средах:

$$v_{\text{прод}} = \sqrt{E/\rho}; \quad v_{\text{попер.}} = \sqrt{G/\rho},$$

где E – модуль упругости (Па);

G – модуль сдвига (Па);

ρ – плотность среды (кг/м^2).

Скорость звука в воздухе $c = \sqrt{\gamma RT/M}$,

где $\gamma = C_p/C_v$ отношение молярных теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме;

R – молярная газовая постоянная (Дж/моль·К);

T – термодинамическая температура (К);

M – молярная масса (моль).

Скорость звука в воздухе при 20 °С, $c = 340$ м/с.

Звуковое давление p (Н/м^2) – скалярная характеристика изменения состояния среды в звуковом поле, разность между мгновенным значением полного давления и средним давлением, которое наблюдается в среде при отсутствии звукового поля. В фазе сжатия $p > 0$, в фазе разрежения $p < 0$.

Длина звуковой волны λ (м) – расстояние, измеренное вдоль распространения звуковой волны между двумя ближайшими точками звукового поля, в которых фаза колебания частиц среды одинаковая.

Связь длины волны, частоты и скорости звука в изотропных средах:

$$\lambda f = c.$$

Звуковая мощность источника P (Вт) – скалярная характеристика источника звука, количество звуковой энергии, излучаемой в единицу времени.

Звуковая мощность источника шума

$$L_p = 10 \lg(P/P_0)$$

где P_0 – пороговое значение звуковой мощности $P_0 = 10^{-12}$ Вт/м².

Плотность звуковой энергии D (Дж/м³) – скалярная характеристика звукового поля, равная звуковой энергии, содержащейся в единице объема среды:

$$D = p^2 / \rho c^2$$

где p – звуковое давление (Па);

ρ – плотность среды (кг/м³);

c – скорость звука (м/с).

Поток звуковой энергии (звуковая мощность, сила звука, плотность потока энергии) I (Вт/м²) – поток звуковой энергии через поверхность площадью S , перпендикулярную направлению распространения звука.

Интенсивность звука (сила звука) I – энергетическая характеристика, средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени сквозь площадку, ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны.

Для плоского звукового поля $I = p^2 / \rho c$.

Для диффузного звукового поля $I = p^2 / 4\rho c$.

Для сферического звукового поля на расстоянии r от точечного источника звука звуковой мощностью P :

$$I = P / 4\pi r^2.$$

Волновое сопротивление (акустическое сопротивление среды, импеданс) ρc – отношение звукового давления на поверхности к нормальной составляющей скорости звука около нее.

Для воздуха $\rho c = 407$ рел (кг·м⁻²·с⁻¹) (41МПа·с/м).

Уровень интенсивности звука L_I :

$$L_I = k \lg \frac{I}{I_0}$$

где I – интенсивность исследуемого звука;

I_0 – стандартный порог слышимости ($I_0 = 10^{-12}$ Вт/м²) (пороговая интенсивность);

k – коэффициент пропорциональности, если L_I выражают в децибелах, то значение $k = 10$.

$$\text{Уровень звукового давления } L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left(p^2 / p_0^2 \right) = 20 \lg \left(p^2 / p_0 \right).$$

Уровень звукового давления равен уровню интенсивности звука L_I при значении $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Н/м², соответствующей пороговой интенсивности:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2.$$

Показатель направленности ПН – характеристика неравномерности излучения источника звука в различных направлениях:

$$ПН = L / \langle L \rangle,$$

где L – уровень звукового давления, измеренный в заданном направлении на фиксированном расстоянии от источника, дБ;

$\langle L \rangle$ – усредненный по всем направлениям уровень звукового давления на том же фиксированном расстоянии.

Частотный спектр звука – распределение звуковой энергии (звукового давления, звуковой мощности) по частотному диапазону.

$$\text{Средняя частота полосы } f_{cp} = \sqrt{f_1 \times f_2},$$

где f_1 – нижняя граничная частота спектра;

f_2 – верхняя граничная частота спектра.

Уровень громкости (фон) – физиологическая характеристика уха человека.

Фон – внесистемная единица уровня громкости. 1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромко с ним звука стандартного чистого тона ($f = 1000$ Гц) равен 1 дБ.

1 фон – это 1 дБ звукового давления тона частотой 1 кГц с поправкой на частотную характеристику уха. Для звука стандартного тона ($f = 1000$ Гц) уровень громкости в фонах совпадает с уровнем звукового давления в дБ.

Эквивалентный уровень звука L_A (дБА) – характеристика непостоянного звука, средняя энергия которого равно уровню постоянного широкополосного неимпульсного звука.

Уровень звукового давления в помещении с источником шума ориентировочно равен:

$$L = L_p - 10 \lg A + 6,$$

где L_p – уровень звуковой мощности источника шума, дБ;

A – общее звукопоглощение в помещении.

Время реверберации $T(c)$ – интервал времени после выключения источника звука, в течении которого плотность звуковой энергии уменьшается в 10^6 раз. При невысоких значениях среднего коэффициента звукопоглощения ($\alpha < 0,2$) время реверберации вычисляется по формуле Сэбина:

$$T = \frac{0,163}{\alpha S} = \frac{0,163V}{A_{общ}}$$

где α – средний коэффициент звукопоглощения;

S – общая площадь отражающих поверхностей, m^2 ;

V – объем помещения, m^3 ;

$A_{общ} = \alpha S$ – общее звукопоглощение в помещении.

Время реверберации зала $T(c)$ на частотах до 1000 Гц вычисляется по формула Эйринга:

$$T = \frac{0,163V}{S_{общ} \cdot \varphi(\bar{\alpha})},$$

где V – объем помещения, m^3 ;

$S_{общ}$ – общая площадь ограждающих поверхностей;

$\varphi(\bar{\alpha}) = -\ln(1 - \bar{\alpha})$ – функция среднего коэффициента звукопоглощения $\bar{\alpha}$.

Время реверберации на частотах выше 1000 Гц вычисляется по формуле:

$$T = \frac{0,163V}{S_{общ} \cdot \varphi(\bar{\alpha}) + 4mV},$$

где m – коэффициент, учитывающий поглощение звука в воздухе и зависящий от температуры и влажности воздуха, m^{-1} .

Шум – звуковые колебания, выходящие за рамки звукового комфорта, то есть всякий неприятный, нежелательный звук или совокупность зву-

ков, мешающих восприятию полезных сигналов, нарушающих тишину, оказывающих вредное воздействие на организм человека, снижающих его работоспособность. Шум обладает сплошным спектром или линейчатым спектром с неорганическими составляющими. Различают широкополосный, тональный и импульсный шум.

Расчетная точка – точка в помещении или на территориях, для которой производится акустический расчет.

Коэффициент звукопроницаемости τ – безразмерная характеристика звукоизоляционных свойств какого-либо ограждения; отношение звуковой мощности, прошедшей через ограждение, к звуковой мощности, попадающей на него:

$$\tau = P_{np} / P_{над} = p_{np}^2 / p_{над}^2$$

где $P_{np}, P_{над}$ – соответственно прошедшая и падающая звуковая мощность;
 $p_{np}, p_{над}$ – соответственно звуковое давление в прошедшей и падающей волнах.

Звукоизолирующая способность ограждений от воздушного шум – характеристика ограждения, находящегося в диффузном звуковом поле.

$$R = 10 \lg(1/\tau) \text{ (дБ)},$$

где τ – коэффициент звукопроницаемости.

Звукоизолирующая способность ограждения от воздушного шума с учетом косвенной передачи звука через прилегающие ограждения:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg(S/A),$$

где L_1 – средний уровень звукового давления в помещении с источником звука (дБ);

L_2 – то же, в изолируемом помещении (дБ);

S – площадь ограждения, разделяющего помещения, м²;

A – общее звукопоглощение изолируемого помещения, м².

Закон массы:

На частотах выше первых двух-трех частот собственных колебаний плоского ограждения его звукоизолирующие качества определяются массой единицы площади ограждения:

$$R = 20 \lg(mf) - 47,5,$$

где m – масса единицы площади ограждения, кг/м²;

f – частота колебаний, Гц.

Коэффициент звукоотражения – безразмерная характеристика поверхности материала и конструкции

$$\beta = E_{отр} / E_{пад},$$

где $E_{отр}$, $E_{пад}$ – соответственно энергия отраженной и падающей звуковой волны.

Коэффициент звукопоглощения – безразмерная характеристика поверхности материала и конструкции:

$$\alpha = \frac{E_{пад} - E_{отр}}{E_{пад}} = 1 - \beta.$$

При падении звуковых волн на открытый проем звуковая энергия не отражается и коэффициент звукопоглощения $\alpha = 1$.

Диффузность звукового поля – акустическая характеристика звукового однородного и изотропного поля в помещении, то есть во всех точках поля усредненные во времени уровень звукового давления и поток входящий по любому направлению звуковой энергии постоянны.

Слышимость речи – субъективный фактор, определяющий качество передачи речи в помещении:

$$P_c = 96k_1k_R,$$

где P_c – слоговая разборчивость, %;

k_1 – коэффициент, учитывающий влияние уровней речи и шума;

k_R – коэффициент учитывающий реверберации.

Гулкость зала – характеристика длительности процесса затухания звука на месте прослушивания. Объективный показатель гулкости – стандартное время реверберации.

Эхо – заметное на слух повторение прямого звука в точке зала, зависит от частоты звука. Положительный эффект эхо – продление звучания звука в органных залах.

Порхающее эхо – эффект, возникающий при многократном отражении звука между параллельными гладкими поверхностями, обычно между боковыми стенами помещения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

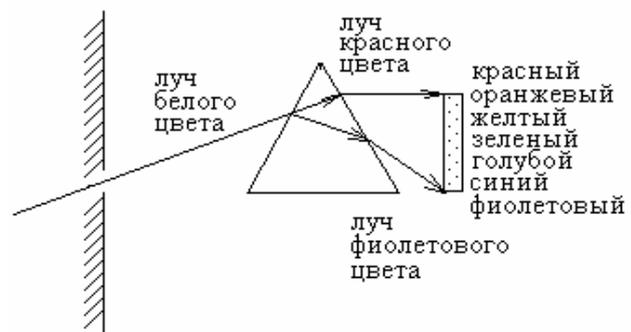
1. Изучение дисперсионного спектра на двойном монохроматоре (работа выполняется звеном либо индивидуально)

Цель работы: изучить принцип действия призмы как диспергирующего элемента, изучить оптическую схему двойного призмного монохроматора; измерить длины волн, соответствующие различным цветам сплошного спектра.

Теоретические основы работы

Дисперсией света называется зависимость абсолютного показателя преломления (n) вещества от частоты света (ν). Если n с увеличением частоты возрастает ($dn/d\nu > 0$), то дисперсия называется нормальной (наблюдается для прозрачных веществ). Если n с увеличением частоты убывает ($dn/d\nu < 0$), то дисперсию называют аномальной. Она наблюдается для окрашенных сильно поглощающих веществ.

Вследствие дисперсии узкий пучок белого света, проходя сквозь призму из стекла либо любого прозрачного вещества, разлагается в дисперсионный спектр, образуя радужную полоску. Подобное разложение белого света наблюдается на дифракционной решетке.



Однако и по природе образования, и по последовательности цветов эти спектры существенно отличаются.

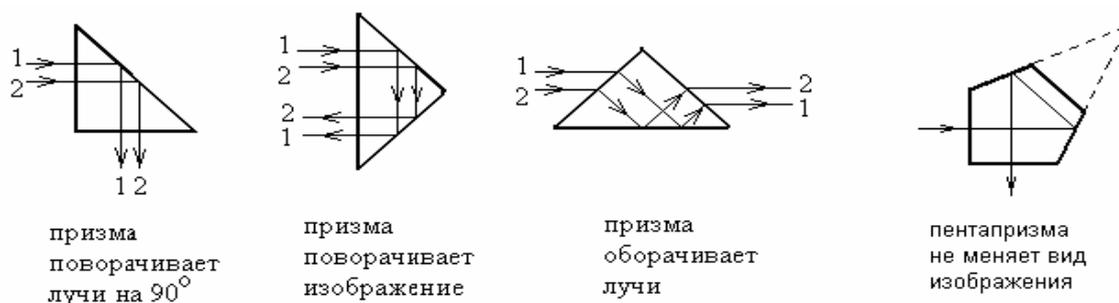
Основным узлом любого спектрального прибора является диспергирующий элемент, назначение которого состоит в разложении белого света в спектр. Это наиболее важная часть спектрального прибора. В качестве диспергирующего элемента используются призмы, дифракционные решетки и интерференционные устройства.

Различия в дифракционном и призматическом спектрах

Дифракционная решетка	Призма
Разлагает падающий свет по длинам волн в результате интерференции и дифракции. По измеренным углам (по направлениям максимумов) можно вычислить длину волны.	Разлагает падающий свет по значениям показателей преломления, поэтому надо знать зависимость преломления конкретного вещества от длины волны.
Красные лучи отклоняются сильнее, чем фиолетовые, так как красные лучи имеют большую длину волны, чем фиолетовые.	Красные лучи отклоняются слабее, чем фиолетовые, так как для красных лучей показатель преломления меньше.
Дисперсия не зависит от частоты (длины волны).	Дисперсия сложным образом зависит от частоты.
Спектральный интервал от 200 до 1000 нм	Спектральный интервал определяется маркой стекла призмы
Разрешающая способность много выше	

Наибольшее распространение получили призмные спектральные приборы, хотя в последние годы резко возрос выпуск приборов и с дифракционной решеткой. Призмы для спектральных аппаратов изготавливают из стекла разных марок или кварца, так как эти материалы достаточно прозрачны в широкой области длин волн. Стекланные призмы дешевле кварцевых и имеют более высокую угловую дисперсию по сравнению с кварцевыми, поэтому для работы в видимом и ближнем инфракрасном участках спектра обычно применяют только стекланные призмы. Для исследования в УФ области спектра применяется кварц.

Принцип действия призмы как оптической детали может быть различен.



В оптических приборах чаще всего применяются отражательные призмы полного внутреннего отражения: прямоугольная с одной и двумя отражающими гранями, призма Довэ, куб-пента-призма, башмачная и другие.

В современных качественных спектральных приборах используют несколько призм, поставленных одна за другой для получения большей дисперсии крайних лучей спектра. Комбинируя марки стекла и располагая призмы вершинами в противоположные стороны, можно получить спектральную призму, которая не изменяет направление среднего луча (например, желтого цвета).

Рассмотрим принцип действия призмы как диспергирующего элемента. Монохроматический пучок света падает на призму с преломляющим углом A и показателем преломления n под углом α_1 . После двукратного преломления (на левой и правой границе призмы) луч отклоняется на угол φ .

Из рисунка 1 следует, что

$$\varphi = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - A.$$

Если углы A и α_1 малы, то углы α_2, γ_1 и γ_2 также малы.

Тогда $\alpha_1/\gamma_1 = n$ и $\alpha_2/\gamma_2 = 1/n$.

Так как $\gamma_1 + \gamma_2 = \varphi$,

то $\alpha_2 = \gamma_2 n = n(A - \gamma_1) = n(A - \alpha_1/n) = nA - \alpha_1$

или $\alpha_1 + \alpha_2 = nA$.

Тогда $\varphi = A(n - 1)$.

Как видно, угол преломления φ определяется величиной преломляющего угла A призмы и ее показателем преломления.

Регистрирующий спектрофотометр СФ-10 предназначен для измерения коэффициентов пропускания и оптической плотности прозрачных и мутных сред в видимой области спектра. Рабочий диапазон 400 – 700 нм.

Источник белого света – кинопроекторная лампа К30.

В учебном спектрофотометре убран кожух, что позволяет детально изучить оптическую и кинематическую конструкцию монохроматора.

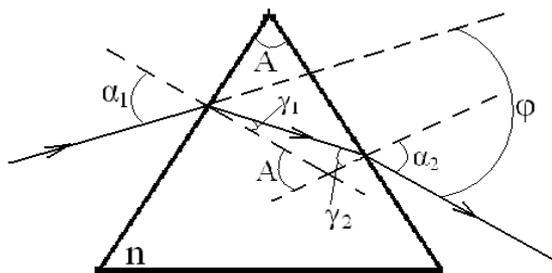


Рис. 1

Устройство двойного монохроматора

Оптическая схема двойного монохроматора показана на рис. 2. Нить лампы 1 изображается конденсором 2 через входную щель 3 в плоскости объектива 4 и коллиматора. Входная щель расположена в фокальной плоскости объектива. Выходящий из него параллельный пучок света проходит диспергирующую призму 5 и разлагается в спектр. Объектив 6 трубы первого монохроматора дает спектральное изображение входной щели в плоскости средней щели по линии А-А. Средняя щель двойного монохроматора, образованная зеркалом 7 и ножом 8, вырезает участок спектра, который проходит во второй монохроматор и проектируется в плоскость выходной щели 9.

Устройство двойного монохроматора

Кинематическая схема показана на рис. 3. Эта схема обеспечивает автоматическое и ручное управление разверткой спектра и раскрытием щелей монохроматора. Электродвигатель 1 через цилиндрические шестерни 2, 3 приводит в движение червяк 4 и червячную шестерню 5 кулачкового механизма длин волн, а через цилиндрические шестерни 6, 7 – червяк 8 и червячную шестерню 9 записывающего механизма. На одном валу с червячной шестерней 5 укреплены кулачки 10 и 11. Кулачок 10 с помощью штока 12 передвигает среднюю щель прибора. Кулачок 11 с помощью штока 13 и кареток 14 с клиньями управляет раскрытием входной и выходной щелей прибора.

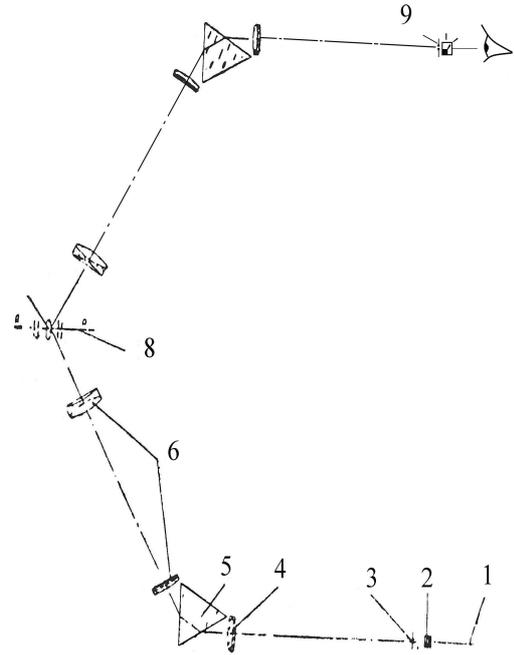


Рис. 2

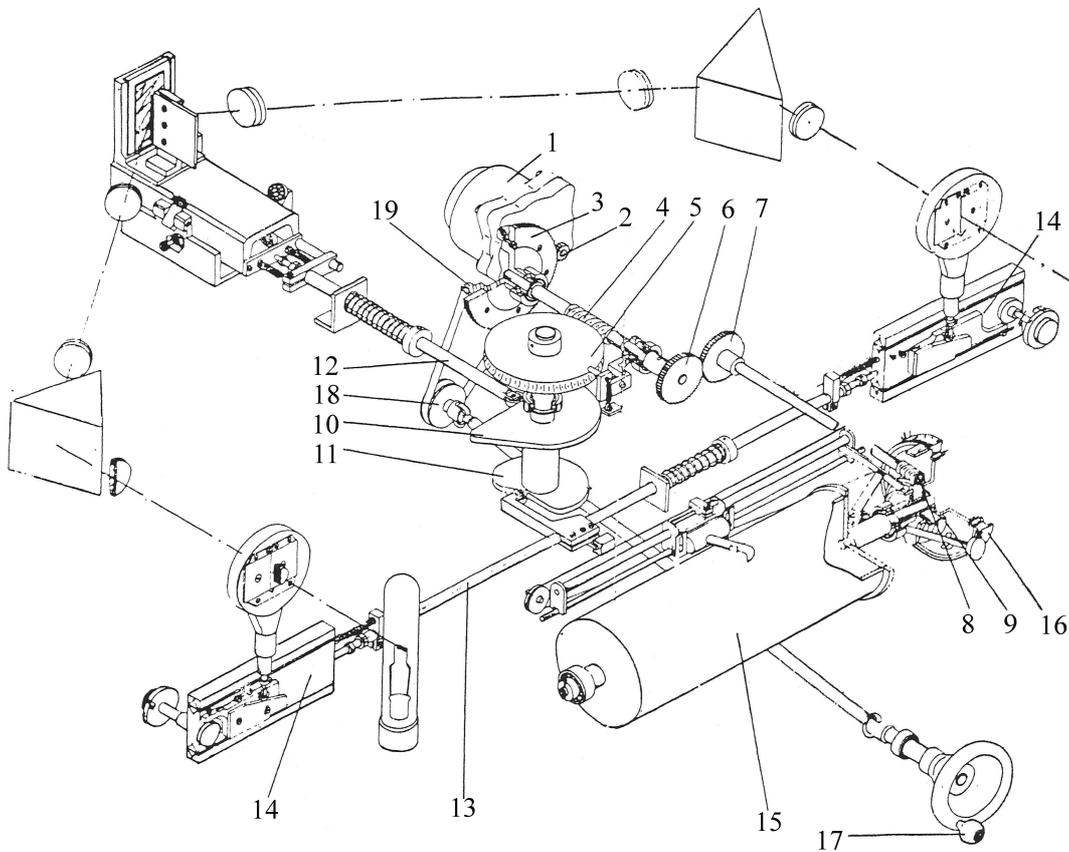


Рис. 3

От червяка 8 и червячной шестерни 9 вращение передается барабану 15 записывающего механизма (в данной работе не используется). К червячной шестерне 9 крепится шкала длин волн 16, по которой определяют λ нм.

Ручное управление механизмом длин волн осуществляется с помощью рукоятки 17. При вращении рукоятки вращается шкив 18, соединенный гибкой связью со шкивом 19, на одной оси с которым укреплен цилиндрический шестерня 3. Далее вращение через червяк 4 и червячную шестерню 5, цилиндрические шестерни 6, 7, червяк 7 и червячную шестерню 9 передается механизму длин волн и шкале длин волн, а также барабану записывающего механизма.

На лицевой стороне прибора имеется пульт управления, на котором расположены выключатели: «сеть», «лампа», «развертка спектра», «обработка», «изменение направления», а также переключатель «скорость развертки спектра».

Экспериментальная часть

Задание 1. *Изучение работы двойного призмного монохроматора.*

Включить прибор тумблером «сеть», при этом должна загореться сигнальная лампа на щитке управления. Включить тумблер «лампа». Произвести юстировку лампы накаливания с помощью рукояток на штативе лампы. Добиться такого положения лампы, при котором изображение нити заслонит объектив коллиматора и будет резким.

Установить между первым монохроматором и центральной щелью экран, получить на нем сплошной спектр. Измерить линейные размеры спектра.

Включить тумблер «развертка спектра». Установить максимальную скорость развертки спектра (рукоятка в положение 4). Изучить, как работает центральная щель и какие участки сплошного спектра попадают на второй монохроматор.

Задание 2. *Изучение сплошного спектра и определение длин волн.*

Наблюдая спектр через вторую щель и измеряя длины волн, составить шкалу электромагнитных волн в видимой области. Результаты занести в таблицу.

В спектроскопии длину волны принято измерять в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) либо в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Частоту $\nu = c/\lambda$ выражают в обратных секундах (с^{-1} , Гц). Частота световых колебаний в герцах представляет очень большое число. Поэтому обычно применяют величину в $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ раз меньшую, которую называют волновым числом (иногда циклической частотой):

$$\omega = \nu / c = 1/\lambda_{\text{см}}$$

и измеряют в обратных сантиметрах (см^{-1}).

№	Цвет	λ , нм	λ , Å	ω , см ⁻¹	E, эВ
10	Начало видимой области (со стороны красного цвета)				
9	Красный цвет				
8	Оранжевый цвет				
7	Желтый цвет				
6	Желто-зеленый цвет				
5	Зеленый цвет				
4	Голубой цвет				
3	Синий цвет				
2	Фиолетовый цвет				
1	Начало видимой области (со стороны фиолетового цвета)				

Длина волны, волновое число и частота вполне подходят в качестве характеристик света как в волновой, так и в квантовой оптике. Поэтому одновременно в современных справочниках применяются и энергетические величины. Для перехода одних единиц к другим пользуются формулами:

$$E = h\nu = hc\omega = \frac{hc}{\lambda}, \quad (h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с})$$

и соотношениями между величинами:

$$1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$1 \text{ Дж} = 6,24 \cdot 10^{18} \text{ эВ};$$

$$E(\text{эВ}) = \frac{12397}{\lambda(\text{Å})} = \frac{1,2397}{\lambda(\text{мкм})} = \frac{\omega(\text{см}^{-1})}{8066,0}$$

Контрольные вопросы

1. Чем объяснить различия в дифракционном и призматическом спектрах?
2. Перечислите принципы действия призмы как оптической детали.
3. Выведите формулу для угла преломления призмы.
4. Объясните принцип действия двойного монохроматора, покажите и назовите оптические детали спектрофотометра.
5. Пользуясь кинематической схемой прибора СФ-10, покажите и поясните назначение механических узлов спектрофотометра.
6. Назовите границы спектральной области видимого излучения.
7. Какому цвету соответствует излучение с длиной волны 550 нм?

2. Основы фотометрии

(работа выполняется звеньями по 2 студента либо индивидуально)

Цель работы: изучить энергетические и световые величины, произвести проверку закона обратных квадратов, изучить направленность излучения лампы накаливания, исследовать зависимость световой отдачи и удельного расхода мощности от потребляемой мощности.

Теоретические основы работы

Фотометрия – совокупность методов измерения энергетических характеристик электромагнитного излучения и световых величин, в том числе измерения интенсивности излучений и потоков заряженных частиц в зависимости от степени почернения светочувствительных слоев.

В фотометрии используются:

– **энергетические величины**, которые характеризуют энергетические параметры оптического излучения безотносительно к его действию на технические приемники излучения (фотоэлементы и т.д.);

– **световые (визуальные) величины**, которые характеризуют физиологические действия света и оцениваются по воздействию на глаз (исходят из так называемой средней чувствительности глаза) либо по действию на селективные приемники излучения с заданной спектральной чувствительностью.

В качестве основной в системе СИ принята кд – кандела (от лат. *candela* – свеча). Кандела равна силе света в заданном направлении точечного изотропного источника света, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Энергетические величины

Величина	Обозначение	Определение	Формула	Единица
Энергетический поток; Поток излучения; Лучистый поток	Φ_e	Величина, равная отношению энергии W излучения ко времени t , за которое излучение произошло	$\Phi_e = W / t$	Ватт (Вт)
Энергетическая светимость (излучательность)	R_e	Величина, равная отношению потока излучения Φ_e , испускаемого поверхностью, к площади S сечения, сквозь которое этот поток проходит	$R_e = \Phi_e / S$	Ватт на метр в квадрате (Вт/м ²)

Сила света	I	Эталонная величина, основная единица в системе СИ	I	Кандела (кд)
Энергетическая сила света (сила излучения)	I_e	Величина, равная отношению потока излучения Φ_e источника к телесному углу Ω , в пределах которого это излучение распространяется	$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$	Ватт на стерадиан (Вт/ср)
Энергетическая яркость (лучистость)	B_e	Величина, равная отношению энергетической силы света ΔI_e элемента излучающей поверхности к площади ΔS проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения	$B_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S}$	Ватт на стерадиан-метр в квадрате Вт/(ср·м ²)

Световые (визуальные) величины

Величина	Обозн.	Определение	Формула	Единица
Световой поток	Φ	Мощность оптического излучения по вызываемому им световому ощущению (по его действию на селективный приемник света с заданной спектральной чувствительностью)		Люмен (лм)
Светимость	R	Величина, равная отношению светового потока Φ к площади S , сквозь которую этот поток проходит	$R = \frac{\Phi}{S}$	Люмен на метр в квадрате (лм/м ²)
Освещенность	E	Величина, равная отношению светового потока Φ , падающего на поверхность, к площади S этой поверхности	$E = \frac{\Phi}{S}$	Люмен на метр в квадрате (лм/м ²)

Светотехнические величины

Величина	Обозн.	Определение	Формула	Единица
Яркость источника света	B	Величина, равная отношению силы излучения к единице площади светящейся поверхности источника света	$B = \frac{I}{S}$	нит
Световая отдача	Z	Величина, равная отношению излучаемого источником светового потока к потребляемой мощности электрической энергии	$Z = \frac{\Phi}{P}$	$\frac{\text{люмен}}{\text{Ватт}}$
Удельный расход мощности	η	Величина, равная отношению мощности электрической энергии к силе света	$\eta = \frac{P}{I}$	$\frac{\text{Ватт}}{\text{кд}}$

Основой расчетов освещенности служит закон освещенности. Закон освещенности устанавливает связь между освещенностью (E), силой света точечного источника (I), расстоянием от источника до освещаемой поверхности (r) и косинуса угла между направлением лучистого потока и нормалью к поверхности:

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

Он применим *только для точечных источников*, поскольку лишь к таким источникам относится понятие силы света. Освещенность, создаваемая системой точечных источников либо протяженным источником, равна сумме (интегралу) освещенности от каждого точечного источника.

Описание люксметра марки Ю 116

Люксметр предназначен для измерения световых потоков и освещенности поверхности в пределах от 5 до 10^5 лк (приборная погрешность 0,1). Он состоит из приемника лучистой энергии (селенового фотоэлемента) и измерителя (милливольтметра для измерения фото-ЭДС).

Фотоэлемент находится в пластмассовом корпусе и присоединяется к измерителю шнуром, обеспечивающим правильную полярность соединения. Светочувствительная поверхность фотоэлемента равна 30 см^2 . Для равномерного освещения поверхности и защиты хрупкого слоя фотоэлемента применяется насадка, состоящая из белой светорассеивающей полусферы и непрозрачного кольца сложного профиля (насадка маркирована символом «К»).

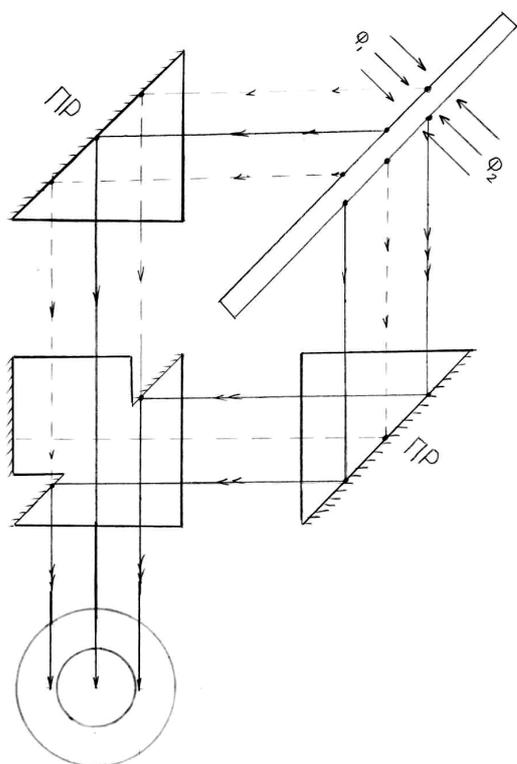
Для ослабления лучистого потока применяются три плоских вставки с маркировками «М», «Р» и «Т» и коэффициентами ослабления 10, 100 и 1000 соответственно. Коэффициент ослабления насадки («К») равен 1. Одновременное использование насадки и одной из вставок позволяет расширить диапазон измерений люксметра в 10, 100 либо 1000 раз.

Измеритель смонтирован в отдельном корпусе, на передней панели которого находятся: шкала милливольтметра, проградуированная в единицах освещенности (люксах); кнопки управления; таблица с указанием диапазонов измерений при различных насадках и последовательно включенных кнопках.

Запрещается включать обе кнопки одновременно!

Люксметр имеет две шкалы: 0 – 100 и 0 – 30. На каждой шкале точками отмечено начало диапазона измерений: на шкале 0 – 100 точка находится над отметкой 17, на шкале 0 – 30 – над отметкой 5. При нажатой правой кнопке следует пользоваться шкалой 0 – 100. При нажатой левой – шкалой 0 – 30. показания приборов в делениях по соответствующей шкале умножают на коэффициент ослабления 10, 100 или 1000 в зависимости от применявшейся вставки.

Описание визуального фотометра



Устройство визуального фотометра следующее. Свет от двух источников освещает двухстороннюю приемную матовую пластину с двух сторон (I), рассеивается поверхностями пластинки и направляется призмами (Пр) через фотометрический кубик (К) в окуляр (Ок). Основным элементом фотометрической головки является фотометрический кубик с контрастными полями, образованный двумя сложеными вместе прямоугольными призмами. Грань одного из них сошлифована по краям таким образом, что касание между призмами осуществляется только в средней части поверхностей. Они на этой части ошлифованы так хо-

рошо, что образуют оптический контакт, через который лучи проходят без преломления. На краях грани лучи в соседнюю призму не проходят. При проведении фотометрических измерений необходимо источник света, приемные пластины, экраны и другие части установки расположить по оси скамьи. Для центрирования (юстировки системы) служат визирные сетки фотометрической головки. На время центрировки приемную пластину вынимают из корпуса головки, нажимая пальцами на щечку замка оправы на верхней плоскости корпуса фотометра, а визирными сетками закрывают с обеих сторон образовавшиеся при этом в корпусе головки сквозные отверстия. При фотометрировании визирные сетки должны быть сдвинуты в сторону. Для того чтобы рассеянный свет не попадал на приемную пласти-

ну головки, с обеих сторон ее устанавливают специально для этого предназначенные бархатные экраны небольшого размера.

Оборудование и приборы: люксметр марки Ю 116, визуальный фотометр, оптическая скамья с мерной линейкой и транспортиром для отсчета углов, амперметр, вольтметр, лабораторный автотрансформатор, лампа накаливания, селеновый фотоэлемент с милливольтметром.

Экспериментальная часть

Задание 1. Изучение устройства и освоение работы на люксметре Ю 116. Составить таблицу пределов измерений этого прибора.

Таблица 1

Пределы измерений люксметра Ю 116

№	Насадка и вставки	Ослабление лучистого потока	Положение кнопки (включ.)	
			Левая	Правая
1	«К»	1		
2	«К» + «М»	10		
3	«К» + «Р»	100		
4	«К» + «Т»	1000		

Определить освещенность рабочих мест студентов в аудиториях и лаборатории. Сравнить с санитарно-гигиеническими нормами.

Задание 2. Проверка закона обратных квадратов.

Установить на оптической скамье лампу с защитным экраном накаливания и фотоэлемент. Включить лампу. Передвигая фотоэлемент, измерить освещенность при разных расстояниях от лампы до фотоэлемента. Следить, чтобы поверхность фотоэлемента была перпендикулярна лучистому потоку. Результаты занести в таблицу 2 и вычислить среднюю энергетическую силу света лампы.

Таблица 2

Зависимость освещенности
от расстояния до точечного источника света

№ опыта	r , м	r^2 , м ²	r^{-2} , м ⁻²	E , лк	I , кд	$\langle I \rangle$, кд
1						
...						
6						

Задание 3. Вычисление яркости лампы по данным таблиц 2 и 3 и известной площади нити накаливания ($S = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

Вычисление производится для трех значений расстояний. Привести расчетную формулу.

Таблица 3

№ опыта	r , м	E , лк	I , кд	B , кд/м ²	$\langle B \rangle$, нит
1					
2					
3					

Задание 4. Проверка закона косинуса.

Установить фотоэлемент в отверстие с лимбом, повернув его перпендикулярно лучистому потоку. Это начальное положение соответствует углу падения, равному 0 ($\cos 0^\circ = 1$). Поворачивая фотоэлемент, снять зависимость освещенности от угла поворота через каждые 10° в интервале 0 – 50° . Результаты занести в таблицу 4.

Таблица 4

Зависимость освещенности от косинуса угла поворота

№ опыта	α°	$\cos \alpha$	E , лк	$E_{теор}$
1	0			
...	...			
5	50			

Зная расстояние до лампы и силу света, вычислить теоретическую освещенность по закону освещенности.

Построить в прямоугольных координатах график зависимости освещенности от косинуса угла. По известному расстоянию и среднему значению силы света рассчитать теоретическую освещенность.

Задание 5. Изучение экономичности источника света.

Определить зависимость силы света светового потока, световой отдачи и удельного расхода мощности исследуемой электролампы от потребляемой мощности.

Таблица 5

Зависимость светотехнических характеристик лампы накаливания от потребленной мощности

№	Измеряемые			Расчетные					
	U , В	I , А	P , Вт	E , лк	I , кд	Φ , лм	B , нит	Z	η
1	250								
2	225								
3	200								
4	175								
5	150								

Задание 6 (выполняется в рамках УНИРС). *Анализ направленности излучения.*

Установить фотоэлемент на расстоянии 0,5 м от лампы перпендикулярно лучистому потоку и зафиксировать его положение. Поворачивая лампу вокруг оси, снять зависимость освещенности от угла поворота Θ в интервале $0^\circ - 360^\circ$ через 20° . Результаты занести в табл. 6 и построить полярную диаграмму зависимости $E(\Theta)$. Длины отрезков, проведенных из центра диаграммы под углами Θ , пропорциональны средним значениям освещенности для этих направлений.

Таблица 6

Зависимость освещенности от угла Θ

№	Θ	E , лк
1	0	
2	20	
...	...	
18	360	

Задание 7. *Сравнить светотехнические характеристики ламп накаливания и люминесцентных ламп нового поколения.*

Контрольные вопросы

1. Дать определение понятиям: сила света, световой поток, светимость, освещенность, яркость, световая отдача, удельный расход мощности электрической энергии.
2. Дать определение единицам измерения: кандела, радиан, стерадиан, люмен, люкс, нит.
3. Дать определение понятиям: поток излучения, энергетическая светимость, энергетическая сила света, энергетическая яркость.
4. Уметь пользоваться соотношениями (числовыми коэффициентами) между энергетическими и световыми единицами измерения.
5. Применить законы освещенности для точечного и протяженного источников света в решении фотометрических задач.

3. Изучение поглощения и отражения света (работа выполняется звеньями по 2 человека)

Цель работы: изучить физические основы визуальной фотометрии; изучить оптическую схему и принцип работы шаровых фотометров; определить коэффициенты поглощения и отражения различных материалов; экспериментально подтвердить закон Бугера – Ламберта.

Теоретические основы работы

Явления поглощения (абсорбции) и отражения света веществом объясняются с точки зрения электромагнитной теории следующим образом. Падающая на вещество электромагнитная световая волна имеет частоту $10^{14} - 10^{15}$ Гц. С такой частотой в веществе смогут колебаться только электроны, так как ионы слишком велики и при таких частотах не успевают смещаться под действием переменного электромагнитного поля. В результате колебания электронов возникают вторичные электромагнитные волны той же частоты в виде отраженных и преломленных волн.

Поглощением света называется уменьшение энергии световой волны, происходящее по мере проникновения ее в глубь вещества. Если свет падает параллельным пучком нормально к поглощающему веществу, то зависимость между интенсивностью падающего потока излучения I_0 и интенсивностью I прошедшего слоя толщины d выражается *законом Бугера – Ламберта*:

$$I = I_0 e^{-kd}, \quad (1)$$

где k – коэффициент поглощения вещества, зависящий от длины волны света, химической природы и состояния вещества. Не зависящий от интенсивности света коэффициент поглощения численно равен единице, деленной на толщину слоя вещества, по прохождению которого интенсивность света уменьшается в $e = 2,72$ раза.

Формула (1) справедлива только для монохроматической плоской волны.

Поглощение света веществом связано с его электропроводностью.

Металлы хорошо поглощают свет, что объясняется наличием в них свободных электронов, которые под действием падающей волны приобретают большую амплитуду колебаний. Энергия, приобретаемая электронами, расходуется на излучение вторичных волн и переходит в тепло. Из-за высокой концентрации электронов проводимости поглощение света происходит в очень тонком слое металла, вблизи поверхности.

В видимой и особенно ультрафиолетовой области у металлов заметно снижается коэффициент поглощения, соответственно возрастает прозрачность тонких слоев. Это доказывает, что при больших частотах существенную роль в оптических свойствах металлов начинают играть вынужденные колебания связанных электронов и ионов, образующих кристаллическую решетку металла.

Получение тонких металлических пленок и покрытий с заданными оптическими характеристиками лежит в основе современных нанотехнологий.

Диэлектрики слабо поглощают свет. В диэлектрике все электроны связаны; они колеблются с собственной частотой ω_0 и «раскачать» их падающей волне трудно. Однако в том случае, когда частота падающей световой волны ω близка к частоте собственных колебаний электрона $\omega \approx \omega_0$ (резонанс), амплитуда вынужденных колебаний резко возрастает, возрастает и коэффициент поглощения. Таким образом, поглощение света в диэлектрике имеет селективный (избирательный) характер.

У прозрачных тел полосы поглощения лежат в области инфракрасных и ультрафиолетовых участков спектра. У окрашенных веществ, например, красок, полосы находятся в видимой области спектра. Так, «красным» является стекло, слабо поглощающее красные и оранжевые лучи, и хорошо поглощающее синие, зеленые и фиолетовые. Если красное стекло осветить синим светом, то оно будет казаться «черным», так как синие лучи хорошо поглощаются красным стеклом.

Отраженная (вторичная) волна возникла вследствие того, что падающая электромагнитная волна привела электроны в атомах в колебательное движение. В результате этого атомы сами начинают излучать электромагнитные вторичные волны с частотой падающей волны. Металлы хорошо отражают свет. Отражение от диэлектриков зависит от состояния поляризации падающего света.

Вывод расчетных формул

Явления отражения, поглощения и пропускания света характеризуют при помощи соответствующих коэффициентов:

1) коэффициент отражения r равен отношению отраженного светового потока Φ_r к падающему Φ_0 , то есть:

$$r = \Phi_r / \Phi_0; \quad (2)$$

2) коэффициент поглощения k равен отношению поглощенного светового потока Φ_k к падающему световому потоку Φ_0 , то есть:

$$k = \Phi_k / \Phi_0; \quad (3)$$

3) коэффициент пропускания t равен отношению прошедшего через тело светового потока Φ_t к падающему световому потоку Φ_0 , то есть:

$$t = \Phi_t / \Phi_0. \quad (4)$$

На основании закона сохранения энергии можно записать:

$$\Phi_0 = \Phi_r + \Phi_k + \Phi_t. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (2) – (5), получим:

$$k + r + t = 1.$$

То есть сумма коэффициентов поглощения, отражения и пропускания равна 1.

Если тело непрозрачно, то $t = 0$ и тогда $r + k = 1$.

Идеально белым телом называется такое тело, у которого коэффициент отражения r равен единице, поэтому r характеризует степень белизны, а величина $k = 1 - r$ характеризует степень черноты тела.

При освещении белым светом окрашенные тела кажутся цветными. Если слой краски достаточно толст, то цвет тела определяется ею и не зависит от свойств, лежащих под краской слоев. Краску можно представить в виде мелких частиц, избирательно рассеивающих свет и погруженных в прозрачную связывающую их массу, например масло. Свойства краски определяются коэффициентами k , r и t этих частиц.

Наиболее высоким коэффициентом отражения обладают металлы. Если у стекла коэффициент отражения от поверхности равен 4 %, то у металлов он достигает 80 – 90 % (при чистой полированной поверхности). У металлов с незначительными следами коррозии коэффициент отражения значительно уменьшается. Жидкий раствор краски, так же как и металл, обладает высокой отражательной способностью.

Коэффициент отражения неразрывно связан с коэффициентом яркости. Коэффициентом яркости поверхности называют отношение яркости светорассеивающей поверхности к яркости «идеального рассеивателя», находящегося в тех же условиях освещения.

За «идеальный рассеиватель» принимают поверхность, отражающую весь падающий на нее световой поток. В качестве такого «идеального рассеивателя» обычно берут баритовую пластинку.

В том случае, когда измеряемый образец и баритовая пластинка имеют одинаковые светорассеивающие свойства, коэффициент отражения образца определяют из выражения

$$r = Rr_n, \quad (6)$$

где r – коэффициент отражения образца;

R – отношение коэффициента яркости образца к коэффициенту яркости баритовой пластинки;

r_n – коэффициент отражения баритовой пластинки, указанный в аттестате.

Для многих технических задач часто необходимо знать степень «близны» материала, то есть оценить, на сколько цвет материала отличается от белого. «Белизна» материала оценивается коэффициентом яркости для белого (или зеленого) света и отношением коэффициента яркости для красного света к коэффициенту яркости для зеленого света R_b / R_K или отношением коэффициента яркости в синем свете к коэффициенту яркости в зеленом свете R_c / R_K .

Коэффициент яркости поверхности зависит от угла падения лучей и от направления луча зрения наблюдателя. Почти все светорассеивающие поверхности при направленном освещении обнаруживают блеск, который проявляется в том, что яркость поверхности в направлении зеркального отражения оказывается больше, чем в других направлениях.

Блеск испытываемой поверхности характеризуют коэффициентом $\gamma(\alpha)$, который равен отношению коэффициентов яркости образца при углах α и 0^0 , то есть:

$$\gamma(\alpha) = \frac{R_\alpha}{R_0} \cdot \frac{1}{p}, \quad (7)$$

где R_α – коэффициент яркости образца при наклоне его на угол α ;
 R_0 – коэффициент яркости образца при угле 0^0 ;
 p – поправка, учитывающая изменение яркости испытываемого образца, происходящее при изменении угла от 0^0 до 45^0 :

$$p = \frac{\cos(45^0 - \alpha)}{\cos 45^0}.$$

При работе на фотометрах отношение коэффициентов яркости образца при углах α и 0^0 можно связать с отсчетами по правому барабану при углах α и 0^0 . Тогда формула (7) примет вид:

$$\gamma(\alpha) = \frac{100}{m(\alpha)} \cdot \frac{1}{p}, \quad (8)$$

где 100 – отсчет по правому барабану при угле 0^0 ;
 $m(\alpha)$ – средний отсчет по правому барабану фотометра при угле наклона образца α ;
 p – поправка, которая берется для соответствующего угла из таблицы.

Рассмотрим основные положения определения коэффициента светопропускания различных материалов. Пусть через однородное вещество толщиной l проходит световой поток параллельных лучей Φ . Выделим в этом веществе бесконечно тонкий слой толщиной dl . Тогда естественно

положить, что уменьшение светового потока $d\Phi$ пропорционально значению самого светового потока Φ и толщине слоя dl , то есть:

$$-d\Phi = k\Phi dl, \quad (9)$$

где k – коэффициент поглощения.

Перепишем выражение (9) в виде

$$d\Phi / \Phi = -kdl.$$

Проинтегрируем последнее выражение:

$$\int_{\Phi_0}^{\Phi_t} d\Phi / \Phi = -k \int_0^l dl.$$

$$\text{Тогда} \quad \ln \Phi_t - \ln \Phi_0 = -kl; \quad \ln \Phi_t / \Phi_0 = -kl, \quad (10)$$

$$\text{откуда} \quad \Phi_t = \Phi_0 e^{-kl}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) видно, что световой поток после прохождения через слой вещества изменяется по экспоненциальному закону (закон Бугера – Ламберта).

Для различных веществ численное значение коэффициента поглощения k различно и колеблется в широких пределах.

В качестве примера приводим коэффициенты поглощения видимых лучей, которые определяются величинами порядка $0,01 - 0,03 \text{ см}^{-1}$ для стекла (в зависимости от сорта), $0,001 \text{ см}^{-1}$ для воды и $2 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ для воздуха (в зависимости от его влажности).

Найдем из выражения (10) коэффициент поглощения:

$$k = -\frac{1}{l} \ln \frac{\Phi_t}{\Phi_0} = -\frac{2,3}{l} \lg \frac{\Phi_t}{\Phi_0} = \frac{2,3}{l} D,$$

$$D = -\lg \frac{\Phi_t}{\Phi_0}. \quad (12)$$

Величину D называют оптической плотностью вещества.

Подставляя (4) в выражение (12), получим зависимость оптической плотности вещества от коэффициента пропускания

$$D = -\lg t = \lg \frac{1}{t}, \quad (13)$$

где t – коэффициент пропускания вещества.

Из уравнения (13) найдем коэффициент светопропускания материалов:

$$t = 1/10^D.$$

Оптическая схема и принцип работы визуального фотометра

Фотометр ФМ-58 (рис. 1) состоит из следующих основных узлов: фотометрической головки 1, в которой находятся оптические детали; револьверного диска с одиннадцатью светофильтрами 2, номера которых выгравированы на крышке фотометра; штатива 3; предметного столика 4, который может перемещаться при помощи кремальеры 5; плоского зеркала 6, осветителя 7 с двумя конденсорами 8. В верхней части фотометрической головки находится окуляр 9. К прибору прилагается блок питания (понижающий трансформатор 220/8 В и ряд приспособлений).

Все детали смонтированы на массивном круглом основании.

В основу устройства прибора положен принцип уравнивания двух световых потоков путем изменения одного из них с помощью диафрагмы с переменным отверстием. На рис. 2 изображена оптическая схема фотометра.

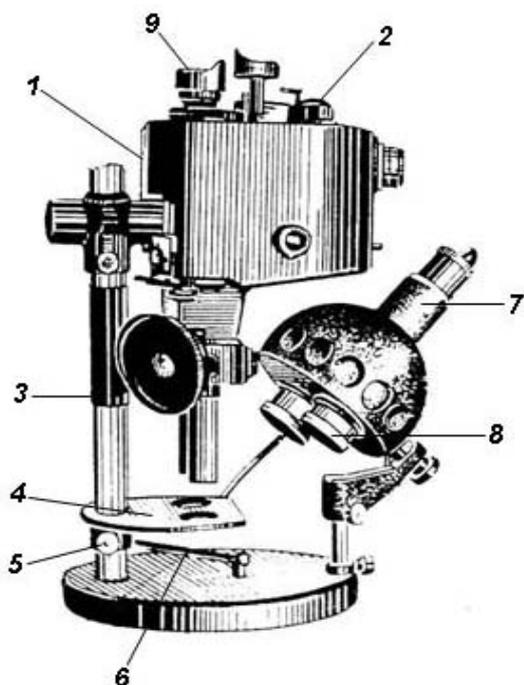


Рис. 1

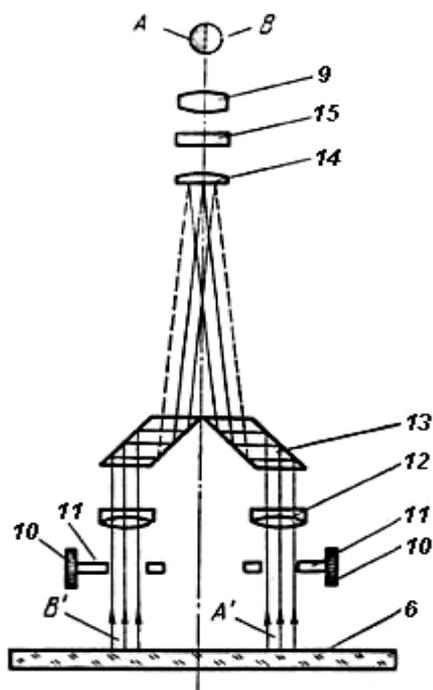


Рис. 2

Два параллельных световых пучка A' и B' , выходящие из осветителя 7, отразившись от зеркала 6, попадают в прибор через две диафрагмы 10, степень раскрытия которых регулируется поворотом барабана 11 (рис. 3). Далее световые пучки A' и B' объединяются с помощью объективов 12 и ромбических призм 13 и попадают на бипризму 14, которая сводит два пучка к оси окуляра 9, причем часть правого пучка, попадая на левую половину бипризмы, создает яркость левой половины поля зрения, а другая

часть его, попадающая на правую половину бипризмы, отклоняется в сторону и поглощается внутри прибора. Левый пучок проходит симметрично.

Из бипризмы лучи проходят через один из одиннадцати светофильтров 15, помещенных в револьверном диске 2, и попадают в окуляр 9, а из окуляра через наглазник в глаз наблюдателя. В окуляре должна быть видна резкая линия раздела полей сравнения.

Во время фотометрирования глаз наблюдателя должен быть прижат к наглазнику окуляра и по возможности всегда принимать при измерениях одно и то же положение. Для наблюдения поля близоруким наблюдателем над окуляром помещено очковое стекло.

Наблюдатель видит поле зрения в форме круга А и В, разделенного линией на две половины, имеющие в общем случае различную яркость. Яркость правой части поля определяется световым потоком, проходящим через левую диафрагму, а левой – через правую.

Когда обе диафрагмы 10 одинаково освещены и в одинаковой мере раскрыты, то яркость обеих половин поля зрения будет одинакова. Если при равенстве яркостей обеих половин поля зрения на пути одного светового потока, например А', поместить пластину из какого-либо вещества, поглощающего или отражающего свет, то фотометрическое равенство нарушится, так как поле А станет менее ярким. Чтобы уравнять поля, необходимо уменьшить яркость поля В, что осуществляется изменением отверстия диафрагмы, через которую проходит световой поток В'.

На измерительных барабанах 11 нанесены две шкалы – черная и красная. Черная шкала показывает в процентах отношение площади отверстия диафрагмы S при данном ее раскрытии к площади S_0 при ее максимальном раскрытии. Так как световой поток равномерного пучка света, проходящего через диафрагму, пропорционален площади ее раскрытия, то отношение площадей отверстий диафрагмы дает отношение световых потоков А' и В'. Следовательно, показания черной шкалы барабана дают непосредственно коэффициент пропускания t или отражения r для данного образца в процентах, то есть отношение светового потока, прошедшего через данный образец или отраженного от данного образца, к световому потоку, падающему на него.

Красная шкала на барабане 11 соответствует оптической плотности образца D . Для удобства измерения шкалы барабанов снабжены лупами. Визирные индексы, с помощью которых производится отсчет, помещены под барабанами.

Экспериментальная часть

Задание 1. Измерить коэффициенты поглощения света прозрачных тел и представить результаты измерений графически, построив зависимость коэффициента поглощения k от длины волны λ [$k = f(\lambda)$].

1. Привести фотометр в рабочее положение:

а) включить через понижающий трансформатор напряжением 220/8 В лампу осветителя;

б) осветитель установить так, чтобы световые пучки, направляемые зеркалом снизу, давали бы одинаковую освещенность отверстий фотометра (при этом оба барабана должны стоять на 100, что соответствует одинаковой степени раскрытия диафрагм);

в) ввести зеленый светофильтр под номером 4, поворачивая револьверный диск 2, который расположен в верхней части прибора.

Для создания равномерно светящегося фона наблюдений в пазы оправ конденсоров вставить матовые рассеиватели. После этого светофильтр выключают.

2. Правый барабан оставить на делении 100 (по черной шкале), что соответствует плотности потока энергии падающего света $I_0 = 100$, а левым барабаном уравнивать поля фотометра по яркости. Такое уравнивание произвести 3 – 5 раз и вычислить среднее положение фотометрического равновесия для левого барабана. Установить левый барабан в это положение и не менять его в процессе работы.

3. Микрометром измерить толщину d исследуемого образца из прозрачного материала. Измерения провести в нескольких точках и взять среднее значение.

4. Исследуемый образец поместить на предметный столик под левой диафрагмой, при этом правая половина поля зрения темнеет. Вращая правый измерительный барабан, добиться равенства яркостей обеих половин зрения и взять отсчет $D = \lg \frac{I}{I_0} = \lg \frac{1}{t}$ прямо по красной шкале правого ба-

рабана. Установку на равенство провести 3 – 5 раз и из полученных отсчетов взять среднее арифметическое.

Так как яркость полей освещения определяется величиной световых потоков, то можно считать, что значение коэффициента пропускания t равно отношению плотностей потока энергии I/I_0 .

5. По формуле (2) вычислить коэффициент поглощения k исследуемого образца в белом свете.

6. Измерить коэффициент поглощения прозрачных цветных образцов (из синего, красного, зеленого стекла или плексигласа) для различных длин волн. Для этого каждый из исследуемых образцов поместить на столик под левой диафрагмой; включить последовательно светофильтры от № 1 до № 8, поворачивая диск 2, и для каждого светофильтра сделать отсчеты оптической плотности D образца (по красной шкале).

По формуле (2) вычислить значения коэффициентов поглощения k . Каждый раз при включении нового светофильтра провести установку фотометра на фотометрическое равновесие.

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Коэффициенты поглощения для белого света

№	Название образца	d	D	k
1	Бесцветный			
	Среднее значение		X	
2	Цветной образец:			
	Красный			
	Синий			
	Зеленый			

Таблица 2

Коэффициенты поглощения для монохроматического света

№ фильтра	Маркировка фильтра	$\lambda_{эфф}$ Нм	Красный образец		Синий образец		Зеленый образец	
			D	k	D	k	D	k
1	М-72	726						
2	М-66	665						
3	М-61	610						
4	М-57	574						
5	М-53	533						
6	М-50	496						
7	М-47	465						
8	М-43	432						
9	К-2	633						
10	К-4	550						
11	К-6	478						

Примечания: 1. Фильтр пропускает излучение определенной эффективной длины волны ($\lambda_{эфф}$).

2. Область пропускания фильтров от № 1 до № 8 сравнительно узка; эти восемь фильтров делят видимую область спектра примерно на равные участки шириной в 40 мкм каждый. Три светофильтра № 9, 10, 11 обладают более широкой областью пропускания; они делят видимую область спектра на три части: красную, зеленую и синюю.

Для определения k используем светофильтры от № 1 до № 8. Светофильтры № 9, 10, 11 включают только при определении коэффициента отражения r .

7. Построить график зависимости коэффициента поглощения от длины волны $k = f(\lambda)$ для синего, красного и зеленого образцов и определить интервалы полос поглощения.

По оси абсцисс отложить длину волны λ , а по оси ординат – найденное значение k . Длины волны света, пропускаемые каждым светофильтром, указаны в таблице записи результатов.

Задание 2. Измерить коэффициент отражения света (работа выполняется по желанию студента).

При определении коэффициентов отражения плоское зеркало б (см. рис. 3) прибора заменяется специальным столиком с держателями А и В для исследуемых образцов.

1. Включить лампу осветителя через блок питания.

2. Поместить на столик прибора в держатели А и В две эталонные баритовые пластинки и осветитель установить так, чтобы обе пластинки были равномерно освещены (оба барабана 11 должны стоять на 100 по черной шкале).

3. Произвести фокусировку окуляра на линию раздела обоих полей (А и В).

4. Левый барабан оставить на делении 100 (по черной шкале), что соответствует значению интенсивности падающего света $I_0 = 100$, а правым барабаном провести уравнивание полей фотометра по яркости. Такое уравнивание провести 3 – 5 раз и вычислить среднее положение фотометрического равновесия. Установить правый барабан в это положение и больше не трогать.

5. Заменить эталонную пластинку в правом держателе А исследуемым образцом, при этом левая половина поля зрения темнеет. Вращая левый измерительный барабан, добиться равенства яркостей обеих половин поля зрения и взять отсчет по черной шкале левого барабана. Этот отсчет дает значение коэффициента отражения образца r для белого света.

6. Поворачивая револьверный диск 2, включить поочередно светофильтры № 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. Для каждого светофильтра провести уравнивание полей зрения фотометра А и В по яркости и каждый раз записывать показания левого барабана – значение коэффициента отражения r для данного образца при данном светофильтре.

7. Построить график зависимости коэффициента отражения r от длины волны $r = f(\lambda)$ для каждого образца, откладывая по оси x длину волны λ , а по оси y показатель отражения r .

Длины волн света, пропускаемые каждым светофильтром, указаны в таблице записи результатов. Значения r , соответствующие светофильтрам, пишут в графе D таблицы; графу k опускают.

Задание 3. Проверить справедливость закона Бугера – Ламберта для бесцветных фильтров (работа выполняется в рамках учебного исследования).

1. Получить коллекцию бесцветных (нейтральных) фильтров различной толщины.

2. Микрометром измерить толщину фильтров.

3. Определить коэффициенты поглощения фильтров различной толщины; построить теоретический и экспериментальный график зависимости интенсивности прошедшего света от толщины фильтра.

4. Составить методику проверки закона Бугера – Ламберта для цветного фильтра. Объяснить полученные результаты.

Задание 4. Измерить блеск синтетических материалов.

1. На основании штатива установить вместо плоского зеркала приспособление для измерения блеска. При этом отсчетный лимб приспособления должен находиться слева от наблюдателя. Из конденсоров осветителя удалить матовые рассеиватели.

2. Круглый держатель с испытуемым образцом укрепить на поворотном столике с правой стороны приспособления для измерения блеска. С левой стороны приспособления на квадратном держателе с хвостовиком разместить баритовую пластинку.

3. Правый барабан установить на отсчет 100 по черной шкале. Вращая левый барабан, добиться фотометрического равновесия. Это положение барабана при дальнейших измерениях не должно сбиваться.

4. Столик вместе с образцом повернуть на 5° в сторону осветителя. Яркость поля, образованного правым световым потоком, при этом увеличится. Для восстановления фотометрического равновесия вращать правый барабан, уменьшая площадь правой диафрагмы. По черной шкале определяют отсчет m (5°), соответствующий среднему значению фотометрического равновесия.

5. Образец наклонить на угол 10° в сторону осветителя и определить отсчет m (10°) как среднее из нескольких отсчетов и т.д.

6. Блеск испытуемой поверхности вычислить по формуле (8).

По результатам измерений построить график зависимости числа γ от угла α при изменении угла от 0 до 45° .

Задание 5. *Определить коэффициент яркости синтетических материалов.*

1. На поворотном столике в гнезда вставить квадратные держатели со штырьками. Поворотный столик установить в горизонтальное положение (отсчет 0 по лимбу, находящемуся на барабане с левой стороны приспособления для измерения блеска). Коэффициент яркости на фотометре измеряется в направлении нормали к образцу при освещении под углом 45° . На держатели под правым и левым объективами кладут баритовые пластинки.

2. На держателе под правым объективом заменить баритовую пластинку исследуемым образцом. Правый барабан устанавливают на деление, равное коэффициенту яркости баритовой пластинки. Поворотом левого барабана добиваются фотометрического равновесия.

3. На место измеряемого образца установить баритовую пластинку с тем же коэффициентом яркости, что и первая, и вращением правого измерительного барабана восстановить нарушенное фотометрическое равновесие. Полученные на правом барабане по черной шкале отсчеты равны коэффициенту яркости измеряемого образца.

Зная коэффициент отражения баритовой пластинки $r_n = 92\%$, по формуле (6) вычисляют коэффициент отражения образца.

Аналогичные измерения и вычисления проводят для других материалов.

Задание 6. *Измерить белизну синтетических материалов.*

Степень белизны материала можно условно определить по коэффициентам яркости для трех длин волн. Измерения выполнить для трех светофильтров: красного, синего и зеленого (№ 6, 7, 8). В качестве образцов обычно берут цветные ткани.

1. Поместить на приспособлении для блеска под правым объективом исследуемый образец, под левым объективом – баритовую пластинку.

2. С помощью рукоятки ввести в ход лучей светофильтр № 6 и определить коэффициент яркости образца для красного света методом, описанным в упражнении 5.

3. В ход лучей ввести светофильтры № 7 и 8 и найти коэффициенты яркости R_c и R_z для синего и зеленого света. Отношение R_b/R_k и R_c/R_k дает белизну данного материала.

Результаты измерений и вычислений запишите в таблицу:

№	Образец	Светофильтр	R	R_b/R_k	R_c/R_k
1	красный синий зеленый	R_k R_c R_z			
2					

Контрольные вопросы

1. Дать определение коэффициентам отражения, поглощения и пропускания. Привести примеры строительных материалов с высоким значением этих коэффициентов.

2. Дать определение яркости и коэффициенту яркости. Назовите модель «идеального рассеивателя».

3. Что такое блеск? Приведите примеры положительного и нежелательного проявления блеска.

4. Сформулируйте закон Бугера – Ламберта. Сравните коэффициента поглощения нескольких веществ.

5. Перечислите возможности оптической фотометрии. Нарисуйте оптическую схему фотометра МФ-58 и поясните принцип его работы.

4. Изучение акустических стоячих волн (работа выполняется звеньями по 2 студента)

Цель работы: изучить условия образования и свойства стоячих волн; освоить метод акустического резонанса с осциллографической регистрацией амплитуды стоячей волны, изучить зависимость скорости звука от частоты.

Введение

Техническое применение механических волн звукового диапазона весьма велико и разнообразно. Звуковые и ультразвуковые колебания применяются в промышленности и на транспорте (локация, дефектоскопия, контроль изделий) и для интенсификации многих технологических процессов (дегазация жидкостей, кавитация, эмульсирование, очистка поверхностей, пайка и сварка пластмасс). Особый интерес представляет воздействие звуковых волн на вещество и механизмы (уменьшение трения, скольжения и увеличение сыпучести порошков в звуковом поле). Распространение механических колебаний в среде сопровождается как поглощением, так и рассеянием колебательной энергии на всякого рода неоднородностях вещества – вихрях в газах и жидкостях, на дисперсных примесях и на зернах поликристаллических тел. Например, коэффициент поглощения звука зависит от влажности воздуха. Установленные взаимосвязи лежат в основе работы контрольных приборов и акустических датчиков.

Теоретические основы работы

Волновой процесс (волна) – это процесс распространения колебаний в сплошной среде. При распространении волны частицы среды колеблются около своих равновесных положений. Вместе с волной от частицы к частице среды передается состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому основное свойство бегущих волн, независимо от их природы, – перенос энергии без переноса вещества. Стоячие волны энергию не переносят.

В продольных волнах частицы среды колеблются по направлению распространения волны. Продольные волны могут распространяться в среде, где возникают упругие силы при деформации сжатия и разряжения, то есть в твердых телах, жидкостях и газах.

В данной работе изучаются звуковые (акустические) волны с частотами $16 - 20 \cdot 10^3$ Гц, распространяющиеся в воздухе.

Рассмотрим характеристики волн и выведем уравнение стоячей волны. Уравнение плоской бегущей волны, распространяющейся вдоль Ox , имеет вид:

$$\xi(x, t) = A \cos [\omega (t - x/v)]. \quad (1)$$

Оно справедливо как для продольных, так и для поперечных волн. Здесь $\xi(x, t)$ – отклонение колеблющейся величины от положения равновесия (в случае механической волны – это смещение колеблющейся частицы; в случае звуковой волны – изменение давления либо плотности газа);

A – амплитуда колебаний;

$\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота волны.

Между фазовой скоростью распространения любой волны v , ее длиной λ , волновым числом $k = 2\pi/\lambda$ и частотами ν и ω существует простая связь:

$$v = \lambda \nu = \omega/k. \quad (2)$$

В природе и технике встречаются случаи, когда две бегущие волны с одинаковыми частотами и амплитудами распространяются навстречу друг другу. Результирующий колебательный процесс называется стоячей волной.

Стоячие волны – это колебания в упругой среде, возникшие в результате интерференции двух бегущих волн, амплитуды и частоты которых одинаковы, а направления распространения противоположны. Они возникают в результате наложения отраженной волны на падающую. Амплитуда стоячей волны в данной точке зависит от разности фаз волн. Следует учесть, что при отражении от границы с более плотной средой отраженная волна теряет половину волны, то есть отстает по фазе на π радиан. При отражении от границы с менее плотной средой потери фазы не происходит.

Для получения уравнения стоячей волны рассмотрим наложение двух плоских монохроматических волн, распространяющихся вдоль Ox в противоположных направлениях.

$$\xi_1 = A \cos [\omega (t - x/v)] \quad \xi_2 = A \cos [\omega (t + x/v)].$$

Смещение частиц среды, в которой распространяются эти волны, определяется суммой:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = A \cos [\omega (t - x/v)] + A \cos [\omega (t + x/v)].$$

Воспользовавшись формулой для суммы косинусов, получим:

$$\xi = A \cos (\omega x/v) \cos(\omega t) = 2A \cos (2\pi x/\lambda) \cos(\omega t). \quad (3)$$

Это и есть уравнение стоячей волны. Оно определяет смещение любой колеблющейся частицы от положения равновесия в зависимости от ее

координат в любой момент времени. Из уравнения (3) видно, что все частицы среды, колеблются с одинаковой частотой ω и с амплитудой, равной $2A \cos(2\pi x / \lambda)$. Причем амплитуда колебаний не зависит от времени, а определяется только координатой. В точках, координаты которых удовлетворяют условию:

$$2\pi x / \lambda = \pi k \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

амплитуды колебаний максимальны и равны $2A$. Эти точки называются пучностями стоячей волны. Их координаты определяются формулой:

$$x_n = k \lambda / 2 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (4)$$

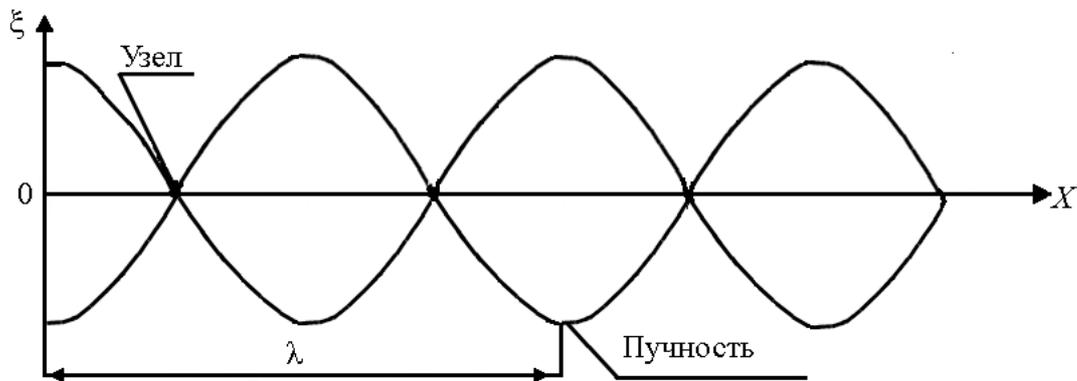
В точках, координаты которых удовлетворяют условию:

$$2\pi x / \lambda = (2k + 1) \pi / 2 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

амплитуды колебаний частиц равны нулю. Эти точки называются узлами стоячей волны. Их координаты определяются формулой:

$$x_y = (2k + 1) \lambda / 4 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (5)$$

Следует отметить, что формулы (1) – (5) справедливы как для поперечных так и для продольных волн. На рисунке приведена «моментальная» фотография поперечной стоячей волны в момент времени, когда отклонение частиц от положения равновесия максимальны.



Как видно, соседние узлы отстоят друг от друга на расстоянии $\lambda / 2$. В интервале между двумя соседними узлами находятся точки, колеблющиеся с различными амплитудами, но в одинаковых фазах, то есть одновременно достигающие максимума. В смежном интервале характер колебаний такой же, но фаза будет противоположна. Так как стоячая волна является результатом сложения двух колебаний, идущих в разные стороны, то поток энергии, переносимый в одну сторону, равен потоку энергии, переносимому в другую сторону. Результирующий поток энергии равен нулю, то есть стоячая волна энергии не переносит.

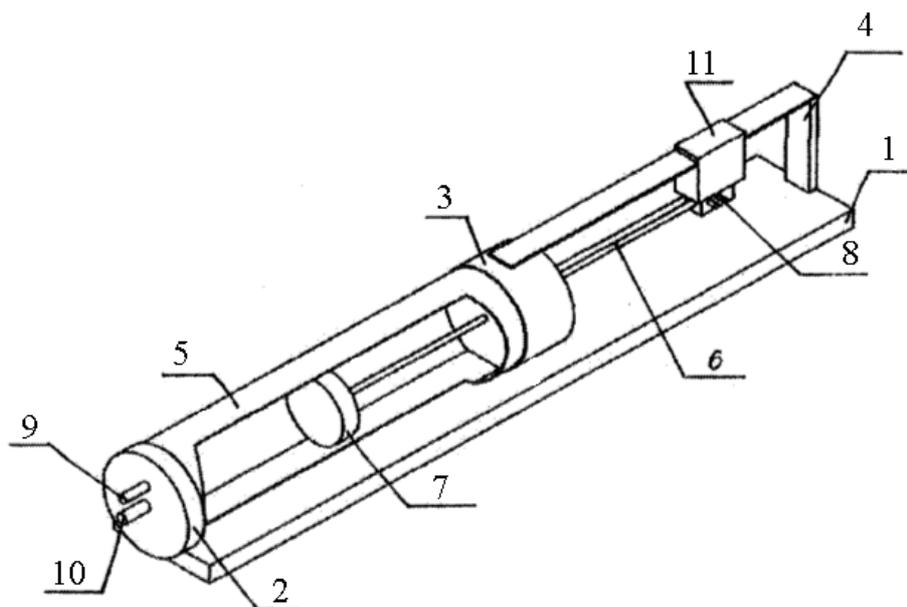
Обычно стоячие волны возникают при распространении упругих колебаний в телах ограниченных размеров. Вследствие многократных отражений от границ тела с окружающей средой падающая волна вызывает множество отраженных волн. В результате взаимодействия падающей и отраженных волн в теле возникает колебание очень сложной формы. Если размеры тела таковы, что отраженные волны, взаимодействуя, усиливают друг друга, то амплитуда результирующего колебания возрастает – наступает резонанс.

Звуковые колебания представляют собой периодические чередования сжатий и растяжений в газе – продольную волну. Важно обратить внимание также на различие бегущей и стоячей волн, подчеркнув при этом, что колебание отдельных точек в этих волнах подчиняется синусоидальному закону. И в этом отношении бегущая и стоячая волны неразличимы. Различие обнаруживается при сравнении колебаний соседних точек. В бегущей волне, согласно уравнению $\xi = A \cos \omega(t - x/v)$, «соседние» по направлению распространения колебаний точки колеблются с одинаковой амплитудой, но имеют разные координаты x и, следовательно, разные фазы $\omega(t - x/v)$. Чем дальше точка от вибратора, тем больше ее колебания отстают по фазе. В стоячей же волне амплитуда меняется от точки к точке, достигая максимума в пучностях и оставаясь все время равной нулю в узлах. Что же касается фазы колебаний $\omega(t - x/v)$, то она не зависит от расстояния x и, следовательно, одинакова у всех точек. Точнее, синфазно колеблются все точки, лежащие между соседними узлами. При переходе же через узел фаза меняется на π .

Описание установки. Вывод расчетных формул

Внешний вид установки для выполнения работы показан на рисунке. На основании 1 укреплены держатели 2, 3 и 4. В держателях 2 и 3 закреплена стеклянная труба 5, внутри которой с помощью штока 6 перемещается поршень. В корпусе поршня установлен телефон 7, служащий источником звуковых волн. Этот источник звука питается от генератора низкой частоты, который подключается к клеммам 8. В корпусе держателя 2 расположен другой телефон, служащий приемником звуковых волн. Внутри держателя 2 имеется так же усилитель, который питается от отдельного источника питания через шнур питания 9. Выход усилителя подключен к

входу осциллографа через клеммы 10. При включении генератора от телефона 7 распространяется волна к приемнику. Возникает так же волна, отраженная от приемника звука. Таким образом, в трубе 5 могут возникать стоячие волны. Положение пучностей и узлов определяется по максимальному и минимальному сигналам на экране осциллографа, которые можно наблюдать при перемещении поршня. Положение поршня и величина его перемещения определяются с помощью штангенциркуля 11.



Рассмотрим условие резонанса колебаний в трубе с воздухом, закрытой с обоих концов. Покажем, что если линейная длина столба равна $l = n (\lambda / 2)$ (n – целое число), то в нем возникает резонанс. Действительно, при отражении от более плотной среды на одном конце трубы образуется узел. Расстояние между соседними узлами равно $\Delta l = \lambda / 2$, а так как длина столба предполагается равной $n(\lambda / 2)$, то и другой неподвижный конец оказывается в узле.

Подставляя значения λ в формулу $v = \lambda / T = \lambda \nu$ ($\nu = 1 / T$ – частота колебаний), получим выражение для скорости волны:

$$v = 2 \Delta l \nu. \quad (6)$$

В данной работе частота задается и регулируется источником звука – звуковым генератором. Поэтому скорость звуковых волн при различных частотах можно определить, изменяя длину воздушного столба и определяя положение пучностей либо узлов.

Экспериментальная часть

Задание 1. Изучить зависимость скорости звука от частоты

- 1.1. Подключить генератор к клеммам 8 рабочей установки.
- 1.2. Подключить вход «У» осциллографа к клеммам 10 установки.
- 1.3. Подключить шланг питания установки 9 к источнику питания, соблюдая полярность.
- 1.4. С разрешения преподавателя включить в сеть генератору осциллограф и источник питания (напряжение источника 9 вольт).
- 1.5. Установить на генераторе низкой частоты ($\nu = 1000$ Гц) и выходное напряжение 0,5 В.
- 1.6. Перемещая поршень 7 в трубе 5 добиться появления сигнала на экране осциллографа. Изменяя частоту развертки осциллографа, добиться, чтобы сигнал на экране был неподвижным.
- 1.7. Регулируя усиление осциллографа, добиться, чтобы при перемещении поршня синусоидальный сигнал находился в пределах экрана осциллографа.
- 1.8. Перемещая поршень вдоль трубы, определить по шкале штангенциркуля такие его положения l_1 и l_2 , при которых сигнал на экране осциллографа максимален. Эти положения поршня соответствуют пучностям стоячих волн, установившимся в трубе. Результаты измерений l_1 и l_2 , а также ν записать в табл. 1.
- 1.9. Устанавливая на генераторе низкой частоты последовательно частоты $\nu_2 = 1100$ Гц, $\nu_3 = 1200$ Гц, $\nu_4 = 1300$ Гц, $\nu_5 = 1400$ Гц, $\nu_6 = 1500$ Гц, $\nu_7 = 1600$ Гц, $\nu_8 = 1700$ Гц, $\nu_9 = 1800$ Гц, $\nu_{10} = 1900$ Гц, $\nu_{11} = 2000$ Гц, $\nu_{12} = 2500$ Гц, $\nu_{13} = 3000$ Гц проделать операции по пунктам 1.6 – 1.8. Обратить внимание на то, что начиная с частоты $\nu_6 = 1500$ Гц и выше имеется более двух положений поршня, а следовательно, и штангенциркуля (l_1, l_2, l_3, \dots) при которых сигнал на экране осциллографа максимален. При работе на частотах $\nu_{12} = 2500$ Гц и $\nu_{13} = 3000$ Гц выходное напряжение генератора должно быть 1 вольт.
- 1.10. Результаты измерений оформить в виде таблицы, причем значение l должно быть меньше l_1, l_2 меньше l_3 и так далее.

Таблица 1

Зависимость координат пучностей от частоты звука

№ п/п	Частота, Гц, ν	l_1 , мм	l_2 , мм	l_3 , мм	l_4 , мм	l_5 , мм	l_6 , мм

Задание 2. Определить скорости распространения звуковых волн

2.1. Для каждой из частот $\nu_1 \dots \nu_2$ вычислить расстояния между соседними пучностями стоячих волн: $\Delta l_1 = l_2 - l_1$, $\Delta l_2 = l_3 - l_2$ и так далее. Определить среднее значение Δl .

2.2. Учитывая, что $\Delta l = \lambda / 2$, вычислить для каждой из частот длину звуковой волны λ .

2.3. Воспользовавшись формулой (2), определить для каждой из частот скорость распространения звуковых волн в воздухе v .

2.4. Результаты данных вычислений оформить в виде табл. 2.

Таблица 2

Зависимость длины волны звука от частоты

№ п/п	Частота, Гц	Δl_1 , мм	Δl_2 , мм	Δl_3 , мм	Δl_4 , мм	Δl_5 , мм	Δl_6 , мм	λ , м	v , м/с

2.5. Построить графики зависимости длины волны звука и скорости его распространения в воздухе от частоты. Указать на графике погрешность измерения.

Контрольные вопросы

1. Волны в упругой среде, их уравнение и характеристики (амплитуда, циклическая частота, волновое число, фазовая и групповая скорость). Скорость звука.

2. Стоячие волны и их характеристики (амплитуда стоячей волны и ее зависимость от координаты; длина стоячей волны). Связь узлов стоячей волны с узлами деформации среды.

3. Почему стоячая волна не переносит энергии?

4. Как изменяется фаза звуковой волны при отражении более плотной среды?

5. Покажите, что расстояние между двумя соседними пучностями равно $\lambda/2$.

6. Вывести уравнение стоячей волны.

7. Как связана скорость распространения колебаний с упругостью среды?

8. Что называется молярной теплоемкостью?

9. Укажите области применения акустических волн в технике.

5. Исследование условий инсоляции городской застройки и зданий

Цель работы: оценка инсоляционного режима фасадов зданий в застройке и выбор типа секции жилого дома, а также оптимальных разрывов между зданиями; определение условий инсоляции отдельных помещений здания в зависимости от ориентации и географической широты местности; определение времени инсоляции помещений графическим методом с помощью траектории движения солнца, калотты и необходимых построений.

Теоретические основы работы

В термин «световой режим» входят два понятия: инсоляция и естественное освещение. *Инсоляция* – это облучение помещений, зданий или территорий прямыми солнечными лучами. *Естественное освещение* обеспечивается как за счет инсоляции, так и за счет рассеянного света от неба, отраженного от фасадов зданий, поверхности земли и т.д.

В спектре прямой солнечной энергии, обеспечивающей инсоляцию, для архитектора наибольший интерес представляют три вида излучения:

- ультрафиолетовое излучение (с длиной волны λ в пределах от $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ мм до $0,4 \cdot 10^{-3}$ мм);
- видимый свет ($\lambda \cong 0,4 \cdot 10^{-3}$ мм ... $0,8 \cdot 10^{-3}$ мм);
- инфракрасное излучение ($\lambda \cong 0,8 \cdot 10^{-3}$ мм ... 40 мм).

Влияние инсоляции может быть положительным или отрицательным в зависимости от интенсивности и продолжительности.

Положительное действие инсоляции определяется бактерицидным, биологическим, психологическим, эстетическим и экономическим аспектами.

В спектре ультрафиолетовой радиации содержатся излучения, оказывающие бактерицидное действие, то есть под действием этого излучения погибают болезнетворные бактерии. При наличии инсоляции в помещении ускоряется процесс заживления раневых поверхностей, обмен веществ, уменьшаются сроки реабилитации при сердечно-сосудистой патологии, нервных заболеваниях, что активно используется в лечебных и лечебно-профилактических учреждениях.

Под действием этих же излучений в организме человека вырабатывается витамин D, необходимый для обмена кальция, что в свою очередь влияет на работу мышечной, нервной и костной систем, изменение терморегуляции, дыхание и др. Причем из всего количества витамина D, кото-

рый необходим организму, большая часть образуется в коже именно под действием ультрафиолета. С продуктами питания поступает очень незначительное его количество.

Тепловое (радиационное) воздействие на помещения через светопроемы и на ограждающие конструкции зданий в холодное время года позволяет уменьшить расходы на отопление. При наличии инсоляции повышается производительность труда и работоспособность человека.

Инсоляция оказывает психологическое действие, оказывая влияние на динамику распределения яркостей и цветностей, обеспечивает связь с внешним пространством.

Инсоляция имеет и эстетический эффект: она определяет характер тенеобразования при освещении зданий прямым солнечным светом. Зрение человека адаптировано к яркостным и цветовым контрастам, создаваемым солнцем в условиях конкретного климата: на севере предпочтительны мягкие и пастельные цветовые соотношения, на юге – резкие контрасты и насыщенные цветовые соотношения. Эти контрасты неразрывно связаны с характером тенеобразования, который резко различается по геометрии и контрасту при переходе от севера к югу. Это определяет солнечный свет как архитектурную категорию, влияющую на выразительность пластического решения зданий.

Отрицательное действие инсоляции проявляется в перегреве, блескости и разрушающем действии.

Солнечные лучи, проникающие в помещение, отдают тепло поверхностям пола, стен и оборудования, которые, в свою очередь, превращаются в источники излучения тепловой энергии. Это способствует перегреву (особенно в летний период), вызывая ухудшение самочувствия людей. Особенно характерно такое явление для крупных городов, где много асфальта, а в застройке преобладает высокоэтажная и плотная. Перегрев влечет за собой и повышение расходов на вентиляцию и кондиционирование воздуха.

Солнечные лучи, попадая на поверхности под углом $< 27^\circ$, отражаясь, вызывает блескость, что приводит к утомлению зрения. При световом дискомфорте и перегреве снижается активность человека и настроение. Физическое и химическое действие солнечных лучей оказывает вред в помещениях для хранения пищи, в музеях, книгохранилищах и др.

Чрезмерная освещенность снижает восприятие формы и ощущение насыщенности цвета, способствует выцветанию поверхностей.

Поэтому продолжительность инсоляции определяется с учетом общеоздоровительного, психофизиологического, теплового, бактерицидного действия и рассчитывается на тот период года, когда она наиболее полезна

человеку и эффективна по астрономическим и природно-климатическим условиям конкретного климатического пояса.

Гигиенический норматив инсоляции ориентирован прежде всего на самые чувствительные и ранимые группы населения (дети, пожилые люди, больные).

Согласно СанПиН №10-25-94 «Обеспечения инсоляцией жилых и общественных зданий и территорий жилой застройки», инсоляция должна быть обеспечена на территории жилой застройки и во всех жилых и общественных зданиях с постоянным пребыванием людей за исключением отдельных помещений общественных зданий, где инсоляция не допускается по технологическим требованиям, предъявляемым к этим зданиям и помещениям. К таким помещениям относятся:

- операционные;
- реанимационные залы больниц;
- выставочные залы музеев;
- химические лаборатории вузов и НИИ;
- книгохранилища;
- архивы.

Дни, характеризующие инсоляцию для различных периодов времени года, принимают (по местному времени):

- 21 марта – день весеннего равноденствия;
- 21 июня – день летнего солнцестояния;
- 23 сентября – день осеннего равноденствия;
- 22 декабря – день зимнего солнцестояния.

Нормирование инсоляции осуществляется для весенне-осеннего периода. Выполнение требований норм достигается соответствующим размещением, ориентацией и планировкой зданий и помещений. В зимний период инсоляция не нормируется, так как в условиях нашей широты время и интенсивность инсоляции значительно уменьшаются и ее полезное действие сокращается.

С 21 марта по 23 сентября должна быть обеспечена следующая продолжительность инсоляции:

- а) для жилых и общественных зданий не менее 2,5 часов непрерывной инсоляции;
- б) для помещений здравоохранения, санаторно-курортных, отдыха, детских дошкольных учреждений, общеобразовательных школ и школ-интернатов, профессионально-технических училищ не менее 3 часов непрерывной инсоляции;

в) для территорий детских игровых площадок, спортивных площадок и зон отдыха жилых домов, групповых площадок детских дошкольных учреждений, спортивной зоны, зоны отдыха и учебно-опытной зоны общеобразовательных школ и школ-интернатов, профессионально-технических училищ не менее 2,5 часов непрерывной инсоляции.

Нормируемая продолжительность времени инсоляции должна быть обеспечена:

- в жилых домах не менее, чем в 1 жилой комнате для 1- – 3-комнатных квартир; не менее, чем в 2-х жилых комнатах для 4комнатных квартир;

- в общежитиях не менее, чем в 60 % жилых комнат (от общего их количества);

- в дошкольных учреждениях в игровых и групповых комнатах;

- в общеобразовательных школах, школах-интернатах, профессионально-технических училищах не менее, чем в 75 % классов и спальных-игровых (от общего их количества); не менее, чем в 50 % кабинетов и лабораторий (кроме кабинетов черчения, изобразительного искусства, информатики и вычислительной техники);

- в лечебно-профилактических учреждениях в палатах для туберкулезных, инфекционных больных (инсоляция должна быть обеспечена не менее, чем для 90 % от общего числа коек в отделении).

В условиях многоэтажной (9 и более этажей) и затесненной застройки допускается прерывистость инсоляции жилых и общественных зданий при увеличении суммарной продолжительности инсоляции в течение дня на 0,5 часа.

В случае обеспечения нормативной инсоляцией (не менее 2,5 часов) только одной комнаты в квартире, окно этой комнаты не должно затеняться застекленным летним помещением.

Круглогодичное затенение территорий жилой застройки и фасадов зданий не допускается. Полугодичные тени не должны превышать по общей площади 10 % свободных от застройки территорий жилых массивов, комплексов лечебно-профилактических и оздоровительных учреждений.

Условия круглогодичного затенения рассчитываются на 22 июня, а полугодичного – на 21 марта и 23 сентября.

В расчетах продолжительности инсоляции не учитывается первый час после восхода солнца и последний час перед заходом. Это вызвано тем, что в это время суток из-за малой высоты стояния солнца эффективность ультрафиолетового облучения мала.

Чрезмерная инсоляция становится источником отрицательных явлений. Для их устранения необходима солнцезащита и кондиционирование.

Солнцезащитные устройства (СЗУ) в настоящее время находят широкое применение в практике проектирования зданий различного назначения. Важнейшие функции СЗУ заключаются в следующем: защита помещений от перегрева в летние месяцы, снижение яркости световых проемов и устранение прямой и отраженной блескости, изменение распределения световых потоков, проникающих в помещение.

Подбор СЗУ осуществляется в зависимости от ориентации световых проемов. Для защиты от низких лучей солнца рекомендуется вертикальная солнцезащита, а от высоких – горизонтальная.

Оптимальный инсоляционный режим достигается путем обеспечения прямого солнечного облучения в необходимом количестве и зависит от целого ряда факторов: географической широты местности, времени года, ориентации зданий, плотности и этажности застройки, планировки помещений и т.д. Проблема инсоляции характерна, прежде всего, для крупных городов, где идет интенсивное строительство, особенно в условиях уплотнения существующей застройки.

Продолжительность и интенсивность инсоляции в течение суток для каждой местности определяется временем видимого движения солнца по небосводу. Положение солнца на небосводе (астрономический фактор) характеризуется тремя координатами: высотой стояния солнца h , углом склонения солнца α и азимутом A .

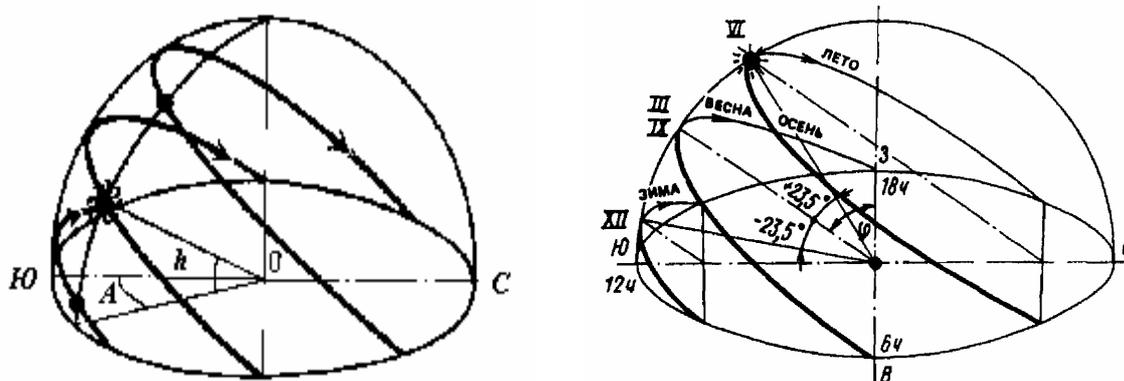


Рис. 1. Схема к определению координат положения солнца

Высота стояния солнца (h) для дней весенне-осеннего равноденствия (22 марта и 22 сентября), в полдень, определяется следующим образом:

$$h_{6-o}^{12} = 90^\circ - \varphi, \quad (1)$$

где φ – широта местности.

Для дня летнего солнцестояния (22 июня), в полдень:

$$h_{л}^{12} = h_{в-о}^{12} + \alpha, \quad (2)$$

а для дня зимнего солнцестояния (22 декабря), в полдень:

$$h_{з}^{12} = h_{в-о}^{12} - \alpha, \quad (3)$$

где α – угол склонения солнца, который изменяется в пределах от $-23,5^\circ$ (для дня зимнего солнцестояния) до $+23,5^\circ$ (для дня летнего солнцестояния).

Азимут (A) – это угол в горизонтальной плоскости, отложенный от направления на юг до исследуемого направления. Этот угол может быть отложен как в сторону востока (тогда он называется восточным азимутом $A^в$), так и в сторону запада (западный азимут $A^з$). Максимальное значение азимута равно $\pm 180^\circ$.

Проекции линий видимого движения солнца по небосводу на горизонтальную плоскость земли называют траекториями движения солнца (см. прил. I).

На инсоляционный режим помещений помимо ориентации здания по сторонам света большое значение оказывает расположение здания на местности. Затеняющее влияние одного здания на другое зависит от конфигурации зданий и их высоты, а также от плотности застройки. Зная азимут и высоту стояния солнца для каждого часа, можно определить длину тени от здания по формуле:

$$l = H \cdot ctgh \quad (4)$$

где l – длина тени, м;

H – высота здания, м;

h – высота стояния солнца, град.

Длина тени зависит от высоты здания, времени года и времени суток. Направление тени зависит от азимута солнца.

Условия инсоляции могут определяться с помощью графических методов и моделированием. Моделирование осуществляется на установке «Гелиодон».

Описание экспериментальной установки

Гелиодон – установка, дающая возможность на макетах определить продолжительность инсоляции, величину, рисунок и направление теней (см. рис. 2).

Гелиодон состоит из поворотного наклонного стола для установки модели (1) и вертикального рельса с кареткой-держателем лампы (2). Рельс проградуирован в датах, причем дата летнего солнцестояния расположена

наверху, зимнего – внизу, а равноденствия – в центре. Наклоняя стол, устанавливают географическую широту; при этом горизонтальное положение стола соответствует полюсам, а вертикальное – экватору. Вращая поворотный круг (3) вокруг вертикальной оси, получают суточные изменения.

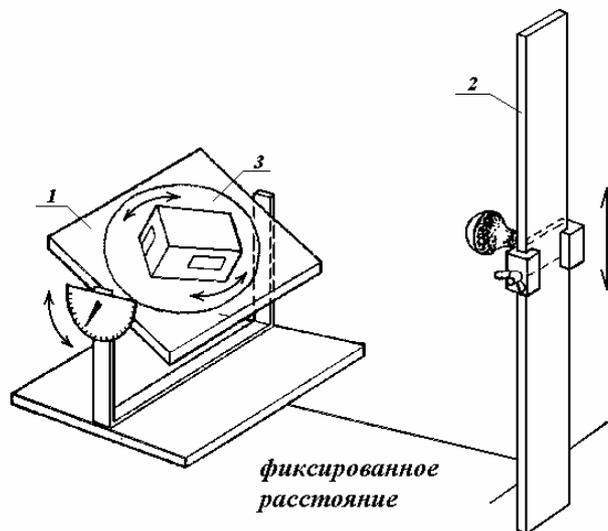


Рис. 2. Схема установки

Методика проведения эксперимента

Оборудование: установка «Гелиодон», макет застройки.

Задача 1. *Оценить инсоляционный режим фасадов зданий в застройке и выбрать тип секции жилого дома, а также оптимальные разрывы между зданиями.*

Для оценки планировочного решения фрагмента застройки, исходя из требований инсоляции, необходимо построить конверт теней от зданий. Макет выполняется в масштабе 1:500 или 1:1000.

Работа проводится в следующем порядке:

1. Установить по шкале № 1 экспериментальной установки широту местности (изменяя угол наклона стола).
2. Установить по шкале № 2 дни весенне-осеннего равноденствия.
3. Положив лист бумаги под макет застройки, закрепить макет на установке с заданной ориентацией (путем вращения поворотного круга шкалы № 3).
4. Включив «искусственное солнце», построить на бумаге конверты теней в 7, 9, 11, 13, 15, 17 часов. Для этого по шкале № 2 последовательно установить время 7 часов, затем 9 часов, затем 11 часов и т.д. Для указанных часов определить время инсоляции фасадов зданий.

5. Установить на шкале № 2 установки летний период по наиболее характерному дню – дню летнего солнцестояния.

6. Подложить под макет новый лист бумаги и построить конверты теней для 6, 8, 10, 12, 14, 16 и 18 часов, определить время инсоляции фасадов зданий.

Обработка результатов эксперимента.

По построенным конвертам теней для периодов весенне-осеннего равноденствия и летнего солнцестояния провести анализ инсоляции территории застройки. Для этого необходимо подсчитать следующие площади:

S_1 – площадь участка, свободную от застройки;

S_2 – площадь полугодичного затенения участка;

S_3 – площадь годовичного затенения участка.

Если S_2 превышает 10 % от площади участка, свободной от застройки, или если на исследуемой площадке существует фрагмент территории, имеющий годовичное затенение, то необходимо внести изменения в планировку застройки: изменить ось существующей застройки, увеличить разрывы между зданиями или совсем изменить планировочную структуру.

Если же S_2 не превышает 10 % от площади участка, свободной от застройки, а годовичного затенения на исследуемой территории вовсе не существует, то можно приступить к размещению площадок на дворовых территориях, выбору зеленых насаждений, организации проездов и благоустройства.

Задача 2. *Определить условия инсоляции помещений здания в зависимости от ориентации и географической широты местности.*

В застройке из задачи 1 выбрать одно или несколько зданий для исследования инсоляции фасадов. Для этого на исследуемых фасадах необходимо назначить несколько точек и с помощью лабораторной установки определить время их инсоляции. Данные занести в таблицу 1:

Таблица 1

№	Весна-осень			Лето			Примечания
	начало	конец	продолжительность	начало	конец	продолжительность	
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
...							
<i>N</i>							

На план застройки для фасадов исследуемых зданий графически в виде схемы нанести нормируемое время инсоляции и фактическое. Сравнить их.

Например, на рис. 3, согласно выбранной масштабной линейке, линией вдоль фасада обозначено нормативное время инсоляции, наклонной линией со штриховкой – фактическое.

С точки зрения архитектурно-планировочной структуры рядовые секции многосекционных жилых домов можно разделить на следующие типы: широтную, меридиональную и смешанную (рис. 4).

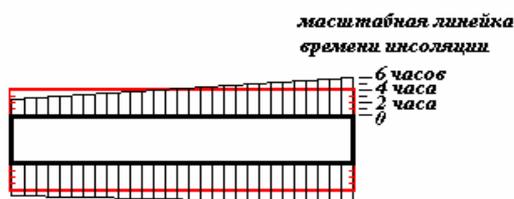


Рис. 3. Графическое изображение времени инсоляции здания



Рис. 4. Типы секций

Если продолжительность инсоляции на двух противоположных фасадах соответствует норме, то жилой дом может иметь меридиональную секцию, то есть секцию с квартирами односторонней ориентации.

Если продолжительность инсоляции соответствует норме (или превышает ее) только на одном фасаде, то рекомендуется широтная секция, то есть секция, в которой квартиры, выходящие на фасад с недостаточной инсоляцией, должны иметь хотя бы одну комнату, выходящую окнами на фасад, имеющий инсоляцию не менее нормативной.

Если продолжительность инсоляции ниже нормы на обоих фасадах здания, то следует увеличить разрывы между зданиями для получения нормированной продолжительности инсоляции хотя бы на одном из фасадов или сделать новые предложения по планировке квартала, ориентации оси застройки и вновь определить время инсоляции в исследуемых точках.

Задача 3. *Определение времени инсоляции помещений графическим методом с помощью траектории движения солнца, калотты (прил. I) инсоляционной линейки (правила ее построения приведены в СанПиН № 10-25-94), и дополнительных построений.*

Контрольные вопросы

1. Что такое инсоляция и от чего она зависит?
2. Какими факторами оценивается инсоляция?
3. Как выбирается тип секции с учетом условий инсоляции и ориентации зданий?

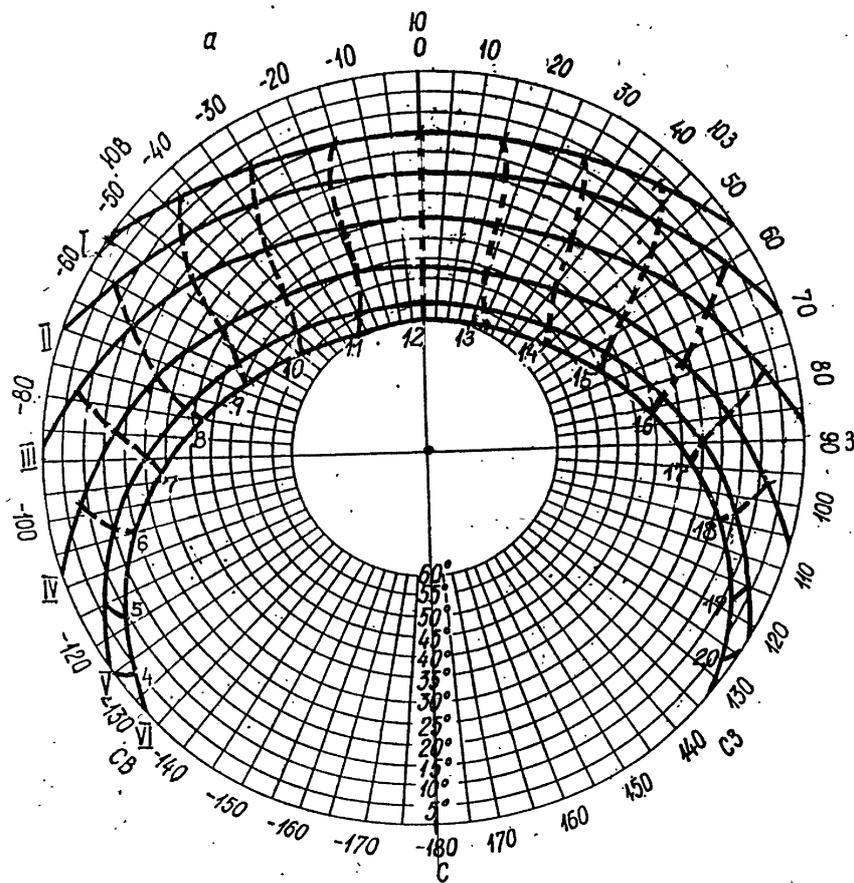
4. Что такое СЗУ? Их назначение и классификация. Материалы, применяемые при изготовлении СЗУ.
5. Координаты солнца на небосводе (h , α и A).
6. Перечислите причины нормирования инсоляции в зданиях различного назначения.
7. Опишите положительное и отрицательное воздействие инсоляции.

Литература

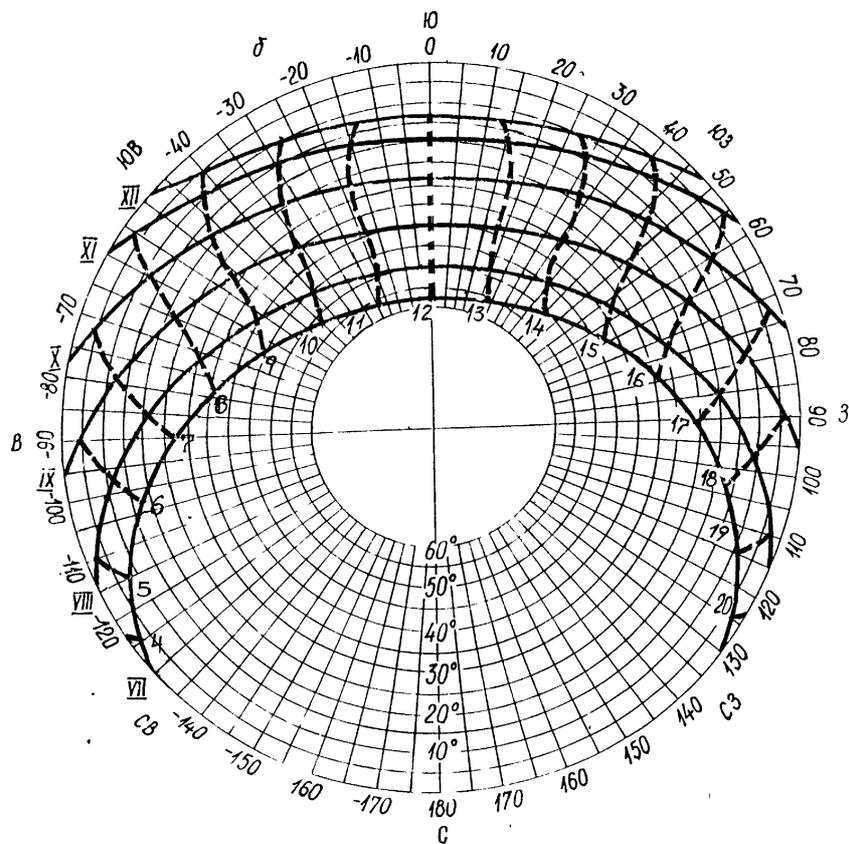
1. Гусев, Н. М. Строительная физика / Н. М. Гусев, П. П. Климов. – М., 1965.
2. СанПиН №10-25-94 «Обеспечение инсоляцией жилых и общественных зданий и территорий жилой застройки».
3. Оболенский, Н. В. Архитектура и солнце / Н. В. Оболенский. – М., 1988.
4. Архитектурная физика / под ред. Н. В. Оболенского. – М., 2003.

Приложение I

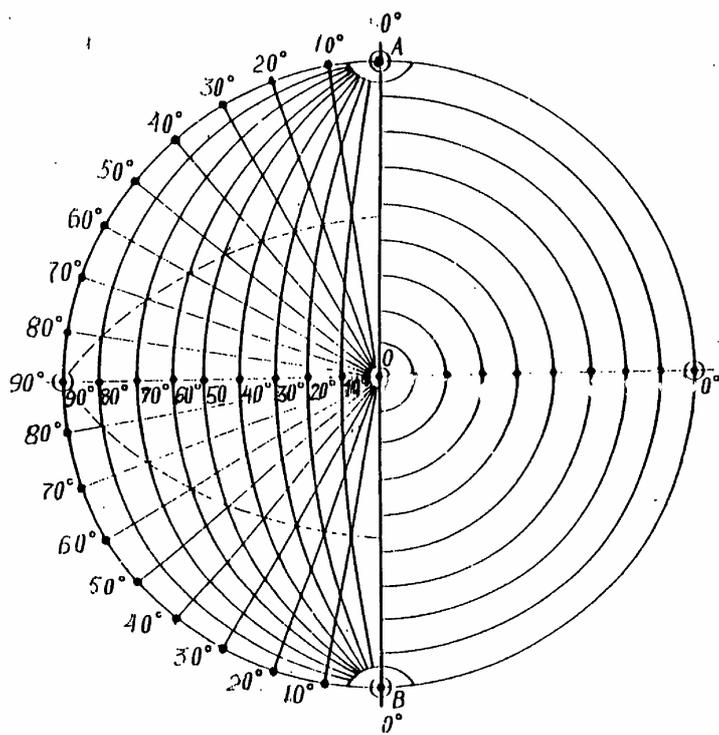
1. Траектории движения солнца на первое полугодие (январь-июнь).



2. Траектории движения солнца на второе полугодие (июль-декабрь).



3. Калотта.



6. Экспериментальное определение и проверочный расчет коэффициента естественной освещенности

Цель работы: определить коэффициент естественной освещенности и время использования естественного света для исследуемого помещения; определить требуемую площадь светового проема для исследуемого помещения. Рассчитать коэффициент естественной освещенности, сравнить его с нормативным и экспериментальным значениями.

Теоретические основы работы

Проектирование естественного освещения в зданиях сводится к рациональному использованию характерных для данных климатических условий природных ресурсов световой энергии. Природные особенности солнечного и диффузного освещения создают переменные условия освещенности в помещении не только в течение светлых часов суток, но даже в течение короткого промежутка времени. Эта изменчивость естественного освещения и трудности, связанные с его регулированием, резко отличают естественное освещение от искусственного.

Однако между этими видами освещения существует тесная связь не только в экономическом отношении (недостаточность естественного освещения компенсируется более интенсивным использованием искусственного света), но и в отношении архитектурно-художественном, вследствие стремления архитектора сохранить единство восприятия интерьера в течение всего времени эксплуатации здания. С этой целью возможно использование следующих способов освещения:

– *естественное освещение* (боковое и верхнее) – освещение помещений светом неба (прямым и диффузным), проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях;

– *второй свет* – свет, поступающий в помещение, отделенное от источника света перегородкой со световым проемом;

– *комбинированное освещение* – сочетание верхнего и бокового естественного освещения;

– *совмещенное освещение* – освещение, при котором естественное и искусственное освещение используются в течение всего рабочего дня;

– *общее освещение* – освещение, при котором светильники размещаются в верхней зоне помещения равномерно (общее равномерное освещение) или применительно к расположению оборудования (общее локализованное освещение);

– *местное освещение* – освещение, дополнительное к общему, создаваемое светильниками, концентрирующими световой поток непосредственно на рабочих местах;

Для характеристики естественного освещения помещений, переменного как по уровню, так и по спектральному составу, вводится коэффициент естественной освещенности (КЕО), выраженный в процентах:

$$e_M = E_M / E_H \cdot 100\% , \quad (1)$$

где e_M – коэффициент естественной освещенности в исследуемой точке M , %;
 E_M – освещенность в исследуемой точке M какого-либо помещения, лк;
 E_H – одновременная наружная освещенность горизонтальной площадки, освещенной диффузным светом полностью открытого небосвода, лк (рис. 1).

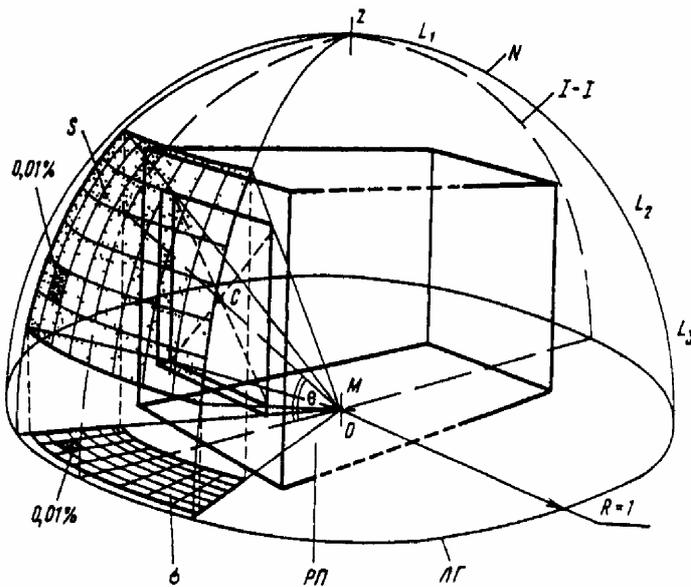


Рис. 1. Схема к определению коэффициента естественной освещенности: ЛГ – линия горизонта; РП – условная рабочая поверхность; θ – угловая высота середины светопроема C над условной рабочей поверхностью; S – участок неба, видимый из точки M ; N – небосвод; Z – зенит небосвода; O – центр небосвода, совмещенный с исследуемой точкой M ; L – яркость небосвода, кд/м²; $I-I$ – продольный разрез

Значение КЕО показывает, какой процент освещенность в данной точке помещения составляет от одновременной наружной освещенности при диффузном свете неба.

Одновременной наружной освещенностью называется освещенность, измеренная на открытой горизонтальной площадке в тот же момент времени, что и освещенность в расчетной точке помещения. В безоблачную или частично облачную погоду наблюдаются *три основных компонента дневной освещенности*:

$$E_H^\Sigma = E_{пр} + E_{диф} + E_{отр} , \quad (2)$$

где E_H^Σ – суммарная наружная освещенность, лк;

$E_{пр}$ – освещенность прямым солнечным светом, лк;

$E_{диф}$ – освещенность диффузным светом, лк;

$E_{отр}$ – освещенность отраженным светом, лк.

Диапазон освещенностей, наблюдаемых при естественном освещении, очень велик. Так, освещенность в полдень ясного дня на открытой горизонтальной площадке может превосходить 100000 лк, в то время как в момент захода солнца в пасмурный день она может быть равна несколько люкс.

Освещенность прямым солнечным светом не учитывается в подсчетах освещенности и может интересовать архитектора только при решении задач, связанных с инсоляцией помещений и архитектурной отделкой фасадов зданий. Наиболее важной составляющей светового климата (E_n^Σ) является наружное диффузное освещение. Основной величиной, характеризующей условия наружного освещения в данной местности, служит наружная освещенность горизонтальной площадки, освещаемой всем небосводом, *при диффузном свете небосвода*:

$$E_n = E_{\text{диф}} + E_{\text{отр}} \quad (3)$$

При этом в исследуемой точке помещения освещенность должна измеряться на высоте *условной рабочей поверхности* – это условно принятая (горизонтальная или вертикальная) поверхность, на которой производится работа и нормируется или измеряется освещенность. Для различных помещений условная рабочая поверхность принимается на разной высоте. Например, в основных помещениях жилых домов и дошкольных учреждений нормированные значения КЕО должны обеспечиваться на уровне пола, а в учебных заведениях – на высоте 0,8 м от уровня пола. Положение и высоту условной рабочей поверхности для каждого помещения принимаем по СНБ 2.04.05-98 «Естественное и искусственное освещение» (прил. I, табл. 1).

В помещениях жилых зданий при одностороннем боковом естественном освещении *минимальное значение КЕО* нормируется в точке, расположенной на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности на расстоянии 1 м от стены, наиболее удаленной от световых проемов: в одной комнате для 1-, 2- и 3-комнатных квартир и в двух комнатах для 4- и более комнатных квартир. В остальных жилых помещениях многокомнатных квартир и в кухне нормируемое значение КЕО при боковом освещении должно обеспечиваться в расчетной точке, расположенной в центре помещения на плоскости пола. В учебных и учебно-производственных помещениях общественных зданий – в расчетной точке, расположенной на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза и условной рабочей поверхности на расстоянии 1,2 м от стены, наиболее удаленной от световых проемов. В жилых и общественных зданиях при двустороннем боковом освещении – в точке посередине помещения, также расположенной на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности.

Характерным разрезом помещения принято считать поперечный разрез посередине помещения, плоскость которого перпендикулярна к плоскости остекления световых проемов (при боковом освещении). В характерный разрез должны попадать участки с наибольшим количеством рабочих мест, а также точки рабочей зоны, наиболее удаленные от световых проемов.

При боковом освещении световой поток в помещении распределяется по глубине неравномерно. Это связано с тем, что различные части окна оказывают неодинаковое влияние на освещенность в различных точках помещения, а именно: нижние части больше влияют на освещенность точек, расположенных вблизи окна, верхние же части – на освещенность точек, наиболее удаленных от окна. Поэтому двухрядное расположение окон способствует повышению минимального КЕО помещения и более равномерному освещению помещения по глубине.

Неравномерность естественного освещения не нормируется для помещений с боковым освещением. Для помещений производственных и общественных зданий с верхним или комбинированным освещением неравномерность не должна превышать 3:1.

Для условий Беларуси нормы КЕО приведены в СНБ 2.04.05-98 «Естественное и искусственное освещение».

Освещенность поверхности естественным светом в каждый данный момент времени определяется астрономическими и геофизическими факторами.

С астрономическими факторами можно ознакомиться в лабораторной работе № 1.

Важнейшими *геофизическими факторами*, определяющими освещенность при естественном свете, являются количество и характер облаков, прозрачность и рассеивающая способность воздуха, высота над уровнем моря и состояние земного покрова. Диффузное естественное освещение создается многократным отражением солнечных лучей от взвешенных в атмосфере частиц воды, пыли и др.

Степень облачности небосвода оценивается баллами в зависимости от процента покрытой облаками поверхности неба: сплошная облачность оценивается 10 баллами, ясное небо – 0 баллов.

На величину диффузной освещенности существенное влияние оказывают прозрачность воздуха и состояние земного покрова. Прозрачность воздуха оценивается коэффициентом прозрачности, значения которого, определяемые степенью видимости, принимаются равными: при отличной видимости – 0,9, при хорошей – 0,8 и при плохой – 0,7. В больших городах и промышленных районах прозрачность воздуха оценивается коэффициентом 0,7.

Освещенность наружной открытой площадки диффузным светом всего небосвода (при условиях облачности) определяется по кривым наружной освещенности, которые строятся на основе результатов обработки многолетних измерений по данным метеорологических станций (прил. II, графики 1 и 2). Пользуясь кривыми наружной освещенности можно определить не только величину освещенности для любого часа дня каждого месяца, но и время использования естественного света в помещениях при различных условиях облачности.

Для определения времени использования естественного света в исследуемой точке помещения необходимо знать *критическую наружную освещенность* ($E_{кр}$, лк), то есть освещенность *поверхности земли* в момент включения (вечером) или выключения (утром) искусственного света.

$$E_{кр} = E_{норм} / e_n \cdot 100\% , \quad (4)$$

где $E_{кр}$ – критическая наружная освещенность, лк;

$E_{норм}$ – освещенность искусственным светом при общем освещении, принятая за нормативный уровень освещенности условной рабочей поверхности в расчетной точке, лк (прил. I, табл. 3);

e_n – нормированное значение КЕО в исследуемом помещении, %.

Формула (4) справедлива для точки, расположенной в плоскости характерного разреза, на высоте условной рабочей поверхности, на расстоянии 1 м от стены, наиболее удаленной от светопроема (так как e_n нормируется именно для этой точки, в то время как $E_{норм}$ справедлива для всех точек помещения, лежащих на уровне условной рабочей поверхности).

Чтобы найти критическую освещенность для любой другой точки в помещении, необходимо вместо нормированного значения КЕО e_n подставить в формулу (4) значение КЕО в данной точке.

Таким образом, численное значение критической освещенности $E_{кр}$ показывает, какой должна быть освещенность наружной горизонтальной площадки, освещенной диффузным светом всего небосвода, чтобы при существующем значении КЕО в данной точке на высоте условной рабочей поверхности обеспечить освещенность естественным светом не ниже, чем $E_{норм}$.

Если наружная освещенность принимает значение меньшее, чем $E_{кр}$, то в данной точке при существующем значении КЕО не обеспечивается нормируемая освещенность. А это значит, что освещенности естественным светом недостаточно и необходимо включить искусственный свет (совме-

шенное освещение). Если наружная освещенность принимает значение равное или большее, чем $E_{кр}$, то в данной точке искусственное освещение не используется.

Для определения времени использования естественного света в исследуемой точке помещения необходимо найти значение критической освещенности, нанести его на графики 1 или 2 (прил. II) в виде изолинии. Затем следует найти точки пересечения построенных изолиний критической освещенности с вертикальной линией, характеризующей конкретный день месяца. Эти линии пересекутся дважды.

Время использования естественного света определяется от того часа в первой половине дня, когда наружная освещенность равна критической, до того времени во второй половине дня, когда наружная освещенность снова равна критической освещенности.

В облачный день для точек, наиболее удаленных от светопроема, в течение всего дня критическая освещенность может быть больше, чем наружная. Это говорит о том, что в течение всего дня необходимо использовать искусственное освещение.

Экспериментальное определение КЕО

1. Описание экспериментальной установки.

Для измерения освещенности поверхности, создаваемой любым источником света, предназначен люксметр (рис. 2).

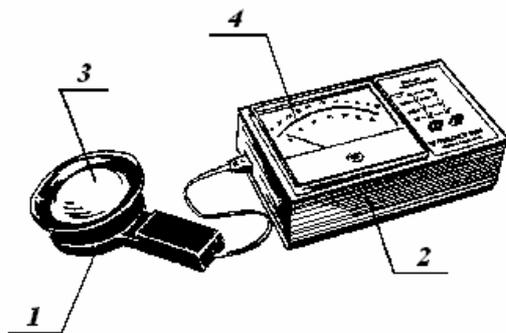


Рис. 2. Люксметр

Принцип действия люксметра основан на явлении фотоэлектрического эффекта. Фотоэлемент имеет чувствительность только в спектре видимого света ($\lambda = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \dots 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$). При освещении поверхности фотоэлемента 1 в замкнутой цепи, состоящей из фотоэлемента и магнитоэлектрического измерителя 2, возникает ток, который отклоняет стрелку измерителя.

Величина тока и, следовательно, отклонение стрелки измерителя пропорциональны освещенности на рабочей поверхности фотоэлемента.

На передней панели измерителя имеются две шкалы 4, отградуированные в люксах (от 0 до 30 и от 0 до 100 лк), и кнопки переключателя, которые позволяют снимать показания освещенности с одной из приведенных шкал.

На корпус фотоэлемента может одеваться один из фильтров (поглотителей) в комплекте со светорассеивающей насадкой 3, которые позволяют расширить пределы измерения в 10, 100 и 1000 раз (комбинации фильтра и насадки КМ, КР, КТ соответственно).

Во время измерений корпус фотоэлемента закрепляется горизонтально на высоте условной рабочей поверхности и не затеняется корпусом исследователя и посторонними предметами.

2. Методика проведения эксперимента.

1. Замеры естественной освещенности и расчет КЕО провести в нескольких помещениях, ориентированных на разные фасады здания.

2. В каждом из выбранных помещений на линии пересечения характерного разреза и плоскости условной рабочей поверхности выбираются точки для исследования. В плане они должны располагаться равномерно по глубине помещения. Первая точка – на расстоянии 1 м от наружной стены, последняя – на расстоянии 1,2 м от стены, наиболее удаленной от светопроема. Выбор количества промежуточных точек ограничен расстоянием между ними в пределах 0,7 – 1 м.

3. В выбранных точках характерного разреза произвести замеры освещенности и результаты внести в следующую таблицу (для каждого исследуемого помещения заполняется отдельная таблица):

Таблица

№	E_n , лк	E_m , лк	e , %	$E_{норм}$, лк	$E_{кр}$, лк
1					
2					
3					
...					
N					

4. По формуле (1) для каждой точки рассчитать КЕО. Результаты расчетов внести в таблицу. Величину наружной освещенности принимать по прил. II, графики 1 и 2.

5. Для исследуемых помещений рассчитать по формуле (4) критическую наружную освещенность. Результат расчетов внести в таблицу.

6. По значениям критической освещенности определить время использования естественного света в исследуемых точках в солнечный и облачный дни (по прил. II, графикам 1 и 2).

7. Выполнить чертежи планов и разрезов исследуемых помещений с указанием расчетных точек. На разрезах построить кривые распределения действительных и нормативных значений КЕО.

Проверочный расчет коэффициента естественного освещения при боковом и верхнем освещении

1. Предварительный расчет площади световых проемов.

Таблицы для определения расчетных коэффициентов, приведенных в данном разделе, находятся в прил. I.

А. При боковом освещении:

$$100\% \cdot \frac{S_o}{S_n} = \frac{e_n \cdot K_3 \cdot \eta_o}{\tau_o \cdot r_o} \cdot K_{3\partial}, \quad (5)$$

Б. При верхнем освещении:

$$100\% \cdot \frac{S_\phi}{S_n} = \frac{e_n \cdot K_3 \cdot \eta_\phi}{\tau_o \cdot r_1 \cdot K_\phi}, \quad (6)$$

где S_o и S_ϕ – суммарная площадь световых проемов (в свету) при боковом и верхнем освещении соответственно;

S_n – площадь пола помещения;

e_n – нормированное значение КЕО (табл. 1);

K_3 – коэффициент запаса (табл. 2);

η_o – световая характеристика окон (табл. 6);

η_ϕ – световая характеристика фонаря или светового проема в плоскости покрытия (табл. 3 или 4);

$K_{3\partial}$ – коэффициент, учитывающий затенение окон противостоящими зданиями в зависимости от отношения расстояния между рассматриваемым и противостоящим зданием (P) и высоты расположения карниза противостоящего здания над подоконником рассматриваемого окна ($H_{3\partial}$), (табл. 5);

r_o – коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении благодаря свету, отраженному от поверхностей помещения и подстилающего слоя, прилегающего к зданию (табл. 9) при одностороннем освещении и (табл. 10) при двустороннем освещении;

r_1 – коэффициент, учитывающий повышение КЕО при верхнем освещении благодаря свету, отраженному от поверхностей помещения (табл. 7);

τ_o – общий коэффициент светопропускания, определяемый по формуле:

$$\tau_o = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5, \quad (7)$$

где τ_1 – коэффициент светопропускания материала (таблица 12);

τ_2 – коэффициент, учитывающий потери света в переплетах светового проема (табл. 13). Размеры светопроема принимаются равными размерам коробки переплета по наружному обмеру;

τ_3 – коэффициент, учитывающий потери света в несущих конструкциях (табл. 14), при боковом освещении $\tau_3 = 1$;

τ_4 – коэффициент, учитывающий потери света в солнцезащитных устройствах (табл. 15);

τ_5 – коэффициент, учитывающий потери света в защитной сетке, устанавливаемой под фонарями, принимается равным 0,9 (при боковом освещении $\tau_5 = 1$);

K_ϕ – коэффициент, учитывающий тип фонаря (табл. 11).

При наличии нескольких световых проемов

$$S_o = S_1 + S_2 + \dots + S_n, \quad (8)$$

где S_1, S_2, S_n – площади каждого из световых проемов, m^2 .

Зная площадь светового проема, можно вычислить ширину по формуле:

$$S_o = a \cdot h, \quad (9)$$

где a – ширина оконного проема, м;

h – высота оконного проема, м.

В. Расчет коэффициента естественной освещенности.

Выполняя данный расчет, результат необходимо заносить в табл. 1, 2 или 3 прил. IV, в зависимости от того, какой способ освещения подлежит исследованию.

Расчет коэффициента естественной освещенности помещения производится без учета мебели, оборудования, озеленения и других затеняющих предметов. Расчетные значения КЕО следует округлять до сотых долей.

Допускается снижение расчетного значения КЕО e_p от нормируемого КЕО e_n не более чем на 10 %.

При верхнем и комбинированном естественном освещении в помещении нормируется *среднее значение* КЕО. Расчет следует вести по формуле:

$$e_{cp} = \frac{1}{N-1} \cdot \left(\frac{e_1}{2} + e_2 + e_3 + \dots + e_{N-1} + \frac{e_N}{2} \right), \quad (10)$$

где N – количество точек, в которых определяется КЕО;

$e_1, e_2, e_3, \dots, e_N$ – значения КЕО при верхнем и комбинированном освещении в точках характерного разреза помещения, определяемые в зависимости от вида освещения по формулам:

а) при комбинированном освещении:

$$e_p^k = e_p^o + e_p^e, \quad (11)$$

где e_p^k – КЕО в расчетной точке при комбинированном освещении;

$e_p^{\bar{o}}$ – КЕО в расчетной точке при боковом освещении;

$e_p^{\bar{v}}$ – КЕО в расчетной точке при верхнем освещении.

б) при боковом освещении:

$$e_p^{\bar{o}} = \frac{(\varepsilon_n^{\bar{o}} \cdot \beta_a + \varepsilon_{3\partial} \cdot b_{\phi} \cdot K_{3\partial}) \cdot \tau_o \cdot r_o}{K_3}, \quad (12)$$

где $e_p^{\bar{o}}$ – расчетное значение КЕО при боковом освещении;

$\varepsilon_n^{\bar{o}}$ – геометрический КЕО в расчетной точке при боковом освещении, учитывающий прямой свет неба; определяется с помощью графиков Данилюка I и II (прил. III) и рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_n^{\bar{o}} = 0,01 \cdot n_1 \cdot n_2, \quad (13)$$

где n_1 – количество лучей по графику I, приходящих от открытых участков небосвода через световые проемы в расчетную точку на характерном разрезе помещения;

n_2 – количество лучей по графику II, приходящих от открытых участков небосвода через световые проемы в расчетную точку на плане помещения (рис. 3);

β_a – коэффициент, учитывающий неравномерную яркость облачного неба (табл. 8);

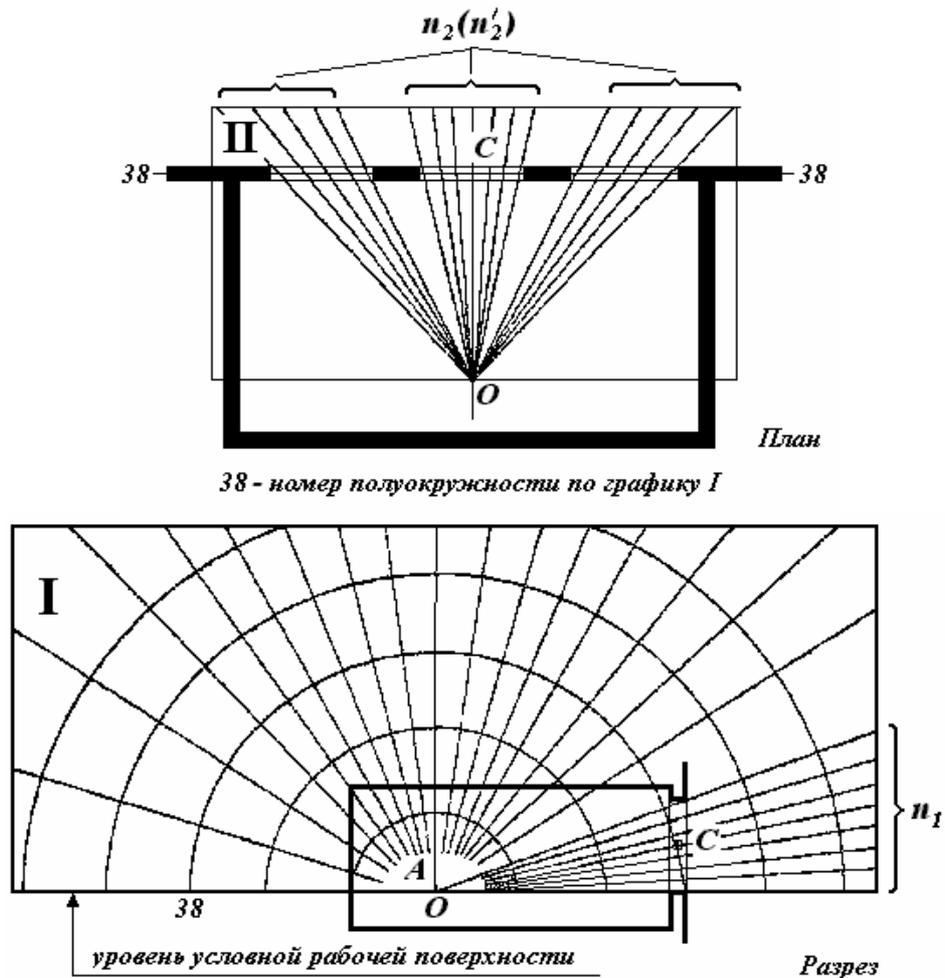
$\varepsilon_{3\partial}$ – геометрический КЕО в расчетной точке при боковом освещении, учитывающий свет, отраженный от противостоящих зданий, определяется с помощью графиков Данилюка I и II (прил. II) и рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{3\partial} = 0,01 \cdot n'_1 \cdot n'_2 \quad (14)$$

где n'_1 – количество лучей по графику I, приходящих от противостоящего здания через световые проемы в расчетную точку на характерном разрезе помещения (рис. 4);

n'_2 – количество лучей по графику II, приходящих от противостоящего здания через световые проемы в расчетную точку на плане помещения (см. расчет n_2);

b_{ϕ} – коэффициент, учитывающий относительную яркость фасада противостоящего здания (табл. 16);



38 - номер полуокружности по графику I

Рис. 3. Схемы для определения количества лучей n_1 и n_2 на разрезе и плане по графикам Данилюка I и II

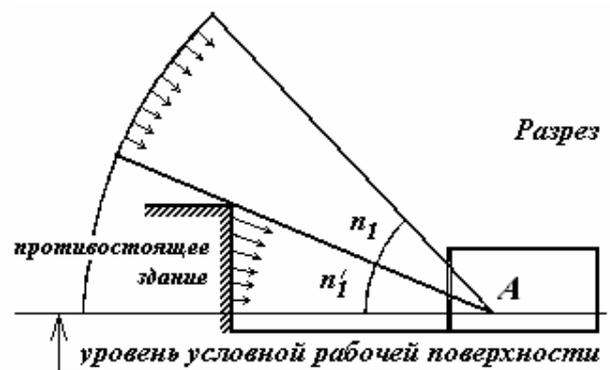


Рис. 4. Схема для определения количества лучей n_1 и n_1' на разрезе

При наличии в помещении световых проемов в двух и более стенах расчет КЕО выполняется от каждого светового проема и полученные результаты суммируются для каждой точки:

$$e_p^{\delta} = e_p^1 + e_p^2 + \dots + e_p^N, \quad (15)$$

где e_p^1, e_p^2, e_p^N – КЕО в расчетной точке от 1-го, 2-го, N -го окна;

При этом количество разрезов помещения соответствует количеству оконных проемов (каждый из разрезов проходит через расчетную точку и является перпендикуляром к тому ограждению, в котором исследуемый оконный проем расположен).

в) при верхнем освещении:

$$e_p^6 = \frac{(\epsilon_n^6 + \epsilon_{отр}^6) \cdot \tau_o}{K_3}, \quad (16)$$

e_p^6 – расчетное значение КЕО при верхнем освещении;

ϵ_n^6 – геометрический КЕО в расчетной точке при верхнем освещении. Определяется с помощью графиков Данилюка III и II (прил. III) и рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_n^6 = 0,01 \cdot n_3 \cdot n_2, \quad (17)$$

где n_3 – количество лучей по графику III, проходящих от неба через световые проемы в расчетную точку на поперечном разрезе помещения;

n_2 – количество лучей по графику II, проходящих от неба через световые проемы в расчетную точку на продольном разрезе помещения.

При наличии нескольких световых проемов ϵ_n^6 определяют отдельно для каждого проема, а затем полученные значения суммируют.

$\epsilon_{отр}^6$ – значение КЕО в расчетных точках при верхнем освещении, создаваемое светом, отраженным от внутренних поверхностей помещения, рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_{отр}^6 = \epsilon_{cp} \cdot (r_1 \cdot K_\phi - 1), \quad (18)$$

где ϵ_{cp} – среднее значение геометрического КЕО при верхнем освещении на линии пресечения условной рабочей поверхности и плоскости характерного вертикального разреза помещения, определяемой из соотношения:

$$\epsilon_{cp} = \frac{1}{N} \cdot (\epsilon_{61} + \epsilon_{62} + \epsilon_{63} + \dots + \epsilon_{6N}), \quad (19)$$

где N – количество расчетных точек;

$\epsilon_{61}, \epsilon_{62}, \epsilon_{63}, \epsilon_{6N}$ – геометрический КЕО при верхнем освещении в расчетных точках 1, 2, 3, ..., N .

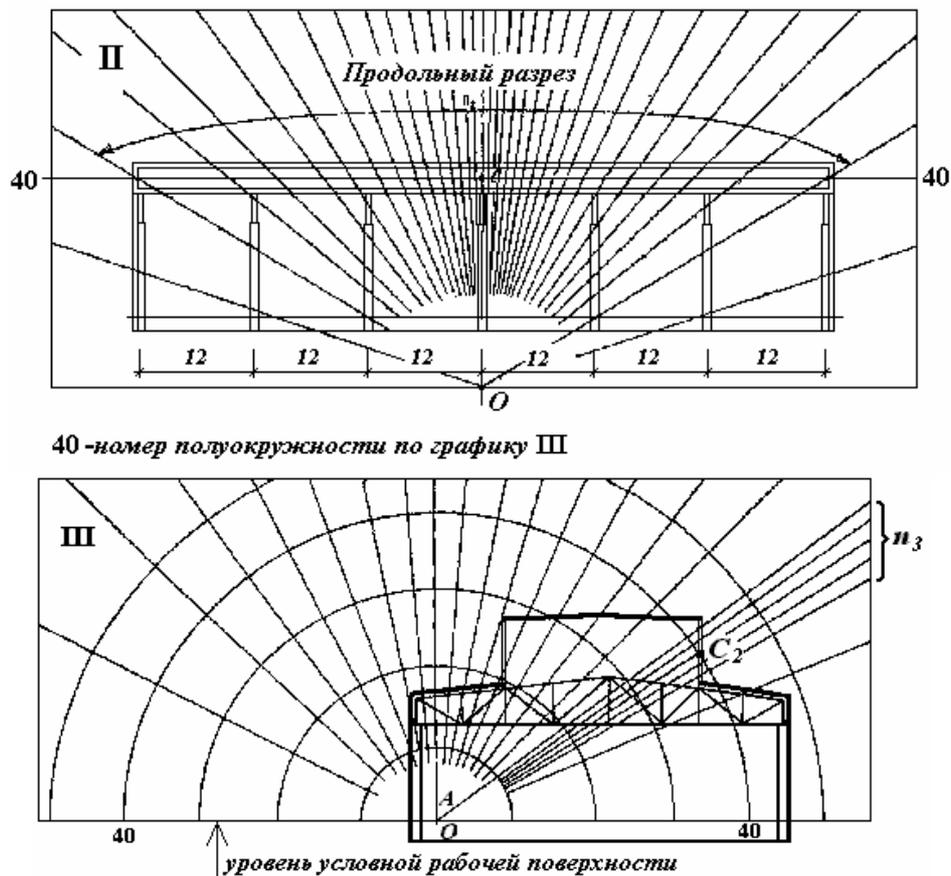


Рис. 5. Схема для определения количества лучей n_3 и n_2 на разрезе и плане при верхнем освещении

Контрольные вопросы

1. Что является характеристикой естественной освещенности в помещении?
2. Что такое КЕО? Его физический смысл.
3. Как выбираются расчетные точки в помещении? Как определить КЕО экспериментальным путем?
4. Что определяет общий коэффициент светопропускания и как он может влиять на степень освещенности в помещении?
5. Принцип нормирования КЕО.
6. Что называют условной рабочей поверхностью?
7. Что такое наружная освещенность? Какие факторы влияют на ее величину?
8. Перечислите известные вам способы освещения и дайте определение каждому из них.
9. Назовите три основных компонента дневной освещенности.

10. Астрономические факторы освещенности.
11. Геофизические факторы освещенности.
12. Что такое критическая наружная освещенность?
13. Как изменится при увеличении глубины помещения в два раза?

Приложение I

Таблица 1

Нормируемые показатели освещения помещений жилых и общественных зданий (СНБ 2.04.05-98 «Естественное и искусственное освещение»).

Помещение	Плоскость и ее высота над полом	Освещенность при общем освещении, $E_{норм}$, лк	КЕО, e_n , %
Классные комнаты, аудитории, лаборатории в учебных заведениях	В – на середине доски	500	–
	Г – 0,8	500	1,5
Читальные залы	Г – 0,8	300	1,0
Кабинеты информатики и вычислительной техники	В – 1,2 (на экране дисплея)	200	–
	Г – 0,8 (на столах и партах)	400	1,5
Макетные мастерские	Г – 0,8 (на рабочих столах)	300	1,2
Кабинеты технического черчения и рисования	Г – 0,8 (на столах и партах)	500	2,0
Конференц-залы	Г – 0,8	200	0,7
Крытые бассейны	Г – на поверхности воды	300	0,7
Спортивные залы	Пол	200	1,0
	В – на уровне 2м от пола с обеих сторон на продольной оси помещения	75	–
Санитарно-бытовые помещения (умывальные, туалет, курительные)	Пол	75	0,3
Здравпункт (процедурный кабинет)	Г – 0,8	200	0,7
Вестибюли и гардеробные	Пол	150	0,4
Комнаты преподавателей	Г – 0,8	300	1,0
Рекреации	Пол	150	0,5
Палаты и спальные комнаты в санаториях и домах отдыха	Пол	150	0,5
Жилые комнаты	Пол	100	0,5
Кухни	Пол	100	0,5
Коридоры, ванные, туалет	Пол	50	–
Лестницы и лестничные площадки	Пол (площадки, ступени)	10	0,1

Примечание – в таблице указано значение КЕО при боковом освещении.

Таблица 2

Значения коэффициента запаса K_3

Вид помещений	Коэффициент запаса K_3 , при том, что угол наклона светопропускающего материала к горизонту составляет, град			
	0 – 15	16 – 45	46 – 75	76 – 90
Производственные помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне: а) свыше 5 мг/м ³ пыли, дыма, копоти (цементные заводы, обрубные отделения литейных цехов); б) от 1 до 5 мг/м ³ пыли, дыма и копоти (цехи кузнечные, литейные, мартеновские, сварочные, сборного железобетона); в) менее 1 мг/м ³ пыли, дыма и копоти (цехи инструментальные сборочные, механические, механосборочные, пошивочные); г) значительные концентрации паров, кислот, щелочей, газов (цехи химических заводов, гальванопластики и т.п.)	2,0 / 4	1,8 / 4	1,7 / 4	1,5 / 4
	1,8 / 3	1,6 / 3	1,5 / 3	1,4 / 3
	1,6 / 2	1,5 / 2	1,4 / 2	1,3 / 2
	2,0 / 3	1,8 / 3	1,7 / 3	1,5 / 3
Помещения жилых и общественных зданий: а) пыльные, жаркие и сырые (прачечные, душевые, бассейны, горячие цехи предприятий общественного питания и др.); б) с нормальными условиями среды	2,0 / 3	1,8 / 3	1,7 / 3	1,6 / 3
	1,5 / 2	1,4 / 2	1,3 / 1	1,2 / 1

Примечание – через дробь указано необходимое количество чисток остекления светопроемов в год.

Таблица 3

Значения световой характеристики (η_ϕ) фонарей
(прямоугольных, трапециевидных и шед)

Тип фонарей	Кол-во пролетов	η_ϕ при l_n/l_1								
		от 1 до 2			от 2 до 4			более 4		
		H/l_1								
		0,2 – 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 1	0,2 – 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 1	0,2 – 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
С вертикальным двусторонним остеклением (прямоугольные, М-образные)	1	5,8	9,4	16	4,6	6,8	10,5	4,4	6,4	9,1
	2	5,2	7,5	12,8	4	5,1	7,8	3,7	6,4	6,5
	3 и более	4,8	6,7	11,4	3,8	4,5	6,9	3,4	4	5,6
С наклонным двусторонним остеклением	1	3,5	5,2	6,2	2,8	3,8	4,7	2,7	3,6	4,1
	2	3,2	4,4	5,3	2,5	3	4,1	2,3	2,7	3,4
	3 и более	3	4	4,7	2,35	2,7	3,7	2,1	2,4	3

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
С вертикальным односторонним остеклением (шеды)	1	6,4	10,5	15,2	5,1	7,6	10	4,9	7,1	8,5
	2	6,1	8	11	4,7	5,5	6,6	4,35	5	5,5
	3 и более	5	6,5	8,2	4	4,3	5	3,6	3,8	4,1
	3 и более	3,8	4,55	6,8	2,9	3,4	4,5	2,5	3,2	3,9
С наклонным односторонним остеклением	1	3,8	4,55	6,8	2,9	3,4	4,5	2,5	3,2	3,9
	2	3	4,3	5,7	2,3	2,9	3,5	2,15	2,65	2,9
	3 и более	2,7	3,7	5,1	2,2	2,5	3,1	2	2,25	2,5
	3 и более	3,8	4,55	6,8	2,9	3,4	4,5	2,5	3,2	3,9

Примечание: l_n – длина помещения, м; l_1 – ширина пролета, м; H – высота помещения, м.

Таблица 4

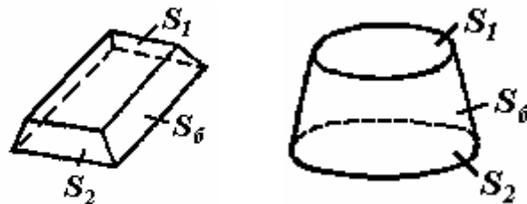
Значения световой характеристики (η_ϕ) световых проемов в плоскости покрытия при верхнем освещении

$\frac{S_2}{S_1 + S_\phi}$	Индекс помещения i									
	0,5	0,7	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5
0,05	25	19	16	14,3	13,3	12	11,5	11	10,5	10
0,1	13	10,3	8,5	7,7	7	6,3	6	5,8	5,5	5,4
0,2	7	5,6	4,6	4,2	3,8	3,4	3,3	3,1	3	2,9
0,3	5	4	3,3	2,9	2,7	2,4	2,3	2,2	2,1	2
0,4	4,2	3,3	2,7	2,4	2,2	2	1,9	1,85	1,8	1,7
0,5	3,7	2,9	2,4	2,1	2	1,8	1,7	1,6	1,55	1,5
0,6	3,3	2,6	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5	1,45	1,4	1,3
0,7	3,1	2,4	2	1,8	1,6	1,5	1,4	1,35	1,3	1,25
0,8	2,9	2,3	1,9	1,7	1,55	1,4	1,35	1,3	1,2	1,2
0,9	2,8	2,2	1,8	1,6	1,5	1,35	1,3	1,25	1,2	1,15

Примечания:

1. Индекс помещения $i = \frac{l_n \cdot b}{H \cdot (l_n + b)}$, где l_n – длина помещения вдоль оси пролетов м; b – ширина помещения, м; H – высота покрытия над условной рабочей поверхностью, м.

2. Схемы фонарей:



где S_1 – площадь входного отверстия, м²; S_2 – площадь выходного отверстия, м²; S_ϕ – площадь боковой поверхности проема, м².

Таблица 5

Значения коэффициента $K_{з\partial}$

$P/H_{з\partial}$	$K_{з\partial}$
0,5	1,7
1	1,4
1,5	1,2
2	1,1
3 и более	1

Примечание: P – расстояние между рассматриваемым и противостоящим зданиями, м; $H_{з\partial}$ – высота расположения карниза противостоящего здания над подоконником рассматриваемого окна, м.

Таблица 6

Значения световой характеристики окон (η_0)

l_n/B	Значение η_0 при отношении B/h_1							
	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	7,5	10
4,0 и более	6,5	7	7,5	8	9	10	11	12,5
3,0	7,5	8	8,5	9,6	10	11	12,5	14
2,0	8,5	9	9,5	10,5	11,5	13	15	17
1,5	9,5	10,5	13	15	17	19	21	23
1,0	11,0	15	16	18	21	23	26,5	29
0,5	18,0	23	31	37	45	54	66	-

Примечания: l_n – длина помещения, м; B – глубина помещения, м; h_1 – высота от уровня условной рабочей поверхности до верха окна, м.

Таблица 7

Значения коэффициента r_1

H_ϕ/l_1	Значения коэффициента r_1 при $\rho_{ср}$, равном								
	0,5			0,4			0,3		
	Количество пролетов								
	1	2	3 и более	1	2	3 и более	1	2	3 и более
2	1,7	1,5	1,15	1,6	1,4	1,1	1,4	1,1	1,05
1	1,5	1,4	1,15	1,4	1,3	1,1	1,3	1,1	1,10
0,75	1,45	1,35	1,15	1,35	1,25	1,1	1,25	1,1	1,05
0,5	1,4	1,3	1,15	1,3	1,2	1,1	1,2	1,1	1,05
0,25	1,35	1,25	1,15	1,25	1,15	1,1	1,15	1,1	1,05

Примечания: H_ϕ – высота помещения, принимаемая от условной рабочей поверхности до нижней грани остекления, м; l_1 – ширине пролета, м; $\rho_{ср}$ – средневзвешенный коэффициент отражения потолка, стен и пола.

Таблица 8

Значения коэффициента β_a

Θ	Значение β_a		Θ	Значение β_a	
	В зоне с устойчивым снежным покровом	На остальной территории		В зоне с устойчивым снежным покровом	На остальной территории
2	0,71	0,46	50	1,08	1,08
6	0,74	0,52	54	1,12	1,12
10	0,77	0,58	58	1,16	1,16
14	0,80	0,64	62	1,18	1,18
18	0,84	0,69	66	1,21	1,21
22	0,86	0,75	70	1,23	1,23
26	0,90	0,80	74	1,25	1,25
30	0,92	0,86	78	1,27	1,27
34	0,95	0,91	82	1,28	1,28
38	0,98	0,96	86	1,28	1,28
42	1,00	1,00	90	1,29	1,29
46	1,04	1,04			

Примечание Θ – угловая высота середины светового проема над рабочей поверхностью.

Таблица 9

Значения коэффициента r_0 при боковом одностороннем освещении

B/h_1	l/B	Значение r_0 при боковом одностороннем освещении при $\rho_{ср}$,								
		0,5			0,4			0,3		
		l_n/B								
		0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
от 1 до 1,5	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1,05	1	1
	0,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,2	1,1	1,1
	1	2,1	1,9	1,5	1,8	1,6	1,3	1,4	1,3	1,2
более 1,5 до 2,5	0	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1
	0,3	1,3	1,2	1,1	1,2	1,15	1,1	1,15	1,2	1,05
	0,5	1,85	1,6	1,3	1,5	1,35	1,2	1,3	1,2	1,1
	0,7	2,25	2	1,7	1,7	1,6	1,3	1,55	1,35	1,2
	1	3,8	3,3	2,4	2,8	2,4	1,8	2	1,8	1,5
более 2,5 до 3,5	0,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1	1	1	1	1
	0,2	1,15	1,1	1,05	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1,05
	0,3	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
	0,4	1,35	1,25	1,2	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1
	0,5	1,6	1,45	1,3	1,35	1,25	1,2	1,25	1,15	1,1
	0,6	2	1,75	1,45	1,6	1,45	1,3	1,4	1,3	1,2
	0,7	2,6	2,2	1,7	1,9	1,7	1,4	1,6	1,5	1,3
	0,8	3,6	3,1	2,4	2,4	2,2	1,55	1,9	1,7	1,4
	0,9	5,3	4,2	3	2,9	2,45	1,9	2,2	1,85	1,5
	1	7,2	5,4	4,3	3,6	3,1	2,4	2,6	2,2	1,7

Окончание табл. 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
более 3,5	0,1	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1
	0,2	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,05	1,05
	0,3	1,75	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	1,25	1,2	1,1
	0,4	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,4	1,3	1,2
	0,5	3,4	2,9	2,5	2	1,8	1,5	1,7	1,5	1,3
	0,6	4,6	3,8	3,1	2,4	2,1	1,8	2	1,8	1,5
	0,7	6	4,7	3,7	2,9	2,6	2,1	2,3	2	1,7
	0,8	7,4	5,8	4,7	3,4	2,9	2,4	2,6	2,3	1,9
	0,9	9	7,1	5,6	4,3	3,6	3	3	2,6	2,1
	1	10	7,3	5,7	5	4,1	3,5	3,5	3	2,5

Примечания: B – глубина помещения, м; h_1 – высота от уровня условной рабочей поверхности до верха окна, м; l – расстояние от расчетной точки до наружной стены, м; ρ_{cp} – средневзвешенный коэффициент отражения потолка, стен и пола; l_n – длина помещения, м.

Таблица 10

Значения коэффициента r_0 при боковом двустороннем освещении

B/h_1	l/B	Значение r_0 при боковом двустороннем освещении при ρ_{cp} ,								
		0,5			0,4			0,3		
		l_n/B								
		0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более	0,5	1	2 и более
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
от 1 до 1,5	0,1	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1,05	1	1
	0,5	1,35	1,25	1,15	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	1	1,6	1,4	1,25	1,45	1,3	1,15	1,25	1,15	1,1
более 1,5 до 2,5	0	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1	1
	0,3	1,3	1,2	1,1	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,05
	0,5	1,8	1,45	1,25	1,4	1,25	1,15	1,25	1,15	1,1
	0,7	2,1	1,75	1,5	1,75	1,45	1,2	1,3	1,25	1,2
1	2,35	2	1,6	1,9	1,6	1,5	1,5	1,35	1,2	
более 2,5 до 3,5	0,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1	1	1	1	1
	0,2	1,15	1,1	1,05	1,1	1,1	1,05	1,05	1,05	1,05
	0,3	1,2	1,15	1,1	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
	0,4	1,35	1,2	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,1
	0,5	1,5	1,4	1,25	1,3	1,2	1,15	1,2	1,1	1,1
	0,6	1,8	1,6	1,35	1,5	1,35	1,2	1,35	1,25	1,15
	0,7	2,25	1,9	1,45	1,7	1,5	1,25	1,5	1,4	1,2
	0,8	2,8	2,4	1,9	1,9	1,6	1,3	1,65	1,5	1,25
	0,9	3,65	2,9	2,6	2,2	1,9	1,5	1,8	1,6	1,3
	1	4,45	3,35	2,65	2,4	2,1	1,6	2	1,7	1,4

Окончание табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Более 3,5	0,1	1,2	1,15	1,1	1,1	1,1	1,05	1,04	1,05	1
	0,2	1,4	1,3	1,2	1,2	1,15	1,1	1,1	1,05	1,05
	0,3	1,75	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	1,25	1,2	1,1
	0,4	2,35	2	1,75	1,6	1,4	1,3	1,35	1,25	1,15
	0,5	3,35	2,8	2,4	1,9	1,7	1,45	1,65	1,5	1,3
	0,6	4,2	3,5	2,85	2,25	2	1,7	1,95	1,7	1,4
	0,7	5,1	4	3,2	2,55	2,3	1,85	2,1	1,8	1,5
	0,7	5,8	4,5	3,6	2,8	2,4	1,95	2,25	2	1,6
	0,8	6,2	4,9	3,9	3,4	2,8	2,3	2,45	2,1	1,7
0,9	6,3	5	4	3,5	2,9	2,4	2,6	2,25	1,9	

Примечания: B – глубина помещения, м; h_1 – высота от уровня условной рабочей поверхности до верха окна, м; l – расстояние от расчетной точки до наружной стены, м; ρ_{cp} – средневзвешенный коэффициент отражения потолка, стен и пола; l_n – длина помещения, м.

Таблица 11

Значение коэффициента K_ϕ

Тип фонаря	K_ϕ
Световые проемы в плоскости покрытия:	
ленточные	1,0
штучные	1,1
Фонари с двусторонним остеклением:	
наклонным (трапециевидные)	1,15
вертикальным (прямоугольные)	1,2
Фонари с односторонним остеклением (шеды):	
наклонным	1,3
вертикальным	1,4

Таблица 12

Значения коэффициента τ_1

Светопроницающий материал	τ_1
Стекло оконное листовое	
одинарное	0,9
двойное	0,8
тройное	0,75
Стекло витринное толщиной 6-8 мм	0,8
Стекло листовое армированное	0,6
Стекло листовое	
солнцезащитное	0,65
контрастно	0,75
Органическое стекло	
прозрачное	0,9
молочное	0,6
Пустотелые стеклоблоки	
светорассеивающие	0,5
светопрозрачные	0,55
Стеклопакеты	0,8

Таблица 13

Значения коэффициента τ_2

Вид оконного переплета (для жилых и общественных зданий)	τ_2
Деревянные:	
одинарные	0,8
спаренные	0,75
двойные раздельные	0,65
с тройным остеклением	0,5
Металлические:	
одинарные	0,9
спаренные	0,85
двойные раздельные	0,8
с тройным остеклением	0,7

Таблица 14

Значения коэффициента τ_3

Несущие конструкции покрытий	τ_3
Стальные фермы	0,9
Железобетонные и деревянные фермы и арки	0,8
Балки и рамы сплошные при высоте сечения	
50 см и более	0,8
менее 50 см	0,9

Таблица 15

Значения коэффициента τ_4

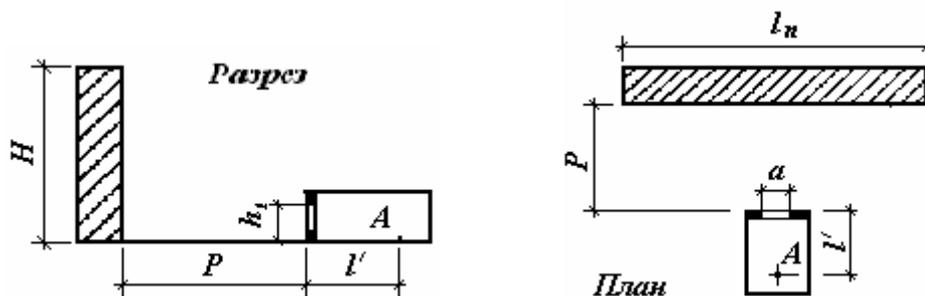
Солнцезащитные устройства и изделия	τ_4
Убирающиеся регулируемые жалюзи и шторы (межстекольные, внутренние, наружные)	1,0
Стационарные жалюзи и экраны с защитным углом не более 45° при расположении пластин жалюзи или экранов под углом 90° к плоскости окна:	
горизонтальные	0,65
вертикальные	0,75
Горизонтальные козырьки с защитным углом:	
не более 30°	0,8
от 15° до 45° (многоступенчатые)	0,9 - 0,6

Таблица 16

Значения коэффициента b_{ϕ}

Отделочные материалы фасада противостоящего здания	Z_1	Z_2							
		0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	>5,0
Кирпич или бетон	1,0	0,14	0,25	0,26	0,23	0,2	0,15	0,11	0,06
	1,5	0,14	0,23	0,25	0,22	0,19	0,14	0,1	0,05
	3,0	0,14	0,21	0,23	0,2	0,18	0,12	0,08	0,04
	6,0	0,14	0,2	0,22	0,2	0,17	0,12	0,08	0,04
	10 и более	0,14	0,18	0,2	0,18	0,16	0,11	0,08	0,04
Блоки облицовочные керамические	1,0	0,16	0,3	0,3	0,26	0,23	0,17	0,13	0,07
	1,5	0,16	0,26	0,28	0,25	0,22	0,16	0,12	0,06
	3,0	0,16	0,24	0,26	0,24	0,2	0,14	0,1	0,05
	6,0	0,16	0,23	0,25	0,23	0,2	0,13	0,09	0,05
	10 и более	0,16	0,21	0,23	0,21	0,18	0,12	0,09	0,04
Краска фасадная цветная на бетоне светлая атмосферостойкая	1,0	0,2	0,36	0,37	0,33	0,29	0,21	0,16	0,08
	1,5	0,2	0,33	0,35	0,32	0,28	0,2	0,15	0,07
	3,0	0,2	0,3	0,33	0,3	0,25	0,18	0,12	0,06
	6,0	0,2	0,29	0,32	0,29	0,24	0,17	0,12	0,06
	10 и более	0,2	0,26	0,29	0,26	0,23	0,16	0,11	0,05
Краска фасадная на бетоне белая атмосферостойкая	1,0	0,25	0,45	0,46	0,4	0,37	0,27	0,2	0,1
	1,5	0,25	0,42	0,44	0,4	0,35	0,24	0,19	0,09
	3,0	0,25	0,38	0,41	0,37	0,32	0,22	0,15	0,08
	6,0	0,25	0,37	0,4	0,36	0,31	0,21	0,15	0,08
	10 и более	0,25	0,33	0,36	0,32	0,28	0,19	0,14	0,07

Примечание: Схема расположения противостоящего здания:



- где Z_1 – индекс противостоящего здания в плане;
 Z_2 – индекс противостоящего здания в разрезе;
 l' – расстояние от расчетной точки до внешней поверхности наружной стены, м;
 l_n – длина противостоящего здания, м;
 H – высота противостоящего здания, м;
 P – расстояние между рассматриваемым и противостоящим зданиями, м;
 a – ширина окна в плане, м;
 h_1 – высота от уровня условной рабочей поверхности до верха окна, м.

$$Z_1 = \frac{l_n \cdot l}{(P+l) \cdot a};$$

$$Z_1 = \frac{H \cdot l}{(P+l) \cdot h_1}$$

Приложение II

График 1. Суммарная наружная освещенность E_n^Σ для условий г. Минска в зависимости от месяца года при ясном небе, клк.

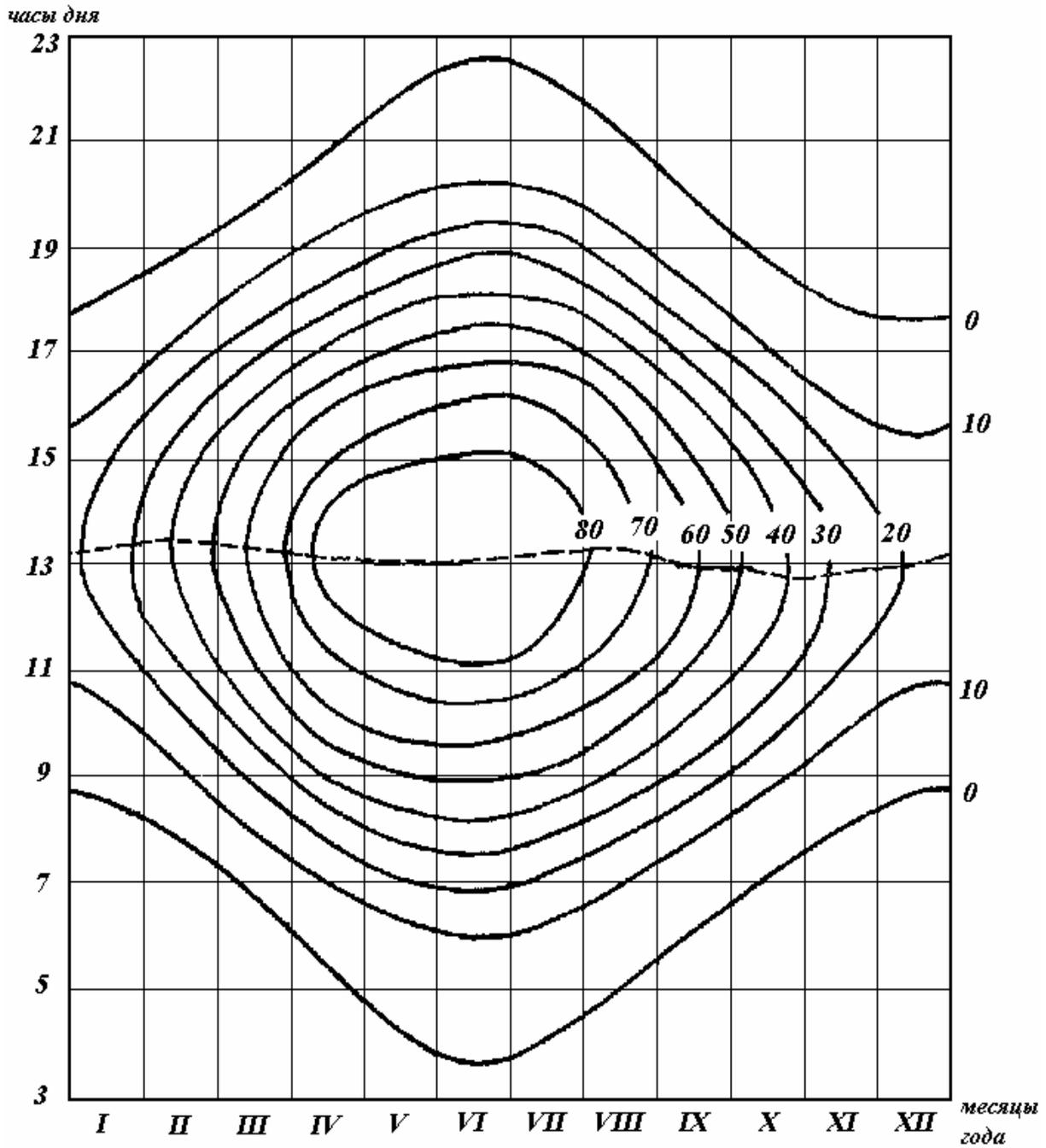
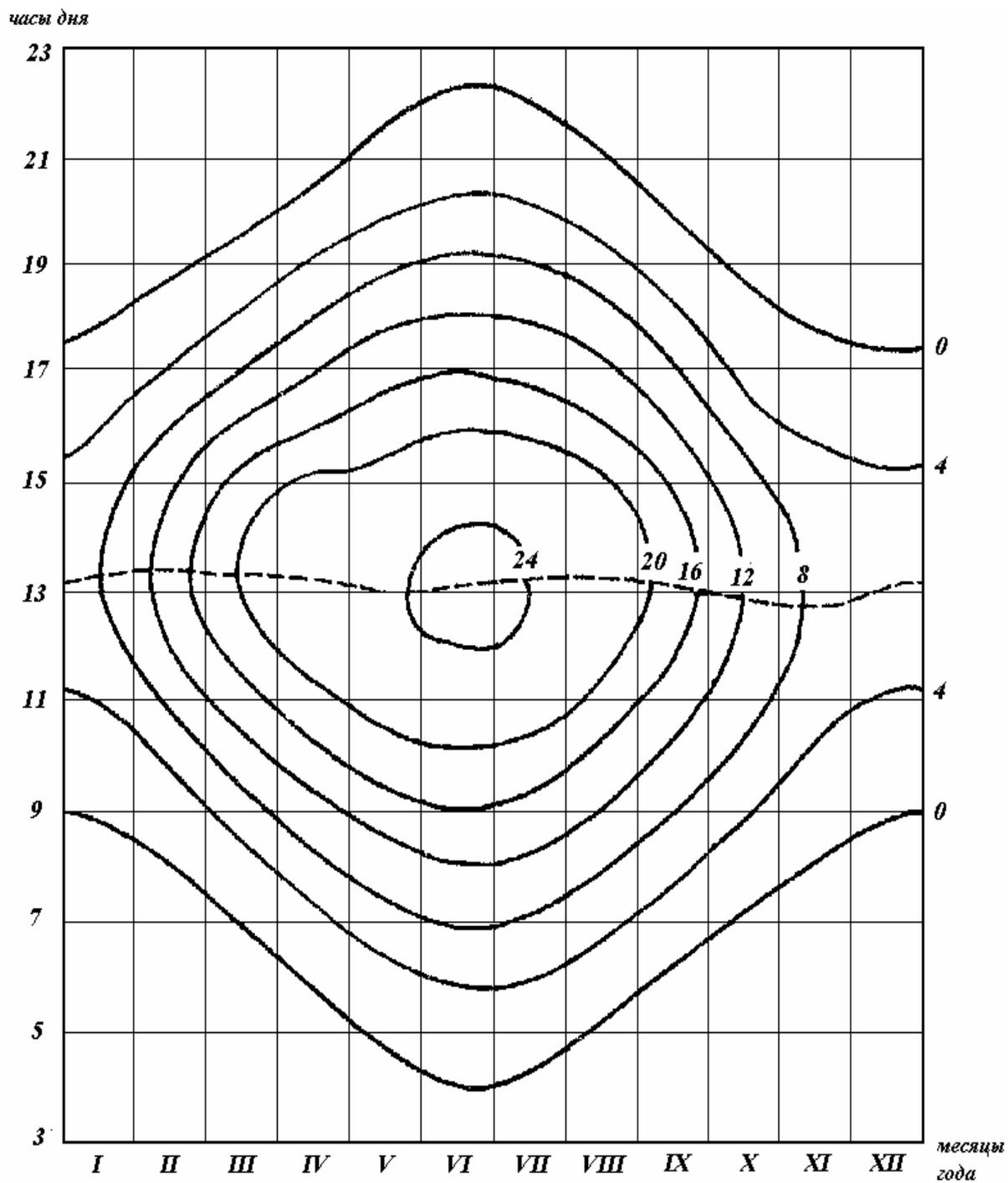
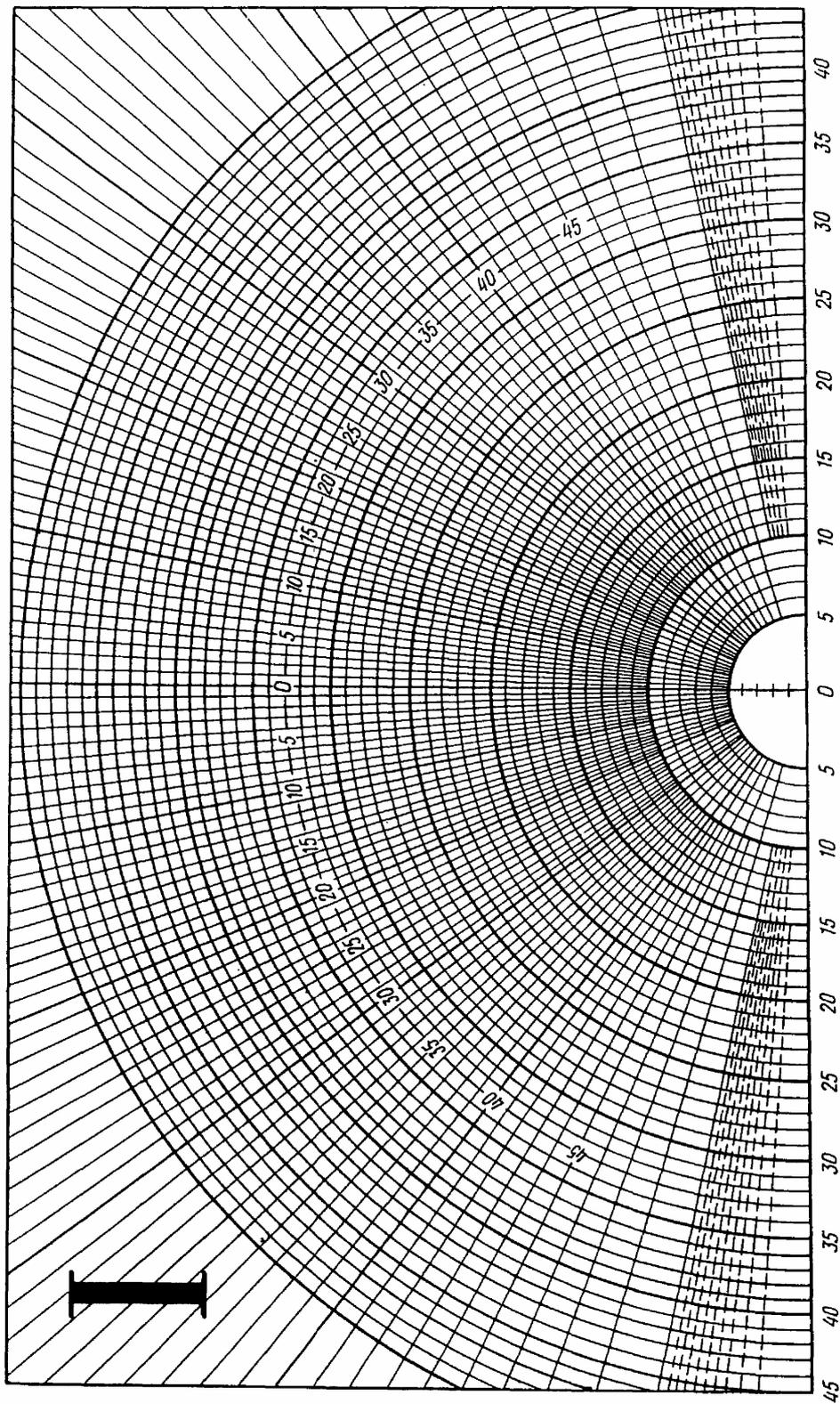


График 2. Суммарная наружная освещенность E_n^Σ для условий г. Минска в зависимости от месяца года при пасмурном небе, клк.

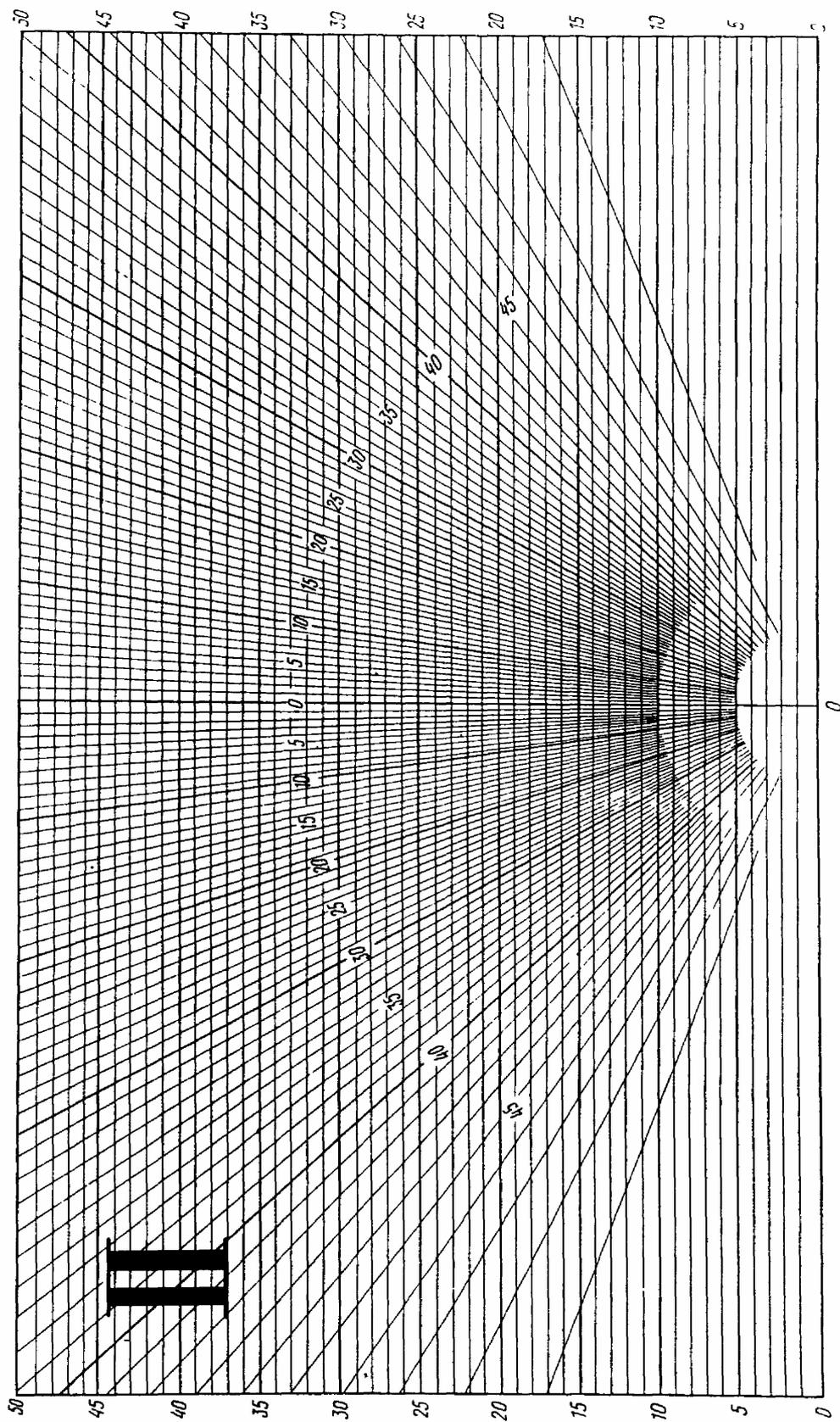


Приложение III

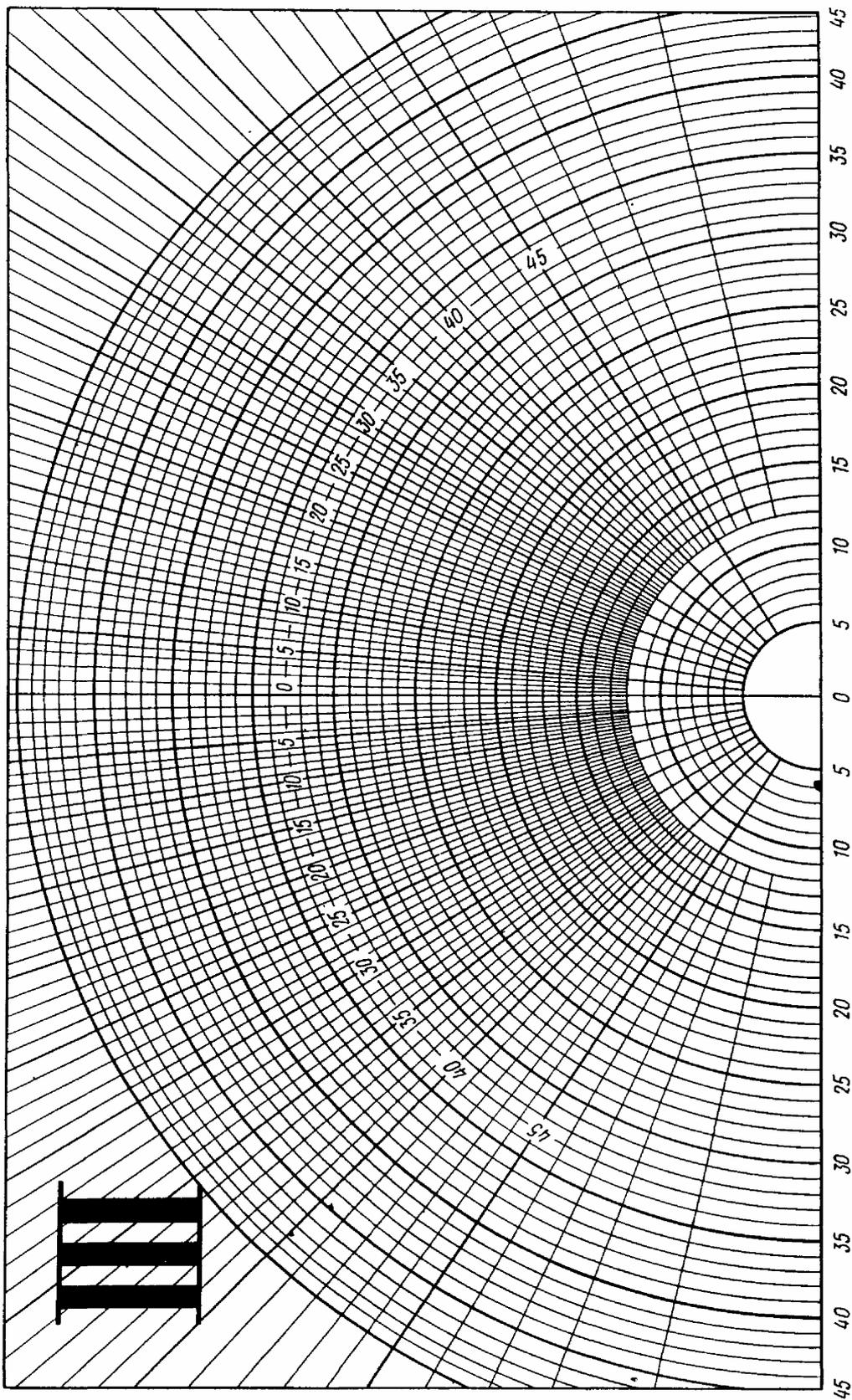
1. График Данилюка I.



2. График Данилюка П.



3. График Данилюка Ш.



Приложение IV

Таблица 1

Результаты расчета КЕО при верхнем освещении

№ точки	n_2	n_3	ϵ_n^{δ}	ϵ_{cp}	r_1	K_{ϕ}	ϵ_{omp}	τ_0	K_3	e_p^{δ}
1										
2										
3										
...										
N										

Таблица 2

Результаты расчета КЕО при боковом освещении
при наличии нескольких световых проемов в одном ограждении

№ точки	n_1	C	n_2	ϵ_n^{δ}	n'_1	n'_2	ϵ_{30}	θ	β_a	z_1	z_2	b_{ϕ}	$K_{3л}$	ρ_{cp}	L_{pl}/B	B/h_1	l/B	r_0	τ_0	K_3	e_p^{δ}	
	1																					
2																						
3																						
...																						
N																						

Таблица 3

Результаты расчета КЕО при боковом освещении
при наличии нескольких световых проемов в разных ограждениях

№ точки	Окно	n_1	C	n_2	ϵ_n^{δ}	n'_1	n'_2	ϵ_{30}	θ	β_a	z_1	z_2	b_{ϕ}	$K_{3л}$	ρ_{cp}	L_{pl}/B	B/h_1	l/B	r_0	τ_0	K_3	e_p для 1-го окна	e_p^{δ}	
	1	I																						
II																								
...																								
N																								
2	I																							
	II																							
	...																							
	N																							
3	I																							
	II																							
	...																							
	N																							
...	I																							
	II																							
	...																							
	N																							
N	I																							
	II																							
	...																							
	N																							

7. Измерение силы света и светового потока электрических источников света

Цель работы: определение силы света, светового потока заданного источника света; практический расчет распределения светности, освещенности и яркости поверхностей в заданном помещении с исследуемым источником света.

Теоретические основы работы

Энергия, передаваемая путем излучения, называется лучистой энергией. Примером источника лучистой энергии является Солнце, нагревающее и освещающее землю своим мощным излучением.

Излучение характеризуется спектральным составом и мощностью.

Спектральный состав определяется длиной волны излучения (λ , м). Длины волн лучистого потока колеблются в широких пределах от тысячных долей миллимикрона (1 миллимикрон = 10^{-9} м) до сотен километров. Только незначительная область излучений, вызывает ощущение света и цвета и лежит в пределах от $\approx 0,4$ до $\approx 0,8$ микрона (1 микрон = 10^{-6} м). Указанный участок спектра носит название видимых излучений.

Мощность лучистого потока в видимой части спектра называют световым потоком.

Световой поток (Φ) – это мощность излучения видимого участка спектра, которое, попадая на сетчатку глаза, вызывает у человека ощущение света и цвета; измеряется в люменах (лм).

Так как применяемые на практике источники света распределяют световой поток в пространстве неравномерно, для оценки светового действия источника в каком-либо направлении вводится понятие силы света.

Силой света источника в некотором направлении называют угловую плотность светового потока источника в данном направлении, которая измеряется в канделах (кд). Сила света характеризуется не только величиной, но и направлением в пространстве.

$$I = d\Phi / d\Omega, \quad (1)$$

где $d\Phi$ – световой поток, лм;

$d\Omega$ – элементарный пространственный (телесный) угол, ср.

Сила света в 1 кд показывает, что световой поток в 1 лм излучается в телесном угле в 1 стер для какого-либо точечного источника света.

Телесным углом [Ω] называют часть пространства, ограниченную конической поверхностью.

Телесный угол, равный одному стерadianу, вырезает на поверхности шара радиуса r участок, площадь которого S равна квадрату радиуса.

Другими словами, телесный угол – это объемный угол, под которым мы видим те или иные предметы.

Согласно определению, для угла в 1 ср:

$$S = r^2, \quad (2)$$

значит

$$\Omega = S / r^2 = 1 \text{ ср}. \quad (3)$$

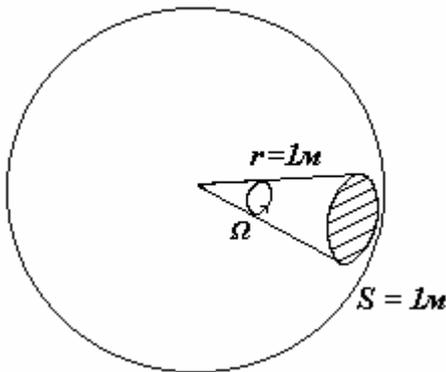


Рис. 1. Схема к определению телесного угла

Величина телесного угла не зависит от величины радиуса, так как с увеличением радиуса увеличивается и вырезаемая часть шаровой поверхности (рис. 1).

Зависимость между телесными и плоскими углами (которые являются проекциями телесных углов на плоскость) выражается следующим соотношением:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

где α – плоский угол;

Ω – телесный угол.

Для представления о распределении светового потока, излучаемого источником в пространстве, пользуются понятием фотометрической поверхности.

Фотометрической поверхностью называется поверхность, которая представляет собой геометрическое место концов радиусов-векторов, отображающих распределение силы света источника во всех направлениях пространства.

Фотометрическая поверхность строится следующим образом: сила света в разных направлениях откладывается в принятом масштабе на радиусах-векторах, проведенных из центра источника света.

Концы векторов, соответствующих значениям силы света в разных направлениях, соединяют и таким образом получают замкнутую поверхность, которая и называется фотометрической поверхностью. Часть пространства, ограниченная этой поверхностью, называется фотометрическим телом.

Для большинства источников света и осветительных приборов фотометрическое тело симметрично относительно некоторой оси. Такие источники света и осветительные приборы называются симметричными.

Для суждения о фотометрической поверхности достаточно иметь одно ее сечение вертикальной плоскостью, проходящей через ось симметрии,

и сечение горизонтальной плоскостью, проходящей через световой центр перпендикулярно оси симметрии.

Продольной кривой распределения силы света (сечение фотометрической поверхности вертикальной плоскостью) называется кривая в любой плоскости, проходящей через ось симметрии лампы осветительного прибора. Для симметричных источников света и осветительных приборов обычно строят половину продольной кривой силы света (рис. 2).

Поперечной кривой распределения силы света (сечение фотометрической поверхности горизонтальной плоскостью) называется кривая, снятая в плоскости, перпендикулярной оси лампы.

Полный световой поток источника света, имеющего ось симметрии, определяется уравнением

$$\Phi = 2\pi \cdot I_{cp} \cdot \int_0^{\pi} \sin \Theta \cdot d\Theta, \quad (5)$$

где Θ – угол между осью источника и исследуемым направлением;
 I_{cp} – среднее значение силы света, кд.

Построение продольных кривых распределения силы света может быть произведено при помощи распределительного фотометра (смотри схему установки). Искомая сила света [I_{Θ}] в данном направлении Θ определяется из соотношения:

$$I_{\Theta} = E_{\Theta} \cdot d^2, \quad (6)$$

где E_{Θ} – освещенность на поверхности, находящейся в направлении Θ ;
 d – расстояние от источника света.

Наряду с силой света, большое применение в светотехнике имеет освещенность.

Освещенность [E] – это поверхностная плотность падающего на поверхность светового потока, единицей измерения является люкс (1 лк = 1 лм/м²):

$$E = \Phi_i / S, \quad (7)$$

где Φ_i – падающий на поверхность световой поток, лм;
 S – площадь поверхности, м².

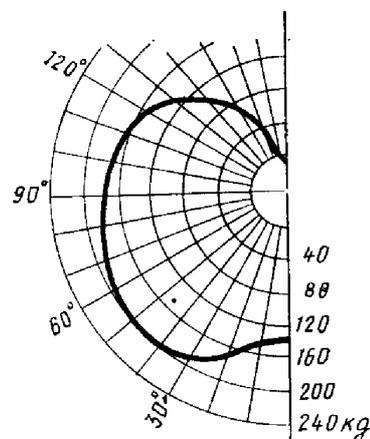


Рис. 2. Продольная кривая силы света точечного источника

Для точечных источников света справедлив закон *квадратов расстояний*: 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:

$$E = \frac{I_{\ominus} \cdot \cos \beta}{d^2}, \quad (8)$$

Угол β – это угол между направлением силы света $[I_{\ominus}]$ и перпендикуляром к освещаемой поверхности (рис. 3).

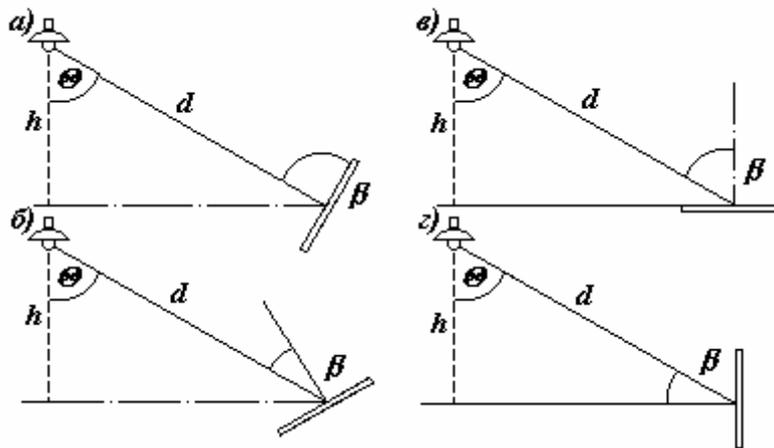


Рис. 3. Схемы к расчету освещенности

Для любой поверхности справедлив закон *сохранения светового потока*, который можно выразить следующим образом:

$$\Phi_i = \Phi_{\rho} + \Phi_{\alpha} + \Phi_{\tau}, \quad (9)$$

где Φ_i – падающий световой поток;
 Φ_{ρ} – отраженный световой поток;
 Φ_{α} – поглощенный световой поток;
 Φ_{τ} – прошедший световой поток.

Следовательно, $\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi_i}; \alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_i}; \tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_i};$ (10)

$$\rho + \alpha + \tau = 1, \quad (11)$$

где ρ – коэффициент отражения;
 α – коэффициент поглощения;
 τ – коэффициент пропускания.

В архитектурной практике наибольший интерес представляют явления отражения и пропускания света, так как все предметы воспринимаются

глазом человека в отраженном свете. Благодаря различной величине этих коэффициентов становится возможным видеть предметы и их детали. С другой стороны, величина коэффициентов отражения и пропускания внутренних поверхностей помещения в значительной степени определяет уровень освещенности в помещении.

Различают несколько видов отражения (пропускания) света:

а) рассеянное (диффузное); примером является отражение от оштукатуренной поверхности потолка и стен или пропускание света молочным стеклом;

б) направленное; примером может быть отражение света от зеркал и полированных поверхностей металла или пропускание света через оконное стекло;

в) направленно-рассеянное; примером может служить отражение от поверхностей, окрашенных масляной краской, или пропускание света матированным стеклом.

Для поверхности, пропускающей или отражающей свет, вводится понятие светности.

Светностью (R) называется поверхностная плотность светового потока, отраженного поверхностью или прошедшего через нее. Светность измеряется в люксах (лк).

$$R_{\tau} = \frac{\Phi_{\tau}}{S}; \quad R_{\rho} = \frac{\Phi_{\rho}}{S}, \quad (12)$$

Между светностью поверхности, пропускающей (или отражающей) свет и ее освещенностью существует зависимость:

$$R_{\tau} = E \cdot \tau; \quad R_{\rho} = E \cdot \rho \quad (13)$$

Яркость (L) – световая величина, которая представляет собой поверхностную плотность силы света, излучаемую в заданном направлении. Единицей яркости является кд/м². Понятие яркости также связано с направлением.

Для какой-либо светящейся поверхности яркость определяется как отношение силы света, излучаемой в данном направлении, к проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению.

$$L = \frac{I_{\Theta}}{S \cdot \cos \beta}, \quad (14)$$

Рассматривая поверхность S под углом β с нормалью, мы увидим не поверхность S , а ее проекцию $S \cdot \cos \beta$, перпендикулярную к рассматриваемому направлению.



Рис. 4. Схема к определению яркости

Определяется яркость в зависимости от силы света, которую испускает каждый элемент данной поверхности в направлении глаза наблюдателя. При этом из двух одинаковых поверхностей более яркой будет казаться та поверхность, которая излучает наибольшую силу света.

Для поверхностей, пропускающих или отражающих свет, справедливо выражение:

$$L_{\tau} = \frac{E \cdot \tau}{\pi}; \quad L_{\rho} = \frac{E \cdot \rho}{\pi}, \quad (15)$$

где E – освещенность поверхности, лк;

τ – коэффициент пропускания;

ρ – коэффициент отражения.

Яркость является субъективной светотехнической характеристикой и поэтому для оценки восприятия поверхности вводится понятие коэффициента контраста:

$$k = \frac{L_{\text{фона}} - L_{\text{поверхн.}}}{L_{\text{фона}}} \quad (16)$$

Источники искусственного света, как правило, не используются самостоятельно, а являются частью конструкции светильников. Выделяют следующие *основные светотехнические характеристики светильников*:

- кривая распределения силы света;
- защитный угол γ (рис. 5);

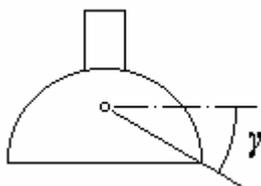


Рис. 5. Схема к определению защитного угла светильника

- коэффициент светопропускания арматуры, τ ;

- коэффициент полезного действия (отношение светового потока, излучаемого источником света к тому световому потоку, который излучает светильник во всех направлениях).

Принята следующая классификация светильников по распределению силы света в пространстве:

Таблица 1

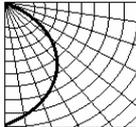
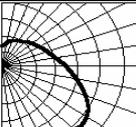
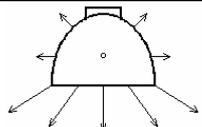
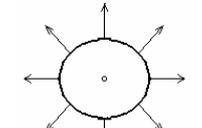
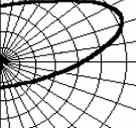
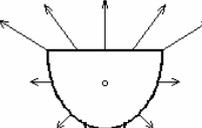
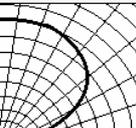
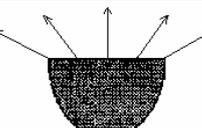
Классы прибора	Подклассы в зависимости от характера светораспределения	Типичная кривая силы света	Схема устройства	Доля светового потока в верхней полушере
Прямого света	Концентрированного; среднего; широкого			0 – 10 %
Рассеянного света	Преимущественно прямого			10 – 45 %
	Равномерно рассеянного			45 – 55 %
	Преимущественно отраженного			55 – 90 %
Отраженного света	Среднего; широкого			90 – 100 %

Таблица 2

Наименьшая допустимая высота подвеса светильников над уровнем пола помещения

Тип светильника	Рассеиватель	Колба лампы	Защитный угол	Наим высота подвеса светильников в м при лампах, мощностью	
				До 200 Вт	Более 200 Вт
1	2	3	4	5	6
Светильники эмалированным и зеркальным отражателями глубокого излучения; с непрозрачными рассеивающими или полурассеивающими отражателями	Отсутствует	Прозрачная	10 – 30°	3	4
			Более 30°	2	3
	Отсутствует	Матированная	10 – 90°	2,5	3,5
			Матированное стекло в зоне 0 – 90°	Прозрачная	До 20°
		Более 20°	2,5		3

Светильники с зеркальным отражателем широкого излучения	Отсутствует	Прозрачная	Любой	4	6
Светильники с рассеивателями без отражателей	Молочное стекло; светотехническая бумага в зоне 0 – 90°	Прозрачная	Нет	2	3
	То же в зоне 60 – 90°	Прозрачная	Нет	3	4
	Матированное стекло в зоне 0-90°	Прозрачная	Нет	3	4
Лампы накаливания (голые)	Отсутствует	Матированная	нет	4	6

Описание экспериментальной установки.

Для построения кривых силы света светильника используется распределительный фотометр.

Принципиальная схема распределительного фотометра представлена на рис. 6.

Он состоит из испытуемого источника света (1), люксметра, черного экрана (2) для защиты фотоэлемента от попадания посторонних световых лучей и оси вращения (5).

Источник света укреплен на оси вращения, проходящей через его центр. Углы поворота отсчитываются по лимбу (6).

Люксметр состоит из селенового фотоэлемента (3), миллиамперметра (4). Преимущество селенового фотоэлемента по сравнению с другими видами фотоэлементов заключается в том, что его спектральная чувствительность близка к чувствительности человеческого глаза.

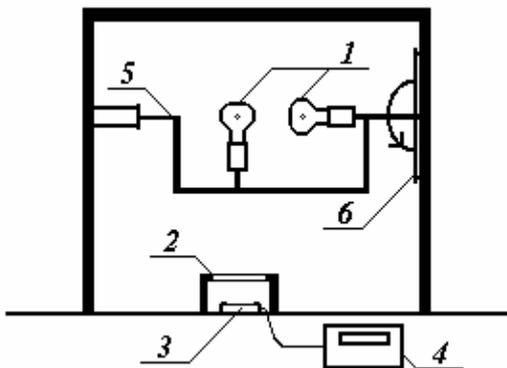


Рис. 6. Схема установки

Методика проведения эксперимента

1. Исследование характера распределения силы света светильника.

1) установить испытуемый источник света в патрон и проверить совпадение его центра с осью вращения;

2) заметить по лимбу положение источника света и снять отсчет по миллиамперметру, соединенному с фотоэлементом.

Освещенность определяется по формуле:

$$E = k \cdot n_{\Theta} \quad (17)$$

где k – градуировочный коэффициент люксметра;

n_{Θ} – число делений на миллиамперметре;

3) поворачивая источник света, снимать отсчеты показаний миллиамперметра через каждые 15° поворота;

4) найти значения $E_{\Theta 1}, E_{\Theta 2}, E_{\Theta 3}, \dots, E_{\Theta n}$ и т.д.;

5) по формуле (6) рассчитать значение силы света, I_{Θ} , в различных направлениях;

6) протокол наблюдений вести в виде таблицы (прил. I, табл. 2).

7) построить продольную кривую распределения силы света источника;

8) провести измерения и занести данные в таблицу при горизонтальном положении источника;

9) построить поперечную кривую распределения силы света источника.

2. Определение полного светового потока светильника.

Вычислить полный световой поток исследуемого источника света графическим методом Руссо (смотри приложение I, таблица 1) с использованием построенных кривых распределения силы света.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение следующих светотехнических величин: световой поток, сила света, освещенность, светность, яркость, телесный угол.

2. Что такое фотометрическое тело? Назовите его составляющие.

3. Закон квадратов расстояний.

4. Закон сохранения светового потока.

5. Виды отражения (пропускания) света.

6. Назовите основные светотехнические характеристики светильников.

7. Классификация светильников.

Приложение I

1. Метод Руссо.

Основой для данного расчета служат кривые распределения силы света источника, построенные в процессе выполнения лабораторной работы. Для того, чтобы с помощью метода Руссо рассчитать полный световой поток источника света, необходимо провести дополнительные построения: поверх изображения продольной и поперечной кривой силы света наносится ортогональная масштабная сетка в выбранном масштабе. Затем рассчитывается площадь одного квадрата этой сетки $S_{1кв}$ в $кд^2$ и подсчитывается количество полных, $N_{п.кв.}$, и неполных квадратов, $N_{неп.кв.}$, находящихся в пределах каждой кривой распределения силы света.

Далее расчет следует проводить по формулам:

$$S_{гор.(верт.)} = S_{1кв.} \cdot N_{п.кв.} + S_{1кв.} \cdot (N_{неп.кв.} / 2), \quad (18)$$

где $S_{гор.(верт.)}$ – площадь пространства, ограниченного поперечной (или продольной) кривой распределения силы света, $кд^2$;

$S_{1кв.}$ – площадь, заключенная внутри одного квадрата ортогональной сетки в выбранном масштабе, $кд^2$;

$N_{п.кв.}$ – количество полных квадратов ортогональной сетки, находящихся внутри замкнутой поверхности, образованной поперечной или продольной кривой силы света;

$N_{неп.кв.}$ – количество неполных квадратов ортогональной сетки, находящихся внутри замкнутой поверхности, образованной поперечной или продольной кривой силы света.

$$I_{ср.(гор.,верт.)} = \sqrt{S_{гор.(верт.)} / \pi}, \quad (19)$$

где $I_{ср.гор.(верт.)}$ – средняя сила света, найденная с помощью горизонтальной и вертикальной кривых распределения силы света соответственно, $кд$;

$$\Phi_{гор.(верт.)} = 2\pi \cdot I_{ср.гор.(верт.)} \cdot \left. \cos \Theta \right|_0^{\pi}, \quad (20)$$

где $\Phi_{гор.(верт.)}$ – световой поток найденный с помощью горизонтальной и вертикальной кривых распределения силы света соответственно, $лм$;

$$\Phi_{ср.} = (\Phi_{гор.} + \Phi_{верт.}) / 2, \quad (21)$$

где $\Phi_{ср.}$ – полный световой поток источника света, $лм$.

2. Таблица для ведения протокола.

$\Theta, ^\circ$	$E_{\text{верт.}}$	$E_{\text{гор.}}$	$I_{\text{верт.}}$	$I_{\text{гор.}}$
0				
15				
30				
45				
60				
75				
90				
105				
120				
135				
150				
165				
180				
195				
210				
225				
240				
255				
270				
285				
300				
315				
330				
345				

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Курсовая работа 1. ШУМОВОЙ РЕЖИМ ЗАСТРОЙКИ

При написании курсовой работы рекомендуется использование следующих источников [1, 20, 22, 23, 24, 25].

Целью курсовой работы по теме «Шумовой режим застройки» является расчет шумового фона жилой застройки и выбор мероприятий по защите от шума внутриквартальной территории.

Источником шума является поток наземного автомобильного транспорта, который в настоящее время является основной причиной экологического дискомфорта в городах.

Шум, создаваемый городским автотранспортом, низко- и среднечастотный, с максимумом звукового давления в диапазоне частот 400 – 800 Гц, снижаясь в среднем на 4 – 5 дБ на октаву. Он имеет широкие спектральный диапазон и время звучания. Это является причиной глубины и мощности его негативного воздействия.

Задачи курсовой работы следующие:

1. Расчет уровня шума от транспортных магистралей.
2. Расчет уровня шума территории проектируемой застройки в узловых точках.
3. Расчет и построение звуковых теней от зданий на внутриквартальную застройку.
4. Определение снижения шума в узловых точках в пределах звуковых теней.
5. Выбор способа снижения уровня шума в застройке, расчет шумозащитных экранирующих элементов. Расчет уровня звукового давления на границе и внутри жилой застройки.
6. Анализ шумового режима и определение комфортных зон застройки.

1.1. Выбор и обоснование метода определения акустических характеристик автотранспортных потоков

Студенту предлагается ознакомиться с существующими методами оценки шума.

Методы определения и оценки шума источников, действующих в городской среде и связанных с движением транспорта, установлены международным стандартом ISO 1996 «Акустика. Описание и измерение шума окружающей среды».

В настоящее время разработаны методы, которые позволяют устанавливать шумовые характеристики разнообразных источников городского шума. Это метод прямых натуральных измерений (инструментальный), метод масштабного и математического моделирования (расчетный) и аналитический метод (графоаналитический), связанный с использованием детерминированных и вероятностных моделей и являющийся основой для прогнозирования.

Инструментальный метод предполагает получение в натуральных условиях шумовых характеристик рассматриваемых источников при помощи специализированных приборов (шумомеров) по жестко установленной методике. Этот метод принято считать наиболее точным и надежным, поскольку определение параметров источника шума включает в себя учет многообразных натуральных условий. Однако применение такого рода определения шума источника возможно только в существующей застройке при ее реконструкции. К сложностям использования этого метода можно отнести, прежде всего, зависимость результатов измерения от климатических, временных, пространственных условий, а также их одномоментность. Наиболее рациональным можно считать применение метода натуральных измерений при научных исследованиях и составлении кадастра шума городских источников.

Расчетный метод предполагает использование известных математических моделей зависимости уровня шума источника от конкретных технических характеристик и условий, опирающихся на базу данных в справочной и нормативной литературе. Метод является приближенным, так как опирается на усредненные для всех видов источников данные, не имеющие диапазона вариантности, но удобен для прогнозирования шумового загрязнения территории.

В архитектурной практике при разработке новых проектов приемлемым методом можно считать расчетный. Такой метод наиболее универсален, он позволяет оценивать шум на всех уровнях градостроительного рассмотрения. При выполнении курсовой работы целесообразно применить компьютерный расчет либо другие современные информационные технологии.

Графоаналитический метод предполагает использование графиков, шаблонов, планшетов, номограмм, в которых обобщены данные об источниках шума и поправки на условия распространения звука. Он является одним из упрощенных методов оценки, предназначенным для инженерных расчетов, и используется в дополнение к расчетному методу.

На разных уровнях проектирования полнота исходной информации значительно различается и в зависимости от этого методы расчета также могут быть различны.

Так, при разработке генерального плана развития города отсутствует детальная информация о составе потоков, скоростях движения и т.д., поэтому пользуются специальными кадастровыми таблицами.

На стадии разработки проектов детальной планировки и проектов застройки, когда известны характеристики движения, (состав транспортных потоков, параметры продольного и поперечного профиля, типы покрытия проезжей части улиц и т.д.) шумовая характеристика определяется расчетным методом.

1.2. Теоретические основы расчета шумового режима застройки

Движение транспорта в городе является наиболее активным источником шума [1 – 4]. По отношению к городской среде, как правило, рассматривают не отдельные средства транспорта, а комплексные источники – линейные транспортные потоки. Характерной особенностью шума, создаваемого транспортным потоком, являются резкие и значительные колебания его уровня, обусловленные неоднородностью потока транспортных средств и изменением режима их движения (троганье с места, разгон, движение, торможение). Поэтому в качестве шумовой характеристики транспортных потоков установлен эквивалентный уровень звука $L_{A_{экв}}$ на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы движения транспортных средств.

Основными характеристиками транспортных потоков являются интенсивность движения в двух направлениях, средневзвешенная скорость потока, состав потока (процент грузового и общественного транспорта), наличие трамваев в потоке. Также обязательно учитываются условия движения: продольный уклон магистрали наличие перекрестков, пересечений в разных уровнях, разделительной полосы, характер прилегающей застройки и др.

Статистическая модель расчета описывается формулой:

$$L_{A_{экв}} = 10 \lg N + 13,3 \lg \langle V \rangle + 8,4\rho \pm \Delta A,$$

где $L_{A_{экв}}$ – эквивалентный уровень шума в 7,5 м от оси первой полосы движения, дБА;

N – интенсивность движения в обоих направлениях, приведенных. ед/ч;

$\langle V \rangle$ – средневзвешенная скорость потока, км/ч;

ρ – процент грузового и общественного транспорта в потоке;

ΔA – сумма поправок, учитывающих продольный уклон магистрали, тип дорожного покрытия, наличие перекрестков, пересечений в разных уровнях, разделительной полосы и характер прилегающей застройки.

На рис. 1 представлена номограмма, которой удобно пользоваться при расчете эквивалентного уровня шума от потока транспорта, с учетом поправок, представленных в табл. 1 и 2.

В соответствии с требованиями международного стандарта *ISO 1996* шумовая характеристика должна учитывать изменение интенсивности движения транспортных потоков в течение дня, поэтому определяется в зависимости от средней часовой интенсивности за дневной период суток. При отсутствии данных о среднечасовой интенсивности движения за дневной период времени, допускается принимать значение этой величины, равное 7 % среднегодовой суточной интенсивности движения.

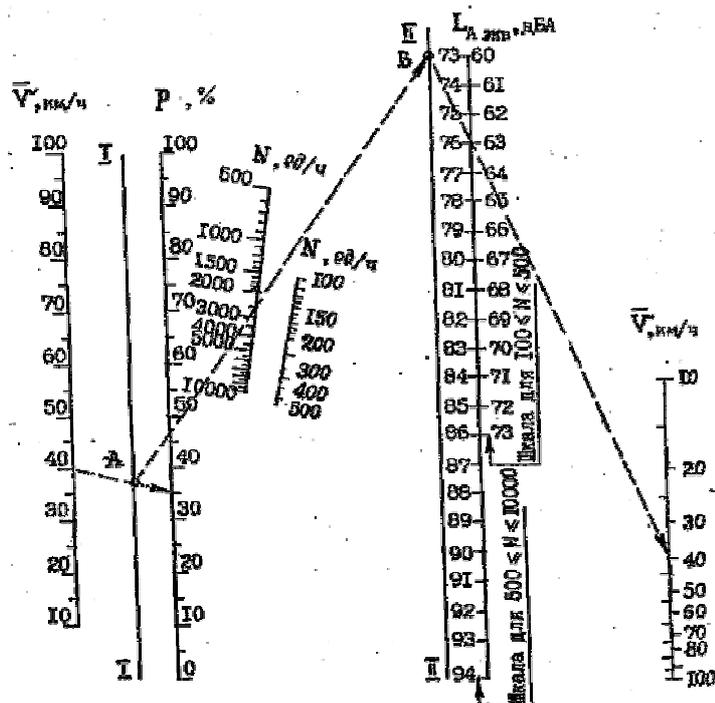


Рис. 1. Номограмма для определения шумовой характеристики $L_{A экв}$ транспортных потоков:
 v – средневзвешенная скорость потока;
 p – состав потока;
 N – интенсивность движения

Таблица 1

Поправки к эквивалентному уровню, учитывающие характеристики пути

Влияющий фактор	Численная величина поправки, дБА							
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Продольный уклон, α %				0	2	4	6	8
Разделительная полоса между проезжими частями шириной, м	15-30	7-15	3-7	3				
Число полос движения			8	6	4	2		
Материал покрытия при средней скорости движения, км/ч:								
асфальтобетон				40-80				
железобетон, цементобетон				10-40	40-60	60-80	Свыше 80	
брусчатый камень					10-20	20-40	40-60	60-80
булыжный камень					10	20	30	40

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перекрестки: регулируемый эстакадное пересечение улиц: одной категории различных категорий								
					Добавля-			
					ется			
							Добавляется	
						Добавляется		

Таблица 2

Поправка к эквивалентному уровню, учитывающая тип застройки, дБА

Тип застройки	Численная величина поправки при усредненных разрывах между зданиями, м			
	более 30	от 30 до 20	от 20 до 10	менее 10
Односторонняя, при расстоянии от линии застройки до края проезжей части, м: более 40 от 25 до 40 от 12 до 25 от 6 до 12			+1	+1
	+1	+1	+2	+2
	+1	+2	+3	+3
Двусторонняя при ширине улицы между линиями застройки, м: более 50 от 40 до 50 от 30 до 40 от 20 до 30 от 10 до 20		+1	+1	+1
	+1	+2	+2	+3
	+2	+3	+4	+5
	+4	+5	+6	+7

При размещении бульваров и пешеходных аллей между полосами проезжей части разных направлений движения, шумовая характеристика определяется отдельно для каждого направления движения. Расчет, как правило, выполняется в табличной форме (табл. 3), а его результаты наносятся на карту города.

Таблица 3

Расчет эквивалентного уровня шума потоков автомобильного транспорта

№ п/п	Наименование участка магистрали	N, прив. ед/ч	$\langle V \rangle$, км/ч	ρ , %	Исходный эквивалентный уровень шума на магистрали, $L_{A_{ЭКВ}}$, дБ А	Поправки, учитывающие факторы снижения уровня шума, дБА	Расчетный эквивалентный уровень шума на магистрали, $L_{A_{ЭКВ}}$, дБА (с учетом поправок)	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Снижение шума за счет поглощения в атмосфере $\Delta L_{\text{погл}}$ учитывает относительное поглощение звука в воздушной среде A_1 и поглощение звука K_n поверхностью между источником и расчетной точкой по формуле:

$$\Delta L_{\text{погл}} = A_1 \cdot K_{\text{П}}.$$

В проектной практике при оценке шумового режима относительное снижение шума в воздушной среде A_1 на ровной открытой территории рекомендуется учитывать с помощью графика, представленного в СНиПе. График для определения снижения уровня звука A_1 в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой приведен на рис. 2. Линия 1 соответствует транспортным потокам с интенсивностью движения менее 500 ед/час. Линия 2 соответствует потокам с интенсивностью более 500 ед/час.



Рис. 2

Снижение шума в воздушной среде A , можно вычислить по формуле:

$$A_1 = 10 \lg \frac{r}{r_0},$$

где r – расстояние от оси первой полосы движения до расчетной точки, м;
 r_0 – расстояние от первой полосы движения до обочины ($r_0 = 7,5$ м).

В зависимости от характера земной поверхности имеет место большее или меньшее снижение, а в ряде случаев и некоторое относительное увеличение уровня звукового давления за счет отражения и фокусирования звуковых лучей, например, на спортивных площадках. Поглощение происходит, как правило, над почвой, покрытой травой и кустарником. Отражение отмечается при наличии гладких твердых покрытий поверхности земли, например при асфальтировании, бетонной одежде дорог и площадей и при других подобных конструкциях.

Коэффициент K_{II} следует учитывать в следующих случаях:

- если точка расчета расположена на высоте менее 5 м и удалена от источника на расстояние до 100 м;
- если точка расчета расположена на высоте менее 10 м и удалена от источника на расстояние от 100 до 500 м;
- для всех расчетных точек, удаленных более 500 м от источника.

Для поверхности с кустарником и деревьями $K_{II} = 1,4 - 1,2$.

Для поверхности с газоном $K_{II} = 1,1$.

Для разрыхленной поверхности $K_{II} = 1,0$.

Для поверхности, покрытой асфальтом, льдом и водой, $K_{II} = 0,9 - 0,8$.

Снижение шума за счет поглощения зелеными насаждениями $\Delta L_{зел}$ во многом зависит от плотности и ширины зеленой зоны.

Эффект снижения шума в зеленых насаждениях зависит от характера посадок, породы деревьев и кустарников, времени года, а также от частотного состава шума, распространяющегося через эти насаждения. Снижение уровня звука полосами зеленых насаждений принимается в соответствии с рекомендациями по табл. 4.

Таблица 4

Эффективность поглощения шума зелеными насаждениями

№ п/п	Ширина полосы зеленых насаждений, м	Снижение уровня звука, дБА	Конструкция шумозащитной полосы
1	10 – 14	4 – 5	Однорядная с живой двухъярусной изгородью на переднем плане и шахматной посадкой деревьев внутри полосы.
2	14 – 20	5 – 8	Однорядная с живой двухъярусной изгородью на переднем плане и шахматной посадкой деревьев внутри полосы.
3	20 – 30	8 – 10	Двухрядная с разрывами между рядами 3 – 5 м, конструкция рядов аналогична приведенной в пп. 1, 2.
4	25 – 30	10 – 12	Двух- или трехрядная с разрывами между рядами 3 м, конструкция рядов аналогична пп. 1 – 3.

Примечание. Высоту деревьев следует принимать не менее 5 – 8 м, кустарников – не менее 1,5 – 2 м.

При условиях, отличных от данных в табл. 4, шумозащитный эффект зеленых насаждений можно рассчитать по формуле:

$$L_n = 20 \lg \frac{r_1 + \sum_1^z B_n + \sum_1^z A_n}{r_1} + 1,5z + \beta \sum_1^z B_n,$$

где L_n – снижение уровня звукового давления за полосой зеленых насаждений;
 r_1 – расстояние от источника до фронта шумозащитной полосы;

B_n – ширина n -ной полосы;

A_n – ширина разрыва между шумозащитными полосами;

z – количество рядов;

β – удельное поглощение звуковой энергии зелеными насаждениями.

Снижение шума $\Delta L_{\text{экp}}$ за счет экранирования экранами (стенками, зданиями, выемками, насыпями) различной протяженности определяется специальным расчетом, учитывающим планировочные ограничения звуковой волны жилой застройкой и преградами на пути распространения звуковой волны. Если из расчетной точки край преграды виден под углом 45° и более, то такую преграду считают бесконечной. Если угол менее 45° , то преграда имеет конечные размеры ($\alpha_1 + \alpha_2 < 90^\circ$, рис. 5).

При расчете снижения уровня звука за экранирующими сооружениями бесконечной длины от транспортных потоков учитывается ряд зависимостей в следующей последовательности:

– Вычерчивают в масштабе принципиальную схему расположения источника шума, экранирующего сооружения и расчетной точки. Расчетные схемы для определения разности хода звуковых лучей d при экранировании источников шума: (а – стенками; б – зданиями; в – выемками; г – насыпями) показаны на рис. 3.

Необходимо помнить, что источником шума транспортных средств принято считать обочину дороги на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы движения.

Источник шума рекомендуется изображать точкой на высоте 1 м от поверхности проезжей части улицы.

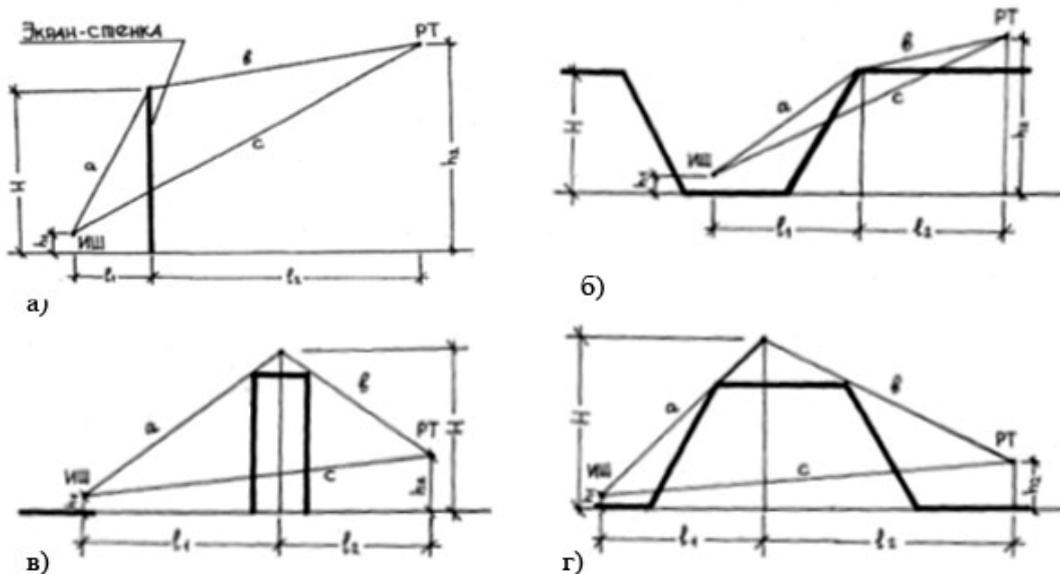


Рис. 3

Расчетные точки на территориях, прилегающих к жилым домам, намечают на уровне середины окон защищаемого от шума здания или на расстоянии 2 м от его фасада на уровне 1,5 м от поверхности земли.

При экранировании источников шума зданиями, насыпями или выемками значение разности длин путей прохождения звуковых лучей d рекомендуется определять по расчетным схемам, представленным на рис. 3.

На схеме приняты следующие обозначения:

ИШ – источник шума; РТ – расчетная точка; l_1 – расстояние между источником шума и экраном; l_2 – расстояние между экраном и расчетной точкой; a – расстояние между источником шума и вершиной экрана; b – расстояние между вершиной экрана и расчетной точкой; h_1 – высота источника шума; h_2 – высота расчетной точки; H – высота экрана.

Находят длину прямых линий a, b, c , м, графически или по формулам:

$$a = \sqrt{l_1^2 + (H - h_1)^2}; \quad b = \sqrt{l_2^2 + (h_2 - H)^2} \text{ при } (h_2 \geq H)$$

$$b = \sqrt{l_2^2 + (H - h_2)^2} \text{ при } (H \geq h_2); \quad c = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + (h_2 - h_1)^2}$$

где $l_1, l_2, l_1 + l_2$ – проекции расстояний соответственной a, b, c , (м).

– Определяют разность длин путей прохождения звукового луча (d) в соответствии со схемами экранов по формуле:

$$d = (a + b) - c.$$

В зависимости от величины d и вида источника шума определяют величину снижения уровня звука A^B экраном бесконечной длины. График для определения снижения уровня звука экраном: (1 – транспортные потоки; 2 – точечные источники) показан на рис. 4.

Если в курсовой работе анализируется экранирующее сооружение ограниченной длины, то расчет следует продолжать в указанном далее порядке:

– Вычерчивают в масштабе принципиальную схему расположения экрана и расчетной точки в плане (рис. 5).

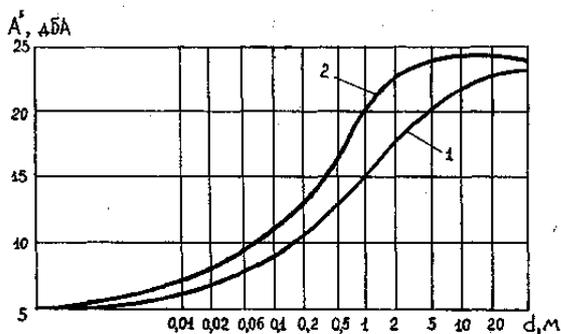


Рис. 4

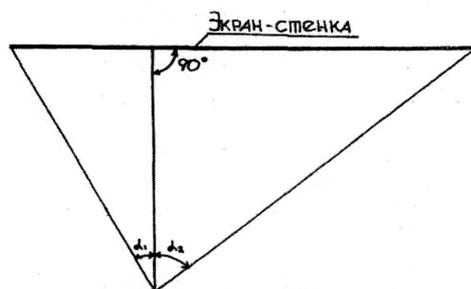


Рис. 5

– Опускают перпендикуляр из расчетной точки на экран, соединяют прямыми линиями расчетную точку с краями экрана.

Определяют углы α , и α_2 между перпендикуляром и линиями, соединяющими расчетную точку с краями экрана. Измеряют расстояние d и по рис. 4 определяют снижение уровня звука экраном A^B .

В зависимости от величины углов α , и α_2 и от A^B определяют величины снижения уровня звука экраном $\Delta L_{1экp}$ и $\Delta L_{2экp}$ по табл. 5.

В зависимости от разницы $\Delta L_{1экp}$, и $\Delta L_{2экp}$ определяют по табл. 6 поправку W и суммируют ее с меньшей из величин $\Delta L_{1экp}$ и $\Delta L_{2экp}$.

Таким образом будет определена величина снижения уровня звука экраном конечной длины при линейном источнике шума (табл. 7).

Расчетный уровень звука от нескольких источников шума определяется энергетическим суммированием уровней. Сложение ведется последовательно, начиная с самых высоких уровней. Определяется разность двух складываемых уровней, находится соответствующая добавка по табл. 8. Затем добавку прибавляют к большему из складываемых уровней. Полученный уровень складывают со следующим и т. д.

Таблица 5

Снижение уровня звука за экраном

$\Delta L_{экp.макс.}$ дБА	Угол								
	45	50	55	60	65	70	75	80	85
	Фактическое снижение уровня звука за экраном								
6	1,2	1,7	2,3	3,0	3,8	4,5	5,1	5,7	6,0
8	1,7	2,3	3,0	4,0	4,8	5,6	6,5	7,4	8,0
10	2,2	2,9	3,8	4,8	5,8	6,8	7,8	9,0	10,0
12	2,4	3,1	4,0	5,1	6,2	7,5	8,8	10,2	11,7
14	2,6	3,4	4,3	5,4	6,7	8,1	9,7	11,5	13,3
16	2,8	3,6	4,5	5,7	7,0	8,6	10,4	12,4	15,0
18	2,9	3,7	4,7	5,9	7,3	9,0	10,8	13,0	16,8
20	3,2	3,9	4,9	6,1	7,6	9,4	11,3	13,7	19,7
22	3,3	4,1	5,1	6,3	7,9	9,8	11,9	14,5	20,7
24	3,5	4,3	5,8	6,5	8,2	10,2	12,6	15,4	22,6

Таблица 6

Поправка к разности эффектов снижения уровня звука

Разность между $\Delta L_{экp\alpha_1}$ и $\Delta L_{экp\alpha_2}$, дБА	0	2	4	6	8	10	12	14	16 и более
W , дБА	0,0	0,8	1,5	2,0	2,4	2,6	2,8	2,9	3,0

Таблица 7

Снижение уровня звука экраном $L_{Аэкр}$, дБА

Расстояние между источником шума и экраном, м	Расстояние между экраном и расчетной точкой, м									
	5		10		20		50		100	
	Эффективная высота экрана, м									
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
2	19	29	18	28	18	28	18	27	18	27
5	17	26	16	25	15	24	15	23	15	23
10	16	25	15	23	14	23	13	21	13	21
20	15	24	14	23	13	20	12	18	11	18
50	15	23	13	21	12	19	10	17	10	15
100	15	23	13	21	11	18	10	17	9	14

Таблица 8

Сложение уровней звука

Разность двух складываемых уровней, дБА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
Добавка к более высокому уровню, дБА	3,0	2,5	2,0	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,0

Октавные уровни звукового давления от нескольких источников шума, дБ, определяются как сумма уровней звукового давления, дБ, в выбранной расчетной точке от каждого источника шума:

$$L_{\text{сум}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i},$$

где L_i – октавный уровень мощности, создаваемый i -тым источником шума.

При оценке состояния шумового загрязнения застройки следует учитывать совокупность акустических, санитарно-гигиенических, градостроительных и экономических критериев. Для полноценного представления о шумовой угрозе очень важно учитывать социальные параметры использования территории (численный и демографический состав населения) и, конечно, экономический ущерб от шумового загрязнения.

В случае выявленной необходимости защиты населения от шума должны разрабатываться градостроительные, архитектурно-планировочные, строительно-конструктивные мероприятия, включающие:

- изменение функционального использования территории и объемно-пространственного решения застройки;
- использование подземного пространства для размещения транспортных и других источников интенсивного внешнего шума;
- устройство разрывов между жилой застройкой и источниками шума и объектами защиты шумозащитных экранов-барьеров и озеленения;

- применение шумозащищенных жилых зданий;
- изменение функционального использования зданий или их первых этажей, перепланировку квартир;
- усиление звукоизоляции наружных ограждающих конструкций, оконных проемов существующих жилых и общественных зданий.

1.3. Рекомендации по выполнению архитектурно-акустических расчетов

Рассмотрим примеры расчетов при акустическом проектировании жилой застройки, необходимые в процессе выполнения курсовой работы. Градостроительные условия движения и транспортные характеристики даны в таблице индивидуальных расчетных заданий для каждого студента.

Пример 1.

Выполните расчет для часа «пик» эквивалентного уровня шума от транспортного потока при следующих условиях:

Транспортные характеристики:

1. Интенсивность движения $N = 2000$ ед./ч;
2. Средневзвешенная скорость транспортного потока $\bar{v}_{cp} = 30$ км/ч;
3. Состав транспортного потока ($\rho = 40\%$) – экипажи грузового и общественного транспорта.

Градостроительные условия движения:

1. Категория магистрали – магистральная дорога регулируемого движения.
2. Материал покрытия проезжей части – асфальтобетон.
3. Продольный уклон проезжей части $i = 3\%$.
4. Проезжая часть размещена симметрично относительно оси улицы и имеет максимальное количество полос движения.
5. Тип застройки – двухсторонняя при ширине улицы между линиями застройки 67,75 м и усредненных разрывах между зданиями на линии застройки – 25 м;
6. Коэффициент поглощения K_{II} принять равным 1.

Выполняются ли условия комфортности по уровням шума у фасада здания и в жилых помещениях со стороны магистрали?

Решение. Эквивалентный уровень звука $L_{Aэкв}$ от транспортных потоков на улицах и дорогах определяется для точки, расположенной в 7,5 м от оси ближайшей полосы движения транспортного потока.

Согласно расчетной методике $L_{A_{экв}}$ находится с помощью номограммы по трем транспортным характеристикам: интенсивности, средневзвешенной скорости и составу транспортного потока (учитывается процент общественного и грузового транспорта в нем) – и дополнительно влияющим факторам, характеризующим градостроительные условия движения транспортного потока. Эта величина называется шумовой характеристикой транспортного потока. Расчетная формула имеет вид:

$$L_{A_{экв}} = L_{A_{экв.норм}} + \sum_1^i \Delta L_i,$$

где $L_{A_{экв}}$ – шумовая характеристика транспортного потока на расстоянии 7,5 м от оси ближайшей полосы движения, дБА;

$L_{A_{экв.норм}}$ – эквивалентный уровень шума, определяемый с помощью номограммы (см. рис. 1) по трем транспортным характеристикам средневзвешенной скорости, наличию в потоке грузового и общественного транспорта (%), средневзвешенной интенсивности движения транспортного потока;

$\sum_1^i \Delta L_i$ – сумма поправок на градостроительные условия движения

транспортных потоков (определяется по табл. 1 и 2).

По заданным характеристикам ($N = 2000$ ед./ч; $\rho = 40$ %; $\langle v \rangle = 30$ км/ч) значение $L_{A_{экв.норм}}$ по номограмме составляет 74 дБА.

$\Delta L_{A_{экр.норм}}$ – учитывает уклон проезжей части, 30 %, вносит поправку 1,5 дБА.

ΔL_1 – учитывает материал покрытия проезжей части. Для асфальтобетона при $\langle v \rangle = 30$ км/ч поправка равняется 0.

ΔL_2 – учитывает особенности застройки. При двухсторонней застройке, ширине улицы в линиях застройки, равной 67,75 м, и усредненных разрывах между зданиями на линии застройки 25 м, поправка составляет 0.

Следовательно,

$$L_{A_{экв}} = 74 + 1,5 + 0 + 0 = 75,5 \text{ дБА} \approx 76 \text{ дБА.}$$

Для магистральной дороги регулируемого движения принимаем количество полос движения проезжей части, равное 6.

Ширина одной полосы движения равна 3,75 – 3,50 м, следовательно, ширина проезжей части с учетом ширины предохранительной полосы (0,5 м) между проезжей частью и бордюром:

$$3,75 \cdot 6 + (0,5 \cdot 2) = 23,5 \text{ м.}$$

Ширина улицы в линиях регулирования застройки согласно заданию равна 67,75 м. При условии расположения проезжей части симметрично оси улицы расстояние от бордюра до линии застройки:

$$\frac{67,75 - 23,5}{2} = 22,125 \text{ м.}$$

Ось первой полосы движения находится от бордюра на расстоянии $\frac{3,75}{2} + 0,5 = 2,375$ м. Следовательно, от нее до линии застройки расстояние:

$$22,125 + 2,375 = 24,5 \text{ м.}$$

У фасада здания уровень шума оценивается в двух метрах от наружных стен на высоте 1,5 м от поверхности земли. Согласно рис. 2 для определения снижения уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой, которое в данном случае составляет 22,5 м, эквивалентный уровень шума уменьшится на 6 дБА и составит 70 дБА, что значительно превышает допустимый уровень шума для территории жилой застройки, для которой $L_{A_{дон}}$ равен 55 дБА в дневной период суток. Следовательно, у фасада здания не выполняются условия комфортности по уровню шума.

Для внутренних помещений уровень шума снижается по сравнению с внешним на 10 дБА (при открытых форточке, узкой створке или фрамуге).

Для расчетных условий уровень шума внутренних жилых помещений:

$$70 - 10 = 60 \text{ дБА.}$$

Уровень шума в 60 дБА превышает нормативный уровень шума для жилых помещений.

В таких случаях для снижения уровня шума во внутренних помещениях до нормативного целесообразно применить специальную конструкцию окна.

Пример 2.

Выполняются ли условия комфортности по уровню шума на площадке отдыха в парке, примыкающей к магистральной улице, при следующих условиях:

Транспортные характеристики:

1. Интенсивность движения $N = 1600$ ед./ч.
2. Средневзвешенная скорость движения 20 км/ч.
3. Состав транспортного потока – в потоке движется 30 % грузового и общественного транспорта.

Градостроительные условия движения:

1. Магистральная улица – улица районного значения.
2. Характер покрытия проезжей части – асфальтобетон.
3. Продольный уклон улицы – 2 %.
4. Расстояние от бордюра проезжей части до границы парка – 25 м и от границы парка до площадки – 43 м.
5. Тип застройки – застройка односторонняя, отстоящая от края проезжей части на 25,5 м; усредненные разрывы между зданиями равны 22 м.
6. Коэффициент поглощения $K_n = 1,3$.

Если не выполняются условия по уровню шума на площадках отдыха при данных условиях, следует дать предложения по его снижению.

Решение. Для площадок отдыха комфортными по уровням шума являются уровни, не превышающие допустимую величину 45 дБА.

Соответствует ли уровень шума при указанных в задании условиях нормативному допустимому уровню, можно определить на основании расчета.

По трем характеристикам транспортного потока: средневзвешенной скорости потока $\bar{v}_{cp} = 20$ км/ч, интенсивности транспортного движения $N = 1600$ ед./ч и составу транспортного потока с учетом процентного наличия в потоке грузового и общественного транспорта $\rho = 30$ % определяется эквивалентный уровень шума $L_{экв}$ без учета градостроительных условий движения. Транспортный поток с указанными характеристиками будет создавать шум в 67,5 дБА.

При уклоне 2 % шумность потока возрастает на 1 дБА, при односторонней застройке, отстоящей от линии бордюра на 25,5 м, и усредненных разрывах между зданиями в 22 м шумность транспортного потока не изменится, асфальтобетонное покрытие также не увеличит уровень создаваемого шума (табл. 1 и 2).

Следовательно, эквивалентный уровень шума на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы движения на уровне 1,2 м от поверхности земли $67,5 + 1 = 68,5$ дБА.

От источника шума (ось полосы движения) площадка удалена на расстояние, равное сумме половины ширины полосы движения ($3,5/2$), расстояния от бордюра до границы парка 25 м и от границы парка до площадки 43 м, то есть $1,8 + 25 + 43 = 69,8$ м.

Согласно графику (см. рис. 2) для определения снижения уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой определяем снижение звука на расстоянии 69,8 м, которое составит

14 дБА. С учетом наличия деревьев и кустарников в парке найденную величину увеличиваем на коэффициент поглощения $K_n = 1,3$.

Тогда снижение звука:

$$14 \cdot 1,3 = 18,2 \text{ дБА.}$$

Следовательно, на площадке уровень звука:

$$68,5 - 18,2 = 50,3 \text{ дБА,}$$

что превышает допустимый уровень шума на 5,3 дБА.

Нормативного уровня звука на площадке отдыха можно достичь организацией шумозащитной полосы, которая представляет собой ряд лиственных деревьев (клен остролистный, вяз обыкновенный, липа мелколистная, тополь бальзамический), посаженных в шахматном порядке с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском (клен татарский, жимолость татарская, боярышник сибирский, терн белый) в пространстве между оградой и площадкой отдыха. Это даст снижение звука на 9 дБА.

Пример 3.

Определить, выполняются ли условия комфортности по уровню шума на площадке отдыха, расположенной за зданием при следующих условиях:

Градостроительные условия движения:

1. Примыкающая магистраль – районного значения, она характеризуется эквивалентным уровнем шума, равным 68 дБА.
2. Проезжая часть имеет 4 полосы движения шириной 3,5 м каждая.
3. Площадка отдыха размером 10×10 м находится на расстоянии 20 м с тыльной стороны от здания, на равном расстоянии от его углов.

Экранирующее сооружение:

1. Здание имеет высоту, равную 30 м, ширину 12 м; длину 210 м.
2. Здание находится на расстоянии 20 м от линии бордюра.
3. Поверхность имеет посадки деревьев и кустарников.
4. Коэффициент поглощения $K_n = 1,3$.

Если не выполняются условия комфортности по уровню шума для площадки отдыха, то какими градостроительными мероприятиями можно снизить уровни шума до нормативных значений?

Решение. Комфортными условиями по уровням шума на площадках отдыха в микрорайонах считаются такие, при которых обеспечиваются допустимые уровни звука, установленные санитарными нормами.

Для площадок отдыха в микрорайонах допустимыми считаются уровни звука, равные 45 дБА.

Для определения соответствия уровней шума на рассматриваемой площадке при заданных условиях нормативным значениям необходимо выполнить проверочный расчет.

Для расчетной точки уровень шума будет снижен за счет расстояния между источником шума и расчетной точкой A_1 и за счет экранирования зданием (точка A_2).

Определяется относительное снижение уровня шума в воздушной среде в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой A_1 . За расчетную принимается точка на высоте 1,5 м над геометрическим центром площадки отдыха. Расстояние между источником шума и расчетной точкой будет равно сумме расстояний: половины ширины ближайшей полосы движения проезжей части ($3,5/2$ м); расстояния от бордюра до здания (20 м); ширины здания (12 м), расстояния от здания до границы площадки (20 м), и от границы площадки до расчетной точки ($10/2$ м):

$$\frac{3,5}{2} + 20 + 12 + 20 + \frac{10}{2} = 58,75 \text{ м.}$$

Согласно рис. 2 уровень звука на расстоянии 58,75 м от источника шума снижается приблизительно на 12 дБА. На поверхности земли с кустарником и деревьями эффект снижения будет больше за счет поглощения, так как расчетная точка расположена на расстоянии, не превышающем 5 м от поверхности земли, и не далее 100 м.

Коэффициент поглощения $K_{П}$ имеет значение 1,4 – 1,2, поэтому для расчета берем среднюю величину, равную 1,3. Общий эффект снижения, таким образом:

$$A_1 = 12 \cdot 1,3 = 15,6 \text{ дБА.}$$

Для определения относительного снижения шума за счет экранирования зданием (A_2) вычерчивается расчетная схема взаиморасположения источника шума и расчетной точки (рис. 6).

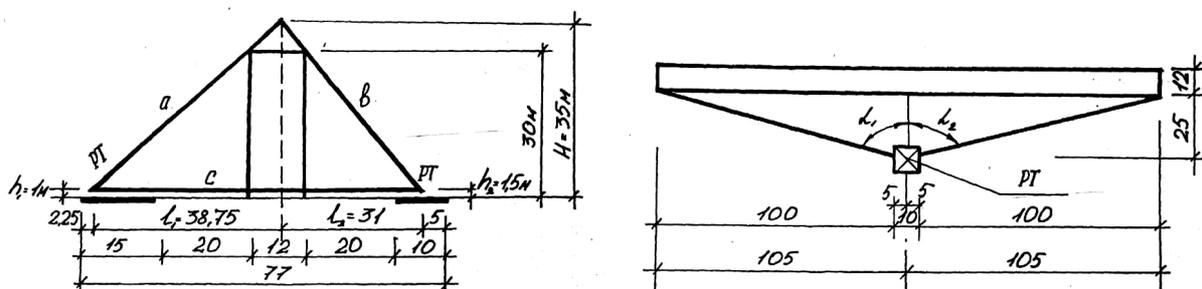


Рис 6

Источник шума для определения эффекта снижения шума за счет его экранирования считается расположенным на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы движения, на высоте 1 м от поверхности проезжей части. Для

определения эффективности снижения шума экранирующим зданием определяется разность длины пути прохождения звука из точки источника шума (ИШ) до расчетной точки (РТ) по прямой c (без наличия здания) и по $a + b$ (при наличии здания) графическим методом (измеряется) или расчетным путем при помощи формул

$$a = \sqrt{38,75^2 + (35 - 1)^2} = \sqrt{1501,56 + 1156} = 51,56 \text{ м};$$

$$b = \sqrt{31^2 + (35 - 1,5)^2} = \sqrt{961 + 1122,25} = 45,67 \text{ м};$$

$$c = \sqrt{(38,75 + 31)^2 + (1,5 - 1)^2} = \sqrt{69,51 + 0,25} = 69,76 \text{ м};$$

$$d = (a + b) - c = 97,20 - 69,76 = 27,44 \text{ м}.$$

По найденной величине 27,44 м находится относительное снижение уровня звука экраном A_2 по графику. $A_2 = 23$ дБА.

Однако это значение будет соответствовать экрану бесконечной длины. Для учета снижения шума зданием конечной длины вводим поправки на проникновение шума в расчетную точку из-за углов здания. Для этого на схеме, изображающей здание в плане, соединяется расчетная точка с угловыми точками экрана и определяются углы α_1 и α_2 . В рассматриваемом случае эти углы равны.

Величину угла можно найти графическим методом при помощи транспортира или через тригонометрические функции.

Так, в рассматриваемом случае:

$$\operatorname{tg} \alpha = 105 / 25 = 4,2$$

По величине $\operatorname{tg} \alpha$ находим угол α через функцию $\operatorname{arctg} \alpha$.

При значении $\operatorname{tg} \alpha = 4,2$ $\alpha = 76,6^\circ$. В зависимости от найденной величины $A_2 = 23$ дБА и величины угла $76,6^\circ$ находятся поправки $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_1$, и $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_2$ (табл. 5), которые оставляют $\approx 12,6$ дБА.

Так как $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_1$ и $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_2$ равны, разность между их величинами равна 0, то поправка W (табл. 6) равна 0.

Следовательно, здание даст дополнительное снижение уровня звука на величину 12,6 дБА.

Суммарная величина снижения шума

$$A_1 + A_2 = 15,6 + 12,6 = 28,2 \text{ дБА}.$$

Таким образом, в расчетной точке на площадке отдыха уровень шума от автотранспорта $68 - 28,2 = 39,8$ дБА, что ниже нормируемой величины на 5,2 дБА, то есть условие комфортности по уровню шума в заданных условиях выполняется и не требуется дополнительных градостроительных мероприятий по шумозащите.

Приложение

Коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов и конструкций

Материалы и конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	2	3	4	5	6	7
Обычные материалы и конструкции						
1. Кирпичная кладка без расшивки швов	0,15	0,19	0,29	0,28	0,38	0,46
2. То же, с расшивкой швов	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
3. Стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
4. То же, окрашенные масляной краской	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
5. Штукатурка по металлической сетке с воздушной полостью позади	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
6. Бетон с железнением поверхности	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
7. Мрамор, гранит и другие каменные породы шлифованные	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
8. Травертин	0,02	0,03	0,03	0,03	0,035	0,04
9. Метлахская плитка	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
10. Панель деревянная толщиной 5 – 10 мм с воздушной прослойкой 50 – 150 мм	0,3	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
11. Плиты древесно-стружечные неокрашенные толщиной 20 мм с воздушной прослойкой 50 – 150 мм	0,1	0,08	0,05	0,05	0,08	0,1
12. Плиты твердые древесно-волоконистые толщиной 4 мм, плотностью 1000 кг/м ³ , с воздушной прослойкой 50 – 150 мм	0,3	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
13. Штукатурка гипсовая сухая толщиной 10 мм с воздушной прослойкой 50 – 150 мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
14. Переплеты оконные застекленные	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
15. Светопрозрачные ограждения из стеклоблоков	0,01	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06
16. Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
17. Пол дощатый на лагах	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,09
18. Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
19. Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
20. То же, на войлочной подкладке толщиной 3 мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,3
21. Портьеры хлопчатобумажные на подкладке со складками, поверхностная плотность ткани 0,5 кг/м ²	0,05	0,3	0,45	0,7	0,65	0,5
22. Портьеры плюшевые со складками, поверхностная плотность ткани 0,65 кг/м ²	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
23. Фибролит толщиной 50 мм с воздушной прослойкой 50 – 100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
24. Вентиляционные решетки	0,3	0,42	0,5	0,5	0,5	0,51
25. Вода в ванне бассейна	0,01	0,01	0,013	0,015	0,02	0,025
26. Проем сцены, оборудованной декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
27. Киноэкран	0,3	–	0,4	–	0,4	–

1	2	3	4	5	6	7
Покрытия полов спортивных залов						
28. «Тарафлекс. Спорт М»	0,02	0,03	0,03	0,08	0,06	0,03
29. Искусственная трава фирмы «Полиграс»	0,07	0,07	0,075	0,1	0,39	0,52
30. «Астротурф»	0,1	0,15	0,3	0,5	0,7	0,5
31. «Пуластик»	0,05	0,12	0,2	0,2	0,15	0,1
32. «Спортан» пористый	0,05	0,06	0,07	0,1	0,3	0,5
33. «Спортан»	0,04	0,05	0,08	0,18	0,2	0,3
34. «Риздор»	0,02	0,03	0,04	0,18	0,25	0,17
35. «Тарган»	0,02	0,03	0,06	0,1	0,18	0,17
Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции						
36. плиты гипсовые перфорированные с пористым наполнителем, размер 810×810×26 мм:						
без воздушной прослойки	0,05	0,2	0,45	0,75	0,55	0,35
с воздушной прослойкой, мм:						
50	0,05	0,4	0,75	0,55	0,55	0,3
100	0,15	0,6	0,75	0,55	0,5	0,3
200	0,25	0,65	0,65	0,6	0,55	0,3
37. Плиты пористые акустические «Акмигран», размер 300×300×20 мм:						
без воздушной прослойки	0,05	0,15	0,5	0,65	0,65	0,7
с воздушной прослойкой, мм:						
50	0,15	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
100	0,25	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
200	0,35	0,6	0,6	0,65	0,7	0,75
38. Плиты «Силакпор»:						
без воздушной прослойки	0,2	0,5	0,65	0,6	0,6	0,6
с воздушной прослойкой, 100 мм:	0,5	0,7	0,6	0,55	0,55	0,6
39. Минские плиты А-1:						
без воздушной прослойки	0,1	0,3	0,6	0,7	0,8	0,8
с воздушной прослойкой, 200 мм:	0,4	0,65	0,65	0,7	0,75	0,75
40. Плиты «Москва»:						
без воздушной прослойки	0,1	0,25	0,8	0,6	0,5	0,35
с воздушной прослойкой, 100 мм:	0,2	0,6	0,6	0,5	0,35	0,3
41. Плиты «Мелодия»:						
без воздушной прослойки	0,15	0,25	0,8	0,4	0,2	0,2
с воздушной прослойкой, 100 мм:	0,25	0,5	0,6	0,45	0,3	0,3
42. Фибролит толщиной около 50 мм с воздушной прослойкой 50-100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
43. Слой пористого звукопоглотителя толщиной не менее 100 мм, покрытый стеклотканью или мешковиной и деревянными рейками шириной 20-25 мм, толщиной 10-12 мм и расстоянием между ними 15-20 мм	0,4	0,7	0,8	0,8	0,75	0,65
44. То же, вместо реек гипсовые перфорированные плиты размером 400×400×10 и 500×500×10 мм, с отверстиями диаметром 10 мм и шагом 24 мм	0,4	0,7	0,75	0,6	0,45	0,3

Курсовая работа 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ

При написании курсовой работы рекомендуется использование следующих источников [1, 15, 16, 20, 21].

Целью курсовой работы «Акустика зрительного зала» является углубление знания по архитектурной акустике, изучение методов расчета акустических характеристик помещений многоцелевого назначения с естественной акустикой.

Проектирование специальных помещений, обладающих высокими акустическими качествами, например, зрительных залов, выполняется, как правило, группой архитекторов и инженеров-акустиков, ибо акустика помещения неразрывно связана с его архитектурой. Размеры зала, форма, отделка поверхностей – элементы, в равной мере влияющие на архитектурный вид и акустические свойства. Очевидно, что только в результате совместной работы архитектора с акустиком можно качественно решать сложные задачи, связанные с сооружением современных залов. Вместе с тем сознательный подход к принципиальным требованиям архитектурной акустики и умение хотя бы ориентировочно рассчитать основные акустические характеристики зала могут значительно помочь автору проекта.

Задачи курсовой работы:

1. Анализ звукового поля в зале и выбор формы и размера зала.
2. Расчет коэффициента разборчивости речи и необходимого количества звуковой энергии.
3. Расчет оптимальной и стандартной реверберации.
4. Расчет дополнительного звукопоглощения зала и подбор материалов.
5. Расположение звукопоглощающих материалов на акустических поверхностях.

2.1. Основные характеристики и методы расчета звукового поля

Область акустики, изучающая качество звукового поля в помещении и способы его регулирования, называется *архитектурной акустикой*. К настоящему времени достаточно глубоко изучены процессы распространения звука в помещении и разработаны теоретические основы акустических расчетов и методов, которые адаптированы к практической работе архи-

текторов. Так, опыт проектирования показал, что геометрическая форма зала должна отвечать следующим требованиям:

1. Первично отраженная звуковая энергия, приходящая к зрителю, не должна создавать фокуса. (Фокусировка звука – концентрация в одной точке первично отраженной звуковой энергии).

2. Первично отраженная звуковая энергия, приходящая к зрителю, не должна создавать эхо.

3. Каждый зритель в зале должен быть обеспечен звуковой энергией не менее чем двумя первично отраженными лучами. Звуковое поле должно уплотняться по мере удаления от сцены и не должно иметь звуковых пустот – теней. (Звуковая пустота – место в зале, куда не поступают первично отраженные звуки.)

Студенту можно запомнить эти требования как *правило трех «нет»* – нет фокуса, нет эха, нет тени.

Существующие методы расчета параметров звукового поля основаны на волновой, геометрической и статистической акустике.

Теория волновой акустики рассматривает два режима колебаний воздушного объема: один – как собственные затухающие, другой – как вынужденные под действием какого-либо источника. В области низких частот собственные частоты колебаний отделены друг от друга сравнительно большими интервалами, то есть имеют дискретную структуру. В области высоких частот спектр уплотняется и число собственных колебаний быстро увеличивается. Чем меньше размеры помещения, тем в большем диапазоне частот будут наблюдаться резонансные явления и увеличиваться неравномерность звукового поля.

В геометрической акустике при рассмотрении отражения звуковых волн от поверхностей помещения используют понятия *фронт волны* и *звуковые лучи* (линии, перпендикулярные фронту волны во всех его точках), которые указывают направление распространения звуковой волны. Так на рис. 1 показана схема отражения и прохождения звука (1 – падающий звук; 2 – отраженный звук; 3 – звук, прошедший через преграду).

Действие отраженных от внутренних поверхностей звуковых лучей часто заменяется действием *мнимых* (или *фиктивных*) источников с соответствующим уменьшением их мощности, пропорциональным коэффициенту поглощения данной поверхности (рис. 2).

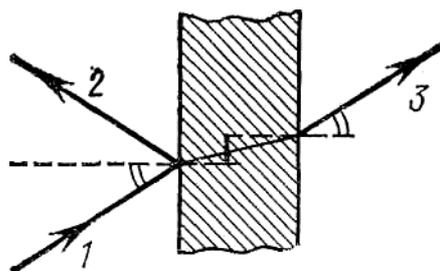


Рис. 1

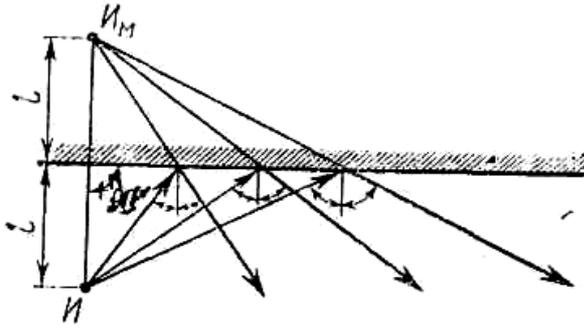


Рис. 2. Схема отраженных звуковых лучей:
И – источник звука; I_m – мнимый источник звука

Мнимый источник звука (I_m) расположен на перпендикуляре к поверхности и на таком же расстоянии от нее, что и действительный источник звука. Угол падения равен углу отражения.

Путь звукового луча, многократно отраженного от стен помещения, может быть представлен в развернутом изображении в нескольких проекциях.

Зная скорость распространения звука, можно определить опаздывание одного звукового луча по отношению к другому, выявить различные акустические дефекты помещений. Такое построение распространения звуковых лучей называется *лучевым эскизом*.

Допустимость применения геометрической акустики зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. Отражение звуковых волн можно считать направленным, если наименьший размер отражающей поверхности не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны.

Для криволинейных поверхностей наименьший радиус кривизны должен быть не менее чем в два раза больше длины волны.

Законы отражения и преломления звука аналогичны законам геометрической оптики.

В помещениях различают *прямой звук*, идущий непосредственно от источника, и *отраженный* от поверхностей. Вследствие многократных отражений звуковых волн и суммирования энергии прямых и отраженных волн в помещении устанавливается звуковое поле с определенными уровнями звукового давления. Энергия проходит также через преграду

Количественно поглощенная, отраженная и прошедшая через преграду части звуковой энергии определяются коэффициентами α , β и τ . Отношение поглощенной и прошедшей звуковой энергии к падающей называется коэффициентом звукопоглощения α :

$$\alpha = (E_{над} - E_{отр}) / E_{над}$$

где $E_{над}$ и $E_{отр}$ – энергия падающих и отраженных звуковых волн.

Коэффициент α можно записать и так:

$$\alpha = (E_{погл} + E_{пр}) / E_{над}$$

где $E_{погл}$ и $E_{пр}$ – энергия, поглощаемая материалом преграды, и энергия, прошедшая через преграду.

Отношение энергии отраженного звука $E_{отр}$ к $E_{над}$ представляет собой коэффициент отражения β :

$$\beta = E_{отр} / E_{над}$$

В расчетах удобно пользоваться соотношением $\alpha + \beta = 1$ и $\alpha = 1 - \beta$.

Отношение энергии прошедшего через преграду звука $E_{пр}$ к $E_{над}$ называется коэффициентом звукопередачи (звукопроницаемости) τ :

$$\tau = E_{пр} / E_{над}$$

Коэффициент звукопоглощения зависит от материала конструкции, частоты звуковых волн и от угла их падения на поверхность.

Обычные строительные материалы имеют невысокие значения α . Например, на частоте 500 Гц значение α для бетона составляет 0,01 (то есть только 1 % звуковой энергии поглощается, а остальные 99 % отражаются в помещение), оштукатуренной стены – 0,02, линолеума – 0,03, паркетного пола – 0,07. Специальные звукопоглощающие материалы (звукопоглотители) имеют коэффициенты звукопоглощения в 10 – 15 раз больше.

Звукопоглощение современных материалов и конструкций, необходимое при выполнении курсовой работы, приведено в приложении.

Суммарное звукопоглощение в помещении ($A_{общ}$) определяется как сумма произведений коэффициентов звукопоглощения отдельных поверхностей на их площади. Кроме того, учитывается звукопоглощение (A) отдельными объектами (людьми, предметами обстановки и пр.), то есть:

$$A_{общ} = \sum \alpha_i S_i + \sum A$$

Произведение αS представляет собой звукопоглощение данной поверхности. Величина $A = \alpha S$ называется эквивалентной площадью звукопоглощения этой поверхности. Эквивалентная площадь звукопоглощения есть площадь поверхности, полностью поглощающей звук; например, при $S = 1 \text{ м}^2$ и $\alpha = 1,0$ $A = \alpha S = 1 \text{ м}^2$ или при $S = 5 \text{ м}^2$ и $\alpha = 0,2$ A тоже равно 1 м^2 .

Для учета звукопоглощения принимается величина *среднего коэффициента звукопоглощения*:

$$\langle \alpha \rangle = A_{общ} / S_{общ},$$

где $S_{общ}$ – суммарная площадь ограждающих поверхностей.

Рассмотрим особенности распространения и поглощения звука в помещении в рамках статической теории.

Статистическая теория акустики основана на предположении, что в помещении под действием источника звука возникает звуковое поле, близкое к диффузному, характеризуемое тем, что во всех точках поля усредненные по во времени уровни звукового давления и поток проходящий по любому направлению звуковой энергии постоянны. При рассмотрении

распространения звуковых волн не учитываются интерференционные явления, и поэтому оценку звукового поля проводят методом энергетического суммирования.

Статистическая теория рассматривает также среднюю длину пути между отражениями, то есть величину среднего пробега звуковой волны, зависящую от объема помещения V . Если за время t в точку помещения приходит n отражений, а интервал времени между двумя последующими отражениями в среднем равен t_1 то число отражений $n = t / t_1$.

Средняя длина пути звуковой волны l_{cp} зависит от размеров и формы помещения, однако для практических целей может быть вычислена по формуле:

$$\langle l \rangle = 4V / S_{общ}$$

где V – объем помещения, м³ ;

S – суммарная площадь отражающей поверхности, м².

Величина суммарного звукопоглощения определяется по формуле:

$$A_{общ} = \frac{1}{4} \epsilon c \alpha_{cp} S_{общ}.$$

Время, в течение которого происходит затухание звука, называется *временем реверберации*. Этот процесс происходит вследствие многократных отражений звуковых волн от ограждающих поверхностей. Время реверберации является одним из важнейших критериев оценки акустических качеств залов. Существенным является также и то, что физическое содержание этого критерия хорошо связано с субъективным ощущением. Немаловажное значение имеет и легкость экспериментального и аналитического определения времени реверберации в уже построенных или проектируемых залах.

В качестве эталона принято время затухания плотности звуковой энергии в 10^6 раз (или уменьшение уровня звукового давления на 60 дБ); это время называется *временем стандартной реверберации* (обычно заменяется термином «время реверберации»).

$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha_{cp} S_{общ}} = 0,161 \frac{V}{A_{общ}}$$

С учетом данных экспериментальных исследований принято:

$$T = 0,163 \frac{V}{A_{общ}},$$

то есть время реверберации зависит только от объема помещения и эквивалентной площади звукопоглощения в нем.

Как видно, плотность звуковой энергии отложена в логарифмическом масштабе (то есть уровень в дБ); при этом получается картина, характеризующая слуховое восприятие нестационарных процессов в помещениях. Процесс нарастания уровня происходит очень быстро и поэтому не играет той большой роли в оценке акустических качеств помещений, которую оказывает процесс затухания звука. Статистический подход к оценке звуковых полей имеет большое значение при решении практических задач борьбы с шумом (рис. 3).

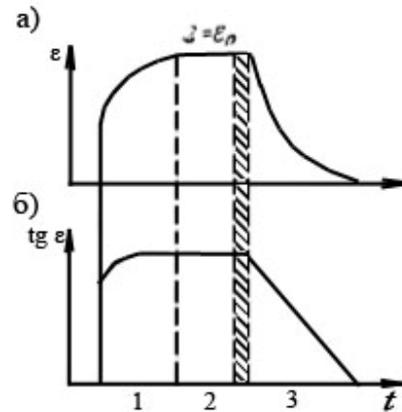


Рис. 3. Кривая нарастания и затухания плотности звуковой энергии в помещении а – в линейном масштабе; б – в логарифмическом масштабе; (1 – зона нарастания звука; 2 – зона стационарного режима; 3 – зона затухания звука)

Штрихами выделен короткий интервал времени после выключения источника звука. Энергию этого начального участка называют полезной, так как она определяет качество звучания речи и музыки и способствует повышению разборчивости. Звуковая энергия зоны затухания звука определяет гулкость помещения, но вместе с тем приводит к понижению разборчивости, поэтому ее называют вредной.

Учтем, что $I = 4W / A_{общ}$ и уровень интенсивности равен:

$$L_I = 10 \lg I / I_0,$$

следовательно:

$$L_I = L_W - 10 \lg A_{общ} + 6.$$

При стандартных атмосферных условиях уровень звукового давления L равен уровню интенсивности звука, поэтому

$$L = L_{P_u} - 10 \lg A_{общ} + 6$$

Эти соотношения справедливы для диффузного звукового поля. Обычно в помещениях можно выделить плотность энергии прямого ϵ_{np} и отраженного от всех поверхностей $\epsilon_{отр}$ звука. Тогда общая плотность звуковой энергии в помещении будет равна

$$\epsilon = \epsilon_{np} + \epsilon_{отр}.$$

Плотность звуковой энергии прямого звука при сферическом фронте звуковой волны на расстоянии r от точечного источника равна:

$$\epsilon_{np} = P / 4\pi r^2 c.$$

Плотность диффузной звуковой энергии после учета потерь энергии при первом отражении звука от поверхностей:

$$\varepsilon_{отр} = \frac{4P}{cS_{общ}} \left(\frac{1 - \alpha_{ср}}{\alpha_{ср}} \right) = \frac{4P(1 - \alpha_{ср})}{cA_{общ}}$$

Общая плотность звуковой энергии:

$$\varepsilon = \frac{P}{4\pi r^2 c} + \frac{4P(1 - \alpha_{ср})}{cA_{общ}} = \frac{P}{4\pi r^2 c} + \frac{4P}{cB},$$

где $B = A_{общ} / (1 - \alpha_{ср})$ – постоянная помещения.

В соответствии с последней формулой уровень звукового давления уменьшается на 6 дБ при увеличении расстояния до источника звука r в два раза. Зона отраженного звука определяется величиной *предельного радиуса* $r_{пр}$, то есть расстоянием от источника, на котором уровни звукового давления отраженного и прямого звука равны (м):

$$r_{пр} \cong \sqrt{A_{общ} / 50(1 - \alpha_{ср})} \cong \sqrt{B / 50}.$$

Статистическая акустика определяет уровень звукового давления L в зоне действия прямого и отраженного звука по формуле:

$$L = L_w + 10 \lg \left(\Phi / \Omega r^2 + 4 / B \right),$$

где Φ – фактор направленности излучения, безразмерная величина, равная отношению интенсивности звука I , создаваемого источником в данной точке звукового поля, к интенсивности $I_{эф}$, которую имел бы источник с такой же мощностью, но равномерно излучающий звук во всех направлениях (то есть сферу);

Ω – телесный угол, в котором излучается звуковой поток.

Обобщая изложенное, можно сделать следующие выводы. Волновая теория акустики позволяет получить точные решения. Однако сложность математического аппарата и большие затраты времени на расчеты ограничивают ее применение диапазоном низких частот, тем более что в этом диапазоне другие методы неприменимы.

Геометрическая акустика дает не только наглядное представление о характере распространения звука, но и позволяет количественно рассчитать положение звукопоглотителей, оценить влияние размеров и формы помещения на эффективность мер борьбы с шумом и др.

Статистическая акустика позволяет достаточно точно решать задачи для помещений с малым звукопоглощением и для диапазона высоких час-

тот. Для помещений, в которых длина, ширина и высота изменяются в широких пределах (например, в производственных зданиях), а также имеющих неравномерное расположение звукопоглотителей, распространение звука не отвечает законам статистической акустики. Однако с учетом различных эмпирических поправок статистическая акустика позволяет наиболее просто решать практические задачи.

2.2. Рекомендации по выполнению архитектурно-акустических расчетов

Рассмотрим примеры расчетов при архитектурном проектировании залов, необходимые при выполнении курсовой работы. Архитектурно-строительные параметры зала даны в таблице индивидуальных расчетных заданий для каждого студента.

Пример 1.

Вычислить размеры зала кинотеатра вместимостью $N = 600$ мест при удельном объеме на каждого зрителя $V_{y\partial} = 6 \text{ м}^3/\text{чел.}$

Расчет размеров зала:

$$V = V_{y\partial} N = 6 \cdot 600 = 3600 \text{ м}^3$$

Дл : Ш : В = $8x : 5x : 3x$, где x – модуль золотого сечения

$$x = \frac{\sqrt[3]{NV_{y\partial}}}{4,94} = \frac{\sqrt[3]{3600}}{4,94} = 3,1025.$$

$$\text{Дл : Ш : В} = 8 \cdot 3,1025 : 5 \cdot 3,1025 : 3 \cdot 3,1025 = 24,9 : 15,6 : 9,307$$

В результате определен размер зала $V = 3612 \text{ м}^3$.

Пример 2.

Определить время реверберации для пустого зала размером $33 \times 22 \times 11,5 \text{ м}$. Объем зала $V = 8349 \text{ м}^3$, $S_{\text{общ}} = 2717 \text{ м}^2$, площади отдельных поверхностей и их коэффициенты звукопоглощения даны в табл. 1.

Таблица 1

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Поверхности, материалы	$S, \text{ м}^2$	Значения α и $\alpha S, \text{ м}^2$, на частотах,					
		125 Гц		500 Гц		2000 Гц	
		α	αS	α	αS	α	αS
Потолок, сухая штукатурка	726	0,02	14,5 29	0,06	43,6	0,05	36,3
Пол, паркет	726	0,04		0,07	50,8	0,07	50,8
Стены, сухая штукатурка	1265	0,02	25,3	0,06	75,9	0,05	63,3

Добавочное звукопоглощение на частоте 125 Гц равно $217,4 \text{ м}^2$ ($0,08 \times 2717 \text{ м}^2$), а на частотах 500 и 2000 Гц – $108,7 \text{ м}^2$ ($0,04 \times 2717 \text{ м}^2$). Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна (табл. 9) на частотах:

- 125 Гц: $A_{\text{общ}} = 14,5 + 29 + 25,3 + 217,4 = 286 \text{ м}^2$;
- 500 Гц: $A_{\text{общ}} = 279 \text{ м}^2$;
- 2000 Гц: $A_{\text{общ}} = 259 \text{ м}^2$.

Средний коэффициент звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}} / S_{\text{общ}}$ на частотах:

- 125 Гц: $\alpha_{\text{ср}} = 286 / 2717 = 0,105$;
- 500 Гц: $\alpha_{\text{ср}} = 279 / 2717 = 0,1$;
- 2000 Гц: $\alpha_{\text{ср}} = 259 / 2717 = 0,095$.

Так как $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$, то время реверберации определяем по формуле $T = 0,163 V / A_{\text{общ}}$ на частотах:

- 125 Гц: $T = 0,163 (8349 / 286) = 4,75 \text{ с}$;
- 500 Гц: $T = 0,163 (8349 / 279) = 4,85 \text{ с}$;
- 2000 Гц: $T = 0,163 (8349 / 259) = 5,25 \text{ с}$.

Полученное время реверберации сравнивается с рекомендуемым (оптимальным) временем для данного типа зала и его объема (рис. 4).

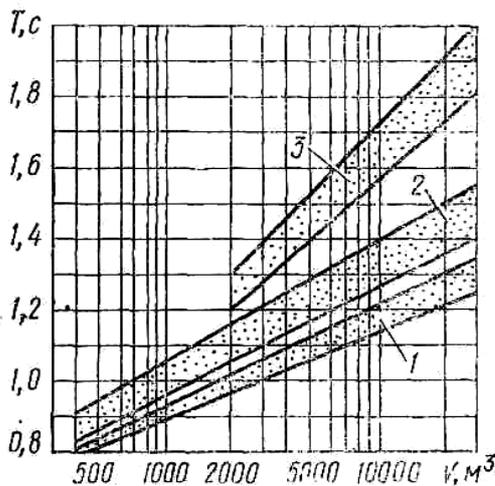


Рис. 4. Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в зависимости от их объема в диапазоне частот 500 – 2000 Гц: 1 – лекционные залы, залы пассажирских помещений вокзалов; 2 – залы драматических театров, залы многоцелевого назначения средней вместимости, кинотеатры; 3 – залы театров оперы и балета, концертные залы реверберации (в пределах $\pm 10\%$)

Это время должно быть в пределах затушеванной области (усредненно по данным различных авторов) в диапазоне частот 500–2000 Гц. На частотах ниже 500 Гц допустимо некоторое увеличение времени реверберации, с тем чтобы на частоте 125 Гц оно было не более чем на 40% больше по сравнению со значением T на частоте 500 Гц. Как правило, расчетное время реверберации получается больше рекомендуемого, поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в зале. Для этого, исходя из требуемого времени реверберации $T_{\text{тр}}$, вычисляем

$$\varphi(\alpha_{\text{ср}}) = \frac{0,163}{T_{\text{тр}} S_{\text{общ}}}$$

Из таблицы в прил. I по найденному значению $\varphi(\alpha_{cp}^{mp})$ находим средний коэффициент звукопоглощения α_{cp}^{mp} после чего получаем требуемую общую эквивалентную площадь звукопоглощения зала $A_{общ}^{mp} = \alpha_{cp}^{mp} S_{общ}$. Сравнив это значение с величиной $A_{общ}$, определяем, насколько необходимо изменить эквивалентную площадь звукопоглощения для достижения нужного времени

Полученные в результате расчета значения времени реверберации округляются с точностью до 0,05 с.

Пример 3.

Требуется определить артикуляцию для большого зала прямоугольной формы при $T = 2$ с и уровне шума около 50 дБ. При $T = 2$ с коэффициент $K_1 = 0,85$; $K_2 = 1$ ($L = 70 - 75$ дБ); $K_3 = 0,8$, $K_4 = 1$.

Вычислим показатель артикуляции ПА по формуле Кнудсена:

$$ПА = 96 K_1 K_2 K_3 K_4,$$

где K_1 – время реверберации;

K_2 – уровень громкости речи;

K_3 – отношение уровня шума к уровню речи;

K_4 – коэффициент учитывающий форму и размер зала.

В данной задаче (отношение уровня шума к уровню речи $\frac{50}{70 \div 75} \cong 0,7$); $K_4 \cong 0,95$.

По формуле Кнудсена показатель артикуляции равен:

$$ПА = 96 K_1 K_2 K_3 K_4,$$

$$ПА = 96 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 62 \text{ \%}.$$

Сравним его с гостированными показателями разборчивости речи (табл. 3).

Таблица 3

ПА, %	Слоговая артикуляция
96 – 85	отличная
85 – 75	хорошая
75 – 65	удовлетворительная
65 – 60	неудовлетворительная
менее 60	разборчивость речи отсутствует

Следовательно, в зале будет неудовлетворительная артикуляция. Для ее улучшения необходимо уменьшить время реверберации и уровень мешающего шума.

Пример 4.

Требуется определить максимально допустимые размеры лекционно-го зала прямоугольной формы при соотношении высоты, ширины и дли-ны 1:2:3. Определить время реверберации и сравнить с рекомендуемым.

Построим распределение первых отражений от потолка зала, приняв высоту 10 м (рис. 5). Результаты анализа сведем в табл. 4.

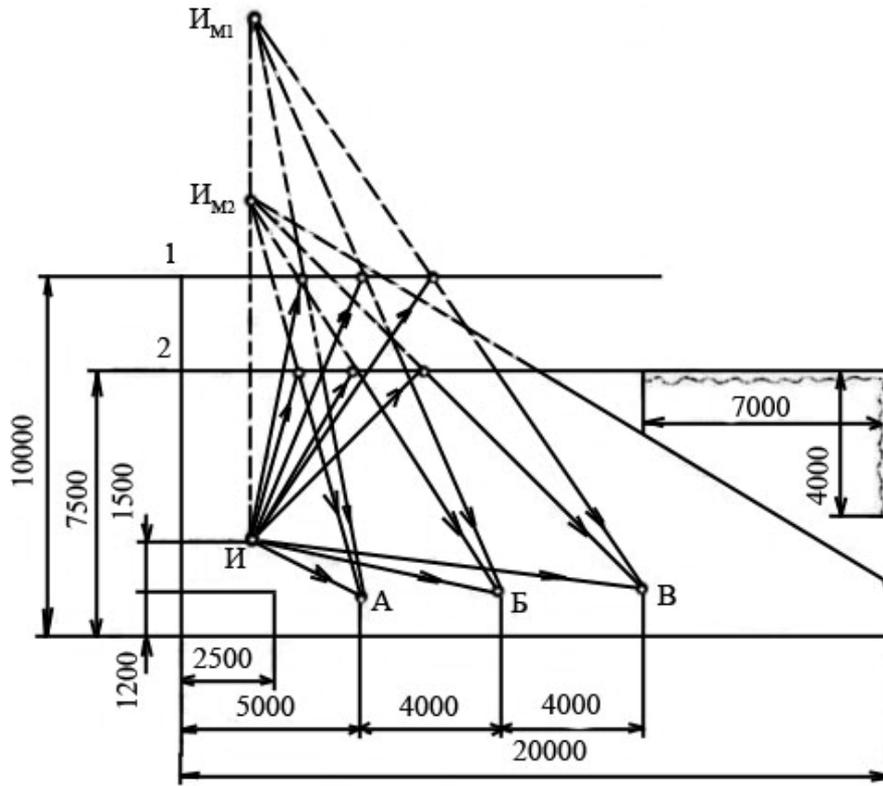


Рис. 5. Распределение первых отражений звука в аудитории

Таблица 4

Запаздывание первых отражений от потолка

Точки	Длина луча до встречи с потолком, м	Длина отраженного луча, м	Длина прямого луча, м	Запаздывание отраженного луча по сравнению с прямым, Δ
<i>При высоте зала 10 м</i>				
<i>A</i>	7,5	9	3,3	16,5 – 3,3 = 13,2
<i>B</i>		9,6	7,2	10,4
<i>B</i>	8 – 8,8	10,6	11	8,4
<i>При высоте зала 7,5 м</i>				
<i>A</i>	5	6,6	3,3	8,3
<i>B</i>	5,7	7,6	7,2	6,1
<i>B</i>	6,8	8,8	11	4,6

При высоте потолка 10 м для точек *A* и *B* запаздывание первых отражений составляет более 10 м, что недопустимо. Поэтому уменьшаем высоту до 7,5 м. Только в этом случае для точки *A* получаем допустимое значение запаздывания. Принимаем высоту потолка 7,5 м, ширину 15 м и длину зала 22,0 м (при соотношении 1:2:3). Удаление слушателя от оратора составляет около 20 м, что является предельно допустимой величиной для лекционных залов.

Аналогично можно оценить характер запаздывания первых отражений от боковых стен. Объем зала $V = 7,5 \times 15 \times 22,0 = 2475 \text{ м}^3$. Необходимое время реверберации на частотах 500 – 2000 Гц должно быть около 1,0 с (см. рис. 4). На частоте 125 Гц рекомендуемое время реверберации может быть допущено до значения 1,4 с ($1,0 \times 1,4$).

Определим фактическое время реверберации в зале, сведя расчеты в табл. 5 и 6. Коэффициенты звукопоглощения и эквивалентная площадь звукопоглощения взяты из прил. 1 и 2.

При удельной площади 1,5 м²/чел., в зале разместится 220 слушателей. При определении звукопоглощения полом взята вся его площадь (а не площадь, свободная от столов, стульев, сидящих людей); большее звукопоглощение компенсируется неучтенным поглощением звука столами. Приняты также несколько меньшие коэффициенты добавочного звукопоглощения.

Таблица 5

Определение эквивалентной площади звукопоглощения поверхностей зала

Поверхности, материалы	Площадь, м ²	Значения α и αS , м ² , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		α	αS	α	αS	α	αS
1	2	3	4	5	6	7	8
Потолок – бетон окрашенный	330	0,01	3,3	0,01	3,3	0,02	6,6
Стены с отметки 2 м – штукатурка по кирпичу	350	0,01	3,5	0,02	7	0,03	7,5
Стены до отметки 2 м – деревянная панель толщиной 5 – 10 мм с воздушным промежутком 50 мм	148	0,25	37	0,06	8,9	0,04	5,9
Пол – паркет по асфальту	300	0,04	12	0,07	21	0,06	18
Деревянная эстрада	45	0,1	4,5	0,1	4,5	0,08	3,6
Остекление	50	0,35	17,5	0,18	9	0,07	3,5
Добавочное звукопоглощение	1200	0,06	72	0,04	48	0,04	48

Таблица 6

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Зрители и кресла	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Зрители на мягком кресле	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40
То же, на жестком кресле	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35
Кресло деревянное жесткое	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Кресло с обивкой сиденья и спинки искусственной кожей	0,08	0,10	0,12	0,10	0,10	0,08
Полумягкое кресло, обитое тканью	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
Мягкое кресло, обитое тканью с пористым наполнителем сиденья и спинки	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна (см. табл. 5 и б) на частотах:

- 125 Гц: $A_{общ} = 3,3 + 3,5 + 37 + 12 + 4,5 + 17,5 + 72 + 30,8 + 13,2 = 194 \text{ м}^2$;
- 500 Гц: $A_{общ} = 168 \text{ м}^2$;
- 2000 Гц: $A_{общ} = 173 \text{ м}^2$.

Определим средний коэффициент звукопоглощения по формуле:

$\alpha_{cp} = A_{общ} / S_{общ}$ на частотах:

- 125 Гц: $\alpha_{cp} = 194 / 1200 = 0,16$;
- 500 Гц: $\alpha_{cp} = 168 / 1200 = 0,14$;
- 2000 Гц: $\alpha_{cp} = 173 / 1200 = 0,14$.

Так как $\alpha_{cp} < 0,2$, время реверберации определяем на частотах:

- 125 Гц: $T = 0,163 V / A_{общ} = 0,163 (2475 / 194) = 2,1 \text{ с}$;
- 500 Гц: $T = 0,163 (2475 / 168) = 2,4 \text{ с}$;
- 2000 Гц: $T = 0,163 (2475 / 173) = 2,35 \text{ с}$.

Фактическое время реверберации выше рекомендуемого, поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в зале.

Зная T_{mp} , определяем $\varphi(\alpha_{cp}^{mp})$ по формуле $\varphi(\alpha_{cp}^{mp}) = \frac{0,163V}{T_{mp}S_{общ}}$, а затем α_{cp}^{mp} .

Для частоты 125 Гц $\varphi(\alpha_{cp}^{mp}) = \frac{0,163 \cdot 2475}{1,40 \cdot 1200} = 0,23$.

Из табл. 2 прил. I по $\varphi(\alpha_{cp}^{mp})$ находим α_{cp}^{mp} , равное 0,25. На частотах 500 и 2000 Гц $\varphi(\alpha_{cp}^{mp}) = \frac{0,163 \cdot 2475}{1,0 \cdot 1200} \cong 0,34$; $\alpha_{cp}^{mp} = 0,29$.

Находим $A_{общ} = \alpha_{cp}^{mp} S_{общ}$:

– на частоте 125 Гц $A_{общ}^{mp} = 0,25 \cdot 1200 = 300 \text{ м}^2$;

– на частотах 500 и 2000 Гц $A_{общ}^{mp} = 0,29 \cdot 1200 = 348 \text{ м}^2$.

Определяем, на сколько требуется изменить общую эквивалентную площадь звукопоглощения ($A_{общ} - A_{общ}^{mp}$) на частотах:

– 125 Гц: $300 - 194 = 106 \text{ м}^2$;

– 500 Гц: $348 - 168 = 180 \text{ м}^2$;

– 2000 Гц: $348 - 173 = 175 \text{ м}^2$.

Если в соответствии с рис. 11 определить рекомендуемые зоны размещения звукопоглотителей, то окажется, что на боковых и задней стенах возможная площадь составит $4 \times 20 \times 2 + 4 \times 7,5 = 190 \text{ м}^2$, а на потолке – $1 \times 20 \times 2 + 2(15 - 2) \times 7 = 131 \text{ м}^2$ (при ширине полос на потолке вдоль стен по 1 м); общая площадь $190 + 131 = 321 \text{ м}^2$.

Если разделить $(A_{общ}^{mp} - A_{общ})$ на данную площадь, получим требуемый коэффициент звукопоглощения облицованной поверхности. На частотах 500 и 2000 Гц он составит около 0,6. Таким образом, для уменьшения времени реверберации требуется большая площадь эффективного звукопоглотителя.

Необходимо отметить, что значительные трудности с уменьшением времени реверберации происходят из-за чрезмерно большого объема залов. В нашем случае удельный объем составляет $2475 / 220 = 11,2 \text{ м}^3/\text{чел}$. Такой объем недопустимо высок для залов, предназначенных для речи. Удельный объем должен быть в пределах $4 - 5 \text{ м}^3$ на одного человека. Поэтому желательно уменьшение высоты зала, что не только сократит время реверберации, но и улучшит распределение ранних отражений по залу.

Итак, при выборе формы зала необходимо, прежде всего, чтобы на все зрительные места пришли ранние, интенсивные отражения. Необходимо, чтобы в течение первых 50 м сек после начала реверберационного процесса пришло, по крайней мере, 2 – 3 отражения, причем первое отражение должно запоздать по сравнению с прямым звуком не более, чем на 15 – 20 м сек, то есть длина пути отраженного звука должна больше прямого не более чем на 5 – 7 м.

Пример 5.

Требуется разработать акустический проект зала драматического театра на 1000 мест.

Схема плана и продольного разреза зала показана на рис. 6. Объем зала (без сцены) $V = 5300 \text{ м}^3$; удельный объем $5,3 \text{ м}^3/\text{чел}$; удельная площадь $0,7 \text{ м}^2/\text{чел}$; длина зала от задней стены до занавеса 28 м ; ширина и высота в центральной части равны $22,0$ и $10,0 \text{ м}$. Общая площадь внутренних поверхностей $S_{\text{общ}} = 2250 \text{ м}^2$.

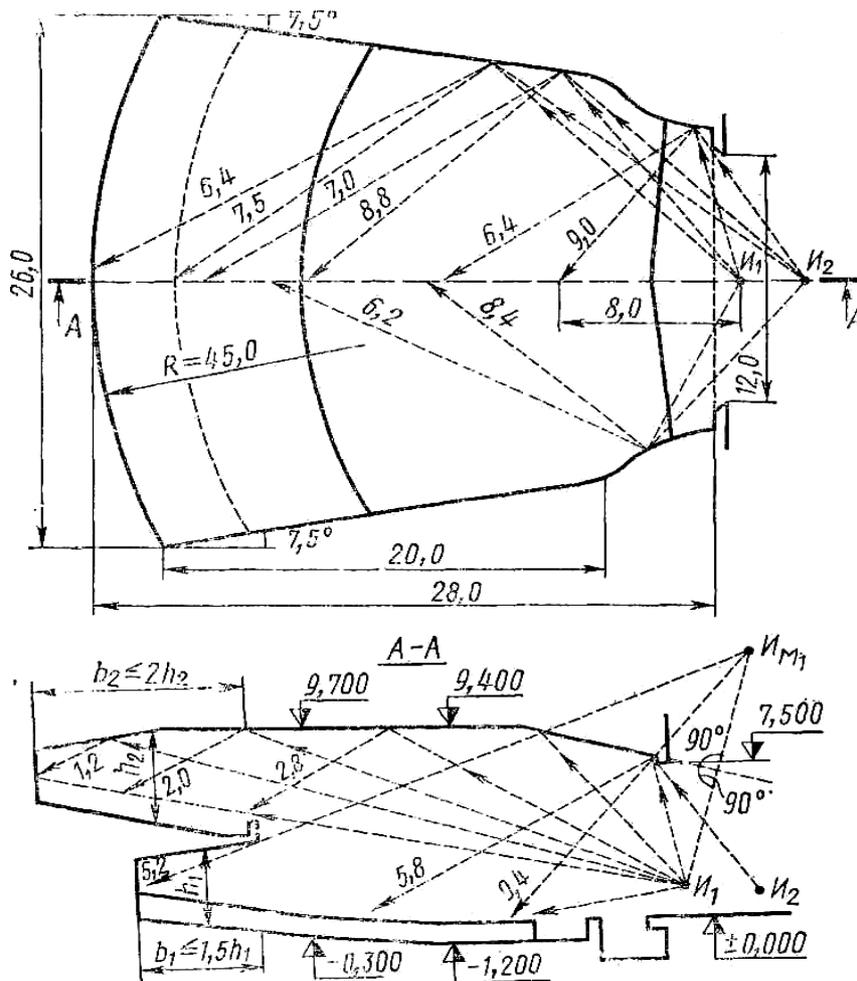


Рис. 6. Зал драматического театра на 1000 мест с построением звуковых отражений (размеры даны в метрах)

Форма зала выбрана исходя из следующих требований:

- обеспечить основные места в партере достаточно интенсивным прямым звуком и малозапаздывающими отражениями. Для театральных залов необходимо, чтобы на расстоянии около 8 м от источника звука на сцене разность хода отраженного и прямого звуков составляла от 7 до 10 м , что соответствует времени $0,02$ и $0,03 \text{ с}$;

- обеспечить предельно высокую диффузность звукового поля.

Пол зала предусматривается с подъемом, обеспечивающим меньшие потери звука за счет экранирования впереди сидящими зрителями. Над порталом участок потолка сделан наклонным для равномерного распределения первых отражений. Для этих же целей ширина начальной части зала сужается до ширины портала. Форма потолка и боковых стен выбрана таким образом, чтобы в переднюю часть зала поступали первые отражения даже при перемещении источника звука из точки I_1 в точку I_2 . Если бы эти поверхности были плоскими, то первые отражения могли бы поступить лишь во вторую половину зала.

На плане и разрезе зала показаны прямые и отраженные звуковые лучи и разница (в метрах) их прихода для нескольких точек. На расстоянии 8 м от источника разница находится в допустимом интервале 9 и 9,4 м. На больших расстояниях от источника звука эта разница уменьшается и составляет в среднем около 6 – 7 м.

На разрезе показан скос потолка над балконом; он необходим для отражения звука к последним рядам мест на балконе. Кроме того, уменьшается опасность неблагоприятного отражения от угла между потолком и задней стеной на авансцену. Для повышения диффузности звукового поля и ослабления возможного порхающего эха боковые стены предусматриваются непараллельными; угол составляет $7,5^\circ$. Предусмотрены также балкон и полукруглая форма задней стены. При большом радиусе кривизны ($R = 45$ м) эта поверхность не будет фокусировать звук в партере. Кроме того, в плоскости задней стены находится балкон с большим количеством зрителей, имеющих значительное звукопоглощение, что приведет к рассеиванию звука, а не его концентрации.

Необходимое время реверберации на частотах 500 – 2000 Гц должно составить 1,25 с (рис. 4). Определим фактическое время реверберации в зале, сведя расчеты эквивалентной площади звукопоглощения в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Поверхности, материалы	Площадь, m^2	Эквивалентная площадь звукопоглощения, m^2 , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		α	αS	α	αS	α	αS
1	2	3	4	5	6	7	8
Потолок (штукатурка по металлической сетке)	600	0,02	12	0,06	36	0,05	30
Стены (штукатурка по кирпичу)	860	0,01	8,6	0,02	17,2	0,03	25,8
Пол, не занятый зрителями (паркет на асфальте)	210	0,04	8,4	0,07	14,7	0,05	12,6

Окончание табл. 9

1	2	3	4	5	6	7	8
Проем сцены	90	0,2	18,0	0,3	27,0	0,3	27,0
Внутренние поверхности оркестровой ямы (дерево)	100	0,1	10	0,1	10	0,1	10
Добавочное звукопоглощение	2250	0,06	135	0,03	67,5	0,03	67,5

Таблица 10

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Зрители, кресла	Число n	Значение A и эквивалентной площади звукопоглощения An , m^2 , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		A	An	A	An	A	An
Сидящие зрители (70 % заполнения)	700 чел.	0,25	175	0,4	280	0,45	315
Свободные кресла (полумягкие с тканевой обивкой)	300 шт.	0,08	24	0,15	45	0,20	60

Для основных ограждающих поверхностей предварительно выбираем штукатурку по кирпичу и сетке; для пола – паркет на асфальте. Зал оборудуется полумягкими креслами с тканевой обивкой. Расчет производим для 70 % заполнения зала зрителями.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна на частотах:

– 125 Гц: $A_{общ} = 12 + 8,6 + 8,4 + 18 + 10 + 135 + 175 + 24 = 391 \text{ м}^3$;

– 500 Гц: $A_{общ} = 498 \text{ м}^2$;

– 2000 Гц: $A_{общ} = 523 \text{ м}^2$.

Определим средний коэффициент звукопоглощения по формуле $\alpha_{ср} = A_{общ}/S_{общ}$ на частотах:

– 125 Гц: $\alpha_{ср} = 391 / 2250 = 0,174$;

– 500 Гц: $\alpha_{ср} = 498 / 2250 = 0,221$;

– 2000 Гц: $\alpha_{ср} = 523 / 2250 = 0,232$.

По табл. 2 находим $\varphi_{ср}(\alpha_{ср})$ на частотах:

– 125 Гц: $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,19$;

– 500 Гц: $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,25$;

– 2000 Гц: $\varphi(\alpha_{ср}) = 0,26$.

Определим время реверберации T на частотах:

$$125 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,19} \cong 2,0 \text{ с}$$

$$500 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,19} \cong 1,55 \text{ с};$$

$$2000 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,26} \cong 1,50 \text{ с}.$$

Время реверберации несколько превышает рекомендуемое, при условии, что на частоте 125 Гц возможно увеличить T_{mp} на 40 %.

На рис. 13 показано возможное размещение звукопоглотителей на стенах и потолке. Примем в качестве звукопоглотителя для стен деревянные панели (5 – 10 мм) с воздушным промежутком около 50 мм. Коэффициенты звукопоглощения на рассчитываемых частотах равны 0,25, 0,06 и 0,04. Площадь панелей на стенах составляет 180 м², часть потолка площадью 80 м² облицовываем акустическими плитами «Акмигран» на отnose. Коэффициенты звукопоглощения этих плит составляют 0,25; 0,75 и 0,80.

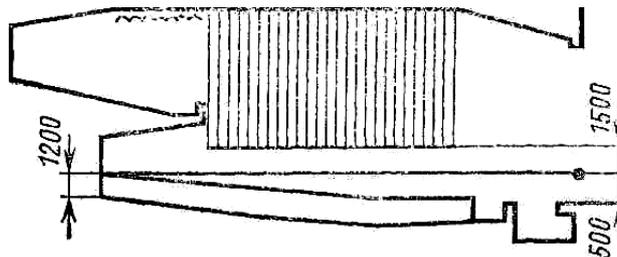


Рис. 13. Размещение звукопоглотителей в зале драматического театра на 1000 мест

Определяем добавляемую эквивалентную площадь звукопоглощения на частотах: 125 Гц (0,25 – 0,01) 180 + (0,25 – 0,02) 80 = 62 м². В скобках показана разность коэффициента звукопоглощения деревянных панелей и плит «Акмигран» и ранее учтенного коэффициента звукопоглощения стен и потолка:

- 500 Гц (0,06 – 0,02) 180 + (0,75 – 0,06) 80 = 62 м²;
- 2000 Гц (0,04 – 0,03) 180 + (0,80 – 0,06) 80 ≅ 66 м².

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения составит на частотах:

- 125 Гц: $A_{общ} = 391 + 62 = 453 \text{ м}^2$;
- 500 Гц: $A_{общ} = 498 + 62 = 560 \text{ м}^2$;
- 2000 Гц: $A_{общ} = 523 + 66 = 589 \text{ м}^2$.

Значения α_{cp} на рассчитываемых частотах равны 0,20; 0,25; 0,26, а $\varphi(\alpha_{cp})$ – 0,22; 0,29; 0,30.

Время реверберации равно на частотах:

$$125 \text{ Гц} - E = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,22} \cong 1,75 \text{ с};$$

$$500 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,29} \cong 1,30 \text{ с};$$

$$2000 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,30} \cong 1,30 \text{ с}.$$

Расчетные значения времени реверберации вполне удовлетворительны, так как отклоняются от рекомендуемых менее чем на 10 %.

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ
по дисциплине «Архитектурная физика»
(V семестр)

1. Цель и задачи архитектурной светотехники. Связь светотехники с задачами архитектуры. Единство проблемы освещения в эстетическом, функциональном, гигиеническом и экономических аспектах.

2. Солнечная радиация и факторы, определяющие ее интенсивность. Учет в архитектурном проектировании воздействий инсоляции и солнечной радиации на микроклимат населенных мест и зданий. Параметры инсоляции помещений: площадь облучения, интенсивность, продолжительность.

3. Учет инсоляции при выборе проектных решений зданий разного назначения. Влияние условий инсоляции на планировочную структуру населенных мест, расположение и ориентацию зданий на участке застройки, их этажность и разрывы между ними.

4. Выбор оптимальной ориентации фасадов здания в зависимости от его назначения. Пластика и конфигурация жилого дома с учетом требований к инсоляции. Влияние формы и размеров окна на инсоляцию помещения.

5. Солнцезащемляющие устройства и их функции. Расчет и проектирование СЗУ.

6. Графический и графо-аналитический способы расчета продолжительности инсоляции. Метод проекции Калотты. Влияние разных видов солнцезащемляющих устройств на количественные и качественные показатели естественного освещения помещения.

7. Объективные и субъективные характеристики освещения. Световые величины (лучистая энергия, видимое излучение, световой поток, сила света, освещенность, яркость, светность, их обозначения и единицы измерения). Световые измерения.

8. Источники искусственного света. Светораспределение от источников света. Основные требования и факторы, определяющие качество искусственного освещения (ослепленность, направленность света, спектральный состав света, пульсация). Способы устранения блескости и дискомфорта.

9. Пространственная освещенность интерьера, ее характеристика и связь с распределением яркости в интерьере. Утилитарное архитектурно-

художественное значение искусственного освещения помещений. Проектирование искусственного освещения зданий различного назначения. Метод расчета искусственного освещения по удельной мощности и коэффициенту использования.

10. Световой климат. Наружная освещенность. Критическая наружная освещенность. Коэффициент естественной освещенности. Законы светотехники: закон проекции телесного угла, закон светотехнического подобия, закон сохранения светового потока.

11. Характеристики естественного освещения: уровень и качество освещения. Особенности зрительной оценки видимого в условиях дневного, сумеречного и ночного освещения.

12. Способы естественного освещения помещений. Светотехнические характеристики и схемы распределения светового потока по характерным разрезам помещений при различных видах освещения.

13. Нормирование естественного освещения. Нормативные требования, предъявляемые к освещению помещений различного назначения. Расчеты естественного освещения помещений: предварительный по методу профессора Н. М. Гусева и проверочный по методу архитектора А. М. Данилюка.

14. Особенности проектирования систем естественного освещения производственных зданий, помещений сложных объемно-планировочных решений. Проектирование естественного освещения помещений гражданских зданий различного назначения, к освещению которых предъявляются специальные требования (помещения зданий мемориальной архитектуры, экспозиционные залы, выставки, классы, аудитории, читальные залы, залы для черчения и рисования, жилые помещения). Совмещенное освещение помещений с недостаточным естественным освещением.

15. Характеристики разных видов листового стекла и стеклоблоков для заполнения светопроемов в ограждениях зданий. Виды и конструктивные особенности заполнения светопроемов.

16. Светопрозрачные изделия из оргстекла и стеклопластиков для ограждений зданий и заполнения светопроемов. Физико-технические свойства оргстекла и стеклопластиков. Примеры конструктивных решений плоских и пространственных ограждений из стеклопластиков в современной архитектуре.

17. Место архитектурной акустики в градостроительстве и проектировании зданий различного назначения. Два основных направления архи-

тектурной акустики (формирование в залах акустической среды, способы борьбы с шумом в градостроительстве и зданиях). Цель и задачи архитектурной акустики.

18. Понятие звука. Распространение звука в твердых, жидких и газообразных средах. Основные характеристики звука, единицы их измерения. Звуковое давление, сила звука. Порог слышимости и порог болевого ощущения.

19. Интерференция, дифракция и рефракция звука. Отражение звука, зеркальное и диффузное эхо. Поглощение звука. Акустический резонанс.

20. Акустические процессы в закрытых помещениях, звуковое поле помещения. Отражение звука от плоских, вогнутых и выпуклых поверхностей и его роль в акустике помещения. Полезные и вредные отражения. Рассеивание отраженного звука путем членения ограждающих поверхностей, виды членений.

21. Реверберация звука в помещении. Процесс реверберации. Оптимальное время реверберации и его расчет. Измерение времени реверберации в помещении. Разборчивости речи. Артикуляция. Способы расчета артикуляции.

22. Требования к звуковому полю помещения. Построение звукового поля помещения методом мнимого источника. Использование геометрических элементов для решения акустических задач, количество звуковой энергии в помещении и ее регулирование.

23. Влияние размеров и формы помещения на его акустические качества. Взаимосвязь требований акустики и видимости. Особенности проектирования залов большой вместимости. Приемы исследования акустических качеств существующих помещений. Акустические недостатки и способы их устранения в существующих помещениях.

24. Звукопоглощающие материалы, их виды и изделия из них, звукопоглощающие конструкции. Звукопоглотители пористые, конструкции с перфорированным слоем, колебательные панели. Поглотители дифракционного типа. Выбор звукопоглощающих материалов и их расположение в зависимости от акустических требований.

25. Особенности распространения звуков в атмосфере. Влияние атмосферных и географических факторов на качество акустики. Особенности открытых театров и предъявляемые к ним акустические требования. Основы проектирования открытых театров с учетом условий акустики открытого пространства. Акустические экраны и раковины, их геометрические формы, конструктивные решения и материалы.

26. Источники шума на территории населенных мест и их характеристики. Эквивалентный уровень шума. Допустимые уровни городского шума. Распространение шума в городской среде и способы борьбы с ним (районирование территории, расположение дорог с учетом рельефа, насыпи, экраны-стенки, применение специальных типов жилых домов, использование новых видов покрытий дорог и др.).

27. Распространение звука через зеленые насаждения. Расчет снижения уровня шума полосой зеленых насаждений различной конструкции и экраном конечных размеров.

28. Вредные воздействия шума на организм человека. Расчетные и допустимые уровни шумов в помещениях разного назначения. Распространение звука в зданиях. Передача звука через ограждения. Зависимость звукоизолирующей способности ограждения от его массы.

29. Метод расчета показателей звукоизолирующей способности ограждающей конструкции от воздушного и ударного шума. Нормативные требования к звукоизоляции ограждений. Нормативные кривые звукоизолирующей способности ограждений от воздушного и ударного шума. Приближенный расчет показателей звукоизолирующей способности этажных перекрытий от воздушного и ударного шума.

30. Способы защиты зданий и помещений от шума: архитектурно-планировочные средства (выбор участка под застройку, рациональная планировка зданий на участке, группировка помещений в здании), архитектурно-конструктивные средства (проектирование конструкций зданий с повышенной звукоизоляцией, звукоизоляция систем вентиляции, трубопроводов и других технических коммуникаций); технологические средства; эксплуатационные средства.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ по 10-бальной системе оценки знаний

Десятибалльная шкала в зависимости от величины балла и оценки включает следующие критерии:

10 баллов – ПРЕВОСХОДНО

– систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;

– точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответов на вопросы;

– безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

– выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;

– полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;

– умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;

– творческая самостоятельная работа на практических лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов – ОТЛИЧНО

– систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;

– точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;

– владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;

– способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы;

– полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;

- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения задания.

8 баллов – ПОЧТИ ОТЛИЧНО

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиции государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов – ОЧЕНЬ ХОРОШО

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически логически правильное изложение ответа, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины,

- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку.
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов – ХОРОШО

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное и логически правильное изложение ответа на вопрос, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов – ПОЧТИ ХОРОШО

- достаточные знания в объеме учебной программы; использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы,
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла – УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО, ЗАЧТЕНО

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы;
- умение делать выводы без существенных ошибок;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку.
- работа под руководством преподавателя на практических лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла – НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО, НЕЗАЧТЕНО

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла – НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл – НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архитектурная физика : учебник для вузов : спец. «Архитектура» / В. К. Лицкевич, Л. И. Макриненко, И. В. Мигалина [и др.]; под ред. Н. В. Оболенского. – М. : Стройиздат, 2003. – 448 с.
2. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Знак, 2006. – 972 с.
3. Павленко Ю. Г. Физика. Полный курс для школьников и поступающих в вузы : учебное пособие / Ю. Г. Павленко. – 2-е изд. испр. – М. : Большая медведица, 2001. – 576 с.
4. Роберт Вихард Поль. Механика, акустика и учение о теплоте (пер. с 16-го немец. изд.) / Роберт Вихард Поль. – М. : Наука, 1971. – 479 с.
5. Яворский, Б. М. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и для самообразования / Б. М. Яворский, Ю. А. Селезнев. – 4-е изд., испр. – М. : Наука. – Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 576 с.
6. Гусев, Н. М. Основы строительной физики: учебник для вузов / Н. М. Гусев. – М. : Стройиздат, 1975. – 440 с.
7. Маркус, Т. А. Здания, климат и энергия: пер. с англ. / Т. А. Маркус, Э. Н. Моррис; под ред. Н. В. Кобышевой, Е. Г. Малявиной. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 543 с.
8. Бахарев, Д. В. Оптическая теория естественного светового поля / Д. В. Бахарев // Светотехника. – 1990. – № 10; 1991. – № 4, 8; 1992. – № 2, 4.
9. Строительные нормы и правила. СНиП II-4-79 «Естественное и искусственное освещение».
10. СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика».
11. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Вып. 14. Ультрафиолетовое излучение / пер. с англ. Н. В. Оболенского. – Женева : изд. ВОЗ, 1984.
12. Каменская, Г. В. Методические рекомендации по проектированию наружного освещения зданий и сооружений / Г. В. Каменская, Л. И. Петрова [и др.] // ЦНИИЭП инженерного оборудования. – М., 1977.
13. Алексеев, С. С. Цветоведение для архитекторов / С. С. Алексеев, Б. М. Теплов, П. А. Шеварев. – М. ; Л. : ГОНТИ, 1938.
14. Рекомендации по учету природно-климатических факторов планировки, застройки и благоустройства городов и групповых систем населенных мест. – М. : ЦНИИП градостроительства, 1980.
15. Качерович, А. Н. Акустика зрительного зала / А. Н. Качерович. – М. : Искусство, 1968. – 207 с.

16. Ковригин, С. Д. Архитектурно-строительная акустика / С. Д. Ковригин, С. П. Крышков. – М. : Высш. шк., 1986. – 255 с.
17. Даньгуб, В. М. Единицы величин : словарь-справочник / В. М. Даньгуб, В. Г. Смирнов. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 240 с.
18. Справочник по защите от шума и вибраций жилых и общественных зданий / под ред. В. И. Заборова. – Киев : Будівельник, 1984. – 158 с.
19. Градостроительные меры борьбы с шумом / Г. Л. Осипов, В. Г. Прутков, И. А. Шишкин, И. Л. Карагодина. – М. : Стройиздат, 1975. – 214 с.
20. Защита от шума в градостроительстве : справочник проектировщика / Г. Л. Осипов, В. Е. Коробков, А. А. Климухин [и др.]; под ред. Г. Л. Осипова. – М. : Стройиздат, 1993. – 96 с.
21. СНиП II-12-77. Глава «Защита от шума». – М. : Стройиздат, 1978. – 49 с.
22. Шум города. Оценка и регулирование шумового режима жилых территорий : учеб. пособие / Н. П. Заборщикова, С. Пестрякова. – М. : Изд-во АСВ; СПб : СПбГАСУ, 2004. – 112 с.
23. СНиП 23.03.2003. Защита от шума. – М. : Стройиздат, 2003.
24. Санитарные нормы СНиП 2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях, жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки / Минздрав РФ. – М., 1996.
25. СНБ 3.01.04.02. Градостроительство. Планировка и застройка населенных пунктов. – Мн., 2003.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
УЧЕБНЫЙ МОДУЛЬ 1. Архитектурная светотехника	6
УЧЕБНЫЙ БЛОК «Световая среда».....	8
Краткое содержание теоретического материала.....	9
1. Свет, зрение и архитектура	9
2. Основные величины, единицы и законы	14
Методические указания к лекционным занятиям.....	21
УЧЕБНЫЙ БЛОК «Инсоляция и светозащита»	22
Введение.....	22
Краткое содержание теоретического материала.....	23
1. Системы естественного освещения помещений.....	24
2. Количественные и качественные характеристики освещения.....	29
3. Инсоляция и солнцезащита.....	34
4. Нормирование и проектирование инсоляций застройки	35
5. Солнцезащита и светорегулирование в городах и зданиях.....	43
Методические указания к лекционным занятиям.....	45
Вопросы к коллоквиуму	46
УЧЕБНЫЙ БЛОК «Световой климат».....	47
Введение.....	47
Краткие основы теоретического материала	48
1. Световой климат	48
2. Источники искусственного света и осветительные приборы	54
3. Нормирование и проектирование искусственного освещения помещений	55
4. Совмещенное освещение помещений.....	62
5. Нормирование и проектирование освещения городов.....	63
6. Моделирование архитектурного освещения.....	66
Методические указания к лекционным занятиям.....	70
ГЛОССАРИЙ. Архитектурная светотехника.....	72
УЧЕБНЫЙ МОДУЛЬ 2. Архитектурная акустика	80
УЧЕБНЫЙ БЛОК «Акустика помещений».....	82
Введение.....	82
Краткое содержание теоретического материала.....	83
1. Основные понятия.....	83
2. Звук и слух	86
3. Основные закономерности распространения звука и шума.....	90
4. Акустические характеристики залов.....	94
5. Общие принципы акустического проектирования залов.....	101
Методические указания к лекционным занятиям.....	108

УЧЕБНЫЙ БЛОК «Шум города».....	109
Введение.....	109
Краткое содержание теоретического материала.....	110
1. Источники шума и их характеристики	110
2. Нормирование шума и звукоизоляция ограждений	113
Методические указания к лекционным занятиям.....	124
ГЛОССАРИЙ. Архитектурная акустика.....	125
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к лабораторному практикуму	131
1. Изучение дисперсионного спектра на двойном монохроматоре	131
2. Основы фотометрии.....	136
3. Изучение поглощения и отражения света	144
4. Изучение акустических стоячих волн.....	157
5. Исследования условий инсоляции городской застройки и зданий	164
6. Экспериментальное определение и проверочный расчет коэффициента естественной освещенности.....	175
7. Измерение силы света и светового потока электрических источников света	203
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к курсовой работе по теме «Шумовой режим застройки»	214
1. Выбор и обоснование метода определения акустических характеристик автотранспортных потоков.....	214
2. Теоретические основы расчета шумового режима застройки.....	216
3. Рекомендации по выполнению архитектурно-акустических расчетов	225
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к курсовой работе по теме «Проектирование залов с естественной акустикой»	234
1. Основные характеристики и методы расчета звукового поля	234
2. Примеры архитектурно-акустических расчетов.....	241
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ по дисциплине «Архитектурная физика» (V семестр).....	252
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ по 10-бальной системе оценки знаний.....	256
ЛИТЕРАТУРА	260

Учебное издание

**АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА
СВЕТОТЕХНИКА И АКУСТИКА**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

для студентов специальности 1-69 01 01 «Архитектура»

Составители:

ОЩЕПКОВА Нонна Владимировна

ВОЙТИК Маргарита Николаевна

КОВАЛЬЧУК Ольга Иосифовна

Редактор *Ю. В. Мацук*

Дизайн обложки *И. С. Васильевой*

Подписано в печать 29.11.07. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 15,31. Уч.-изд. л. 14,38. Тираж 65 экз. Заказ 1859.

Издатель и полиграфическое исполнение –
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29