

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ  
ФГБОУ ВО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра  
электропривода и электротехнологии

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ**

Учебник  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,  
профиль «Электроснабжение»  
очной и заочной форм обучения

КАРАБАЕВО  
Костромская ГСХА  
2015

УДК 628.91:63  
ББК 31.294  
Э 45

*Составитель:* к.т.н., доцент кафедры электропривода и электротехнологии Костромской ГСХА *Н.А. Фалилеев.*

*Рецензент:* д.т.н., профессор кафедры электроснабжения Костромской ГСХА *Н.М. Попов.*

*Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 6 от 6 июля 2015 г.*

Э 45     **Электрическое освещение** : учебник для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / сост. Н.А. Фалилеев. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 210 с.

В данном издании рассмотрены не только конструктивные особенности, но и физические процессы, происходящие в электрических цепях.

Учебник предназначен для студентов для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения.

УДК 628.91:63  
ББК 31.294

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Введение .....</b>	<b>7</b>
1.1. Наука светотехника, предмет ее изучения и связь с другими дисциплинами .....	7
1.2. Задача курса .....	8
1.3. Основные проблемы светотехники.....	8
1.4. Оптическое излучение как технологический фактор сельскохозяйственного производства .....	9
<b>2. Основы оптического излучения .....</b>	<b>14</b>
2.1. Физические основы оптического излучения .....	14
2.2. Спектр излучения .....	16
2.3. Системы эффективных величин и единицы их измерений.....	17
2.4. Приемники оптического излучения.....	20
2.5. Понятие активного и эффективного потоков .....	23
<b>3. Энергетические системы величин и единицы их измерения .....</b>	<b>26</b>
3.1. Общие понятия и определения.....	26
3.2. Воздействие оптического излучения на глаз. Световые величины.....	31
3.3. Воздействие оптического излучения на бактерии .....	34
3.4. Витальные (эритемные) системы величин и единицы их измерения .....	36
3.5. Воздействие оптического излучения на зеленый лист .....	37
<b>4. Методы и схемы измерения оптического излучения.</b>	
<b>Приборы для измерения оптического излучения.....</b>	<b>39</b>
4.1. Тепловые приёмники оптического излучения.....	39
4.2. Термоэлектрические приёмники излучения .....	41
4.3. Фотоэлектрические приёмники.....	43
4.4. Измерение силы света .....	48
4.5. Измерение светового потока .....	49
<b>5. Законы теплового излучения .....</b>	<b>51</b>
5.1. Классификация источников оптического измерения.....	51
5.2. Закон Кирхгофа .....	52
5.3. Закон Планка.....	53
5.4. Закон смещения Вина .....	54
5.5. Закон Стефана-Больцмана .....	54
<b>6. Тепловые источники оптического излучения .....</b>	<b>57</b>
6.1. Основные этапы развития ламп накаливания.....	57
6.2. Устройство ламп накаливания .....	59
6.3. Классификация ламп накаливания .....	61
6.4. Световые и электрические характеристики ламп накаливания.....	64
6.5. Влияние отклонения напряжения сети на основные показатели ламп накаливания .....	66
6.6. Галогенные лампы накаливания .....	66
6.7. Источники ИК-излучения, используемые в сельскохозяйственном производстве .....	69

<b>7. Газоразрядные источники оптического излучения.....</b>	<b>70</b>
7.1. Электрический разряд в газах и парах металлов.....	70
7.2. Условия зажигания и стабилизации дугового разряда.....	75
7.3. Влияние вида балластного сопротивления на работу газоразрядных ламп.....	77
<b>8. Люминесцентная лампа .....</b>	<b>84</b>
8.1. Лампы низкого давления. История развития люминесцентной лампы низкого давления.....	84
8.2. Устройство и принцип действия люминесцентной лампы.....	85
8.3. Влияние внешних факторов на работу люминесцентной лампы.....	88
<b>9. Схемы включения люминесцентной лампы.....</b>	<b>93</b>
9.1. Схемы включения люминесцентной лампы.....	93
9.2. Пускорегулирующие аппараты импульсного зажигания с предварительным подогревом электродов.....	93
9.3. Схема последовательного включения люминесцентных ламп.....	95
9.4. Схема включения люминесцентных ламп с расщепленной фазой.....	96
9.5. Схема быстрого зажигания.....	97
9.6. Схема мгновенного зажигания.....	98
<b>10. Газоразрядные лампы высокого и сверхвысокого давления.....</b>	<b>108</b>
10.1. Газоразрядные лампы высокого давления.....	108
10.2. Схема включения двухэлектродной лампы ДРТ.....	109
10.3. Схема включения четырёхэлектродной лампы ДРТ.....	112
10.4. Лампы ДРЛ.....	113
10.5. Металлогалогенные дуговые лампы.....	115
<b>11. Световые приборы и облучатели .....</b>	<b>124</b>
11.1. Общие сведения.....	124
11.2. Классификация светильников по классу светораспределения и по светораспределению в пространстве.....	125
11.3. Классификация светильников по исполнению защиты от воздействия окружающей среды.....	127
11.4. Классификация светильников по назначению.....	128
<b>12. Расчёт электрических осветительных установок.....</b>	<b>130</b>
12.1. Правила и нормы проектирования осветительных установок.....	130
12.2. Принципы нормирования освещённости.....	132
12.3. Расчёт освещённости от точечного и линейного источника света.....	134
12.4. Расчёт освещённости от линейного источника.....	136
<b>13. Порядок проектирования осветительной установки.....</b>	<b>139</b>
13.1. Последовательность проектирования осветительной установки.....	139
13.2. Выбор вида и системы освещения.....	139
13.3. Выбор нормируемой освещённости и коэффициента запаса.....	141
13.4. Выбор светового прибора.....	142
13.5. Размещение светильников.....	143
13.6. Расчёт мощности осветительной установки.....	146
<b>14. Проектирование и расчёт электрических осветительных сетей .....</b>	<b>153</b>
14.1. Выбор напряжения и источников питания.....	153
14.2. Компоновка осветительных сетей.....	153

14.3. Выбор марки проводов и способов их прокладки.....	153
14.4. Расчёт сечения проводов и кабелей.....	154
14.5. Выбор защитной аппаратуры .....	161
14.6. Разработка схемы управления осветительными установками.....	162
14.7. Выбор щита управления .....	165
<b>15. Облучательные установки в сельскохозяйственном производстве.....</b>	<b>167</b>
15.1. Облучательные установки и их классификация.....	167
15.2. Бактерицидные облучательные установки .....	168
15.3. Источники бактерицидного излучения .....	169
15.4. Применение бактерицидного излучения в сельскохозяйственном производстве.....	169
15.5. Классификация бактерицидных облучательных установок.....	171
15.6. Основы расчёта бактерицидных облучательных установок.....	173
15.7. Порядок расчёта бактерицидных облучательных установок.....	174
15.8. Примеры расчёта бактерицидных облучательных установок .....	175
<b>16. Эритемные облучательные установки.....</b>	<b>179</b>
16.1. Эритемные облучательные установки .....	179
16.2. Источники эритемного излучения .....	180
16.3. Дозирование эритемного облучения .....	180
16.4. Классификация облучательных установок .....	181
16.5. Расчет стационарных эритемных облучательных установок .....	181
16.6. Расчёт подвижных эритемных облучательных установок.....	182
<b>17. Облучательные установки инфракрасного излучения.....</b>	<b>185</b>
17.1. Особенности инфракрасного нагрева.....	185
17.2. Биологическое действие инфракрасного излучения.....	186
17.3. Источники инфракрасного излучения и облучательные установки .....	189
17.4. Особенности включения и работы некоторых облучателей.....	191
17.5. Расчет установки для инфракрасной пастеризации молока.....	194
17.6. Расчет установок инфракрасного обогрева молодняка .....	196
17.7. Расчет инфракрасной установки для сушки, предпосевной обработки и дезинсекции зерна .....	197
<b>18. Облучательные установки для растений .....</b>	<b>199</b>
18.1. Применение облучательных установок в растениеводстве .....	199
18.2. Расчет фотосинтетического потока .....	200
18.3. Классификация облучательных установок .....	202
18.4. Характеристика источников света и облучателей для выращивания растений.....	203
18.5. Методика расчета фитоустановок.....	204
<b>Список литературных источников .....</b>	<b>207</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник «Светотехника» представляет собой первую часть курса «Светотехника и электротехнология» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства». В основу учебника положен курс лекций, читаемый автором в Костромская ГСХА.

Ограниченность лекционного времени не позволяет углубленно усвоить материал в рамках учебного процесса. Существующие учебные пособия, как правило, не рассматривают физические процессы, происходящие в источниках оптического излучения, и не связывают их с предыдущими курсами.

В настоящем учебнике более подробно рассмотрены вопросы, связанные с излучением, схемами включения источников оптического излучения в сеть, применением оптического излучения в сельскохозяйственном производстве.

Значительную долю издания составляют вопросы проектирования электрических осветительных сетей.

Издание предназначено для студентов специальности 110302.65 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», 110800.62 «Агроинженерия» очной и заочной форм обучения.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

- Наука светотехника, предмет её изучения и связь с другими дисциплинами
- Задачи курса
- Основные проблемы светотехники
- Оптическое излучение как технологический фактор с.-х. производства

Свет является одним из важнейших параметров микроклимата. От уровня освещенности и спектрального состава света зависят рост и развитие, здоровье и продуктивность животных, расход кормов и качество полученной продукции. Под воздействием света усиливаются окислительные процессы и обмен веществ, стимулируются функции эндокринных желез, повышается устойчивость организма к болезням.

В настоящее время с введением новой технологии содержания животных наблюдается все большая изоляция их от естественной среды. В связи с этим возрастает роль искусственного освещения и роль облучательных установок.

Рационально спроектированные и грамотно эксплуатируемые осветительные установки (ОУ) позволяют компенсировать недостаточное естественное освещение при минимальных затратах электроэнергии, электротехнического оборудования и материалов.

Курс светотехники включает в себя изложение основ светотехники и их применение к решению интенсификации основных отраслей сельскохозяйственного производства.

### 1.1. Наука светотехника, предмет ее изучения и связь с другими дисциплинами

*Светотехника* — область науки и техники, предметом которой является:

- разработка способов генерирования оптического излучения;
- разработка способов перераспределения оптического излучения в пространстве;
- разработка приборов и методов измерения оптического излучения;
- преобразование оптического излучения в другие виды энергии и использование их в народном хозяйстве;
- разработка систем управления, монтажа и эксплуатации осветительных установок.

Оптическое излучение (ОИ) — это область электромагнитных колебаний с длинами волн от 1 нм до 1 мм. В указанных пределах содержится ультрафиолетовое излучение (УФ), видимое и инфракрасное. Участки спектра, занимаемые перечисленными излучениями, неодинаковы: ультрафиолетовое 1,0...380 нм, видимое — 380...760 нм, инфракрасное — 760 нм...1 мм.

*Излучение* (радиация) — одна из форм существования материи в виде электромагнитного поля. Характерной особенностью излучения являются частица и волна.

Светотехника является частью науки о природе, изучающей генерирование и применение электромагнитного излучения, и фактически является продолжением курса физики, химии и теоретических основ электротехники. Без знаний этих дисциплин трудно разобраться в процессах генерирования излучения, перераспределения его в пространстве, а также в эксплуатации приборов оптического излучения.

## **1.2. Задача курса**

Основная цель — дать чёткое и полное представление о значении оптического излучения как технологического фактора в сельскохозяйственном производстве.

Основная задача дисциплины — изучение способов и методов применения оптического излучения к интенсификации сельскохозяйственного производства в основных его отраслях.

Главной задачей светотехники является обеспечение комфортной среды для человека и улучшение эффективности технологических процессов (точность выполнения зрительных работ, применение ультрафиолетового, инфракрасного и видимого излучения).

## **1.3. Основные проблемы светотехники**

На сегодняшний день примерно 10...15% вырабатываемой в нашей стране электроэнергии используется на нужды сельского хозяйства. На искусственное освещение и облучение расходуется 15...25% этой энергии. Поэтому рациональное проектное решение — переход к энергоэкономичным лампам, светоизлучающим диодам и энергосберегающим технологическим установкам — позволит сэкономить не менее 20% электроэнергии, а грамотное применение осветительных и облучательных установок может повысить производительность труда на 4...12%, продуктивность животных — на 8...15%.

В связи с этим возникает ряд проблем.

1. Проблемы повышения коэффициента полезного действия (КПД) источников света (лампы накаливания имеют КПД до 5%, люминесцентные лампы низкого давления — до 21%).

2. Проблемы эксплуатации осветительных установок.

Люминесцентные лампы низкого давления работают при температурах от +5 до +40 °С. При более высоких температурах световая отдача ламп снижается, а при низких температурах они плохо зажигаются. Значительное влияние оказывают запыление ламп и высокая влажность помещения. Поэтому правила устройства электроустановок (ПУЭ) требуют чистить све-



тильники не реже одного раза в три месяца. Ставится задача разработки необслуживаемых осветительных приборов (ОП) с антистатическими пылеотталкивающими свойствами, с системой пневмозащиты от пыли или со специальной системой омовения, которая включается периодически.

3. Требования к качеству электроэнергии. Напряжение сети — важный фактор, сильно влияющий на эксплуатационные характеристики источников света. Снижение напряжения на 7% у ламп накаливания приводит к снижению их светового потока на 27%, но зато возрастает срок службы на 200%; увеличение напряжения на 7% приводит к увеличению светового потока на 30%, но срок службы снижается до 60%.

4. Проблемы разработки пускорегулирующих аппаратов (ПРА). Существуют самые различные ПРА для газоразрядных ламп — стартерные, бесстартерные, индуктивные, емкостные и другие. Все они имеют ряд недостатков — металлоемкость (сталь и медь) и потери энергии. Потери энергии в них составляют от 10 до 50%. Поэтому в настоящее время продолжаются работы по созданию полупроводниковых ПРА, которые снижают массу и потребление энергии до 2...10%, а также позволяют повысить частоту питания газоразрядных ламп и регулировать световой поток в широких пределах.

#### **1.4. Оптическое излучение как технологический фактор сельскохозяйственного производства**

Современное человечество не мыслит своего существования без использования света. Осветительные установки создают необходимые условия видения и позволяют получить до 90% информации от окружающего мира. Свет создает нормальные условия работы, учебы, быта. Без искусственного освещения невозможно себе представить жизнь современного города, невозможно строительство и с.-х. работы в ночное время, работа транспорта.

Эффективное использование света с помощью достижений современной светотехники — важнейший резерв производительности труда и качества продукции, снижение травматизма и сохранение здоровья людей.

Освещенность сельскохозяйственных помещений — важнейший параметр микроклимата. Под воздействием света усиливается обмен веществ, стимулируются функции эндокринных желез и окислительные процессы, повышается устойчивость организма к болезням, рост и сохранность молодняка. Так, например, увеличение естественной освещенности в помещении с 5 до 70...80 лк снижает заболеваемость телят на 20%, повышает привесы на 9...12%, удои молока — на 5...6%.

Однако естественное и искусственное освещение оказывают разное влияние на организм животных. Например, у молодняка свиней, выращенных при естественном свете, был лучший биохимический состав крови, поросята лучше росли, меньше подвергались заболеваниям, имели большую сохранность.

Длительное содержание коров при искусственном освещении привело к резкому снижению воспроизводительной способности.

Поэтому искусственный свет надо использовать не как замену естественного, а как дополнение к увеличению освещенности и продолжительности светового дня.

Оптическое излучение является разновидностью электромагнитных колебаний. В шкале электромагнитных волн оптическая часть занимает значительную область с длинами волн от 1 нм до 1 мм. В длинноволновой части спектра оптическое излучение граничит с ультракороткими радиоволнами, в коротковолновой — с рентгеновским излучением.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение занимает участок спектра от 1 нм до 0,4 мкм и делится на области УФ-А (0,315...0,4 мкм), УФ-В (0,28...0,315 мкм) и УФ-С (1 нм...0,28 мкм). Эти области принято называть соответственно мутагенной, терапевтической или витальной (эритемной) и бактерицидной.

Небольшой участок в средней части спектра занимает видимое излучение с длинами волн 0,38...0,76 мкм.

Основную часть оптической области занимает инфракрасное (ИК) излучение. Весь диапазон инфракрасного излучения принято разделять на три области: ИК-А (0,76...1,5 мкм), ИК-В (1,5...3 мкм) и ИК-С (3 мкм...1 мм).

По своей природе каждая часть оптического спектра по-разному воздействует на живые организмы.

Исследования показывают, что видимое излучение играет важную роль в регулировании обмена веществ у животных. При высоких уровнях освещенности (200...300 лк) увеличивается содержание кальция, гемоглобина в крови и фосфорно-кальциевых солей в костях, производительность труда работающих возрастает на 10...15%, травматизм снижается на 5...7%, улучшается общая культура сельскохозяйственного производства.

Инфракрасный обогрев сельскохозяйственных животных и птицы в начальный период выращивания повышает сохранность и продуктивность молодняка. Действие излучения основывается на поглотительной способности кожи животных, зависящего от влажности, густоты шерстного и пухоперьевого покрова и пигментации. Механизм действия ИК-лучей основывается на проникновении их на некоторую глубину. Длинноволновое излучение с длиной волны более 1,4 мкм поглощается поверхностными слоями кожи, что ведет к расширению кровеносных сосудов и увеличению скорости кровотока.

Коротковолновое излучение с длиной волны 0,76...1,4 мкм проникает на глубину 2,5...8 мм, поглощается тканями и преобразуется в тепловую энергию. Повышение температуры ткани способствует ускорению химических реакций и происходящих там биологических процессов, что повышает обмен веществ, улучшает питание тканей, ускоряет рассасывание и удаление патологических продуктов.

Ультрафиолетовое излучение — необходимый фактор внешней среды. Поэтому при содержании животных и птицы в закрытых помещениях у них возникает «ультрафиолетовое голодание», которое ослабляет иммунобиологические свойства организма и вызывает авитаминоз, функциональные расстройства нервной системы и другие отрицательные явления. Уф-излучение благотворно действует на организм животных и птицы при облучении определенными дозами. Оно улучшает дыхание, кровообращение, повышает содержание гемоглобина в крови, активизирует деятельность внутренней секреции и образование витамина Д<sub>3</sub>, что способствует лучшему усвоению солей кальция, калия и других микроэлементов, укрепляет нервную систему, ускоряет рост, снижает заболеваемость. УФ-излучение действует через фотохимические реакции, происходящие в кожных покровах, слизистых оболочках и органах зрения. Кроме этого, УФ-излучение образует в воздухе озон, окислы азота, аэроионы, положительно влияющие на организм животных и птицы. Доказано, что наиболее перспективно использование ИК-обогрева в комплексе с УФ-облучением. Их совместное воздействие позволяет получить результаты, недостижимые при воздействии каждого фактора в отдельности. Внедрение установок ИК-обогрева и УФ-облучения позволяют увеличить сохранность молодняка до 98% и получить привес до 20%, позволят снизить отход молодняка на 10...15%.

Применение установок УФ-С-облучения, помимо дезинфицирующего и дезодорирующего действия, улучшает ионный состав воздуха, снижает концентрацию сероводорода и двуокиси углерода. Преимущество УФ-С-излучения перед другими химическими и физическими дезинфицирующими средствами заключается в том, что оно сочетает в себе высокую дезинфекционную активность с полным отсутствием токсического действия. Применение совместного эритемно-бактерицидного облучения позволяет повысить продуктивность — на 20%, привес телят — на 10%, надой коров — на 15%, снижает простудные заболевания.

Основные показатели технологической эффективности от облучения растений, животных и птицы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технологический эффект  
от применения облучения растений, животных и птицы

Объект облучения	Технологический эффект, %	Величина эффекта при длине волны, %			Совместное эритемное и инфракрасное излучение, %
		Видимое излучение 380-760 нм	Инфракрасное излучение 760 нм...1 мм	Витальное облучение 280-320 нм	
Коровы	Жирность молока	0,2	–		
	Удои	7-14			
Телята	Привесы	7-12	7		
	Сохранность	15-20	6,8	13	10
Свиньи	Плодовитость	5-25			
	Привесы	6-10			
Поросята	Привесы	13-27	6,5		20
	Сохранность	7-9	8-10	4-10	98
Куры и цыплята	Привесы, сохранность	8,6	4,2	4-11	
	Яйценоскость	8,8	7	10-15	3,7
Ягнята	Привесы		4,6		
	Сохранность		7,6		
Утята	Привесы		2		
	Сохранность		4		
Индюшата	Привесы		8,5		
	Сохранность		3,3		
Крольчата	Привесы		8		
	Сохранность		4,7		
Зерно	Урожайность		10-14	5-20	
	Созревание		Ускоряется на 3-5 дней		
Картофель	Урожайность	7-25			

Область применения оптического излучения в сельскохозяйственном производстве приведена в таблице 2.

*Таблица 2. Область применения оптического излучения  
в сельскохозяйственном производстве*

Ультрафиолетовое излучение			Видимое излучение	Инфракрасное излучение		
А	В	С		А	В	С
200-280 нм	280-315 нм	315-380 нм	380-760 нм	760-1400 нм	1400-3000 нм	3000 нм-1 мм
1	3	5	8		11	
2	4	6	9		12	
		7	10		13	

*Примечание.* 1, 2 — бактерицидное излучение для пастеризации молока, соков и обеззараживания воздуха, тары, воды; 3, 4 — облучение животных и семян; 5 — психогенное влияние на людей; 6 — привлечение рыб и насекомых; 7 — люминесцентный анализ; 8 — рабочее освещение; 9 — дежурное освещение; 10 — технологическое освещение; 11 — сушка лакокрасочных покрытий, семян, овощей и фруктов, пастеризация молока и соков; 12 — диагностика деталей; 13 — терапия животных

### *Вопросы для самопроверки*

1. Дайте определение науки светотехники. 2. Назовите задачу курса «Светотехника». 3. Роль видимого излучения в жизнедеятельности человека. 4. Где применяется инфракрасное излучение в сельскохозяйственном производстве? 5. Перечислите примеры применения ультрафиолетового излучения в сельском хозяйстве.

## 2. ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Физические основы оптического излучения
- Спектр излучения
- Системы эффективных величин и единицы их измерения
- Приемники оптического излучения
- Понятие активного и эффективного потоков

### 2.1. Физические основы оптического излучения

Мельчайшей химически неделимой частицей вещества является атом, состоящий из положительно заряженного ядра, вокруг которого вращаются по своим орбитам отрицательно заряженные электроны.

Электроны в атомах обладают различным запасом энергии, которую они поглощают или излучают определенными порциями, или так называемыми квантами. Электрон в атоме находится лишь в определенных квантовых состояниях, соответствующих определенным значениям его энергии связи с ядром. Состояние электронов в атоме определяется главным квантовым числом  $n$ , орбитальным квантовым числом  $l$ , магнитным квантовым числом  $m$  и спиновым  $s$ . Значение энергии электрона задается главным квантовым числом, которое может принимать только целочисленные значения. На каждом уровне может находиться строго определенное количество электронов. У атомов с большим порядковым номером, как правило, внутренние слои заполнены. В зависимости от запаса энергии, электроны располагаются по энергетическим уровням.

При получении извне определенного количества энергии электроны с внешних энергетических уровней способны перемещаться на более удаленные (высокие) энергетические уровни от ядра и только на те энергетические уровни, которые разрешены для данного атома. При этом происходит поглощение полученной энергии. Такое состояние атома называется *возбужденным*. В данном состоянии атом находится сравнительно малый промежуток времени (примерно  $10^{-8}$  с). Если количество поглощенной энергии превышает энергию атомных связей, то электрон может выйти из-под влияния ядра атома, стать свободным и покинуть атом. Такое явление называется *ионизацией*. Иначе электрон возвращается на более низкие энергетические уровни атома. При этом перемещение может осуществляться не только по энергетическим уровням, но и по подуровням (рис. 1).

Переход с высокого энергетического уровня на более низкий связан с выделением кванта энергии, носящего название «фотон». Фотон имеет свойство как частицы, так и электромагнитной волны. Энергия фотона пропорциональна частоте электромагнитных колебаний  $\nu$  или обратно пропорциональна длине волны  $\lambda$ :

$$W = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

- $\nu$  — частота электромагнитных колебаний, Гц;  
 $c$  — скорость распространения света,  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с;  
 $\lambda$  — длина волны, м.

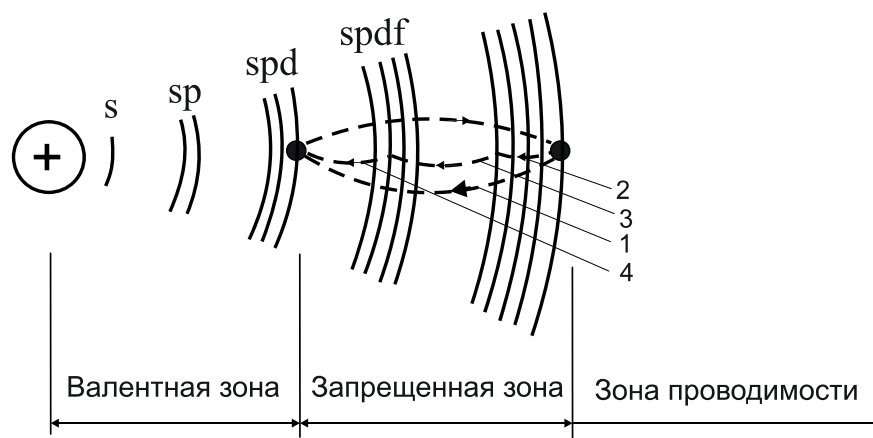


Рис. 1. Возможные пути переходов электрона с одного энергетического уровня на другой

Энергия кванта с уменьшением длины волны растёт.

Элемент оптической системы, в которой рождаются фотоны, называется генератором или источником ОИ.

Для каждого сорта атомов набор разрешенных орбит строго определен, следовательно, будет строго определен набор квантов или, по-другому говоря, строго определенные длины волн излучения.

Общая энергия излучения

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n,$$

$$W = h \frac{c}{\lambda_1} + h \frac{c}{\lambda_2} + h \frac{c}{\lambda_3} + \dots + h \frac{c}{\lambda_n} = hc \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \right).$$

Поле оптического излучения неразрывно связано с переносом энергии от излучающего тела к поглощающему. Этот перенос осуществляется посредством электромагнитных колебаний.

Энергия оптического излучения имеет размерность, свойственную любой форме энергии, и измеряется в Дж. В практике чаще требуется знать не энергию излучения, а её мощность (поток излучения).

Потоком излучения, или мощностью излучения,  $\Phi$ , Вт, называют энергию излучения, переносимую в единицу времени:

$$\Phi = \frac{dW}{dt},$$

где  $dW$  — энергия излучения за время  $dt$ , Дж;

$dt$  — промежуток времени, в течение которого происходит излучение, с.

## 2.2. Спектр излучения

Существует два вида спектра — монохроматический и сложный.

Монохроматический спектр — это поток, состоящий из квантов определенной длины волны (рис. 2, а). Интенсивность монохроматического излучения определяется произведением энергии кванта на число фотонов, проходящих через замкнутый контур пространства в единицу времени:

$$\Phi = n \frac{dW}{dt},$$

где  $n$  — число фотонов, прошедших через замкнутый контур за время  $dt$ .

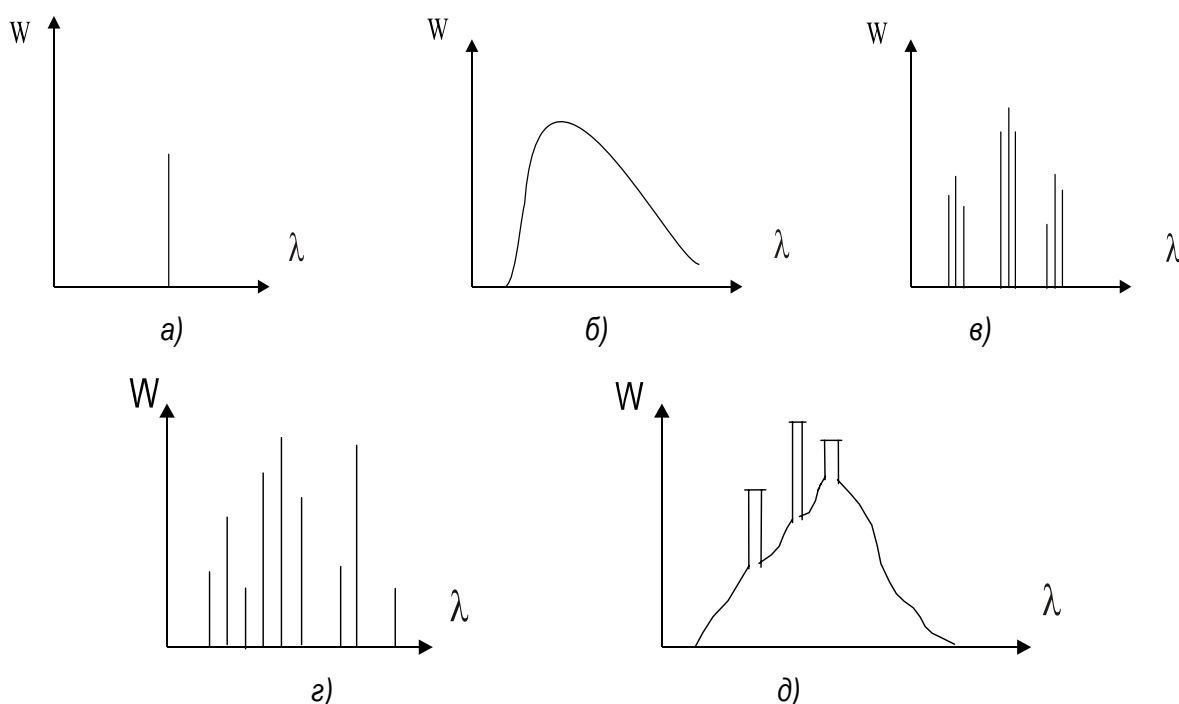


Рис. 2. Виды спектра:  
а — монохроматический; б — сплошной;  
в — полосатый; г — линейчатый; д — сложный

Спектр излучения — совокупность монохроматических излучений, входящих в состав сложного излучения. Спектр излучения может быть описан графически, аналитически или табличной зависимостью. Источники излучения могут иметь сплошной, линейчатый, полосатый спектр или иметь сплошную и линейчатые составляющие.

*Сплошной спектр* — это спектр, в котором составляющие не имеют разрывов по длинам волн (рис. 2, б). Такой спектр имеют тела, состоящие из множества различных атомов.

*Полосатый спектр* — это спектр, в котором монохроматические излучения образуют группы (полосы), состоящие из множества тесно расположенных линий (рис. 2, в). Полосатый спектр образуется молекулами излучения.



*Линейчатый спектр* — это спектр чистых атомов (линии не при-  
мыкают друг к другу) (рис. 2, з).

*Сложный спектр* — это спектр, где на фоне сплошного спектра вы-  
деляются отдельные составляющие (рис. 2, д).

### 2.3. Системы эффективных величин и единицы их измерений

При расчёте светотехнических установок необходимо знать и учи-  
тывать не только свойства источника, но и свойства приёмников оптиче-  
ского излучения.

Основными энергетическими характеристиками любого источника  
и приёмника оптического излучения являются его спектральная плот-  
ность излучения, относительная спектральная плотность излучения, ин-  
тегральная и спектральная чувствительности.

Только что мы рассмотрели различные спектры излучения, описан-  
ные в виде графиков. На практике такими графиками пользоваться не-  
удобно, т.к. они дают приближенные значения энергии. Удобнее пользо-  
ваться спектральной плотностью излучения  $\varphi(\lambda)$  — численно равной  
отношению однородного потока  $\Delta\Phi$ , заключённого в интервале длин  
волн  $\Delta\lambda$ , к величине этого интервала (рис. 3):

$$\varphi(\lambda) = \frac{\Delta\Phi(\lambda)}{\Delta\lambda}, \text{ Вт/нм.}$$

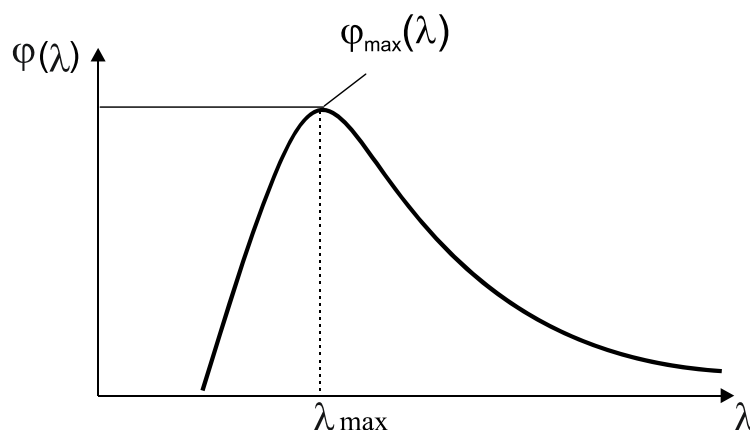


Рис. 3. Спектральная плотность излучения

Принимая  $\Delta\lambda \rightarrow 0$ , получим в пределе

$$\varphi(\lambda) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi(\lambda)}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda}, \text{ Вт/нм.} \quad (1)$$

Длина волны, при которой наблюдается максимум спектральной  
плотности излучения, обозначается  $\lambda_{\max}$ .

При сопоставлении различных источников друг с другом пользуются относительной спектральной плотностью излучения  $f(\lambda)$  — отношение величины спектральной плотности излучения к её максимальному значению:

$$f(\lambda) = \frac{\varphi(\lambda)}{\varphi_{\max}(\lambda)};$$

Подставив  $f(\lambda)$  в выражение (1), получим:

$$d\Phi(\lambda) = \varphi(\lambda) d\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) f(\lambda) d\lambda.$$

Например, для тела накала ламп накаливания различной мощности спектральные плотности при одинаковой температуре излучения будут различны (рис. 4).

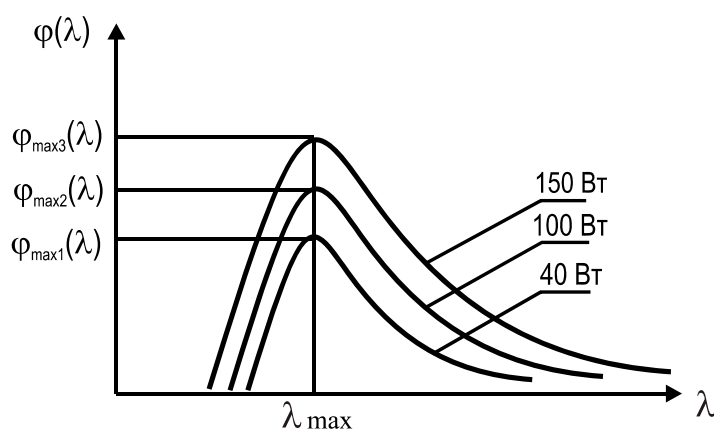


Рис. 4. Спектральные плотности излучения ламп накаливания различной мощности

Значение  $\varphi_{\max}(\lambda)$  определяется заводом-изготовителем.

Но если взять для каждой лампы накаливания отношение спектральной плотности излучения к её максимальному значению, то получим одну относительную спектральную плотность излучения для всех ламп накаливания, имеющих одинаковую температуру тела накала (рис. 5).

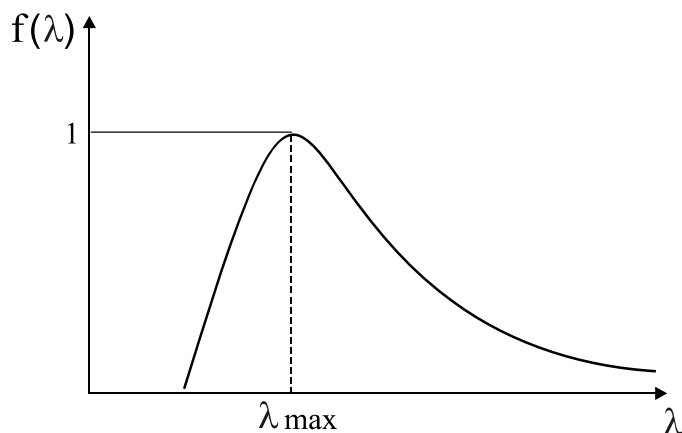


Рис. 5. Относительная спектральная плотность излучения

Спектральные характеристики потоков дают полное представление об излучении источника.

Интегрируя значение интегральной плотности излучения (1) в пределах оптической части спектра, получим значение лучистого (интегрального) потока излучения:

$$\Phi = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \varphi(\lambda) d\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} f(\lambda) d\lambda.$$

Зная величину максимальной спектральной плотности излучения  $\varphi_{\max}(\lambda)$  и распределение энергии излучения по спектру, можно легко определить лучистый поток для любого участка спектра.

Так как аналитическое выражение для относительной спектральной плотности излучения для большинства источников оптического излучения неизвестно, то вычисление определенного интеграла можно заменить суммой, а весь спектр разбить на участки с определенным шагом  $\Delta\lambda$  (рис. 6):

$$\Phi = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} f(\lambda) d\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) \sum_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} f(\lambda) (\Delta\lambda).$$

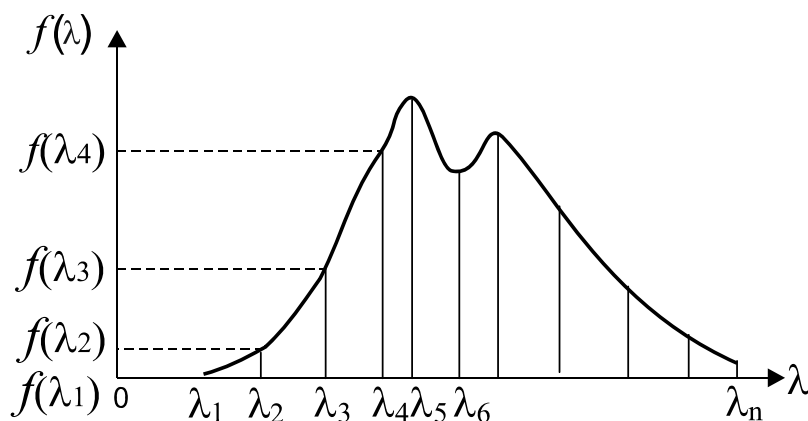


Рис. 6. К расчету интегрального потока излучения

Для расчета потока излучения разбиваем спектральную характеристику по длинам волн на участки с шагом  $\Delta\lambda$  так, чтобы боковая линия была прямой, а площадь заменим суммой площадей трапеций. Площадь каждой трапеции определяется как произведение  $\Delta\lambda_i f(\lambda_{i\text{cp}})$ .

Тогда площадь, ограниченная кривой зависимости относительной спектральной плотности излучения,

$$S = \sum S_{TP} = \frac{f_1 + f_2}{2} \Delta\lambda_1 + \frac{f_2 + f_3}{2} \Delta\lambda_2 + \frac{f_3 + f_4}{2} \Delta\lambda_3 + \dots + \frac{f_{n-1} + f_n}{2} \Delta\lambda_n$$

и поток излучения

$$\Phi = \varphi_{\max}(\lambda) [f_{1\text{cp}}(\lambda) \Delta\lambda_{1\text{cp}} + f_{2\text{cp}}(\lambda) \Delta\lambda_{2\text{cp}} + \dots + f_{n\text{cp}}(\lambda) \Delta\lambda_{n\text{cp}}].$$

Если спектральная плотность излучения по длинам волн разбита на одинаковые участки, то  $\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \dots = \Delta\lambda_n$ , тогда спектральный поток излучения  $\Phi$ , Вт, можно представить в следующем виде:

$$\Phi = \varphi_{\max}(\lambda) \left( \frac{f_1}{2} + f_2 + f_3 + \dots + f_{n-1} + \frac{f_n}{2} \right) \Delta\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) \sum_{\lambda=1}^{\lambda=n} f(\lambda) \Delta\lambda.$$

Для линейчатого спектра принимается сумма действительных спектральных плотностей излучения, а шаг  $\Delta\lambda$  принимается равным 1 нм.

## 2.4. Приемники оптического излучения

Под приемником оптического излучения понимают тело, преобразующее поглощенную энергию излучения в любой другой вид энергии (электрическую, биологическую, химическую, тепловую и т. д.).

Приемники оптического излучения делятся на два больших класса — физические (фотоэлемент, люминофор, фотографическая эмульсия и др.) и биологические (глаз, зеленый лист растения, кожа человека и животных и др.).

Каждому приемнику свойственно поглощать, отражать и пропускать энергию излучения.

Например, попадая на какой-то приёмник (рис. 7), поток излучения  $\Phi$  частично им поглощается, отражается и пропускается:

$$\Phi = \Phi_{\alpha} + \Phi_{\rho} + \Phi_{\tau},$$

где  $\Phi$  — падающий на приёмник поток излучения;

$\Phi_{\alpha}$  — пропущенный поток излучения;

$\Phi_{\rho}$  — отраженный поток излучения;

$\Phi_{\tau}$  — поглощенный поток излучения.

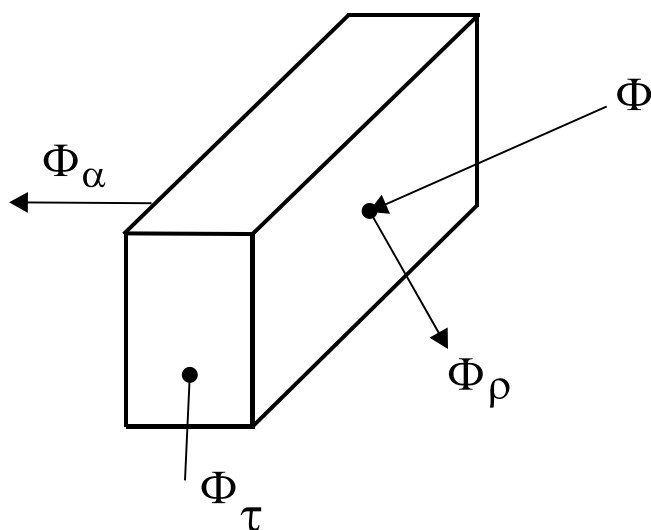


Рис. 7. Приемник оптического излучения

Количественная оценка этого явления определяется соответствующими спектральными коэффициентами:

$$\text{– пропускания} \quad \alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi};$$

$$\text{– отражения} \quad \rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi};$$

$$\text{– поглощения} \quad \tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi},$$

откуда  $\alpha + \rho + \tau = 1$ .

Спектральные коэффициенты пропускания, отражения и поглощения — постоянные характеристики приёмника оптического излучения и не зависят от спектрального состава излучения, если он не вызывает химических изменений в приёмнике.

Для каждого приёмника излучения значения коэффициентов различны. Так, например, для зеркала коэффициенты отражения  $\rho = 0,85$  и поглощения  $\tau = 0,15$ , а для чёрного сукна —  $\rho = 0,02$  и  $\tau = 0,98$ .

Поглощенная энергия ОИ преобразуется в другие виды энергии.

Если поглощенная энергия вызывает положительный эффект, то она называется эффективной, а другие виды энергии называются потерями.

При расчёте и выборе источников энергии применительно к приёмникам необходимо знать свойства приёмников. Основными характеристиками приёмников являются интегральная и спектральная чувствительности.

Интегральная чувствительность приёмника — чувствительность к сложному излучению — показывает, какая часть энергии, падающей на приёмник по всем длинам волн излучения, эффективно преобразуется в другой вид энергии. В общем случае интегральная чувствительность  $q(\lambda)$  приёмника излучения может быть выражена отношением

$$q = C \frac{W_e}{W} = C \frac{\Phi_{\varepsilon}}{\Phi},$$

где  $C$  — коэффициент пропорциональности;

$W_e, \Phi_{\varepsilon}$  — соответственно эффективная энергия и эффективный поток;

$W, \Phi$  — соответственно падающие энергия и поток.

Большинство приемников обладают избирательностью к поглощению энергии излучения. Для оценки чувствительности приемника к однородному излучению введено понятие спектральной чувствительности:

$$q(\lambda) = C \frac{d\Phi_{\varepsilon}(\lambda)}{d\Phi(\lambda)},$$

где  $\Phi_{\varepsilon}(\lambda), \Phi(\lambda)$  — соответственно эффективный и падающий поток какой-то конкретной длины волны.

Спектральная чувствительность показывает, какая часть падающего монохроматического потока эффективно преобразуется в другой вид энергии.

Кривые зависимости интегральной чувствительности потока излучения от длины волны для одного и того же вида приемника приведены на рисунке 8.

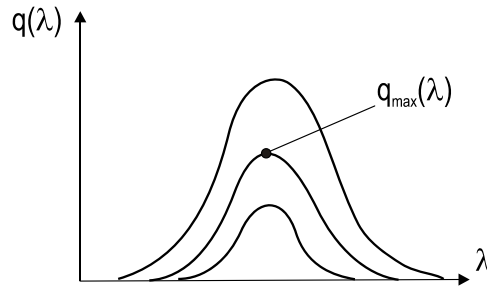


Рис. 8. Интегральные чувствительности приемника

Под относительной спектральной чувствительностью приёмника  $k(\lambda)$  понимают отношение спектральной чувствительности приёмника для какой-то длины волны  $q(\lambda)$  к максимальному значению спектральной чувствительности этого же приёмника  $q_{\max}(\lambda)$ .

*Коэффициент спектральной чувствительности* показывает долю энергии конкретной длины волны, эффективно преобразуемой в другой вид энергии:

$$k(\lambda) = \frac{q(\lambda)}{q_{\max}(\lambda)}.$$

Каждый приёмник обладает избирательностью (селективностью) поглощения энергии излучения (рис. 9, а). Примером может служить коэффициент спектральной чувствительности глаза человека.

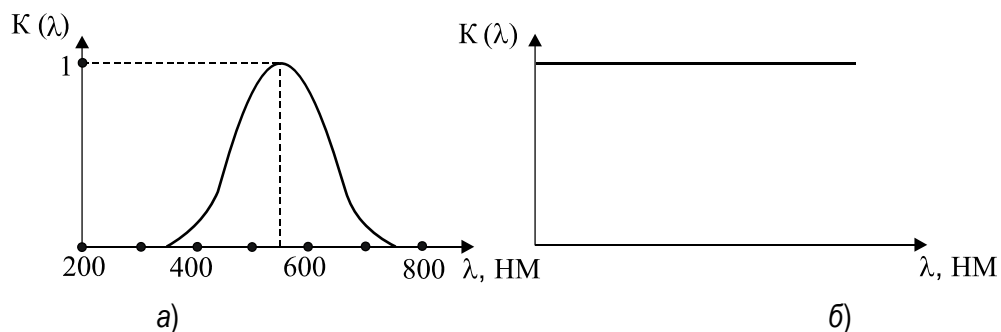


Рис. 9. Коэффициент спектральной чувствительности селективного (а) и неселективного (б) приемников

Кроме избирательных приемников, имеются и неизбирательные (неселективные) приемники, у которых спектральная чувствительность не зависит от длины волны излучения (рис. 9, б). Такими неизбирательными приемниками являются сажа, термопара и др.

## 2.5. Понятие активного и эффективного потоков

Преобразование поглощенной энергии излучения не происходит полностью в другой вид энергии, некоторая её часть преобразуется в тепловую. Для большинства приёмников тепловая энергия, получаемая при преобразовании поглощенного потока излучения, в дальнейшем не используется и является потерянной.

Для оценки пригодности источника энергии излучения к приёмнику излучения вводится понятие активного и эффективного потоков.

Под *активным потоком*  $\Phi_a$  понимается часть лучистого потока, находящаяся в зоне чувствительности приемника:

$$\Phi_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} f(\lambda) d\lambda.$$

На рисунке 10 — это зона площадью  $\lambda_1 a b c \lambda_2$ . Расчет активного потока аналогичен расчету интегрального потока, но в диапазоне длин волн чувствительности приемника.

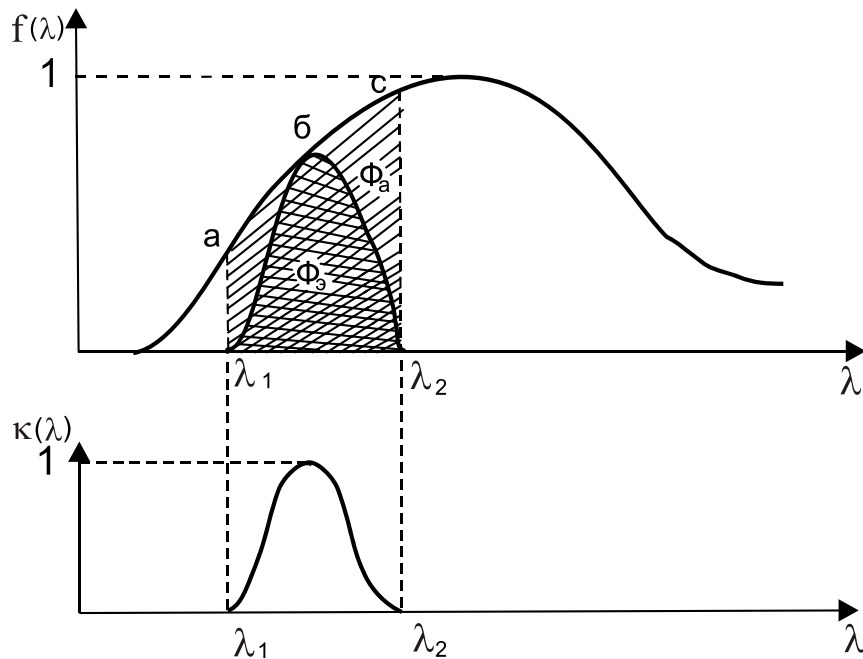


Рис. 10. Спектральные плотности интегрального, активного и эффективного потоков

*Часть активного или интегрального потока, пропорциональная реакции приёмника на это излучение, называется эффективным потоком  $\Phi_э$ , Вт:*

$$\Phi_э = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) k(\lambda) d\lambda = \varphi_{\max}(\lambda) \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) k(\lambda) \Delta\lambda.$$

На рисунке 10 — это зона, ограниченная контуром  $\lambda_1 b \lambda_2$ .

Так как приемник эффективно преобразует энергию различных длин волн по-разному, то количество преобразованной энергии будет отличаться от падающей на величину коэффициента спектральной чувствительности.

### Методика расчёта эффективного потока

1. Исходные данные — коэффициент спектральной плотности излучения и коэффициент спектральной чувствительности.
2. Отмечаем на кривой спектральной плотности излучения границы спектральной чувствительности приёмника  $\lambda_1$  и  $\lambda_n$  (рис. 11).

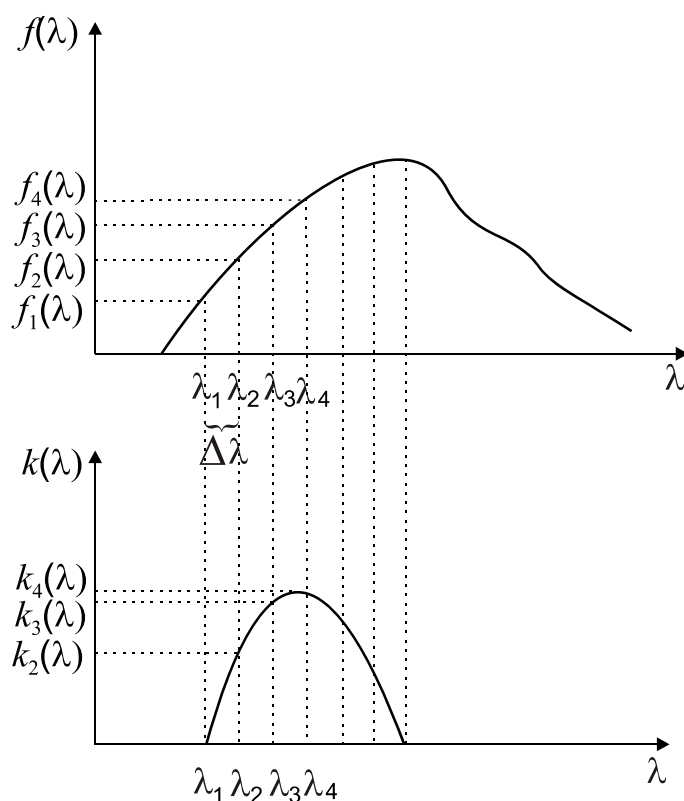


Рис. 11. К методике расчета эффективного потока

3. Делим кривую спектральной плотности излучения на участки  $\Delta\lambda$  и на каждом участке определим среднее значение спектральной плотности излучения:

$$f(\lambda) = \frac{f_i(\lambda) + f_{i+1}(\lambda)}{2}.$$

4. Разбиваем кривую спектральной чувствительности по длинам волн на такие же участки, как и спектральной плотности излучения.

5. На каждом участке  $\Delta\lambda$  зоны чувствительности определяем средний коэффициент спектральной чувствительности:

$$k_{icp}(\lambda) = \frac{k_i(\lambda) + k_{i+1}(\lambda)}{2}.$$



6. Определяем значение эффективного потока на каждом участке спектральной плотности излучения:

$$\Phi_{\text{Э}i} = \varphi_{\text{max}}(\lambda) f_{i\text{cp}}(\lambda) k_{i\text{cp}}(\lambda) \Delta\lambda .$$

7. Находим значение всего эффективного потока:

$$\Phi_{\text{Э}} = \sum \Phi_{\text{Э}i} = \varphi_{\text{max}}(\lambda) [f_{1\text{cp}}(\lambda) k_{1\text{cp}}(\lambda) + f_{2\text{cp}}(\lambda) k_{2\text{cp}}(\lambda) + \dots + f_{i\text{cp}}(\lambda) k_{i\text{cp}}(\lambda)] \Delta\lambda .$$

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Как возникает оптическое излучение? 2. Запишите выражение энергии кванта. 3. Что такое спектр излучения? 4. Как возникает сплошной спектр? 5. Что такое  $\lambda_{\text{max}}$ ? 6. Что такое поток излучения? 7. Как вычислить интегральный поток излучения? 8. Что такое приемник оптического излучения? 9. Как получается относительная спектральная чувствительность? 10. Что понимается под активным и эффективным потоками? 11. Поясните методику расчета эффективного потока.

### 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

- Общие понятия и определения
- Воздействие оптического излучения на глаз
- Воздействие оптического излучения на бактерии
- Витальные (эритемные) системы величин и единицы их измерения
- Воздействие оптического излучения на зеленый лист

#### 3.1. Общие понятия и определения

Основной энергетической величиной является поток излучения  $\Phi$ , Дж/с = Вт:

$$\Phi = \frac{dW}{dt} = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} f(\lambda) d\lambda.$$

*Сила излучения*  $I$ , Вт/ср, — это отношение лучистого потока к величине телесного угла, в котором этот поток равномерно распространяется:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

*Телесный угол* — это коническое тело, вершиной которого служит центр сферы произвольного радиуса, а основанием — часть поверхности этой сферы, на которую этот конус опирается (рис. 12).

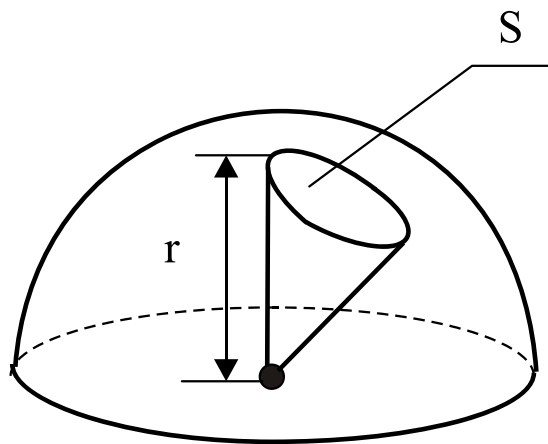


Рис. 12. К определению телесного угла

Величина телесного угла  $\omega$  определяется отношением площади основания сферической части конуса к квадрату радиуса:

$$\omega = \frac{S = r^2}{r^2}.$$

За единицу телесного угла принят такой угол, который вырезает на поверхности сферы участок площадью, равной квадрату радиуса сферы. Эта единица называется стерadianом (ср).

Разность двух телесных углов называется *зональным телесным углом* (рис. 13).

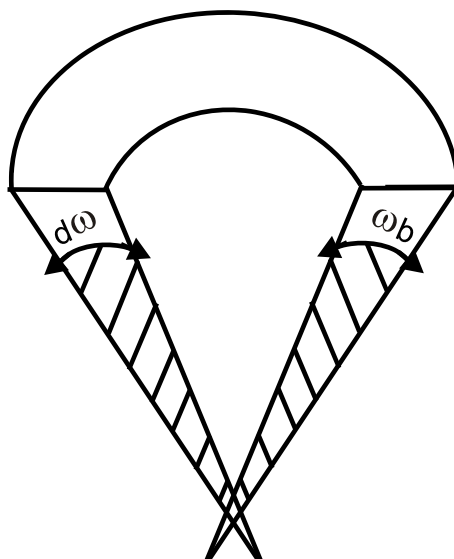


Рис. 13. Зональный телесный угол

За направление силы излучения принимается ось телесного угла, в пределах которого равномерно распространяется лучистый поток (рис. 14).

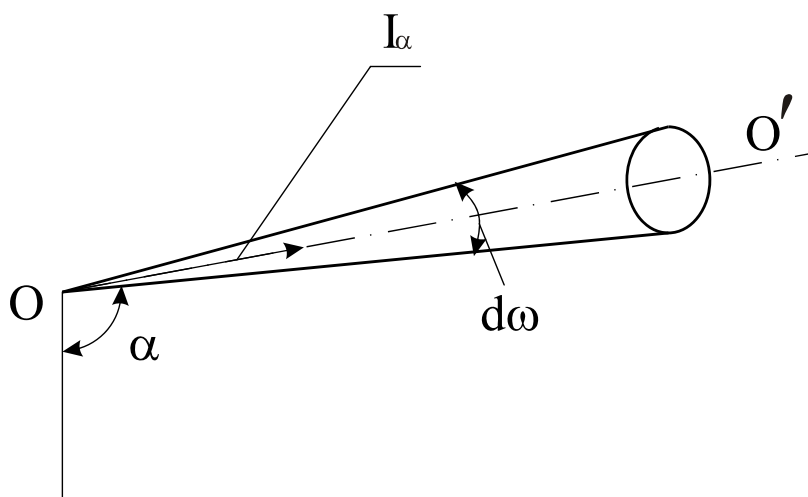


Рис. 14. Направление силы излучения

Несмотря на то, что все реальные источники излучения имеют размеры, часто пользуются понятием точечного источника излучения.

Под *точечным источником излучения* понимают такой источник, когда его видимые размеры из точки наблюдения меньше расстояния до него как минимум в пять раз.

Если от источника излучения отложить все силы излучения, то вся поверхность, образованная ими, называется фотометрическим телом.

*Фотометрическое тело* — часть пространства, ограниченная поверхностью, которая является геометрическим местом точек концов радиус-векторов сил излучения.

Симметричный источник излучения имеет ось симметрии, а несимметричный — нет. Если источник симметричный, то его фотометрическое тело является телом вращения.

*Кривая силы излучения* — это линия, полученная сечением фотометрического тела плоскостью, проходящей через центр симметрии этого тела (рис. 15).

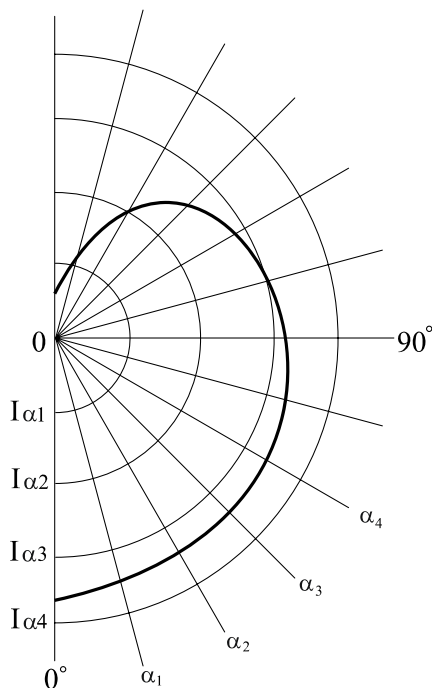


Рис. 15. Кривая силы излучения

Эта кривая характеризует распределение энергии излучения в пространстве.

По известной продольной кривой силы излучения можно легко получить лучистый поток источника, т.е.  $\Phi = f(I_\alpha)$ .

Действительно

$$d\Phi = I_\alpha d\omega; \quad \Phi = \int_{\alpha_i}^{\alpha_n} I_\alpha d\omega; \quad d\omega = \frac{dS}{r^2}, \quad (2)$$

где  $dS$  — площадь разности площадей двух сегментов, вырезанных на поверхности двумя вращающимися радиусами.

Известно, что площадь сегмента  $S_c = 2\pi r h$ , где  $h$  — высота сегмента.

Тогда разность сегментов (рис. 16):

$$S = S_{c1} - S_{c2} = 2\pi r(h_2 - h_1);$$

$$h_1 = r - r \sin \alpha; \quad h_2 = r - r \sin(\alpha + d\alpha); \quad h_1 - h_2 = r \sin \alpha d\alpha.$$

Отсюда 
$$d\omega = \frac{2\pi r r \sin \alpha d\alpha}{r^2} = 2\pi \sin \alpha d\alpha.$$

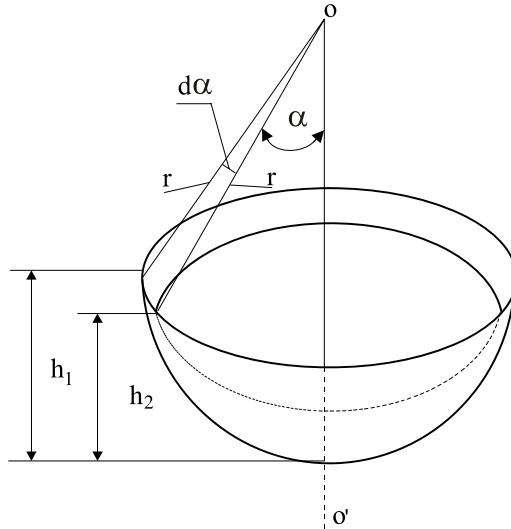


Рис. 16. К расчету потока излучения по кривой силы излучения

Подставляя в формулу (2), получим:

$$\Phi = \int_{\alpha_i}^{\alpha_n} 2\pi \sin \alpha d\alpha I_\alpha = 2\pi \int_{\alpha_i}^{\alpha_n} I_\alpha \sin \alpha d\alpha,$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_n$  — углы, определяющие ту часть пространства, в пределах которой источник излучает поток.

Таким образом, можно подсчитать поток в телесном угле  $\alpha_1 - \alpha_2$ , потом поток в зоне  $\alpha_2 - \alpha_3$  и т.д.

*Энергетическая светимость*  $m$ , Вт/м<sup>2</sup> (плотность излучения, излучательность), — это плотность потока излучения с поверхности элементарного участка излучающего (отражающего или пропускающего) тела. Энергетическая светимость численно равна отношению потока излучения к площади участка поверхности, излучающей этот поток:

$$m = \frac{d\Phi}{dS}.$$

где  $d\Phi$  — поток излучения с поверхности  $dS$ .

*Энергетическая яркость* (лучистость) — отношение силы излучения с поверхности в данном направлении к площади проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную силе излучения (рис. 17). Энергетическая яркость участка поверхности  $S$  в направлении  $\alpha$  вычисляется:

$$L = \frac{I_\alpha}{S_\alpha} = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha},$$

где  $I_\alpha$  — сила излучения элемента поверхности  $S$  в направлении  $\alpha$ ;  
 $S_\alpha = S \cos \alpha$  — проекция участка поверхности  $S$  на плоскость, перпендикулярную силе излучения.

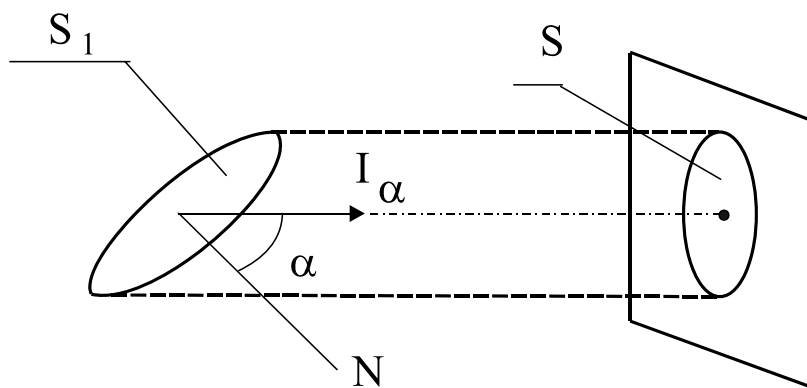


Рис. 17. К определению лучистости

За единицу измерения энергетической яркости принимают энергетическую яркость плоской поверхности в  $1 \text{ м}^2$ , которая в перпендикулярном направлении имеет силу излучения  $1 \text{ Вт} \cdot \text{ср}^{-1}$ .

Энергетическая освещенность  $E$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  (облученность), — это отношение потока излучения  $d\Phi$  к площади  $dS$ , на которую падает излучение:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Выразим связь между силой излучения и облученностью (рис. 18):

$$\begin{aligned} \Phi &= I_\alpha d\omega, \\ d\omega &= \frac{dS}{l^2} = \frac{dS \cos \beta}{l^2}, \\ E &= \frac{I_\alpha dS \cos \beta}{dS l^2} = \frac{I_\alpha \cos \beta}{l^2}. \end{aligned}$$

Это основной закон светотехники:

$$E = \frac{I_\alpha \cos \beta}{l^2}.$$

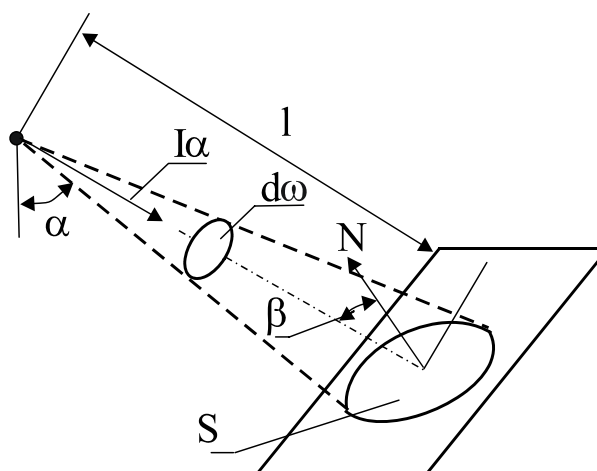


Рис. 18. Связь силы излучения и облученности

Поскольку процесс преобразования излучения в другие виды энергии определяется не только значением облученности приёмника и спектральным составом излучения, но и продолжительностью облучения, важное значение имеет величина, называемая количеством облучения.

Количество облучения  $H$ , Вт·с/м<sup>2</sup>, — это значение энергии излучения, упавшей на единицу облучаемой поверхности в течение времени облучения:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E_t dt,$$

где  $E_t$  — мгновенное значение облученности, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_1$  и  $t_2$  — время начала и конца облучения.

### 3.2. Воздействие оптического излучения на глаз.

#### Световые величины

Зрительный аппарат человека состоит из приёмника лучистой энергии глаза и нервных волокон, соединяющих глаз с нервными центрами коры головного мозга (рис. 19).

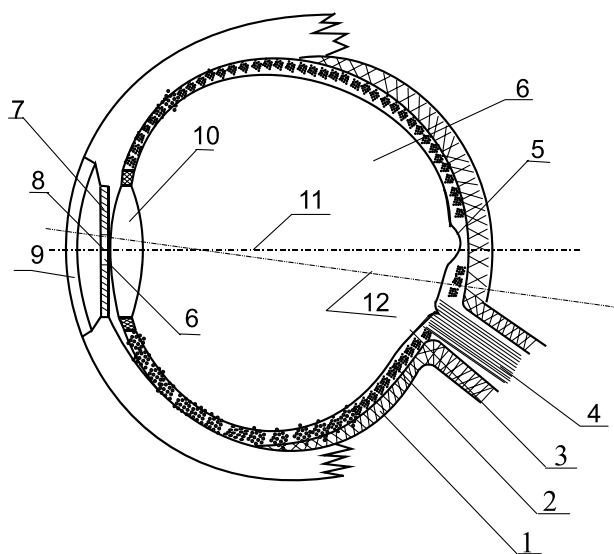


Рис. 19. Схема строения глаза человека:

- 1 — плотная белковая оболочка — склера, защищающая глаз; 2 — сосудистая оболочка, питающая глаз; 3 — сетчатая оболочка-сетчатка, соединяющая нервные клетки между собой; 4 — зрительный нерв; 5 — жёлтое пятно, в области которого расположены колбочки; 6 — стекловидное тело; 7 — радужная оболочка, определяющая цвет глаза; 8 — зрачок с радиальными мышечными волокнами; 9 — роговая оболочка-роговица, являющаяся частью склеры; 10 — хрусталик, обладающий способностью менять кривизну своей поверхности; 11 — оптическая ось; 12 — зрительная ось

Глаз представляет собой тело, заполненное прозрачным для видимых излучений веществом, — стекловидным телом. В задней части глаза расположена сетчатка, состоящая из нервных клеток и нервных волокон,

соединяющих нервные клетки между собой. В этой оболочке расположены приёмники энергии излучения. Эти приёмники делятся на два типа, которые называют колбочками и палочками. В сетчатке различают десять слоев, имеющих различное строение. Толщина её около 0,2 мм.

Колбочка — светочувствительный приёмник, в котором находится вещество — иодопсин, разлагающееся при поглощении лучистого потока. Колбочки сосредоточены в центральной области сетчатки. В этой области сетчатой оболочки глаза размещается жёлтое пятно, в середине которого имеется углубление, называемое центральной ямкой. В пределах жёлтого пятна расположены преимущественно колбочки, в центральной ямке — только колбочки, причём каждая из них может соединяться с корой головного мозга отдельным зрительным волокном.

Колбочковый аппарат работает при больших яркостях, что соответствует дневным условиям освещения, поэтому колбочковое зрение называют дневным.

Колбочковый аппарат глаза обладает способностью различать цвета.

Палочки — светочувствительный приёмник, в котором находится особое вещество родопсин, разлагающееся под действием поглощенного потока излучения. Палочки расположены в сетчатке неравномерно. Число палочек, приходящихся на единицу поверхности сетчатки, растёт по мере удаления от центральной части к периферии. Палочки соединяются с корой головного мозга одним волокном по несколько десятков штук.

Палочковый аппарат глаза имеет более высокую чувствительность, чем колбочковый, и работает при малых яркостях окружающего пространства. Зрение, при котором работает только палочковый аппарат, называется ночным. Известно, что при ночном зрении цвета не различаются. Это говорит о том, что палочковый аппарат не обладает способностью воспринимать цвета. Зрение, при котором работают оба аппарата глаза, называется сумеречным.

Поток излучения, поглощенный светочувствительным веществом палочек и колбочек, вызывает фотохимическую реакцию, в процессе которой разлагаются иодопсин и родопсин. В результате фотохимической реакции возникает разность потенциалов между элементами сетчатой оболочки и соединенными с ними центрами коры головного мозга. Химическая энергия, возникающая при распаде светочувствительного вещества, превращается в электрическую энергию импульсов тока, протекающего по волокнам нерва между сетчатой оболочкой и корой головного мозга. Эта электрическая энергия преобразуется в затылочных долях коры головного мозга в биологическую энергию, под действием которой возникают зрительные ощущения.



Способность глаза приспособливаться к чёткому различению равноудалённых предметов называется аккомодацией. Чёткое обнаружение у нормального глаза получается автоматически изменением кривизны хрусталика.

Приспособление глаза к изменившимся условиям освещения называется адаптацией. Под адаптацией понимают процесс изменения чувствительности зрительного аппарата, вызываемый изменением уровня и распределения яркости в поле зрения.

Световая адаптация — это процесс уменьшения чувствительности органа зрения при повышении яркости поля зрения. При световой адаптации через 8-10 мин снижение чувствительности глаза прекращается.

Очень важной характеристикой усредненного человеческого глаза является его спектральная чувствительность. Максимальная спектральная чувствительность органа зрения имеет место при освещении сетчатки монохроматическим излучением с длиной волны  $\lambda = 555$  нм (жёлто-зелёный участок спектра) (рис. 20).

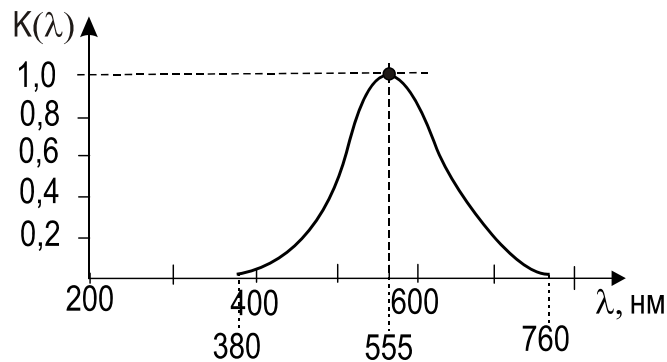


Рис. 20. Коэффициент спектральной чувствительности глаза человека

Световой поток — эффективный поток, т.е. та часть лучистого потока, которая пропорциональна реакции глаза на это излучение. Световой поток определяется соотношением

$$\Phi_{CB} = \varphi_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} f(\lambda)k(\lambda) d\lambda .$$

Многочисленными измерениями установлено, что 1 Вт потока монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda = 555$  нм равен 680 лм светового потока, т.е. 1 лм равен 1/680 Вт. Следовательно, максимальное значение спектральной плотности излучения:

$$\varphi_{\max}(\lambda) = 680 \text{ лм/Вт};$$

$$\Phi_{CB} = 680 \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} f(\lambda) k(\lambda) d\lambda , \text{ лм.}$$

Существует другое определение: люмен — поток излучения абсолютно черного тела площадью  $0,5305 \text{ м}^2$  при температуре затвердевания платины (2046 К) и давлении 101325 Па.

При расчете светового потока источника с линейчатым спектром принимается  $\Delta\lambda = 1 \text{ нм}$ .

$$\Phi = 680 \sum_{380}^{760} f(\lambda)k(\lambda)\Delta\lambda.$$

Освещенность (облученность)  $E$ ,  $\text{лм/м}^2 = \text{лк}$  — это отношение светового потока к площади поверхности, по которой этот поток равномерно распределяется:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

За единицу освещенности принят люкс (лк). Освещенность в 1 лк имеет поверхность площадью в  $1 \text{ м}^2$ , на которой равномерно распределяется световой поток в 1 лм.

*Сила света*  $I$ ,  $\text{лм/ср} = \text{кд}$ , — это отношение светового потока к величине телесного угла, в котором он равномерно распространяется. Единицей силы света является 1 кандела. 1 кандела — световой поток в 1 лм, равномерно распространяющийся в единице телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

В системе СИ кандела — сила света, излучаемая в перпендикулярном направлении с  $1/600\,000 \text{ м}^2$  поверхности полного излучателя при температуре затвердевания платины (2046 К) и давлении 1 атм. (101 325 Па).

*Экспозиция*  $H_C$  (количество освещения) — количество световой энергии, падающей на  $1 \text{ м}^2$  за определенный промежуток времени:

$$H_C = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda.$$

### 3.3. Воздействие оптического излучения на бактерии

УФ-излучение области С, с длинами волн менее 280 нм, имеющие большую энергию квантов, способно уничтожать бактерии. В бактериях под воздействием УФ-С-излучения происходит коагуляция белка, что приводит к их гибели.

Свойство излучения убивать бактерии называется бактерицидностью.

Максимальную чувствительность бактерий обнаруживают к однородным излучениям с длиной волны  $\lambda = 254 \text{ нм}$ , то есть максимальной эффективностью уничтожения бактерий обладает монохроматическое излучение при  $\lambda = 254 \text{ нм}$ . Коэффициент спектральной чувствительности бактерий представлен на рисунке 21.

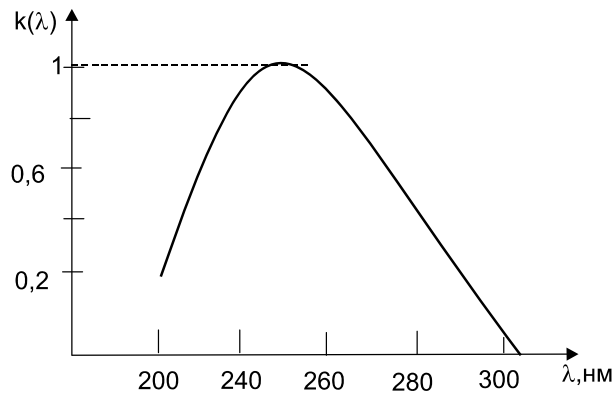


Рис. 21. Коэффициент спектральной чувствительности бактерий

Различные виды бактерий неодинаково чувствительны к УФ-лучам. Наименее чувствительны дифтерийные палочки. Наибольшей чувствительностью обладают бактерии коли — бактерии кишечной палочки, стафилококки, бациллы холеры, тифа. Поэтому за образцовый приемник принята кишечная палочка коли.

Исходной величиной в системе бактерицидных величин служит бактерицидный поток, который определяется как поток излучения, оцененный по его бактерицидному действию, то есть по эффективности уничтожения бактерий:

$$\Phi_B = \int_{\lambda_1=200}^{\lambda_2=280} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda.$$

Единицей измерения бактерицидного потока служит *бакт* (*бк*), численно равный излучению мощностью 1 Вт при длине волны  $\lambda = 254$  нм.

*Плотность бактерицидного потока*  $E_B$ , бк/м<sup>2</sup>, по поверхности облучаемого тела называется бактерицидной облучённостью:

$$E_B = \frac{d\Phi_B}{dS}.$$

Силой бактерицидного излучения  $I_B$ , бк/ср, называется пространственная плотность бактерицидного потока, равная отношению бактерицидного потока к значению телесного угла, в котором равномерно распространяется:

$$I_B = \frac{d\Phi_B}{d\omega}.$$

Весьма важной расчётной величиной является количество бактерицидного облучения, определяемое количеством энергии бактерицидного излучения, упавшей на единицу поверхности облучаемого тела за определенный промежуток времени  $H_B$ , (бк·с)/м<sup>2</sup>:

$$H_B = \int_{t_1}^{t_2} E_B dt.$$

### 3.4. Витальные (эритемные) системы величин и единицы их измерения

Вита — жизнь, эритема — покраснение.

Витальный (эритемный) поток — часть лучистого потока, пропорциональная реакции кожи человека на оптическое излучение:

$$\Phi_{\text{э}} = \varphi_{\text{max}} \int_{280}^{315} f(\lambda)k(\lambda)d\lambda = \varphi_{\text{max}} \sum_{280}^{315} f(\lambda)k(\lambda)\Delta\lambda.$$

Единицей эритемного потока служит  $\text{эр}$ , численно равный излучению мощностью в 1 Вт при длине волны  $\lambda = 297$  нм.

Коэффициент спектральной чувствительности кожи человека представлен на рисунке 22.

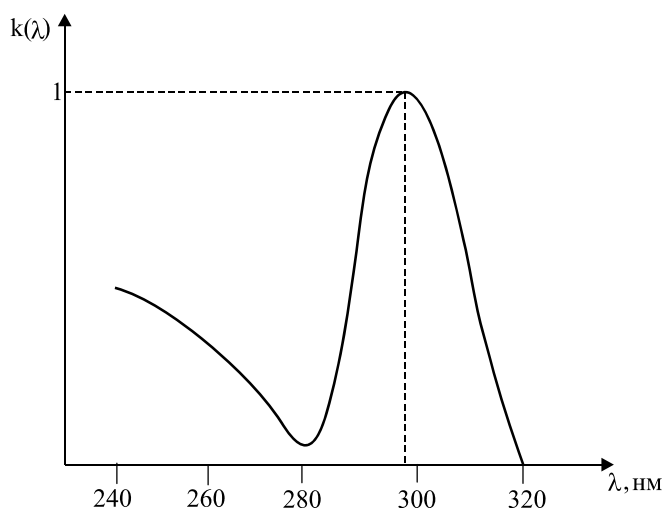


Рис. 22. Коэффициент спектральной чувствительности кожи человека

Под влиянием эритемного облучения в организме образуется биологически активное вещество  $D_3$ , которое оказывает положительное терапевтическое и тонизирующее действие на организм. В результате поглощения квантов УФ-излучения на коже человека образуется эритема (покраснение) и пигментация.

Плотность эритемного потока на поверхности облучаемого тела называется эритемной облученностью  $E_{\text{э}}$ ,  $\text{эр}/\text{м}^2$ :

$$E_{\text{э}} = \frac{d\Phi_{\text{э}}}{dS}.$$

Силой эритемного излучения  $I_{\text{э}}$ ,  $\text{эр}/\text{ср}$ , называется пространственная плотность эритемного потока, равная отношению эритемного потока к величине телесного угла, в котором он равномерно распространяется:

$$I_{\text{э}} = \frac{d\Phi_{\text{э}}}{d\omega}.$$

Количеством эритемного облучения  $H_э$ , (эр·с)/м<sup>2</sup>, называется количество энергии эритемного излучения, упавшей на единицу облучаемой поверхности за определенный промежуток времени:

$$H_э = \int_{t_1}^{t_2} E_э dt .$$

*Доза эритемного облучения* — количество витальной энергии, которое вызывает наибольшее благотворное воздействие на какой-либо живой организм. УФ-облучение влияет на обмен веществ, на процессы дыхания, активизацию кровообращения, увеличивает содержание гемоглобина в крови, активизирует деятельность желез внутренней секреции; образующийся витамин D<sub>3</sub> способствует лучшему усвоению корма, оздоровлению организма, сохранности молодняка. Переоблучение вызывает ожог кожи, выпадение пухо-перьевого покрова, а отсюда и отрицательное действие.

### 3.5. Воздействие оптического излучения на зеленый лист

Растения — это единственные организмы на нашей земле, способные самостоятельно преобразовывать энергию оптического излучения в химическую энергию органического вещества. Фотосинтез — сложная многоступенчатая реакция превращения углекислого газа и воды, под действием энергии оптического излучения, в органическое вещество.

Поглощенная растением энергия используется на фотосинтез, нагрев и испарение воды:

$$W = W_ф + W_{нагр.} + W_{испар.}$$

Фотосинтетическим действием обладает излучение с длинами волн от 300 до 750 мм.

Зеленый лист поглощает 80...90% падающего на него фотосинтетического активного излучения, отражает 5...10%. В естественных условиях всего 2% растения использует на фотосинтез, а остальная энергия идет на нагрев растения.

Спектральный состав излучения действует на различные растения по-разному, даже для одного и того же растения в различной фазе развития. Для создания специальных источников для искусственного облучения растений необходимо знать средний спектр действия фотосинтеза (рис. 23).

Одной из основных величин оптического излучения, используемого в растениеводстве, является *фитопоток* — эффективный поток излучения:

$$\Phi_э = q_{\max}(\lambda) \int_{\lambda=300}^{\lambda_2=750} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda ,$$

где  $q_{\max}(\lambda)$  — максимальная спектральная фотосинтетическая эффективность оптического излучения, равная 0,95.

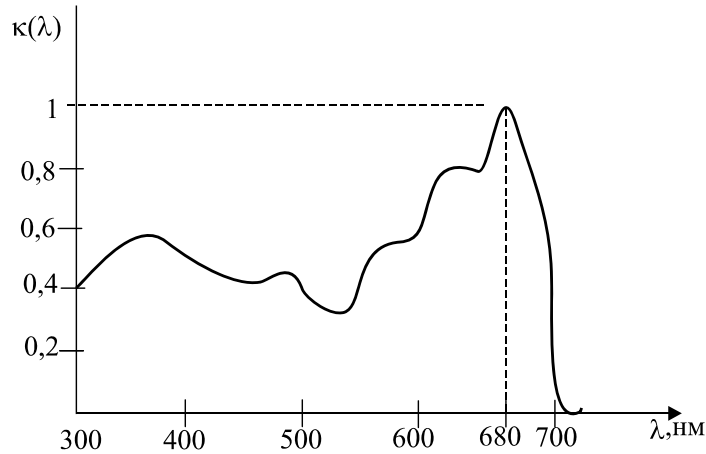


Рис. 23. Коэффициент спектральной чувствительности зеленого листа

Он характеризует содержание в интегральном излучении энергии, потенциально доступной растениям для осуществления фотосинтеза. За единицу фитопотока принят  $\text{фит}$ , численно равный монохроматическому потоку излучения в 1 Вт с длиной волны 680 нм.

Сила излучения фитопотока  $I_\phi$ , фит/ср, под которой понимается отношение фитопотока к телесному углу, в пределах которого он заключён и равномерно распределён:

$$I_\phi = \frac{d\Phi_\phi}{d\omega}.$$

Фитооблучённость — отношение фитопотока к облучаемой площади,  $E_\phi$ , фит/м<sup>2</sup>:

$$E_\phi = \frac{d\Phi_\phi}{dS}.$$

Количество фитооблучения  $H_\phi$ , (фит·с)/м<sup>2</sup>, — значение фотосинтетически активной энергии излучения, достигшей облучаемой поверхности в течение времени облучения:

$$H_\phi = \int_{t_1}^{t_2} E_{\phi t} dt.$$

### Вопросы для самоконтроля

1. Что такое телесный угол? 2. Физический смысл кривой силы излучения. 3. Дайте определение фотометрического тела. 4. Дайте определение энергетической светимости, яркости, освещенности. 5. Запишите выражение основного закона светотехники. 6. Опишите работу зрительного аппарата человека. 7. Что такое бактерицидность? 8. Что такое доза эритемного излучения? 9. Что такое фотосинтез? 10. Дайте определение величин потока излучения — люмен, бакт, фит.

## 4. МЕТОДЫ И СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Тепловые приемники оптического излучения
- Термоэлектрические приемники оптического излучения
- Фотоэлектрические приемники
- Измерение силы света
- Измерение светового потока

Существуют два метода измерения оптического излучения:

- *субъективный* (зрительный), при котором приемником служит глаз человека. Метод дает приближённую оценку световых величин;
- *объективный* (физический), где для измерения ОИ служат различные физические приемники лучистого потока — фотоэлементы, фотоумножители, фотографические материалы и др.

Физическими приемниками ОИ могут служить:

- тепловые;
- фотоэлектрические.

### 4.1. Тепловые приёмники оптического излучения

В этих приёмниках поглощаемая энергия квантов превращается в теплоту, вследствие чего изменяется их температура. Таким образом, задача измерения оптического излучения сводится к измерению перепада температур, вызванного поглощением энергии излучения приёмником.

Так как превращается в теплоту в таких приемниках квант энергии любой длины волны, то такие приемники называются *неселективными*.

В этих приемниках оптическое излучение воспринимается черной пластинкой (тонкая металлическая пластинка покрытая окисью меди, серебра, золота).

### *Болометры*

В этих приборах чувствительным элементом служат проводники или полупроводники, у которых электрическое сопротивление зависит от температуры. Конструкция болометра представлена на рисунке 24.

Эта конструкция помещается в стеклянную или кварцевую колбу, из которой выкачан воздух для уменьшения влияния окружающей среды. Колбу помещают в различные оболочки, которые служат для ограничения длин волн излучения.

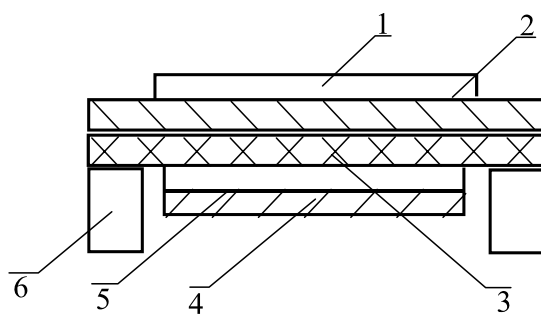


Рис. 24. Конструкция болометра:  
 1 — слой черни; 2 — подложка из металла;  
 3 — изолятор с хорошей теплопроводностью;  
 4 — термочувствительный слой; 5 — контакты  
 из серебра; 6 — выводы

Принцип действия болометра основан на измерении электрического сопротивления проводника, зависящего от температуры.

Включаются болометры в измерительную цепь по мостовой схеме, питаемой переменным или постоянным током (рис. 25).

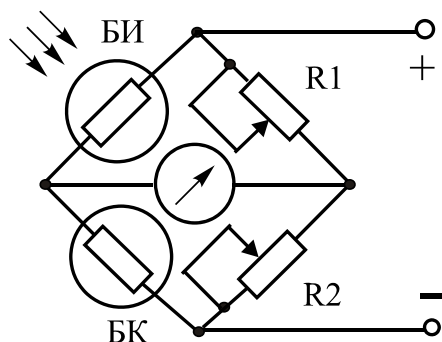


Рис. 25. Схема включения болометра

Один болометр является измерительным БИ, другой компенсационным БК. При облучении измерительного болометра он нагревается и изменяется его сопротивление, по диагонали моста течет ток, который косвенно характеризует поток излучения на болометр. Как правило, значения этого тока невелики, поэтому необходимо применять различные способы усиления сигнала.

В смежное плечо моста включают такой же компенсационный болометр БК, который не подвергается действию излучения, а служит лишь для поддержания равновесия моста при изменениях окружающей температуры.

Чувствительность современных болометров достигает  $10^{-10}$  Вт.

Недостатки — большая инерционность.



## 4.2. Термоэлектрические приёмники излучения

Действие термоэлектрических приёмников (термопары, термоэлементы и пр.) основано на возникновении термоэлектродвижущей силы при нагреве спая разнородных металлов или полупроводников падающим на него излучением (рис. 26).

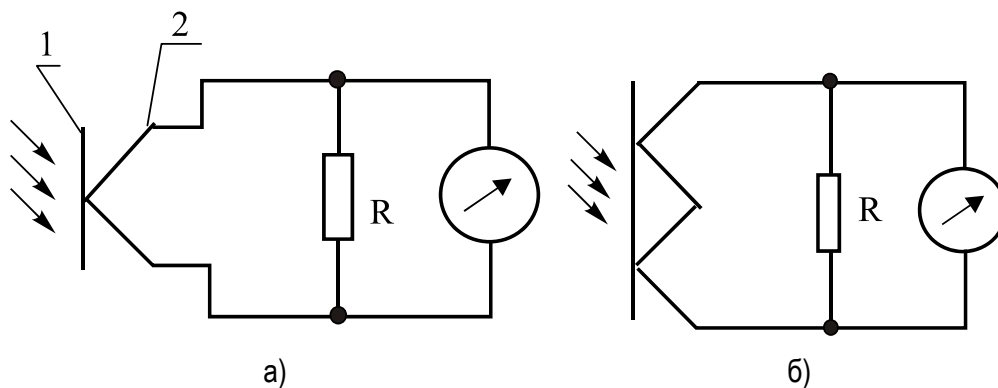


Рис. 26. Схемы включения:  
а — термопары (1 — зачерненная пластинка;  
2 — термопара) и б — термопар в батарею

Для небольших перепадов температур справедлива зависимость:

$$E_T = \alpha \Delta\theta,$$

где  $E_T$  — термоэлектродвижущая сила, В;

$\Delta\theta$  — перепад температур между спаями термопары, град;

$\alpha$  — коэффициент, характеризующий свойства спая, В/град.

В термоэлектрических приёмниках используют спаи константана с манганином, висмута с сурьмой или оловом, сплавы селенистого и сернистого серебра с добавлением меди и теллура. Термоэлектродвижущая сила современной термопары, помещенной в вакуум, достигает 500 мкВ на 1 °С перепада температур между «холодным» и «горячим» спаем термопары.

Для компенсации внешних воздействий на термоэлектрический приёмник излучения включают два одинаковых приёмника встречно-последовательно, один из которых является измерительным (И), а другой — компенсационным (К) (рис. 27).

Такие приборы в настоящее время в основном используются для измерения ИК-облученности.

Оба приёмника герметично закрыты полусферическими стёклами, поверх которых можно устанавливать полусферические оптические фильтры. Рабочие поверхности приёмников чернят специальным составом, что повышает их чувствительность и делает их равночувствительными к излучениям широкого диапазона длин волн.

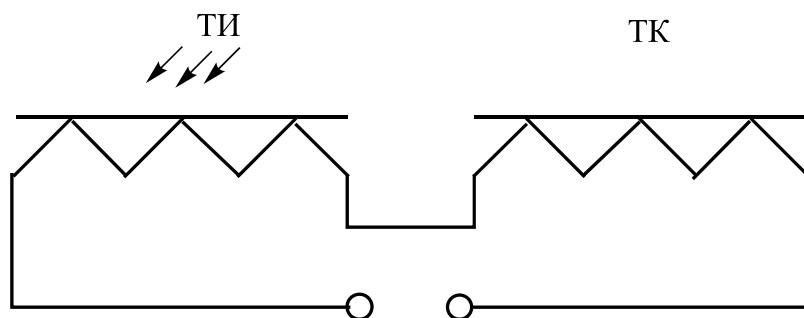


Рис. 27. Компенсированный термоэлектрический приемник:  
 ТИ — термоэлемент измерительный;  
 ТК — термоэлемент компенсационный

Чувствительность термоэлектрических приёмников излучения достигает 5 В/Вт.

Пиранометр Янишевского — наиболее распространённый прибор с практически неизбирательной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 300 до 2750 нм (рис. 28).

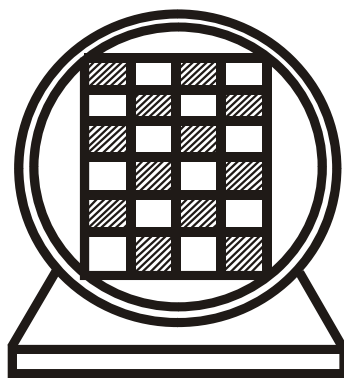


Рис. 28. Схема пиранометра Янишевского

Приёмником излучения пиранометра служит термоэлемент, защищённый стеклянной полусферой. Ток термоэлемента измеряется гальванометром типа ГСА-1 без предварительного усиления. Инерционность прибора не превышает 40 с. Термобатарея из манганина и константана из 28, 112 или 252 термопар. Все горячие спаи окрашиваются в черный, а холодные — в белый цвет в шахматном порядке. Все четные спаи соединены с белыми, а нечетные — с черными клетками.

При облучении термобатареи спаи, находящиеся под черными участками, нагреваются, а под белыми нет. Поэтому в цепи возникает ток.

В приборе ИКМ-71, служащего для измерения ИК-облученности в диапазоне 600-10000 нм, датчиком служит термоэлектрический приемник из 10 хромель-копелевых термопар.

Основные их недостатки те же, что и у болометра.

### 4.3. Фотоэлектрические приёмники

В этих приёмниках энергия оптического излучения непосредственно преобразуется в электрическую благодаря фотоэффекту.

В зависимости от механизма фотоэлектрического эффекта к таким фотоприёмникам относятся фотоэлементы с внешним фотоэффектом, с внутренним фотоэффектом и фотоэлементы с запирающим слоем (вентильные фотоэлементы).

#### *Фотоэлементы с внешним фотоэффектом*

Внешний фотоэффект проявляется в эмиссии электронов с поверхности катода при возбуждении их энергией оптического излучения.

Это фотоэлементы типа Ф, ЦГ, ФЭУ.

Ф — вакуумные фотоэлементы с двумя электродами: фотокатод и анод (рис. 29).

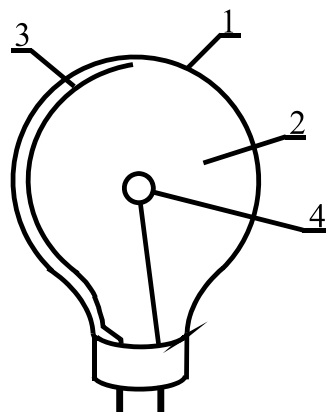


Рис. 29. Схема фотоэлемента с внешним фотоэффектом:  
1 — колба; 2 — вакуум;  
3 — фоточувствительный слой; 4 — анод

Сурьмяно-цезиевый, кислородно-цезиевый или висмута-цезиевый фотокатод наносится тонким слоем на колбу, а анод в виде кольца располагается в центре колбы.

В стеклянном или металлическом баллоне 1 имеется окно из кварцевого стекла, если необходимо измерить УФ-излучение или стекло, если его исключить. Обычно спектральная чувствительность таких приборов бывает от 200 до 3 000 нм.

Катоды фотоэлементов изготавливают из материалов, обладающих свойством поглощать оптическое излучение требуемого диапазона волн и испускать электроны под действием этого излучения. Существует красная граница фотоэффекта, когда энергия квантов с увеличением длины волны уменьшается и будет недостаточной для выбивания электронов из катода.

Фотоэлементы могут быть вакуумными и газонаполненными. В вакуумных фотоэлементах фототок определяется потоком электронов, покинувших катод под действием этого излучения. В газонаполненных фотоэлементах эти электроны разгоняются под действием электрического поля и ионизируют инертный газ, находящийся под давлением 10 Па. Фототок увеличивается примерно в два раза. Но он все равно мал, порядка  $10^{-6}$  А, поэтому его необходимо усиливать.

Примером газонаполненных фотоэлементов может служить ЦГ-4, заполненного аргоном при давлении 10 Па.

У таких приборов высокая чувствительность  $\approx 10^{-5}$  Вт, но мал электрический ток, который трудно измерить прибором, и возникает необходимость его усиления.

Выпускаются фотоэлементы Ф2...Ф32. Эти фотоэлементы отличаются друг от друга составом стекла, материалом катода, способом крепления катода.

Фотоэлементы применяются:

- 1) в устройствах автоматизации для регистрации быстро протекающих процессов (постоянная времени  $T \approx 10^{-10}$  с);
- 2) для управления освещением;
- 3) для счета деталей;
- 4) в биологии.

### **Фотоэлектрические умножители**

В этих приборах фототок усиливается благодаря вторичной электронной эмиссии (рис. 30).

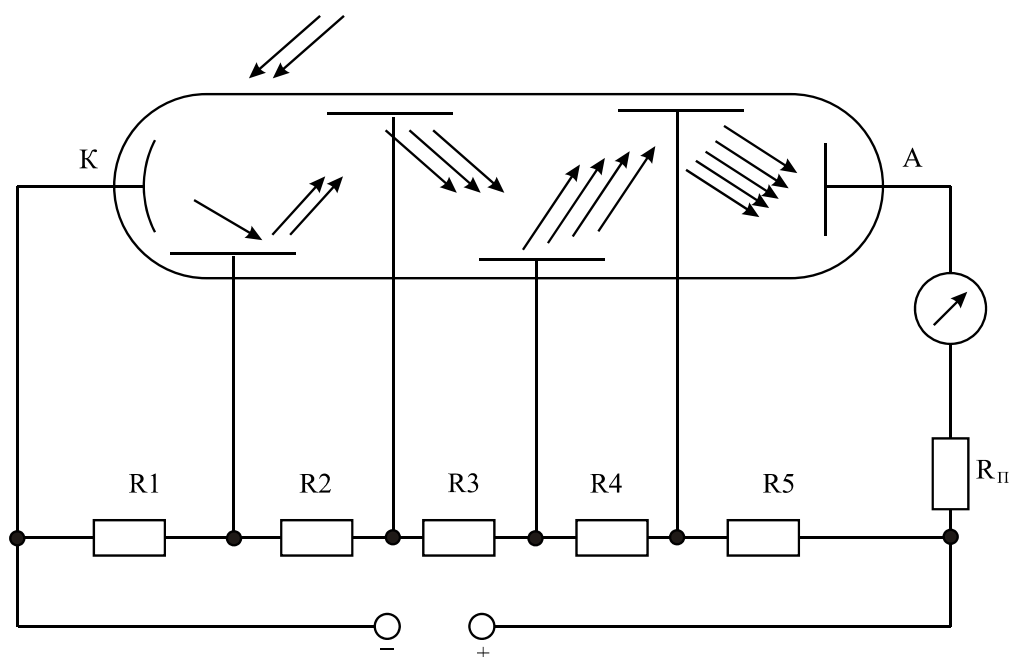


Рис. 30. Схема включения фотоумножителя

Кроме катода К и анода А, в колбе фотоумножителя размещены дополнительные электроды — диоды. Оптическое излучение поглощается катодом, испускающим под его действием электроны в вакуум-колбы. В электростатическом поле, создаваемом электродами, имеющими определённую конфигурацию и разность потенциалов по отношению друг к другу, электроны ускоряются и фокусируются на диноде. Электроны, имеющие за счёт ускорения достаточный запас энергии, выбивают из тела динода вторичные электроны, число которых в несколько раз превышает число первичных.

Коэффициент усиления многокаскадных фотоумножителей достигает  $10^7$ , чувствительность позволяет обнаруживать поток излучения мощностью  $10^{-12} \dots 10^{-15}$  Вт.

Фотоумножители применяются для регистрации и измерения излучений ультрафиолетовой и видимой частей спектра. Входное окно фотоумножителя изготавливают из сапфира, кварца, увиолевого стекла или других материалов с высокой прозрачностью в требуемом диапазоне длин волн.

Напряжение источника питания фотоумножителя достигает нескольких киловольт, что требует осторожности при работе с ним.

Примером могут служить ФЭУ-13, ФЭУ-131.

### ***Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом***

Внутренний фотоэффект проявляется в изменении проводимости материалов под действием оптического излучения — фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и т.д.

Фоторезисторы — полупроводники с сернистокадмиевым, селенистокадмиевым слоем и др.

Устройство фоторезистора показано на рисунке 31.

Под действием оптического излучения увеличивается проводимость полупроводниковых материалов.

Как известно, при нормальных условиях в полупроводниках имеются электроны, слабо связанные с ядром атома, и при воздействии какого-либо вида энергии могут освободиться от этой связи, создавая электрический ток.

Количество освобожденных электронов зависит от энергии кванта и от их количества, т.е. от освещенности. Чем больше освещенность, тем больше квантов, упавших на единицу поверхности, тем больше выбитых электронов и больше фототок.

При отсутствии напряжения количество освобожденных и рекомбинированных электронов равно. При появлении электрического поля часть электронов выйдет во внешнюю цепь, создавая электрический ток, другая часть будет рекомбинироваться.

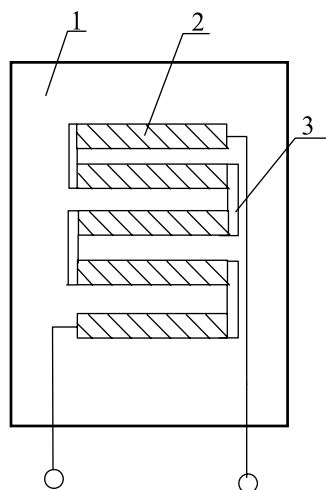


Рис. 31. Устройство фоторезистора:  
 1. — изоляционная подложка (стекло, керамика, пластмасса); 2 — фоточувствительный слой (кадмий, висмут, свинец); 3 — контактная сетка

Чем больше напряженность поля, тем больше электронов выйдет во внешнюю цепь и больше будет фототок. При достижении напряжения насыщения, например при освещенности  $E_1$ , все освобожденные электроны выйдут во внешнюю цепь и возникнет ток насыщения  $I_{нас}$  (рис. 32).

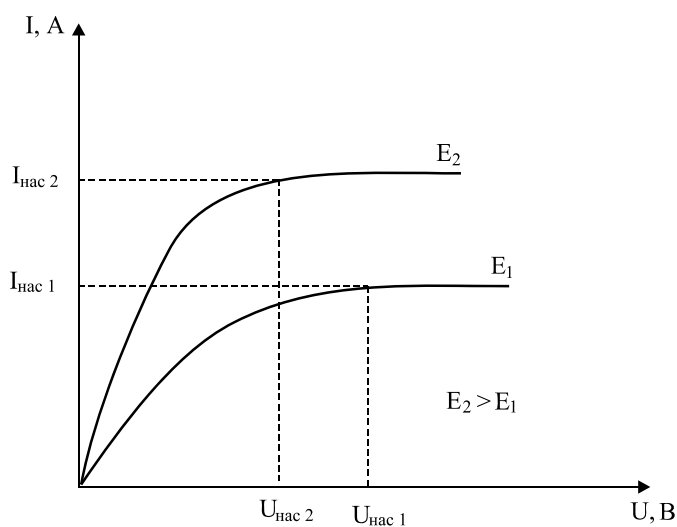


Рис. 32. Зависимость фототока от освещенности

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом обладают весьма высокой чувствительностью к излучениям ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной частей спектра. Порог чувствительности у них достигает  $10^{-11}$  Вт.

Недостатком является нелинейная зависимость фототока от облученности, ярко выраженная зависимость характеристик прибора от температуры, поэтому это затрудняет использование фотоэлементов с внутренним фотоэффектом для измерения оптического излучения.

### **Фотоэлементы с запирающим слоем (вентильные фотоэлементы)**

Действие фотоэлементов с запирающим слоем основано на явлении возникновения электродвижущей силы на  $p$ - $n$  переходе при воздействии на него оптического излучения.

При соединении полупроводника  $p$ -типа с полупроводником  $n$ -типа свободные электроны из  $n$ -слоя переходят в  $p$ -слой и на  $p$ - $n$ -переходе возникает разность потенциалов  $E_0$  (рис. 33).

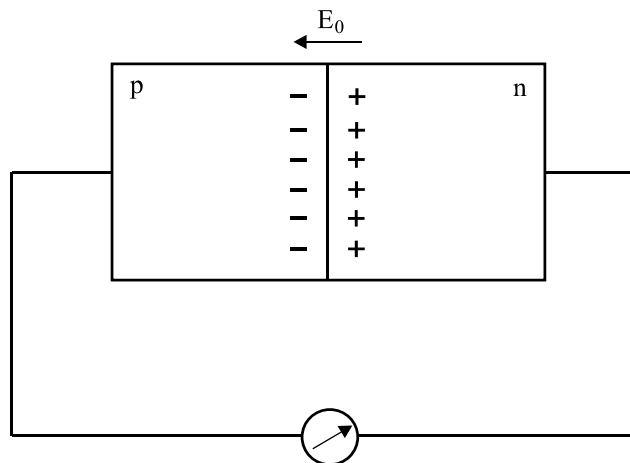


Рис. 33. Распределение зарядов на  $p$ - $n$ -переходе

При отсутствии освещенности фототок отсутствует, т.к. нет свободных носителей зарядов в  $p$ -слое. При освещении в  $p$ -слое освобождаются электроны и под действием поля напряженностью  $E_0$  начинают двигаться навстречу полю, создавая электрический ток, пропорциональный количеству освобожденных электронов. Конструкция вентильного фотоэлемента представлена на рисунке 34.

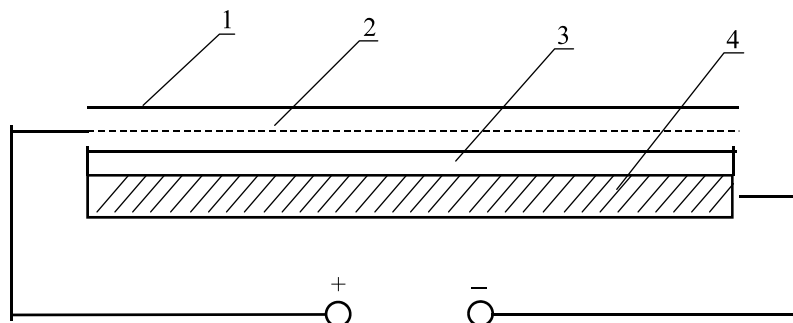


Рис. 34. Устройство вентильного фотоэлемента:  
1 — прозрачный защитный слой лака; 2 — прозрачный электрод в виде сетки (серебро, золото, платина) —  $n$ -тип; 3 — полупроводник (закись меди, сернистое серебро, селен) —  $p$ -тип; 4 — токопроводящая подложка

В настоящее время важное значение имеют кремниевые фотоэлементы, используемые в качестве солнечных преобразователей. Из таких элементов путем последовательного и параллельного соединений создаются солнечные батареи с КПД до 20% и мощностью до нескольких киловатт.

Достоинства вентильных фотоэлементов:

- не нуждаются в дополнительном источнике питания;
- обладают значительной чувствительностью;
- возможность подключения к измерительному прибору без предварительного усиления;
- любая мощность при последовательно-параллельном включении.

#### 4.4. Измерение силы света

Измерения производят при помощи оптической скамьи.

Оптическая скамья состоит из 2-х параллельных труб, на которых имеется шкала для определения расстояния. По скамье свободно перемещаются три каретки, на двух имеются патроны для ламп, а на средней — фотометрическая головка (рис. 35).

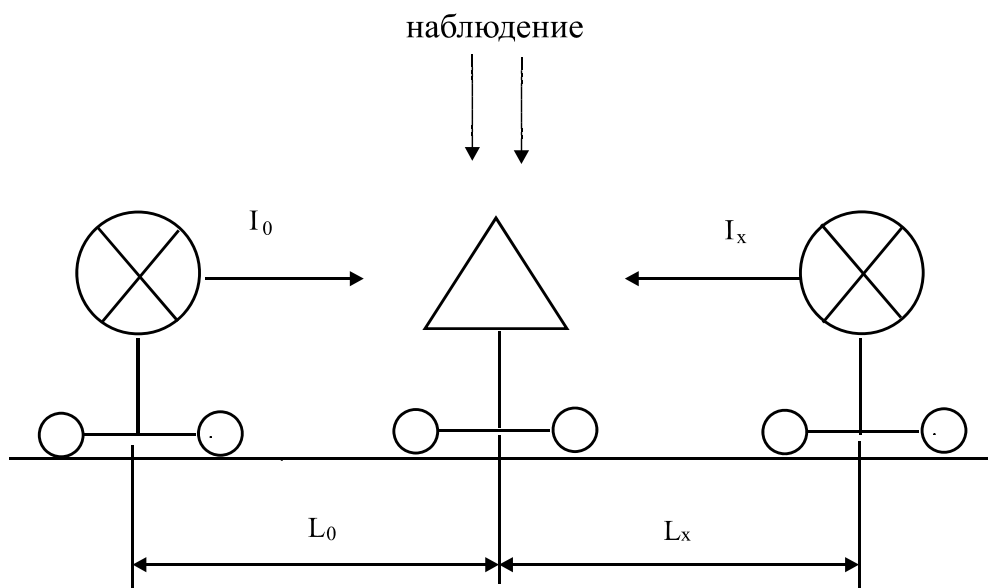


Рис. 35. Измерение силы света

Фотометрическая головка — равнобедренная призма, боковые поверхности которой покрыты серноокислым барием и имеют очень высокий коэффициент отражения. На каждой лампе, эталонной и исследуемой, поддерживается неизменное напряжение.

Используют стандартный источник света с известной силой света, равнобедренная призма и исследуемый источник света. Наблюдения производятся сверху.



Перемещением ламп или фотометрической головки добиваются равенства освещенностей:

$$E_0 = E_x;$$

$$E_0 = \frac{I_0 \cos \beta_0}{l_0^2}; \quad E_x = \frac{I_x \cos \beta_x}{l_x^2};$$

$$\frac{I_0 \cos \beta_0}{l_0^2} = \frac{I_x \cos \beta_x}{l_x^2}.$$

Так как призма равнобедренная, тогда

$$\beta_0 = \beta_x \quad \text{и} \quad I_x = \frac{I_0 l_x^2}{l_0^2}.$$

#### 4.5. Измерение светового потока

Для измерения светового потока служит шаровой фотометр — фотометрический шар.

Шаровой фотометр — полый шар, внутренняя поверхность которого окрашена белой, рассеянно отражающей свет, краской. Внутри шара размещается источник света, имеется отверстие, которое является частью шаровой поверхности (рис. 36).

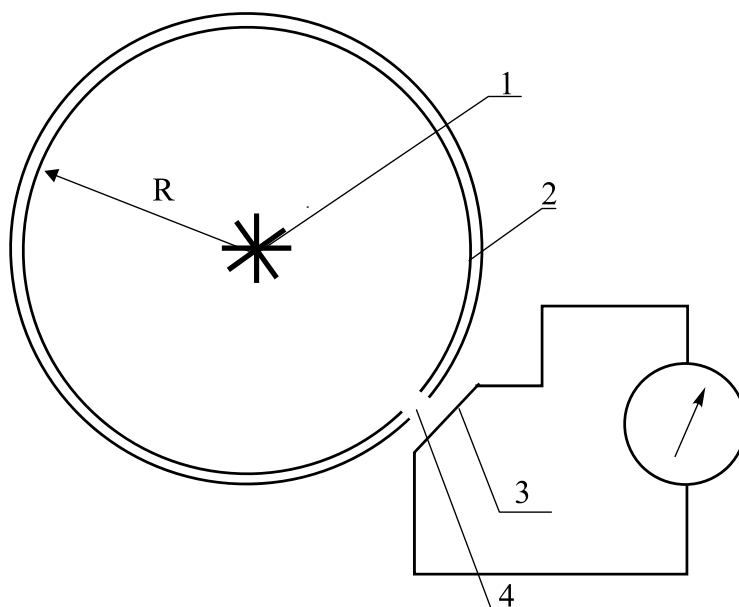


Рис. 36. Схема фотометрического шара  
1 — источник света; 2 — защитный экран;  
3 — молочное стекло; 4 — фотоэлемент

Освещенность можно выразить:

$$E = \frac{I \cos \beta}{R^2},$$

где  $R$  — радиус шара;

$\beta$  — угол между падающим лучом и нормалью к поверхности:

$$\beta = 0; \quad I = \frac{\Phi}{\omega}; \quad \omega = \frac{S}{R} = \frac{4\pi R^2}{R^2};$$

$$\Phi = I\omega = 4\pi R^2 E.$$

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Опишите конструкцию болометра.
2. Составьте схему включения болометра.
3. Принцип действия термоэлектрического приемника.
4. Каковы преимущества и недостатки болометра и термопары?
5. Что такое фотоэффект?
6. Устройство и принцип действия фотоэлемента с внешним фотоэффектом.
7. Каков принцип действия фотоэлектрического умножителя?
8. Опишите устройство фоторезистора.
9. Каково устройство и принцип действия вентильного фотоэлемента?
10. Как измерить силу света?
11. Измерение светового потока.

## 5. ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Классификация источников оптического излучения
- Закон Кирхгофа
- Закон Планка
- Закон смещения Вина
- Закон Стефана-Больцмана

### 5.1. Классификация источников оптического измерения

Источники оптического излучения делятся на *естественные* и *искусственные*. Естественный источник излучения — это солнце, все остальные относятся к искусственным источникам излучения.

Искусственным источником оптического излучения называется устройство, предназначенное для преобразования какого-либо вида энергии в энергию оптического излучения.

По физической природе искусственные источники оптического излучения подразделяются на тепловые и люминесцентные.

Первыми искусственными источниками ОИ были лучины, световой КПД которых составляет приблизительно 0,0001...0,0002%, световой КПД свечи — 0,001...0,002%, а керосиновой лампы — 0,04%.

В настоящее время наиболее распространены электрические источники оптического излучения. Классификация электрических источников ОИ представлена на рисунке 37.

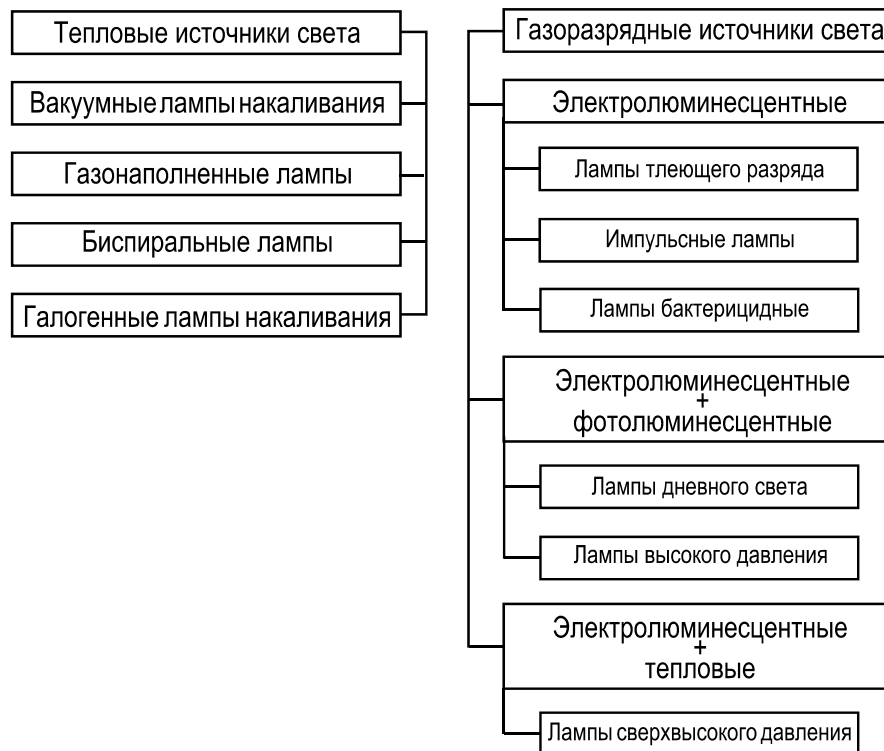


Рис. 37. Классификация электрических источников оптического излучения

*Электролюминесценция* — это оптическое излучение атомов и молекул жидких и твёрдых тел под действием ударов электронов (ионов), движущихся со скоростями, достаточными для их возбуждения.

В газоразрядных лампах, в лампах тлеющего разряда светятся атомы и молекулы под действием электронов, которые разгоняются под действием электрического поля в межмолекулярном промежутке.

*Фотолюминесценция* — это оптическое излучение, возникающее в результате поглощения телами квантов оптического излучения с меньшей длиной волны.

### ***Основные законы теплового излучения***

Тепловое излучение — излучение, возникающее в результате теплового движения молекул и атомов.

Температура — мера средней кинетической энергии молекул и атомов.

В процессе теплового движения атомы и молекулы, с большим запасом энергии, сталкиваются с атомами и молекулами, имеющими меньшее количество кинетической энергии, и передают им часть своей энергии. Последние увеличивают свою скорость и могут перейти в возбужденное состояние. Возвращаясь в исходное состояние, они излучают излишек энергии.

Излучение во внешнюю среду происходит с поверхности тел, так как внутри их кванты энергии поглощаются соседними атомами и молекулами.

Основные законы теплового излучения сформулированы для абсолютно черного тела. В качестве него принято тело, которое поглощает все падающие на него излучения (коэффициент поглощения  $\alpha = 1$ ) независимо от длины волны, угла падения, амплитуды и поляризации.

Под абсолютно черным телом излучения понимают такой излучатель, который способен создавать наибольший поток излучения по сравнению с другими излучателями при одинаковых условиях.

### **5.2. Закон Кирхгофа**

В 1859 г. Р. Кирхгоф установил связь между интегральной плотностью излучения и интегральным коэффициентом поглощения двух тел, имеющих одинаковую температуру:

$$\frac{M_1(T)}{M_2(T)} = \frac{\alpha_1(T)}{\alpha_2(T)}, \quad \frac{M_1(T)}{\alpha_1(T)} = \frac{M_2(T)}{\alpha_2(T)},$$

где  $M$  — излучательная способность, Вт/м<sup>2</sup>мкм;

$\alpha$  — поглощательная способность.

Излучают все тела, температура которых выше абсолютного нуля. Чем выше температура, тем большую тепловую энергию они излучают.

Если поместить в вакуум несколько тел, имеющих разную температуру, то тело, имеющее большую температуру, будет больше излучать, а менее нагретое тело будет больше поглощать. Тело, имеющее меньшую температуру, будет тоже излучать, но меньше энергии, а тело, имеющее большую температуру, будет эту энергию поглощать. Через некоторое время тела приобретут одинаковую температуру благодаря обмену энергией. Наступает тепловое равновесие, т.е. сколько тело излучает, столько же и поглощает. Из теплового равновесия следует, что два тела, обладающие одинаковой способностью к излучению, обладают одинаковой способностью и к поглощению.

$$\frac{M_1(T)}{M_2(T)} = \dots = \frac{M_n(T)}{M_m(T)} = \frac{\alpha_1(T)}{\alpha_2(T)} = \dots = \frac{\alpha_n(T)}{\alpha_m(T)}.$$

Он нашел, что отношение энергетических светимостей тел с одинаковой температурой равняется отношению их коэффициентов поглощения.

Равновесие между излучаемой и поглощенной энергиями должно выполняться и для каждой длины волны. Поэтому закон Кирхгофа для спектральной плотности излучения:

$$\frac{m_1(\lambda, T)}{m_2(\lambda, T)} = \frac{\alpha_1(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)},$$

$$\frac{m_1(\lambda, T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{m_2(\lambda, T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = \frac{m_{a.ч.м}}{1} = m_{a.ч.м}.$$

Отсюда следует, что отношение плотности излучения к коэффициенту поглощения для всех тел, имеющих одинаковую температуру, — величина постоянная, равная плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре.

### 5.3. Закон Планка

В 1900 году М. Планк установил зависимость спектральной плотности излучения от температуры.

Этот закон устанавливает распределение спектральной плотности излучения абсолютно чёрного тела в зависимости от температуры  $m(\lambda, T)$ , Вт/м<sup>2</sup>мкм (рис. 38):

$$m_{\lambda T} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)},$$

$$C_1 = 2\pi h C_0 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = \frac{hC_0}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К},$$

где  $h$  — постоянная Планка;

$C_0$  — скорость света в вакууме;

$k$  — постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

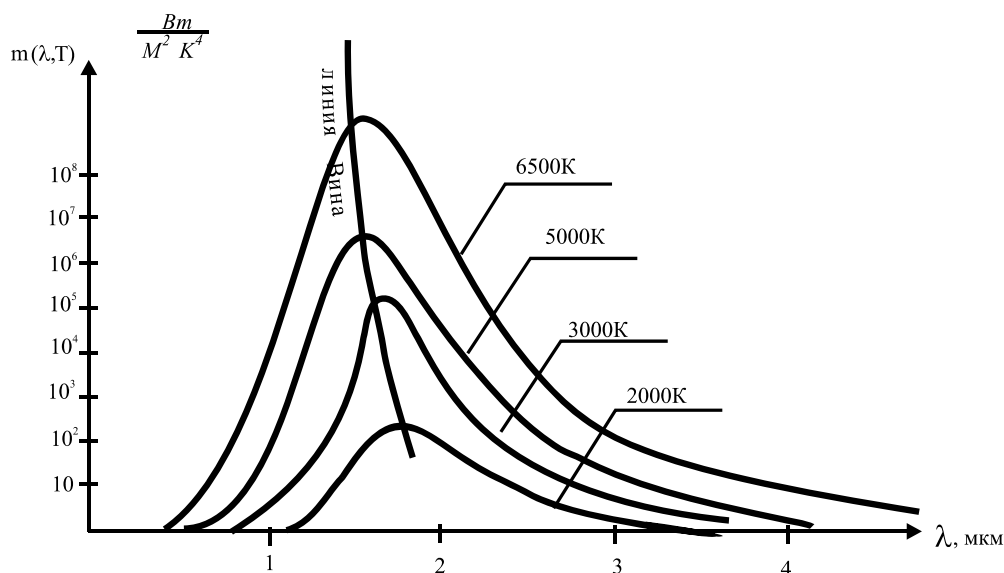


Рис. 38. Зависимость спектральной плотности излучения от температуры

Из рисунка можно сделать выводы:

- 1) с увеличением температуры излучающего тела максимум спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн;
- 2) с увеличением температуры тела излучения возрастает и поток излучения.

#### 5.4. Закон смещения Вина

Этот закон получается из уравнения Планка, если взять первую производную по длине волны и приравнять нулю (исследовать на экстремум).

На основании опытных кривых распределения спектральной плотности излучения по спектру чёрного тела получено аналитическое выражение, описывающее длину волны, на которую приходится максимум кривой при данной температуре:

$$\lambda_{\max} T = 2896 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

Это соотношение называется законом смещения Вина.

#### 5.5. Закон Стефана-Больцмана

Стефан (1879) и Больцман (1884) установили связь между интегральной плотностью излучения и температурой.

Интегральная плотность излучения пропорциональна четвёртой степени температуры для любого теплового излучателя  $M$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$M = \sigma T^4.$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  — постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$T$  — температура абсолютно чёрного тела, К.

Этот закон можно получить, если проинтегрировать по длинам волн закон Планка.

В природе нет абсолютно черных тел, есть тела серые — поглощательная способность которых ниже, чем излучательная, тогда мощность излучения можно выразить следующим образом:

$$\Phi = \zeta \sigma T^4 S,$$

где  $\zeta$  — степень черноты тела;

$S$  — площадь излучения, м<sup>2</sup>.

Световой КПД излучения чёрного тела:

$$\eta_c = \frac{\Phi_c}{\Phi},$$

где  $\Phi_c$  — световой поток, излучаемый телом;

$\Phi$  — интегральный поток излучения.

Важное значение в практической жизни имеет вопрос зависимости эффективного потока от температуры тела излучения.

Этот вопрос лучше всего рассмотреть относительно светового потока.

Энергетический КПД — отношение активного потока к интегральному:

$$\eta_9 = \frac{\int_{0,38}^{0,76} m(\lambda t) d\lambda}{\int_0^{\infty} m(\lambda t) d\lambda} = \frac{S_{\lambda_1 BC \lambda_2}}{S_{ABCD}} \quad \text{или} \quad \frac{\Phi_{\max}(\lambda) \int_{0,38}^{0,76} f(\lambda) k(\lambda) d\lambda}{\Phi_{\max}(\lambda) \int_0^{\infty} f(\lambda) d\lambda}.$$

Световой КПД — отношение светового потока к интегральному:

$$\eta_c = \frac{\int_{0,38}^{0,76} m(\lambda t) k(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} m(\lambda m) d\lambda}.$$

При повышении температуры излучения максимум спектральной плотности излучения стремится в сторону коротких волн, а значит, с повышением температуры световой КПД будет расти (рис. 39).

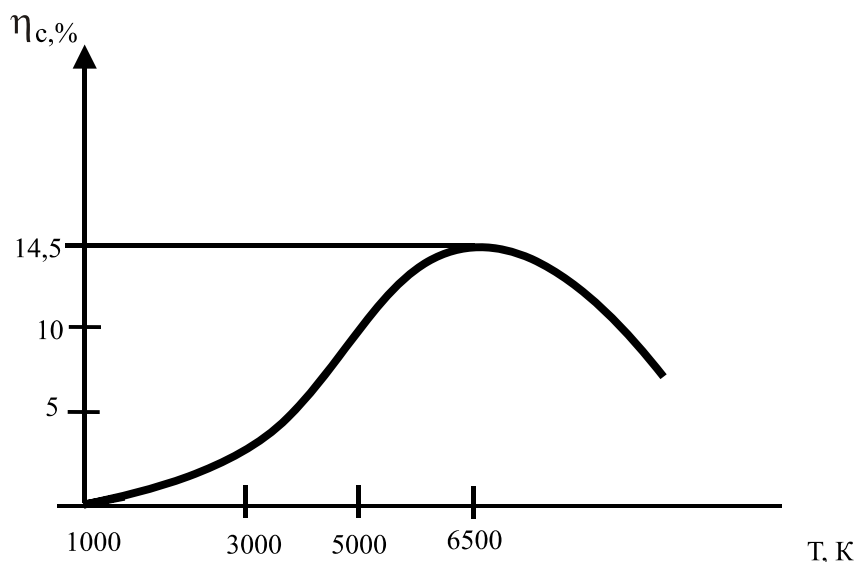


Рис. 39. Зависимость светового КПД от температуры тела излучения

Наибольшего значения (14,5%) световой КПД достигает при температуре абсолютно черного тела 6500 К, в этом случае максимум кривой спектральной плотности излучения будет находиться при максимуме спектральной чувствительности глаза человека. При дальнейшем увеличении температуры максимум смещается в сторону УФ-части спектра и световой КПД снижается.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Что такое искусственный источник оптического излучения? 2. Назовите классификацию электрических источников оптического излучения. 3. Что такое электролюминесценция, фотолюминесценция? 4. Запишите выражение закона Кирхгофа. 5. Нарисуйте зависимость спектральной плотности излучения от температуры. 6. Почему с увеличением температуры тела излучения максимум спектральной плотности излучения стремится в сторону коротких волн? 7. Почему световой КПД возрастает с увеличением температуры тела излучения? 8. Что такое температура? 9. Почему проводник нагревается при прохождении по нему тока?



## 6. ТЕПЛОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Основные этапы развития ламп накаливания
- Устройство ламп накаливания
- Классификация ламп накаливания
- Световые и электрические характеристики ламп накаливания
- Влияние отклонения напряжения сети на характеристики ламп накаливания
- Галогенные лампы накаливания
- Источники ИК-излучения, используемые в сельскохозяйственном производстве

### 6.1. Основные этапы развития ламп накаливания

В развитии лампы накаливания (ЛН) можно наметить несколько периодов:

I период (с 1800 до 1880 гг.) — создание ламп накаливания, телом накала которого служил уголь.

II период (с 1880 до 1890 гг.) — совершенствование лампы накаливания с угольным электродом с целью увеличения срока службы.

III период (с 1890 по 1900 гг.) — лампы накаливания с металлизированной угольной нитью.

IV период (с 1900 г. по наше время) — лампы накаливания с металлическим телом накала.

Опыты по получению света путем накаливания проводников электрическим током начались после открытия в 1800 г. теплового действия электрического тока. Особенно они стали интенсивными после того, как в 1801 г. Г. Генард (итальянец), занимаясь батареей Вольты, случайно замкнул «+» и «-» тонкой проволокой, которая нагрелась и засветилась.

В 1802 г. Г. Деви специально нагрел платиновую проволочку до 1700 °С.

В 1832 г. Джандус поместил угольную нить в колбу, из которой откачал воздух. Этот источник света проработал несколько часов.

В 1872 г. русский изобретатель А.Н. Ладыгин предложил работоспособную лампу накаливания. Он поместил угольный стержень в специальный баллон, из которого кислород удалялся за счет сгорания части угля. Оставшаяся часть угля работала относительно долго, излучая свет.

21 октября 1879 г. считается датой рождения лампы накаливания.

Т.А. Эдисон (резьбовая) и Г. Свэн (лампа со штырьками, как в автомашине) изобрели цоколь для лампы накаливания и впервые наладили серийное промышленное производство. В этих лампах в качестве тела накала служила угольная нить, полученная из тонких бамбуковых волокон, кроме этого, Эдисон ввел откачку воздуха.

С 1880 года до 1890 года происходило развитие ламп накаливания с угольным телом накала. Создаются лампы мощностью от 10 до 120 Вт и большим сроком службы (от 700 до 2 000 ч), но у этих ламп низкая световая отдача (2-3,5 лм/Вт).

С 1890 по 1900 гг. велись поиски увеличения светоотдачи ЛН путем металлизации угольной нити. Металлизация была сложной и для промышленного выпуска ламп накаливания успеха не имела.

В 1890 г. А.Н. Лодыгин усовершенствовал ЛН и предложил изготавливать тело накаливания из тугоплавкого металла.

В 1898 г. появились лампы накаливания с телом накала из осмия.

В 1902 г. — с телом накала из тантала.

В 1903 г. — с телом накала из вольфрама.

После освоения промышленностью в 1906-1909 гг. производства вольфрамовой нити путем протягивания через калиброванные отверстия началось серийное производство вакуумных ЛН с прямой нитью из вольфрама. Суммарный световой КПД их составлял около 1,2%. Срок службы этих ламп был небольшим из-за распыления тела накала.

В 1913 г. американец И. Ленгмюр предложил заполнять лампу накаливания инертным газом, а тело накала выполнять в виде спирали. Световой КПД составил 1,76%. Наполнение инертным газом позволило снизить высокотемпературное распыление вольфрама и увеличить срок службы лампы.

В 1934 г. появились газонаполненные лампы с биспиральным телом накала, что позволило увеличить КПД до 2%.

В 1936 г. появились биспиральные вольфрамовые лампы с криптоновым наполнителем.

В 1959 г. появились галогенные ЛН с КПД около 3%.

В настоящее время, несмотря на быстрое развитие газоразрядных ламп, лампы накаливания являются одним из самых распространенных источников света.

В настоящее время выпускается более 1 600 типоразмеров ламп накаливания и производство их продолжает расти, несмотря на решение правительства РФ прекратить их выпуск более 75 Вт с 2014 г.

Долголетие и массовость ламп накаливания обусловлена их преимуществами:

- относительно низкая стоимость;
- удобство в обращении, простота в обслуживании;
- малые капитальные вложения на оборудование осветительных установок;
- разнообразие конструкций и мощностей;
- высокий уровень механизации и автоматизации производства.

Недостатки ЛН:

- сравнительно низкая световая отдача (6...22 лм/Вт);
- мал срок службы (до 2 000 ч);
- не всегда приемлемая цветопередача;
- недостаточная механическая прочность.

## 6.2. Устройство ламп накаливания

Наиболее распространённый искусственный источник излучения — лампы накаливания. На долю видимого излучения приходится менее 10% потока, их световой КПД — 2...2,5%. Тем не менее, лампы накаливания в основном применяют для освещения в промышленности и сельском хозяйстве, в стационаре и на транспорте, в быту и для наружного освещения. Простота устройства и схемы её включения в сеть обеспечивают широкое применение.

Схематическое устройство лампы накаливания для целей общего освещения показано на рисунке 40.

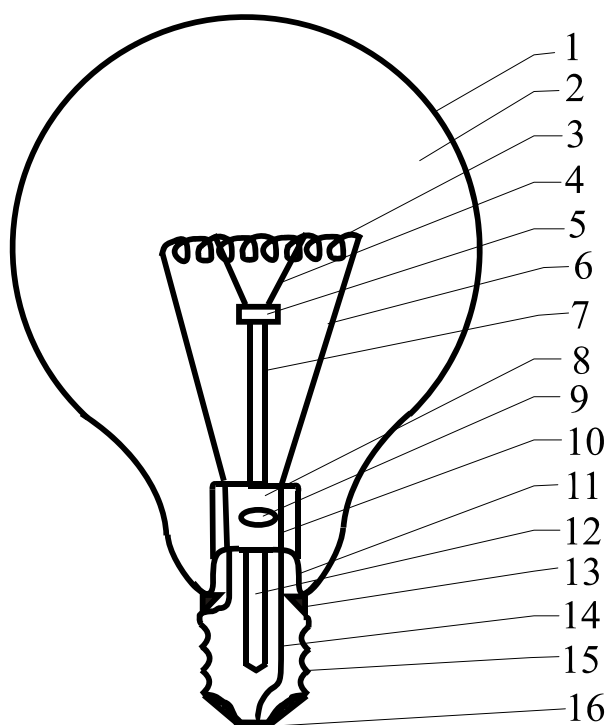


Рис. 40. Схематическое устройство лампы накаливания:

- 1 — колба лампы; 2 — смесь газов; 3 — тело накала; 4 — крючки;
- 5 — линзочка; 6 — электроды; 7 — штабик (стеклянный стержень);
- 8 — лопаточка; 9 — откачное отверстие; 10 — средняя часть электродов;
- 11 — тарелочка; 12 — откачная трубка; 13 — цоколевочная мастика;
- 14 — выводы лампы; 15 — цоколь; 16 — контактная пластина

У вакуумных ламп давление остаточных газов в колбе после откачки составляет  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  мм рт. ст., у газонаполненных ламп после откачки колба заполняется смесью инертных газов под давлением около 600 мм рт. ст.

К стеклу колбы лампы предъявляют следующие требования: легкое сваривание; постоянный коэффициент пропускания; достаточно высокая механическая прочность; термостойкость стекла.

Основной частью лампы накаливания является тело накала 3, выполненное из вольфрамовой проволоки, свитой в спираль, биспираль или триспираль. Тело накала изготавливают из вольфрама, обладающего высокой температурой плавления (3663 К) и высокой пластичностью, позволяющей получать из него проволоки весьма малых диаметров. Важным преимуществом вольфрама является также низкая скорость испарения. Молибденовые крючки 4 придают телу накала определенную форму, препятствующие его провисанию. Электроды 6 служат для подачи напряжения на тело накала лампы.

Подводящие электроды 6 делятся на три части:

- 1) внутренняя, соединенная с телом накала, выполняется из молибдена или платинида (сталь и 40...44% никеля), а у газонаполненных — из никеля или никелевой стали;
- 2) средняя часть, вплавленная в стекло, — наиболее ответственная часть. У этой части электрода коэффициент теплового расширения должен быть равен коэффициенту теплового расширения стекла. Выполняется из платинида для стекол платиновой группы или из молибдена для молибденовых стекол;
- 3) наружная 14, соединенная с цоколем лампы, выполняется обычно из меди.

Штабик 7 — стеклянный стержень, в верхней части которого имеется утолщение — линзочка 5, куда впаиваются крючки 4. Полый стеклянный цилиндр 11 с расширенной нижней частью (тарелкой) и опресованной верхней частью — лопаткой 8, в которой соединены штабик, электроды и откачная трубка 12 (называемая штенгелем). В лопатке продувается отверстие 9, через которое производится откачка лампы. Штабик с крючками, тарелка, электроды с телом накала и штенгель, собранные вместе, называется ножкой.

Цоколь лампы 15 — металлический стакан с резьбой, к которому припаян один из электродов. Второй электрод припаивается к латунной контактной пластине 16, скрепленной со стаканом цоколя с помощью стекломассы.

Цоколь специальной мастикой 13 соединяется с колбой лампы.

Обозначение цоколя ламп: S — плоские цоколи, В — штифтовые (для автомобилей), Е — резьбовые цоколи — Е (6, 14, 27, 40 мм).

Наполнение ламп накаливания газом (смесь аргона с азотом или смесь криптона с азотом) даёт возможность повысить рабочую температуру тела накала без уменьшения срока службы вследствие снижения скорости распыления вольфрама в газовой среде по сравнению с распылением в вакууме. Однако технологические трудности при изготовлении ограничивают применение только для ламп небольшой мощности. Лампы мощностью до 25 Вт изготавливают вакуумными.

### 6.3. Классификация ламп накаливания

Классификация ламп накаливания производится по двум признакам: *по назначению и по конструкции* (технологии изготовления).

Классификация ламп по назначению

1. Лампы общего назначения:

- лампы общего назначения (вакуумные, газонаполненные и галогенные);
- лампы местного освещения (лампы для освещения рабочих мест).

2. Лампы специального назначения:

- транспортные лампы (автомобильные, железнодорожные, судовые, самолетные и др.);
- лампы для сигнализации (миниатюрные, светофорные, маячные);
- лампы для оптических систем и приборов (кинопроекторные, для оптических приборов, прожекторные, лампы-фары);
- лампы для технологических целей (инфракрасные зеркальные лампы, галогенные лампы инфракрасного излучения, лампы для фотографии и др.);
- метеорологические лампы (светоизмерительные лампы силы света и светового потока, пирометрические лампы и др.);
- лампы для специальных светотехнических систем и установок (рудничные, для подводного освещения, для эксплуатации при высоких температурах и пр.).

В основе классификации по конструкции лежит принцип группировки ламп, которые можно изготавливать на однотипном технологическом оборудовании. Это, прежде всего, определяется размером и формой колб, от которых зависят размер и конструкция ножек, тела накала, вводов, тип цоколя, а значит, и характер соответствующего технологического оборудования.

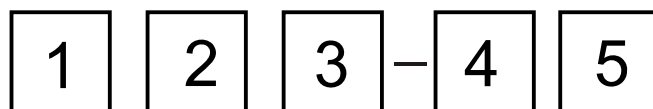
Классификация по конструктивно-технологическим признакам, мм:

- крупногабаритные:  $d > 80$ ;  $L > 175$ ;
- среднегабаритные:  $d = 40-80$ ;  $L = 75-175$ ;
- малогабаритные:  $d = 25-40$ ;  $L = 30-75$ ;
- миниатюрные:  $d = 5-20$ ;  $L = 10-30$ ;
- сверхминиатюрные:  $d < 5$ ;  $L < 10$ ;
- цилиндрические:  $d = 15-30$ ;  $L < 80$ ;
- лампы-фары;
- лампы-светильники;
- галогенные.

Лампы накаливания могут классифицироваться и по другим признакам, например по напряжению, мощности, по характеру среды, окружающей тело накала (вакуумные или газонаполненные).

Из приведённой классификации легко понять, как формируется основные требования к лампам накаливания. Прежде всего, определяется, к какому классу по назначению относится новая лампа, и полностью учитываются требования соответствующего потребителя. Затем стремятся так конструктивно выполнить лампу, чтобы она вошла в один из конструктивно-технологических классов. Первое позволяет создать лампу, полностью удовлетворяющую специфическим требованиям потребителя, а второе — использовать имеющееся технологическое оборудование для изготовления ламп, сократить затраты на организацию производства.

Маркировка ламп накаливания:



- 1) от одной до четырех букв, обозначает особенности лампы: В — вакуумная; Г — газонаполненная; Б — газонаполненная биспиральная; БК — биспиральная криптоновая; МТ — матированные колбы; МЛ — лампа из молочного стекла (стекло с добавками);
- 2) одна-две буквы, обозначает назначение лампы (может отсутствовать): А — автомобильная; Ж — железнодорожная; СМ — самолётная; ПЖ — прожекторная;
- 3) от 3-х до 6-ти цифр, обозначает номинальное напряжение, В;
- 4) через дефис — мощность лампы, Вт, или световой поток, лм, или сила света, кд;
- 5) порядковый номер разработки (может отсутствовать).

### *Принцип действия ламп накаливания*

Работа ламп накаливания основана на тепловом действии электрического тока, проходящего через тело накала.

Известно, что проводник — металл, который имеет в кристаллической решетке свободные электроны.

Приложенное напряжение в проводнике создаёт электрическое поле напряженностью без учета диэлектрических свойств

$$\vec{E} = \frac{U}{l},$$

где  $l$  — расстояние между электродами.

Под действием поля на электроны действует сила, которая заставляет их двигаться с ускорением  $a$ :

$$\vec{F} = \vec{E}q = m\vec{a}.$$

Таким образом, электрическое поле совершает работу по увеличению кинетической энергии электрона на длине свободного пробега между электродами:

$$A = \vec{F}\lambda = \frac{m\vec{v}^2}{2},$$

где  $\lambda$  — длина свободного пробега;

$m$  — масса электрона.

Встречая на своем пути атомы кристаллической решетки, разогнавшиеся электроны отдают им часть своей энергии. Атомы получают энергию, которая идет: 1) на увеличение скорости движения атома в кристаллической решетке, а это означает, что температура проводника возрастает; 2) на увеличение внутренней энергии атома, атом возбуждается и его внешние электроны переходят на более высокие энергетические уровни. В этом состоянии они находятся  $10^{-8} \dots 10^{-5}$  с, после чего атом, переходя в нормальное состояние, излучает излишек энергии в виде кванта:

$$W = h\frac{c}{\lambda}.$$

Чем выше напряжение, тем выше напряженность поля и сила, действующая на заряд, тем большая скорость свободных электронов, тем сильнее удар и больше переданной энергии, тем сильнее возбуждение атома и излучаются кванты с большей энергией и с меньшей длиной волны:

$$U \uparrow \Rightarrow \vec{E} \uparrow \Rightarrow \vec{F} \uparrow \Rightarrow \frac{mv^2}{2} \uparrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow C \Rightarrow W \uparrow \Rightarrow \lambda \downarrow.$$

В этом суть закона смещения Вина.

Распределение энергии в лампе накаливания следующее (табл. 4).

Таблица 4. Распределение энергии в лампе накаливания

Тип лампы	Потери на конвекцию, %	Потери на теплопередачу, %	Потери на ИК-излучение, %	Излучение в видимой зоне, %
В	—	7	86	7
Г	19	3	68	10
Б	12	2	74	12
БК	9	2	76	13

#### **6.4. Световые и электрические характеристики ламп накаливания**

Основной характеристикой является температура тела накала. Как следует из основных законов теплового излучения, важнейшие показатели работы лампы накаливания (спектральный состав излучения, поток излучения, КПД и др.), при прочих равных условиях, зависят только от температуры излучающего тела. Однако добиться повышения эффективности ламп накаливания только путём повышения температуры накала непросто, так как нагревание тела накала сопровождается его распылением. Интенсивность процесса распыления резко возрастает с повышением температуры нагрева, что в свою очередь приводит к резкому снижению срока службы лампы накаливания.

При тех значениях температуры, до которых обычно нагревается тело накала (у вакуумных (В) — 2400 К, у газонаполненных (Г) — 2900...3000 К), повышение её на 1% увеличивает скорость распыления вольфрама примерно в два раза.

*К электрическим характеристикам* ламп накаливания относят:

- номинальное напряжение — это напряжение, при котором лампа предназначена к работе. Выпускаемые промышленностью лампы накаливания имеют различные значения номинального напряжения от 1 до 220 В, в зависимости от типа и назначения;
- электрическая мощность — это мощность лампы накаливания, которая указывается как средняя величина для номинального напряжения при регламентируемых соответствующими стандартами о допусках. Промышленность выпускает лампы накаливания мощностью от долей ватта до нескольких киловатт.

#### ***Световые характеристики ламп накаливания***

1. *Световой поток* — основная величина, которая указывается в паспорте для номинального напряжения и зависит от мощности лампы, температуры тела накала. В процессе эксплуатации световой поток снижается вследствие испарения тела накала, уменьшения сечения нити и увеличения её сопротивления, что приводит к снижению тока и температуры тела накала, а значит, к смещению спектра излучения в сторону длинных волн и светового потока к снижению. Кроме того, испарившиеся атомы оседают на стенках колбы, что является затеняющим предметом.

Допускается снижение светового потока на 5...10%, а для ламп, прогоревших 75% срока службы, снижение допускается на 15 ...20%.



2. *Светоотдача*  $H_c$ , лм/Вт, — одна из основных характеристик, определяющих экономичность ламп накаливания, зависит от температуры, площади излучения и диаметра тела накала:  $H_c = \frac{\Phi_c}{P}$ .

У ламп с криптоновым наполнителем светоотдача увеличивается на 11...13% (табл. 5).

Таблица 5. Световая отдача ламп накаливания, лм/Вт

Наименование	Отдача ЛН
Танталовая нить	7
Вольфрамовая нить (вакуум)	8,5
Вольфрамовая спираль	10
Биспираль (аргон)	12,8
Биспираль (криптон)	13,9
Вольфрам при температуре плавления	53
Чёрное тело ( $T = 6\ 500\ K$ )	87,5

Лампы накаливания большей мощности и меньшего напряжения, при прочих равных условиях, имеют большую световую отдачу. Биспиральная лампа накаливания мощностью 40 Вт, рассчитанная на напряжение 125...135 В, имеет световую отдачу 12,3 лм/Вт, а лампа того же типа и напряжения, но мощностью 1000 Вт, имеет световую отдачу 19,1 лм/Вт. Обыкновенные лампы накаливания обладают световой отдачей 20...22 лм/Вт.

3. *Световой КПД*  $\eta_c$  — это отношение светового потока лампы к ее мощности

$$\eta_c = \frac{H_c}{680} = \frac{\Phi_c}{680P}$$

Существует ряд проектов повышения КПД ламп. Однако в настоящее время в основном значение светового КПД не превышает 2...3%, для лучших ламп достигает 5%.

4. *Срок службы* — это средняя продолжительность горения всех типов ламп накаливания общего назначения:

- 127, 220 В — 1 000 ч.,
- 230-240 В, 235-245 В — 2 500 ч.

При этом после 1000 ч. горения ламп накаливания световой поток должен составлять 80% первоначального значения.

### 6.5. Влияние отклонения напряжения сети на основные показатели ламп накаливания

При изменении напряжения в сети, к которой присоединена лампа накаливания, изменяются ток, протекающий по нити накала, температура нагрева, сопротивление и мощность, рассеиваемая нитью в окружающее пространство. Следствием этого будет изменение яркости нити накала, светового потока, световой отдачи и срока службы лампы (рис. 41):

$$I = I_H \left( \frac{U}{U_H} \right)^{0,53} ; \quad H = H_H \left( \frac{U}{U_H} \right)^{2,14} ;$$

$$P = P_H \left( \frac{U}{U_H} \right)^{1,63} ; \quad \Phi = \Phi_H \left( \frac{U}{U_H} \right)^{3,67} ; \quad \tau = \tau_H \left( \frac{U}{U_H} \right)^{-14,8} .$$

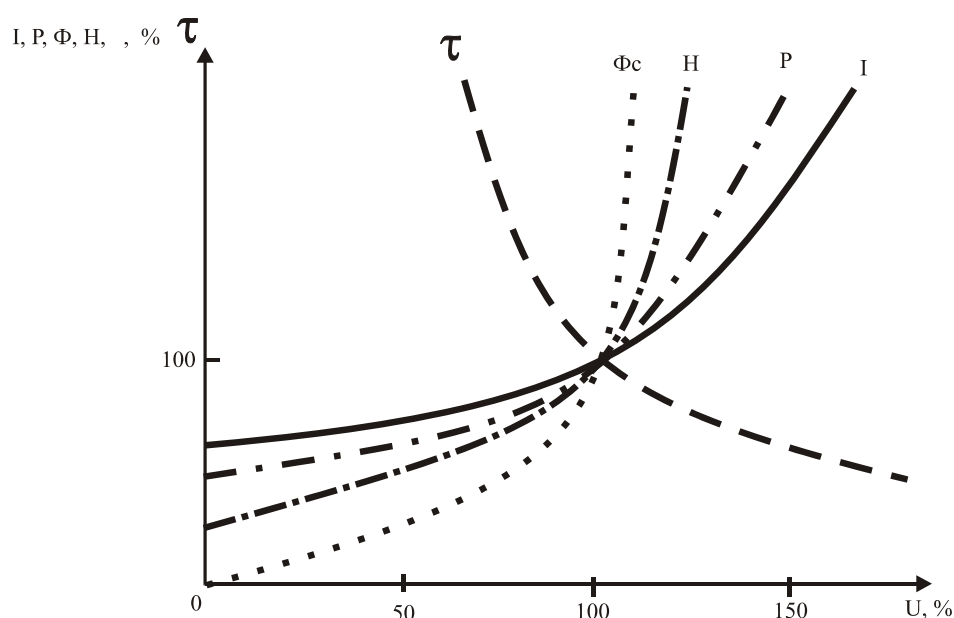


Рис. 41. Зависимость характеристик ламп накаливания от напряжения сети

### 6.6. Галогенные лампы накаливания

Основными недостатками лампы накаливания являются низкая светоотдача — до 20 лм/Вт, неудовлетворительный спектральный состав излучения, чрезмерная яркость, низкий КПД.

Увеличить КПД и светоотдачу можно путем увеличения температуры тела накала, вследствие чего произойдет смещение максимума спектральной плотности излучения в сторону коротких волн и увеличится доля активного и эффективного потоков. Однако увеличение температуры тела накала приведет к интенсивному распылению вольфрама и резкому сокращению срока службы.

Для снижения распыления тела накала применяют йодный цикл. В колбу лампы добавляют йод. Образующиеся в результате распыления тела накала атомы вольфрама движутся от нити к стенке колбы лампы, где вступают в химическое соединение с йодом, образуя йодистый вольфрам  $WJ_2$ . При температуре колбы, превышающей 500 К, йодистый вольфрам остаётся в парообразном состоянии и постепенно диффундирует к нити лампы. В зоне нити лампы (при температуре выше 1 500 К) йодистый вольфрам разлагается на вольфрам и йод; атомы вольфрама осаждаются на нити накала, а атомы йода вновь возвращаются к стенкам колбы. При таком непрерывном цикле происходит восстановление вольфрамовой нити, что позволяет повысить температуру тела накала, светоотдачу и приводит к увеличению срока службы ламп. Йодистый вольфрам  $WJ_2$  может образовываться при температуре 250...1600 °С, поэтому конструктивно галогенные лампы накаливания изготавливаются из длинной узкой кварцевой трубки (рис. 42).

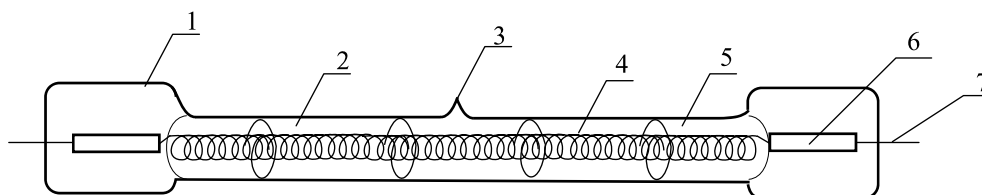


Рис. 42. Схематическое изображение галогенной лампы накаливания

Колба 1 лампы выполнена в виде трубки из кварцевого стекла, по оси которой располагаются тело накала в виде одинарной или двойной спирали 4. Выводы в кварц изготовлены из полосок молибденовой фольги 6, запрессованной в сплюснутые концы кварцевой трубки. Внутренняя часть электродов состоит из вольфрама, внешние выводы — из стали или меди. В лампах большой мощности, имеющих длинную спираль, для устранения ее провисания применяются вольфрамовые подпорки 2.

Для откачки, вакуумной обработки и наполнения лампы в средней части трубки колбы припаявается штенгель из кварцевого стекла, после запайки которого остаётся носик 3.

Внутреннее пространство лампы 5 заполняется инертным газом — аргоном, ксеноном или криптоном с добавлением определённого количества йода.

#### Преимущества ГЛН

По сравнению с обычными лампами накаливания галогенные лампы имеют:

- более стабильный во времени световой поток;
- большой срок службы (2 000 ч);
- меньшие размеры;
- большую механическую прочность, что позволяет наполнять лампу ксеноном и получать на этой основе большую светоотдачу и КПД.

Недостатки ГЛН:

- работа только в горизонтальном положении;
- более высокая стоимость, т.к. необходимо использовать кварцевое стекло и особо чистый вольфрам;
- более частые вольфрамовые поддержки.

Эффективность ламп накаливания повышена применением йодного цикла.

### ***Типы и маркировка галогенных ламп накаливания***

Галогенные лампы накаливания классифицируются по применению и конструктивному исполнению. Применяются:

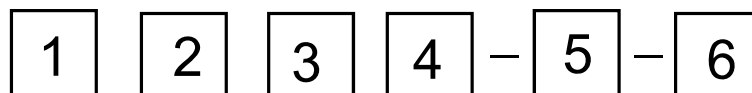
- для прожекторного и общего освещения;
- для инфракрасного облучения;
- для освещения в кино-, теле- и фотостудиях;
- автомобильных фарах;
- в оптических приборах.

По конструктивному исполнению галогенные лампы накаливания делятся на 2 группы: 1 — с длинным спиральным телом; 2 — с компактным телом накала.

В первом случае отношение длины лампы к диаметру более 10 ( $L/d > 10$ ); во втором —  $L/d < 8$ .

Обозначение:

- 1) одна буква К — кварцевая (материал колбы, трубки);



- 2) одна буква — вид галогенной добавки (И-йод, Г-галоген);
- 3) одна буква — область применения или конструктивная особенность (О — облучательная, М — мелогобаритная);
- 4) три цифры — напряжение, В;
- 5) три-пять цифр — мощность, Вт (может быть I, А; Ф<sub>с</sub>, Лм; и т.д.);
- 6) номер разработки.

### ***Перспективы совершенствования ЛН***

Резервы совершенствования ламп накаливания очень велики: об этом говорит то, что КПД современных ламп накаливания составляет 2...5%, а теоретический — 14,5%.

Каковы же пути увеличения светоотдачи и КПД ламп накаливания?

1. Поиск новых материалов для тела накала, которое имело бы более высокую температуру, а следовательно, более высокую светоотдачу и КПД.
2. Создание новых материалов для оболочек стекла.

3. Уменьшение потребления энергии без изменения температуры тела накала и светового потока путем рационального использования ИК части излучения. Для этого создаются пленочные экраны на колбе лампы, пропускающие видимое излучение и отражающее ИК-излучение на спираль. В этом случае светоотдача увеличивается на 15...30%.

4. Заполнение ламп вместо аргона и азота криптоном, что позволяет увеличить светоотдачу на 11...13%.

### **6.7. Источники ИК-излучения, используемые в сельскохозяйственном производстве**

ИК-излучение в сельскохозяйственном производстве используется во многих технологических процессах:

- 1) для обогрева молодняка животных и птиц;
- 2) для сушки с.-х. продуктов и лакокрасочных покрытий;
- 3) для дезинсекции зернопродуктов;
- 4) для пастеризации молока, соков и т.д.

*Светлые* источники ИК-излучения — лампы накаливания с температурой тела накала 2 200...2 500 К. Максимум спектральной плоскости излучения находится в области 1...1,4 мкм — это инфракрасные зеркальные лампы.

ИКЗК 220-250, ИКЗК 220-500 и ИК-галогенные ЛН-КГ 220-1000-1.

У этих ламп часть внутренней поверхности покрыта слоем алюминия с коэффициентом отражения 0,9, нижняя часть этих ламп покрыта красным простым лаком для снижения светового потока.

Срок службы ламп — до 5000 ч.

*Темные* источники ИК-излучения — лампы с температурой тела накала 600...1 000 °С, максимум спектральной плотности излучения  $\lambda_{\text{макс}} = 1,4...10$  мкм.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите основные этапы совершенствования лампы накаливания. 2. Назовите основные детали лампы накаливания. 3. Укажите основные причины снижения светового потока лампы накаливания. 4. Назовите мероприятия, снижающие распыление тела накаливания. 5. Объясните, почему лампы с биспиралью имеют более высокую светоотдачу. 6. Почему светоотдача и световой КПД лампы накаливания с увеличением напряжения сети возрастает? 7. Как электрическая энергия в лампе накаливания преобразуется в световую? 8. Как влияет напряжение сети на световые характеристики ламп накаливания? 9. Назовите преимущества галогенной лампы накаливания. 10. Почему светоотдача галогенных ламп выше? 11. Назовите перспективы совершенствования ламп накаливания.

## 7. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Электрический разряд в газах и парах металлов
- Условия зажигания и стабилизации дугового разряда
- Влияние вида балластного сопротивления на работу газоразрядных ламп

### 7.1. Электрический разряд в газах и парах металлов

Одним из путей повышения эффективности источника света является применение электрического разряда в газах и парах металлов.

В нормальном состоянии газы являются изолятором и в них отсутствуют носители тока — электроны и ионы. При создании особых условий в них могут появляться заряды и тогда может возникнуть разряд.

Разряд может быть несамостоятельным и самостоятельным. Несамостоятельный разряд появляется тогда, когда имеется внешнее воздействие и заряды появляются не под действием поля, а, например, под действием высокой температуры, космического излучения, радиации земли или ионизирующего излучения.

Если же заряды появляются под действием электрического поля, то разряд называется самостоятельным.

Характер газового разряда в этом случае зависит от многих факторов: от температуры и давления газа, от химической природы газов и электродов; от расположения электродов, их формы и размеров; от напряженности поля в газовом промежутке.

Вспомним из курса физики процессы, происходящие при электрическом разряде в газе, на примере баллона, заполненного газом с двумя электродами (рис. 43). Из баллона откачаем газ до давления 10 Па.

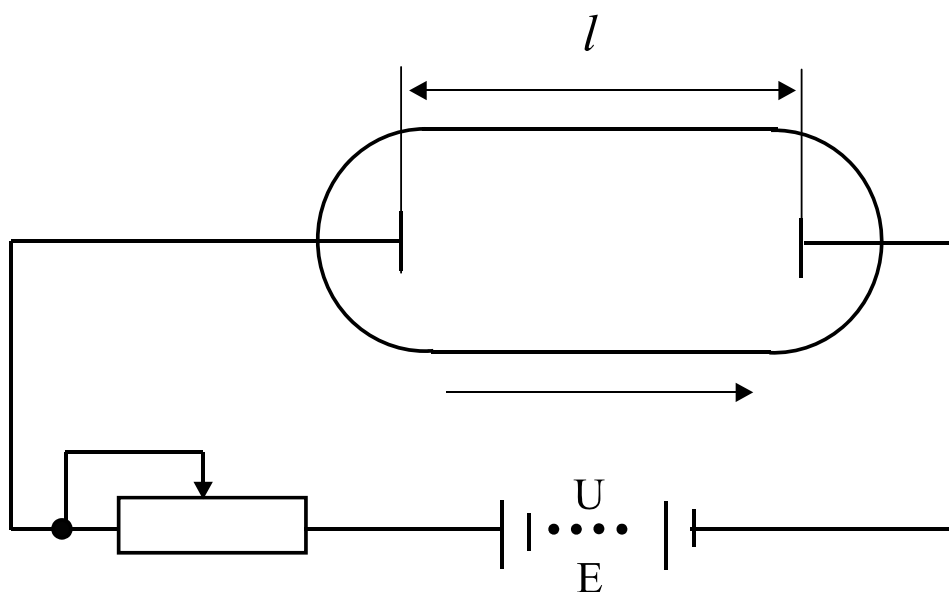


Рис. 43. Схема включения газоразрядной лампы

К электродам приложено напряжение от батареи с ЭДС  $E$ . В разрядном промежутке существует небольшое количество ионов под действием космического излучения, радиации земли и других воздействий. Если напряжение на электродах лампы  $U = 0$ , то образованные ионы и электроны рекомбинируют и ток равен нулю. Если напряжение выше нуля, то появляется напряженность поля  $\vec{E} = \frac{\vec{U}}{l}$  и на заряды будет действовать сила  $\vec{F} = \vec{E}q = m\vec{a}$ . Заряды начнут перемещаться ускоренно — электроны навстречу полю, а положительные ионы — в направлении поля. Из-за различия в массах скорость электронов будет выше, чем положительных ионов, и электронный ток будет больше, чем ионный. Общий ток будет равен сумме этих токов, т.к. заряды перемещаются навстречу друг другу. Вследствие того, что из разрядного промежутка в единицу времени уходит больше электронов, чем ионов, то в приборе образуется объемный положительный заряд.

При движении электронов к аноду, а ионов к катоду возможны их взаимодействия с молекулами газа. Характер этих взаимодействий во многом зависит от скорости электронов и ионов. Молекулы газа, электроны и ионы, как известно, участвуют в двух движениях — хаотическом (тепловом), с некоторой средней скоростью  $u \approx 10^5$  м/с, и упорядоченным под действием поля  $\vec{E}$ , со скоростью  $v \ll u$ . Скорость хаотического движения определяется формулой

$$\frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

где  $m$  — масса молекулы;

Электрон между двумя последовательными столкновениями проходит в среднем путь  $\lambda$  — длина свободного пробега. И поле совершает работу

$$A = qEl_F,$$

где  $l_F$  — путь частицы под действием силы  $F$  (рис. 44).

В процессе перемещения электрона поле совершает работу, в результате чего скорость его возрастает. Если скорость электрона невелика, то происходит упругое столкновение с молекулой газа, в результате чего энергии частиц практически не изменяются, т.е. электрон отскакивает от молекулы, как мяч от стенки.

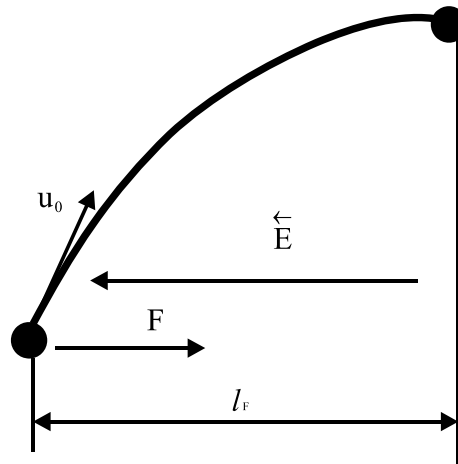


Рис. 44. Схема движения заряда в электрическом поле

При большей скорости электрона возможно неупругое столкновение, в результате которого изменяются скорости частиц и изменяется внутренняя энергия хотя бы одной из них. Если изменилась энергия атома, то он, увеличивая свою скорость, может перейти в возбужденное состояние или даже ионизироваться. Увеличение скорости приводит к увеличению температуры. В возбужденном состоянии атом может находиться порядка  $10^{-8}$  с, а потом переходит в обычное состояние, испуская излишек энергии в виде кванта. Необходимо помнить, что в разреженном газе, когда длина свободного пробега велика и при достаточно большой напряженности поля, работа поля может быть больше энергии, передаваемой в среднем молекуле при каждом столкновении. В результате энергия хаотического движения электронов быстро растет, и доля энергии, передаваемой при каждом столкновении, будет также расти и может достичь энергии возбуждения или ионизации. Чаще всего энергию, необходимую для ионизации, электроны приобретают не за один свободный пробег, а постепенно накапливают за несколько пробегов.

В процессе ионизации образуются новые электроны, которые, в свою очередь, разгоняются и участвуют в процессе объемной ионизации. Таким образом, по мере приближения к аноду число электронов лавинообразно растет (рис. 45). Положительные ионы, попадая на катод, выбивают из него новые электроны, которые могут участвовать в процессе ионизации. В результате образуется лавина заряженных частиц.

Однако не все образующиеся электроны и ионы достигают электродов. При встрече положительного иона с электроном может произойти рекомбинация, в результате которой образуется нейтральный атом, а излишек энергии излучается в виде кванта.

Различают четыре вида электрического разряда в газе — тихий, нормально тлеющий, аномально тлеющий и дуговой разряд.



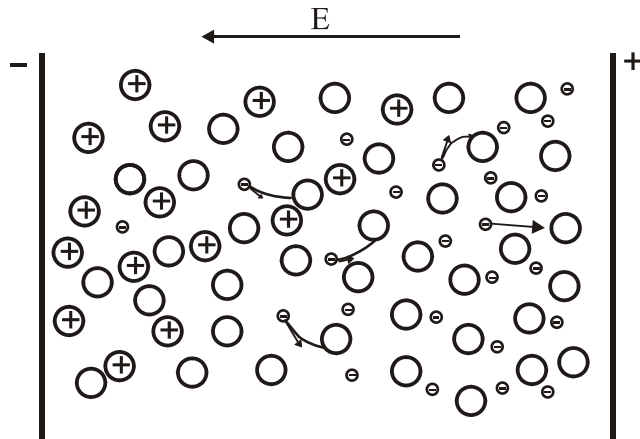


Рис. 45. Механизм образования ионов

Рассмотрим эти виды разрядов на примере лампы с давлением  $(5...6)10^3$  Па, которое будем уменьшать.

Если все вышеперечисленные факторы, влияющие на характер разряда, будут постоянными, за исключением напряжения, приложенного к электродам, то процессы, происходящие в разрядном промежутке, можно охарактеризовать вольт-амперной характеристикой (рис. 46).

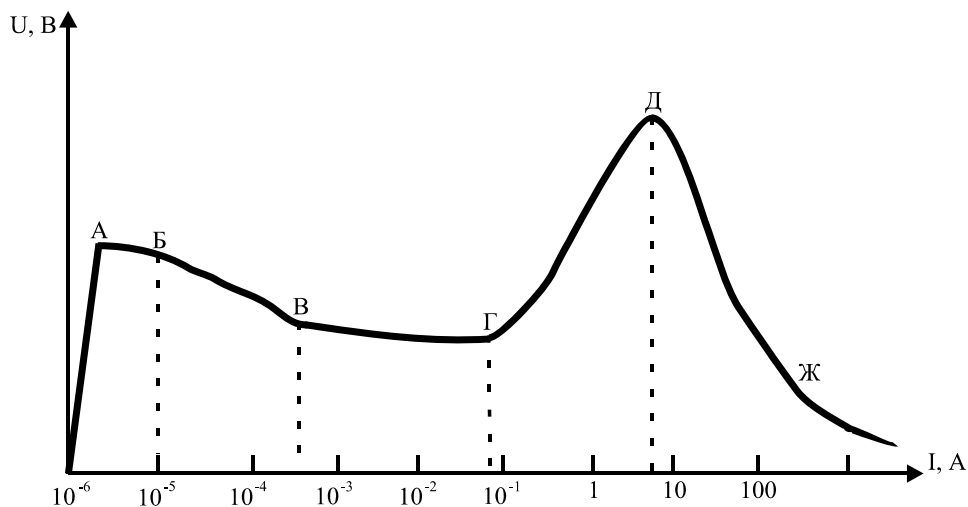


Рис. 46. Вольт-амперная характеристика разряда

Область АБ — тихий разряд или начало самостоятельного разряда — характеризуется очень малым количеством ионов. Здесь в основном происходит ионизация, свечение отсутствует. По мере увеличения тока тихий разряд переходит в тлеющий — область ВГ — и газ начинает светиться. В переходной области БВ, начиная с точки Б, начинается эмиссия электронов с катода под воздействием ударов ионов, количество электронов увеличивается и происходит более интенсивная ионизация газа и проводимость увеличивается. При тлеющем разряде (область ВГ) все процессы стабилизируются. У катода появляется положительный объемный заряд и газоразрядный промежуток разбивается на несколько участков (рис. 47).

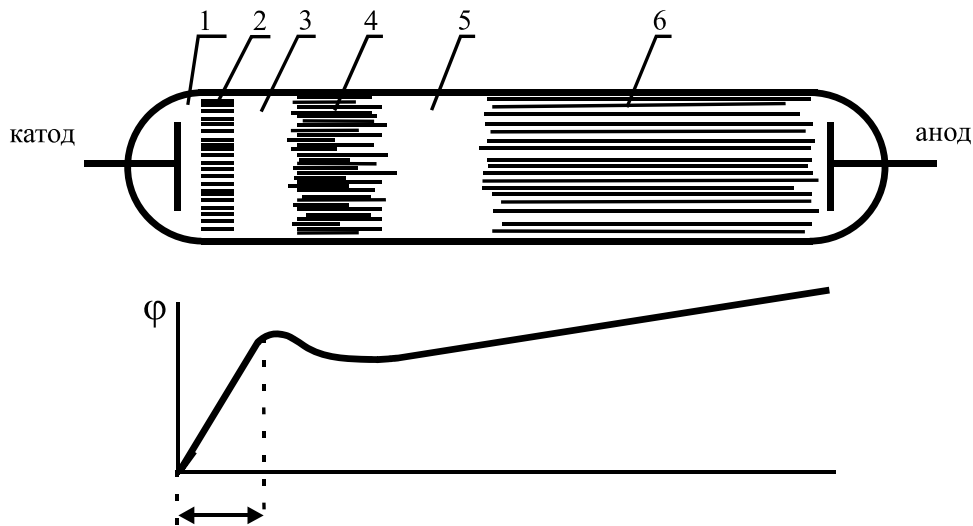


Рис. 47. Распределение потенциала в лампе

- 1 — Астоново темное пространство; 2 — катодная светящаяся пленка;  
 3 — катодное темное пространство; 4 — тлеющее свечение;  
 5 — Фарадеево темное пространство; 6 — положительный столб

Чем это можно объяснить?

1. Астоново темное пространство. Здесь электроны еще не получили энергию для возбуждения атомов. Свечение отсутствует.

2. В этой области электроны уже получают эту энергию, т.к. они разогнались в Астоновом пространстве, появляется свечение.

3. Опять темное пространство, но менее темное, чем Астоново, имеется слабое свечение. Это объясняется тем, что здесь накапливается положительный объемный заряд и количество возбужденных молекул меньше. Свечение же происходит за счет рекомбинации ионов.

4. Тлеющее свечение. В этой области электроны разгоняются до энергии возбуждения. Появляется свечение.

5. Темное Фарадеево пространство, свечение уменьшается, т.к. концентрация электронов снижается, а скорость их возрастает. Здесь начинается усиленная ионизация и преимущественное движение зарядов переходит в хаотическое. Свечение незначительно, т.к. возбужденных молекул недостаточно.

6. Положительный столб представляет собой газоразрядную плазму, где в основном происходит возбуждение и где большое количество ионов и электронов, а их количество примерно равно. Поэтому объемный заряд практически равен нулю. Здесь создается хороший проводник. Свечение вызвано в основном переходом возбужденных молекул в стационарное. Эта область и является источником света.

Потенциал изменяется вдоль трубки неравномерно. Основное падение потенциала приходится на первые три участка. Эта часть называется катодным падением потенциала.

В области тлеющего разряда потенциал практически не изменяется.

Такое распределение потенциала вызвано образованием в области катодного пространства повышенной концентрацией положительных ионов.

Положительные ионы бомбардируют катод и выбивают из него электроны, которые, разогнавшись в Астоновом пространстве, начинают возбуждать молекулы и возникает катодное свечение. Часть электронов, пролетая без столкновения в области темного катодного пространства, чаще ионизируют молекулы, чем возбуждают и возникает Фарадеево пространство.

При нормальном тлеющем разряде (см. рис. 46) светящаяся часть пространства пропорциональна току, протекающему через разрядный промежуток.

Для дальнейшего повышения тока необходимо увеличить напряжение, что приведет к образованию новых ионов. Такой разряд называется аномальным тлеющим разрядом. В точке Д напряженность поля настолько велика, что скорость ионов возрастает, и при бомбардировке катода ионами он разогревается и с его поверхности возникает термоэлектронная эмиссия. В приборах со ртутью происходит испарение ртути, увеличивается число столкновений электронов с их атомами, это приводит к новому увеличению количества электронов и ионов. Образуется у катодного пространства большая плотность положительных ионов, что вызывает электростатическую электронную эмиссию — электроны просто вырываются этим полем из катода. В результате всего этого количество электронов резко возрастает. Возникает дуговой разряд (область ДЖ). В результате этого разряда образуется интенсивная ионизация и возбуждение молекул. Вследствие этого возникает сильное свечение. Дуговой разряд является основным рабочим режимом всех газоразрядных источников излучения.

Сопротивление межэлектродного промежутка уменьшается, а значит, уменьшается и напряжение. Вольтамперная характеристика является падающей и электрический ток имеет тенденцию к неограниченному возрастанию. Для ограничения тока мы вынуждены последовательно с лампой включать какое-то ограничивающее сопротивление.

## 7.2. Условия зажигания и стабилизации дугового разряда

Что необходимо иметь, чтобы возник газовый разряд?

В первую очередь — наличие соответствующей напряженности поля  $E = \frac{U}{d}$ , которое способно разогнать заряды до энергий ионизации. Но так как  $E \approx U$  и  $E \approx \frac{1}{d}$ , то, видимо, для каждого конкретного газоразрядного прибора, у которого имеется определенное межэлектродное расстояние, необходимо соответствующее напряжение зажигания  $U_3$ .  $U_3$  — наименьшее напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд.

Второе условие зажигания — наличие определенной длины свободного пробега электронов  $\lambda$ , при которой электрон может получить энергию ионизации при данной напряженности поля. Длина свободного пробега определяется давлением газа и его температурой. Следовательно, одним из условий зажигания являются температура и давление.

Если нет свободных зарядов, то не будет и ударной ионизации. Значит, третьим условием зажигания является наличие свободных зарядов.

Свободные заряды в газоразрядных лампах получают различными путями:

- внешний источник ионизирующего излучения;
- покрытие электродов специальным слоем, который будет эмиссировать электроны;
- нагрев электродов, который уменьшает работу выхода электронов из электродов.

Так как при дуговом разряде электрический ток резко возрастает, то его необходимо ограничить. Для этой цели в цепях постоянного тока последовательно с лампой включают активное сопротивление, а в цепях переменного тока — активное, индуктивное, емкостное сопротивление или их комбинации. Главный вопрос состоит в выборе величины сопротивления.

Рассмотрим это на примере питания газоразрядной лампы от сети постоянного тока (рис. 48).

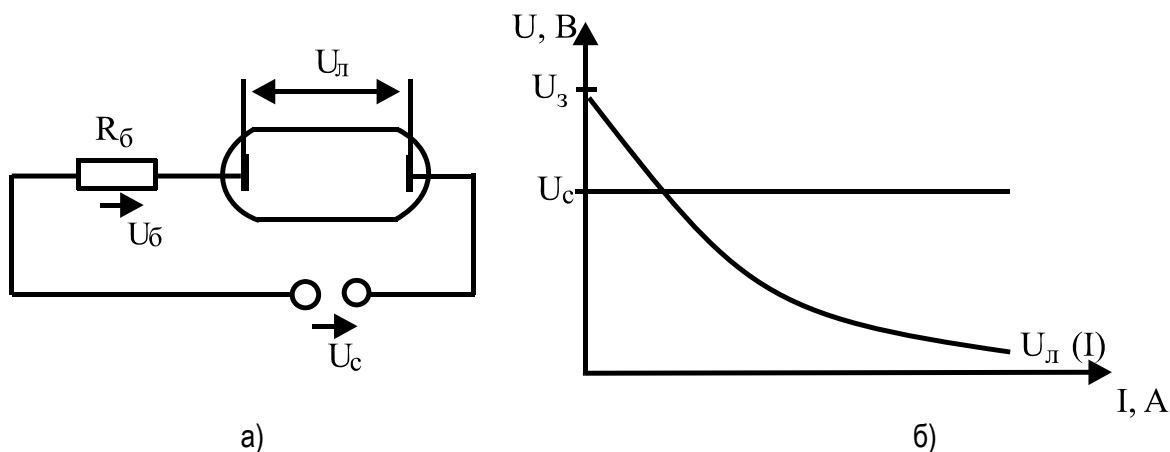


Рис. 48. Схема стабилизации дугового разряда (а) и ВАХ дугового разряда (б)

Рассмотрим дуговой разряд. Устойчивый режим работы электрического разряда может быть выполнен по второму закону Киргофа:  $U_c = U_{л}$  (рис. 48, б). Если по какой-либо причине возрастет ток, то это приведет к снижению напряжения на лампе и  $U_c > U_{л}$ , а это приведет к дальнейшему росту тока, а значит, температуры и давления, что может привести к взрыву колбы.

Поэтому в дуговых лампах ток ограничивают путем последовательного включения балласта. На основании второго закона Кирхгофа имеем:

$$U_c = U_B + U_L$$

и ВАХ лампа-балласт будет иметь следующий вид (рис. 49).

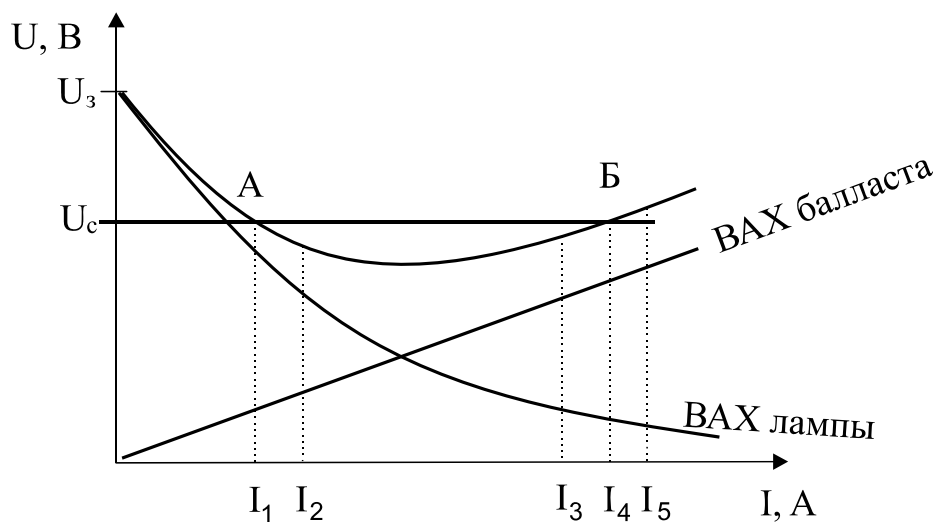


Рис. 49. Вольт-амперная характеристика лампы – балласта

Этот закон может соблюдаться в двух точках — А и Б. Устойчива ли будет работа в этих точках? При случайном увеличении тока в точке А напряжение сети будет больше напряжения  $U_{Л+Б}$  и электрический ток будет возрастать до тех пор, пока не будет выполняться второй закон Кирхгофа. При случайном увеличении напряжения сети в возрастает ток, увеличивается падение напряжения на балласте, увеличится ток в лампе и падение напряжения на ней, устанавливается новое равновесие.

При снижении напряжения сети снижается ток, падение напряжения на лампе и снова устанавливается равновесие.

Сопротивление балласта выбирают таким, чтобы были минимальными потери энергии в балласте и работа лампы была устойчивой. На практике сопротивление балласта выбирают таким, чтобы  $U_L \approx (0,5...0,65)U_c$ .

### 7.3. Влияние вида балластного сопротивления на работу газоразрядных ламп

Только что рассмотренные основные положения стабилизации дугового разряда для постоянного тока будут справедливы и при питании ламп переменным током. Однако переменный ток оказывает свое влияние на работу газоразрядных ламп в зависимости от вида балластного сопротивления.

Рассмотрим стабилизацию разряда активным сопротивлением (см. рис. 48, а и рис. 50).

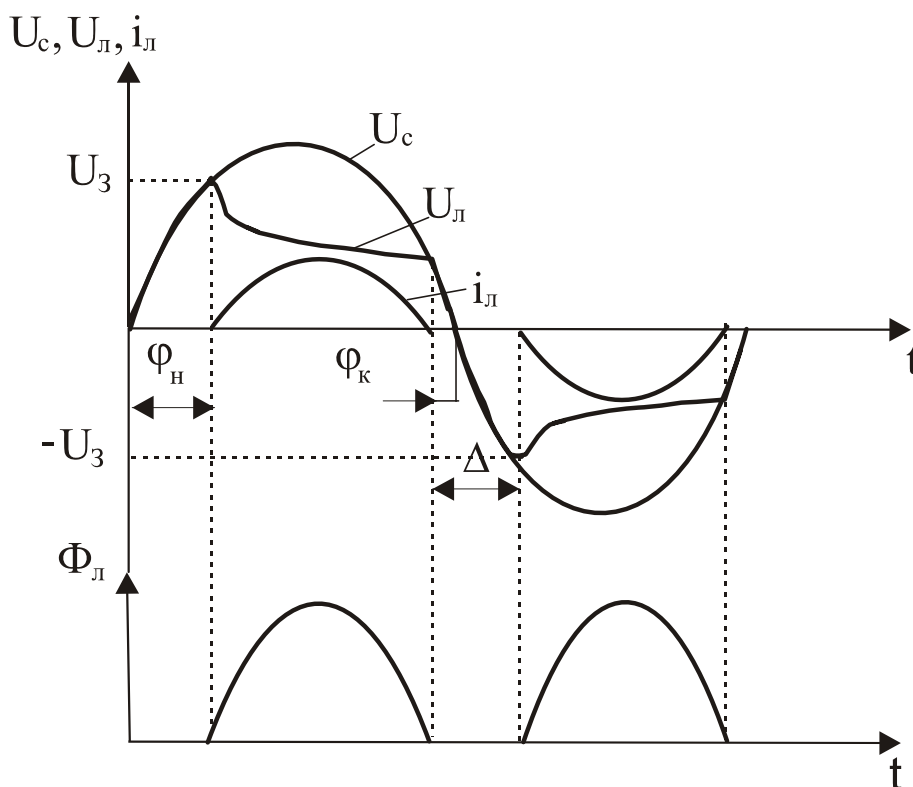


Рис. 50. Мгновенные значения напряжения, тока и потока излучения при активном балласте

При подаче напряжения на схему (см. рис. 48, а), лампа не горит, нет тока и нет падения напряжения на балласте. Все напряжение подается на лампу. При достижении напряжения зажигания  $U_3$  (см. рис. 50), по лампе пойдет ток, сопротивление лампы уменьшится, а напряжение на балластном сопротивлении возрастет. Напряжение на лампе будет снижаться до тех пор, пока напряжение на лампе не снизится до напряжения погасания. Когда напряжение на лампе достигнет напряжения погасания, лампа погаснет, прекратится ток и все напряжение сети будет подано на лампу. Все процессы повторятся во втором полупериоде. Как видно из рисунка, процесс перезажигания повторяется два раза за период, наблюдаются паузы тока и потока излучения. Общая пауза  $\varphi_{нач} + \varphi_K$  может достигать  $1/3$  периода. Как видим, электрический ток и напряжение на лампе далеки от синусоиды, а поток излучения имеет пульсирующий характер, что приводит к утомляемости глаза, стробоскопическому эффекту и быстрому износу электродов.

Недостатки активного балласта:

- 1) кривые тока и потока излучения несинусоидальны;
- 2) большая пульсация тока и потока излучения;
- 3) снижается срок службы лампы вследствие ускоренного распыления оксидного слоя электродов и потери эмиссионных свойств;
- 4) большие потери энергии ( $\approx 50\%$ ) в активном балласте.

Преимущества активного балласта:

- 1) наиболее дешевый и легкий балласт;
- 2) коэффициент мощности  $\cos \varphi$  практически равен 1.

### ***Работа газоразрядной лампы с индуктивным балластом***

Этот балласт имеет ряд преимуществ перед активным балластом и широко применяется на практике.

Рассмотрим более подробно работу газоразрядной лампы с индуктивным балластом (рис. 51).

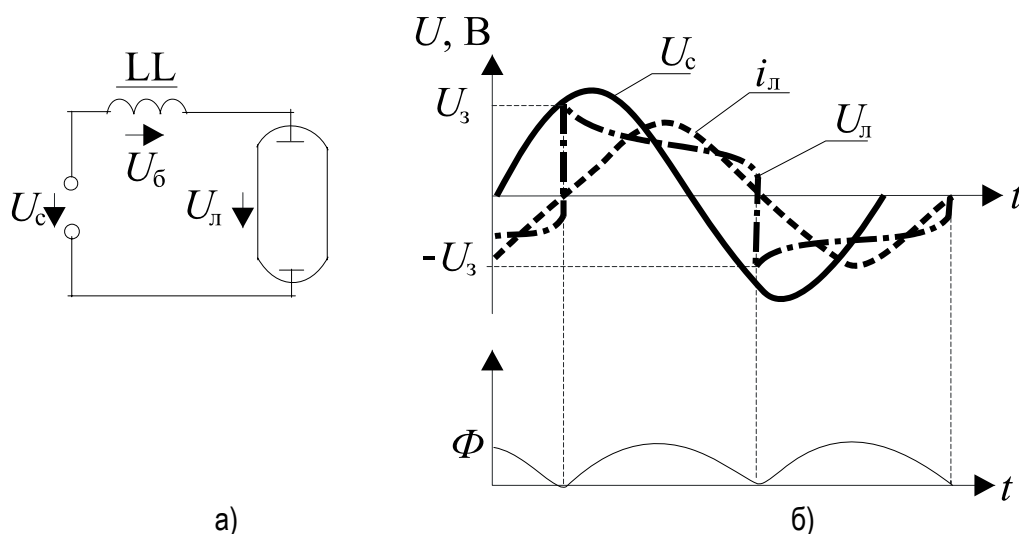


Рис. 51. Схема включения в сеть газоразрядной лампы с индуктивным балластом (а) и кривые мгновенных значений тока, напряжения и потока излучения лампы (б)

При включении лампы в момент времени  $t = 0$  тока в ней нет и лампа не работает. При достижении напряжения сети напряжения зажигания лампы в лампе появится разряд и по ней пойдет ток. Ток пойдет и в индуктивном балласте и в нем возникнет ЭДС самоиндукции, препятствующего изменению тока. Возникнет переходный процесс. Однако напряжение сети растет, что приводит к увеличению тока и напряжения на балласте и снижению напряжения на лампе. В то время, когда напряжение сети достигнет максимума, ток еще не достиг его из-за влияния ЭДС самоиндукции. В дальнейшем мгновенное напряжение сети снижается и ток, достигнув максимального значения, начнет тоже снижаться, снижается и ЭДС самоиндукции. При достижении напряжения сети нулевого значения напряжение на лампе не равно нулю из-за той же ЭДС самоиндукции, которая теперь стремится поддержать уменьшающийся ток. И только тогда, когда напряжение сети достигнет напряжения перезажигания ( $-U_3$ ), лампа загорается снова и все процессы повторяются. Как видим из рис. 51, ток по своей форме уже близок к синусоидальному, а поток излучения похож на полусинусоиду. Паузы тока и потока излучения почти отсутствуют.

Преимущества индуктивного балласта:

- паузы тока и излучения отсутствуют, снижается пульсация излучения;
- режим работы электродов облегчается;
- потери в балласте незначительны (10...35%);
- схема не нуждается в специальном зажигающем устройстве.

Недостатки индуктивного балласта:

- низкий  $\cos \varphi$ ;
- большой расход стали и цветного металла, поэтому он дорогой и тяжелый.

### *Работа газоразрядной лампы с емкостным балластом*

Этот балласт применяется очень редко. Рассмотрим его работу при стабилизации дугового разряда (рис. 52).

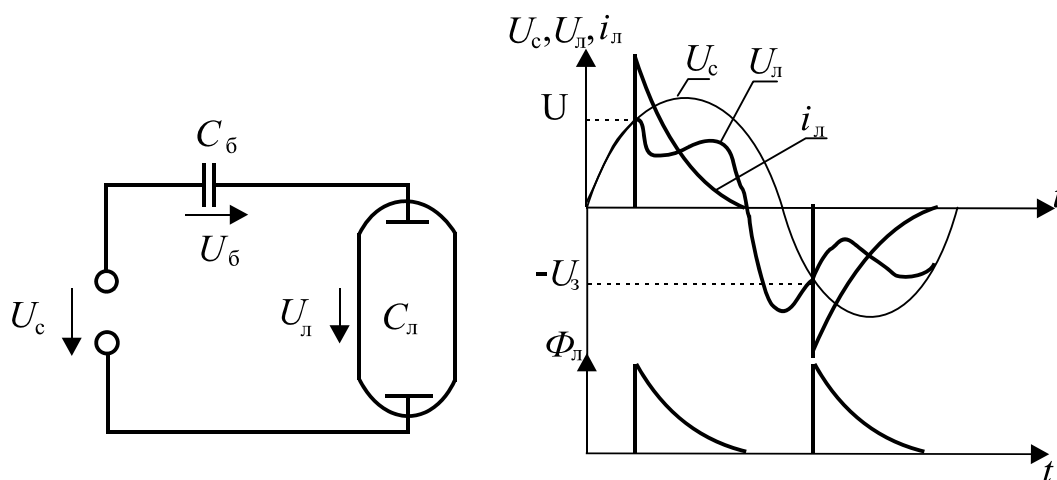


Рис. 52. Стабилизация дугового разряда емкостным балластом

Включаем лампу так же в момент времени  $t = 0$ . Лампа не работает и ее тоже можно считать емкостью очень маленькой величины. Таким образом, в цепь включено последовательно две емкости.

При увеличении напряжения сети оно перераспределяется обратно пропорционально емкостям. Так как  $C_l \ll C_b$ , то все напряжение будет приложено к лампе. При достижении сети напряжения зажигания лампы она из емкостного сопротивления превращается в активное и ток резко возрастает, снижается падение напряжения на лампе, начинает заряжаться конденсатор  $C_b$ . Напряжение на нем растет, а ток падает. Это говорит о том, что проводимость лампы снижается и напряжение на ней растет. При дальнейшем увеличении заряда на конденсаторе практически все напряжение сети прикладывается к нему, а напряжение на лампе снижается до нуля. Изменение потока излучения пропорционально току. Как видим, ток и поток излучения имеют очень сильные толчки.



Отсюда и недостатки:

- кривые тока и потока излучения очень искажены;
- срок службы лампы снижается;
- снижаются светотехнические показатели лампы.

Но есть и преимущества:

- потерь энергии практически нет;
- балласт малогабаритный и очень дешевый;
- нагрузка имеет емкостный характер.

### ***Особенности работы лампы на переменном токе и влияние частоты тока на их работу***

В процессе работы газоразрядной лампы она перезажигается за период два раза. Процессы же, происходящие в лампе в каждом полупериоде, такие же, как при постоянном токе.

Необходимо отметить, что поток излучения получается пульсирующим; искажаются форма тока и потока излучения. Однако сдвиг по фазе между током и напряжением на лампе при всех видах балластного сопротивления отсутствует. Но мощность лампы не равна произведению действующих напряжений и токов, как при простом включении R, L, C в сеть переменного тока. Это объясняется тем, что кривые тока и напряжения отличаются от синусоиды и для нахождения мощности разряда необходимо разложить кривые тока и напряжения в ряд, а мощность разряда определить как сумму мощностей каждой из гармоник. Чтобы этого не делать, вместо коэффициента мощности применяют коэффициент искажения:

$$k_{II} = \frac{P_L}{U_L I_L}.$$

Физический смысл имеет такой же, как коэффициент мощности.

Этот коэффициент зависит от вида балластного сопротивления.

При увеличении частоты процесс перезажигания лампы ускоряется. Так как электроды лампы не успевают остыть, в разрядном промежутке не успевает произойти деионизация и при большой частоте процесс перезажигания становится мгновенным. Кроме этого, значения тока и напряжения на лампе уже не будут зависеть от рода балластного сопротивления и при частотах 0,8...1 кГц будут иметь одинаковую форму — напряжение на лампе близкое к треугольной, а ток — синусоиду. Это объясняется тем, что процессы ионизации и деионизации уравниваются и проводимость лампы становится постоянной.

Преимущества питания лампы повышенной частотой:

- световая отдача ламп увеличивается на 15...25% по сравнению с 50 Гц;
- срок службы ламп увеличивается на 20...30%;
- пульсации светового потока резко снижаются и уже при 600 Гц практически отсутствуют;
- при повышенных частотах можно применять любой балласт, и это будет одинаково;
- масса индуктивного балласта значительно меньше, чем при 50 Гц.

Есть и недостатки:

- у индуктивного балласта во избежание увеличения потерь в стали необходимо применять специальные ферромагнитные материалы;
- тангенс угла потерь конденсаторов начинает возрастать и поэтому приходится применять конденсаторы со специальным диэлектриком;
- необходимы специальные схемы преобразования частоты.

### *Пульсация светового потока*

Работа люминесцентной лампы сопровождается их погасанием и зажиганием в каждый полупериод переменного тока. В связи с этим возникают пульсации светового потока. Освещение объектов пульсирующим световым потоком утомляет зрение, так как мышцы зрачка сокращаются в два раза за период, и вызывает стробоскопический эффект (кажущаяся неподвижность объекта при совпадении или кратности частоты пульсации светового потока и частоты вращения или колебания объекта наблюдения).

Пульсация светового потока оценивается коэффициентом пульсации.

Коэффициент пульсации — отношение изменения потока излучения к двойному среднему:

$$K_{II} = \frac{\Phi_{\text{МАКС}} - \Phi_{\text{МИН}}}{2\Phi_{\text{СР}}} 100 = \frac{\Phi_{\text{МАКС}} - \Phi_{\text{МИН}}}{\Phi_{\text{МАКС}} + \Phi_{\text{МИН}}} 100.$$

Величина  $K_{II}$  определяется составом люминофора, видом балластного сопротивления и схемой включения лампы в сеть.

Для снижения коэффициента пульсации необходимо подобрать люминофор с большим временем послесвечения (с хорошей фосфоресценцией), подобрать вид балластного сопротивления, заставить работать лампы в разное время (схемы включения, разные фазы), увеличить частоту или питать постоянным током.

С увеличением частоты (до 800 Гц и выше) глаз человека не реагирует на пульсации светового потока. При высоких частотах перезажигание не требуется (деонизация не возникает), существует возможность применения малогабаритных балластов.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Как происходит электрический разряд в газе? 2. Перечислите виды электрического разряда в газе. 3. Перечислите условия зажигания разряда в газе. 4. Расскажите о процессе стабилизации разряда в газе. 5. Расскажите о работе газоразрядной лампы с активным, индуктивным и емкостным балластами. 6. Перечислите особенности работы газоразрядной лампы при переменном токе. 7. Назовите причины пульсации светового потока. 8. Как влияет пульсация светового потока на зрение? 9. Какова сущность стробоскопического эффекта? 10. Как определить коэффициент пульсации? 11. Почему отсутствует для газоразрядных ламп  $\cos \varphi$ ? 12. Назовите преимущества питания газоразрядных ламп повышенной частотой.

## 8. ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ЛАМПА

- История развития люминесцентной лампы низкого давления
- Устройство и принцип действия люминесцентной лампы
- Влияние внешних факторов на работу люминесцентной лампы

Газоразрядные источники — приборы, в которых электрическая энергия превращается в энергию оптического излучения в результате электрического разряда в газе или парах металла.

Газоразрядные источники по давлению классифицируются на источники:

- низкого давления  $1 \dots 400$  Па;
- высокого давления  $(0,6 \dots 3) \cdot 10^5$  Па;
- сверхвысокого давления  $(3 \dots 50) \cdot 10^5$  Па.

### 8.1. Лампы низкого давления.

#### История развития люминесцентной лампы низкого давления

Люминесцентные лампы потребляют около 30% всей электроэнергии, идущей на освещение, и создают более 60% общего светового потока всех источников света.

История развития люминесцентной лампы такова.

В 1802 году академик В.В. Петров, работая с заряженным конденсатором, получил устойчивую дугу в воздухе и указал о возможности ее использования в качестве источника света.

В 1802 г. Дэви поместил угольные электроды в стеклянный баллон и откачал воздух. Образующаяся дуга давала много света, но электроды необходимо было сдвигать по мере их сгорания.

Спустя 70 лет, в 1876 г., П.Н. Яблочков предложил на этом принципе источник, приемлемый для целей освещения. Эта дуговая лампа с открытой дугой используется и по настоящее время в прожекторных установках, а до недавнего времени и в кинопроекторных установках. Яблочков поместил два электрода между диэлектриком (рис. 53).

Дуга между электродами 1 зажигалась путем сгорания проволоочки. По мере выгорания электродов сгорал и диэлектрик 2. Таким образом, происходило саморегулирование. КПД такого источника составлял около 3%.

В 1883 г. С. Мур выкачал воздух из трубки, вставил платиновые электроды, закачал инертный газ и получил газосветную лампу.

В 1933 г. была изобретена, под руководством В.В. Фабриканта, люминесцентная лампа. Световой КПД ее составил около 10%.

В 1939 г. была изобретена лампа ДРЛ с меньшими габаритами, чем у люминесцентной лампы той же мощности. Ее световой КПД составил около 7%.

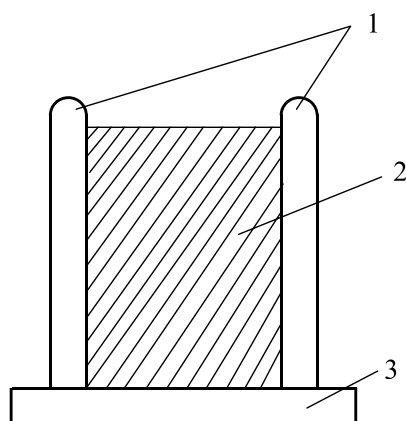


Рис. 53. Схема дуговой лампы

В 1954 г. была изобретена дуговая ксеноновая лампа типа ДКсТ. КПД ее около 3%.

В 1964 г. изобретена металлогалогенная лампа с КПД 13%.

В 1965 г. изобретена натриевая лампа ДНаТ с КПД 20%.

## 8.2. Устройство и принцип действия люминесцентной лампы

Люминесцентная лампа (ЛЛ) низкого давления (рис. 54) представляет собой цилиндрическую колбу из силикатного стекла *б*, из которой откачан воздух до давления 1...1,5 Па. После откачки воздуха внутреннее пространство колбы *5* заполняется аргоном до давления 400 Па и вводится дозированное количество ртути.

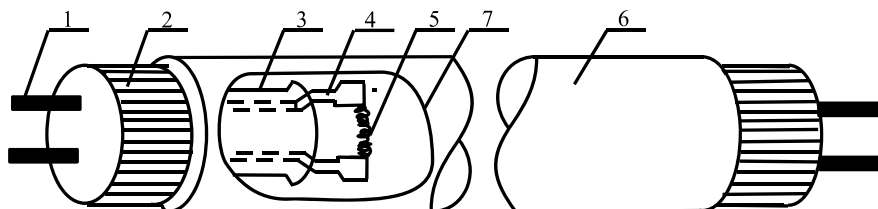


Рис. 54. Устройство люминесцентной лампы

Внутренняя поверхность колбы покрыта люминофором *7* — твердым кристаллическим порошкообразным веществом (соли кальция, активированные сурьмой и марганцем). Трубка герметически закрыта вваренными в ее торцы стеклянными ножками *3*, на которых смонтированы вольфрамовые биспиралы *4*, покрытые слоем оксида для снижения работы выхода электронов. На концах лампы имеются короткие цоколи *2* с полыми штырьками *1*.

Внутреннее пространство лампы служит:

- для снижения химической реакции между стеклом и электродами;
- снижения распыления электродов и увеличения срока службы лампы;
- облегчения зажигания лампы.

Ртуть служит для преобразования электрической энергии в энергию ультрафиолетового излучения. У ртути 5 изотопов. Изотоп с резонансным излучением 253,7 нм дает излучение в ультрафиолетовой области 55%, другой изотоп с резонансным излучением 184,9 нм дает излучение 9%. Причем с увеличением температуры содержание УФ-излучения снижается. Остальные изотопы дают видимое излучение.

С увеличением температуры в лампе ртуть испаряется и образует с аргоном смесь Пеннинга, которая снижает потенциал ионизации по сравнению с аргоном и ртутью.

Вольфрамовые электроды лампы (биспирали), покрытые слоем оксида (окислы бария, тория), служат:

- для подогрева лампы перед пуском, чтобы образовалась смесь Пеннинга;
- уменьшения работы выхода электронов путем термоэлектронной эмиссии;
- создания первоначальных носителей зарядов;
- подведения электрического тока к спирали.

Люминофор служит для преобразования УФ-излучения в видимое и изготавливается из галофосфата кальция, активированный сурьмой и марганцем. Его свойства должны быть такими, чтобы максимум спектральной чувствительности был близок к максимуму спектральной плотности излучения ртути 254 и 185 нм, т.е. чтобы люминофор с наибольшей эффективностью преобразовывал эти излучения в видимое.

В зависимости от концентрации марганца от 0,3 до 1,2% по массе при постоянной концентрации сурьмы  $\approx 1\%$  возникает различная цветопередача люминесцентных ламп. По этому принципу и маркируют лампы.

ТБ — тепло-белые (ЛТБ); Б — белые (ЛБ); ХБ — холодно-белые (ЛХБ); Д — дневного света (ЛД); ЕЦ — естественного света (ЛЕЦ); ДЦ — дневного с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ).

В конце прошлого века были разработаны люминесцентные лампы с пятиполосным редкоземельным люминофором. Это позволило увеличить светоотдачу ламп на 15...20% по сравнению с галофосфатом кальция.

### ***Принцип действия люминесцентной лампы***

При подаче напряжения  $U$  на лампу в ней создаётся напряжённость электрического поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{U}}{d},$$

где  $d$  — расстояние между электродами.

Если лампа зажжена, то в ней есть свободные носители зарядов и на них действует электрическая сила:

$$\vec{E}q = \vec{F} = m\vec{a}.$$

Поле совершает работу на пути свободного пробега по увеличению кинетической энергии зарядов:

$$A = \bar{F} \lambda = \frac{mv^2}{2}.$$

На своём пути заряды встречают нейтральные атомы и отдают им часть своей энергии, которая идёт: 1) на увеличение кинетической энергии атомов и молекул, т.е. на увеличение температуры газа и 2) на возбуждение или ионизацию атомов в зависимости от количества переданной энергии. Возбужденные атомы ртути испускают УФ-излучение с длинами волн 185 и 254 нм, которые в люминофоре преобразуются в видимое излучение. То есть квант с большей энергией преобразуется в квант с меньшей энергией. Часть энергии УФ-излучения преобразуется в люминофоре в тепловую.

Здесь различают два вида люминесценции:

- *электролюминесценция* — излучение, получаемое под действием электрического тока;
- *фотолюминесценция* — излучение, получаемое под действием поглощенной энергии квантов, но с меньшей длиной волны.

Энергетическая диаграмма люминесцентной лампы представлена на рисунке 55.

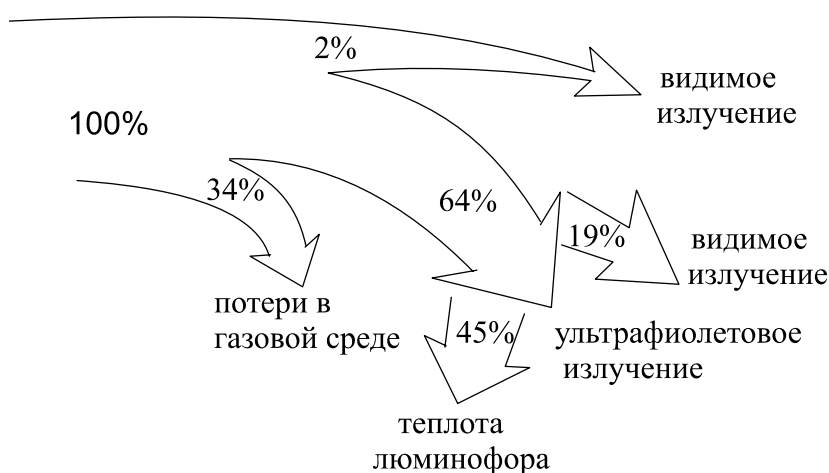


Рис. 55. Энергетическая диаграмма люминесцентной лампы

Как видим из энергетической диаграммы, 21% поступившей энергии превращается в световую. Остальная энергия превращается в теплоту.

Преимущества газоразрядных ламп:

- большой срок службы (до 15000 часов);
- большая светоотдача (до 90 лм / Вт);
- хорошая цветопередача;
- при одинаковом световом потоке потребление электрической энергии меньше, чем у ламп накаливания.

Недостатки газоразрядных ламп:

- относительно сложная схема включения в сеть;
- зависимость светоотдачи лампы от температуры;
- пульсации светового потока;
- большие габариты.

### 8.3. Влияние внешних факторов на работу люминесцентной лампы

Работа люминесцентной лампы определяется тремя критериями:

- 1) напряжением зажигания;
- 2) светоотдачей лампы;
- 3) сроком службы лампы.

Рассмотрим влияние некоторых внешних факторов на напряжение зажигания лампы.

#### *Влияние тока подогрева электродов на напряжение зажигания*

Напряжение зажигания — напряжение, при котором начинается лавинообразное образование ионов и возникновение дуги. У негорящей лампы практически отсутствуют носители зарядов и полное сопротивление лампы  $Z \approx 10^{12}$  Ом. У горящей лампы увеличивается количество носителей заряда и полное сопротивление составляет  $Z \approx 100...300$  Ом (рис. 56).

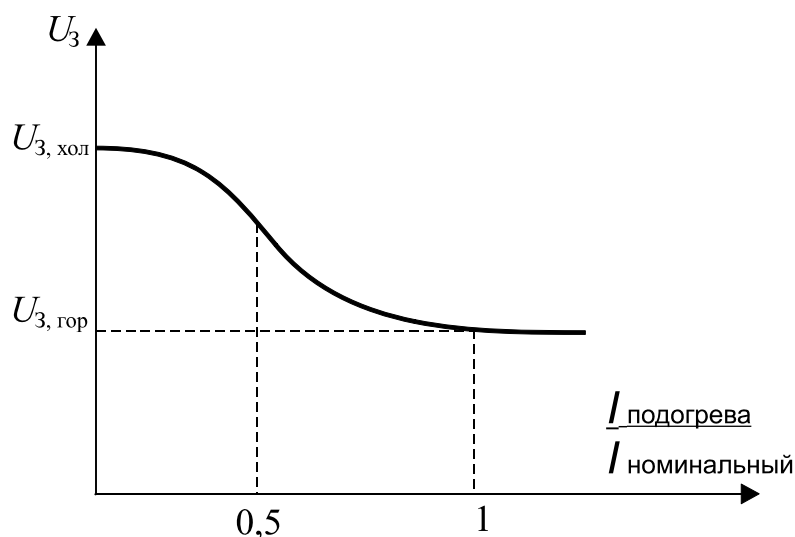


Рис. 56. Влияние тока подогрева электродов на напряжение зажигания люминесцентной лампы

Как видно (см. рис. 56), ток подогрева электродов практически в два раза снижает напряжение зажигания лампы.



### ***Влияние температуры окружающей среды на напряжение зажигания лампы***

Температура окружающей среды очень сильно влияет на работу люминесцентной лампы. Известно, что для ионизации атома необходима строго определенная энергия для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Это можно представить следующим выражением:

$$W_{\text{ИОНИЗАЦИИ}} = W_{\text{ВНУТРЕННЯЯ}} + W_{\text{ПОЛЯ}} = 3/2 kT + W_{\text{ПОЛЯ}},$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;

$T$  — температура газа, К.

Поэтому, чем ниже температура, тем большая напряженность поля нужна для ионизации атома (рис. 57).

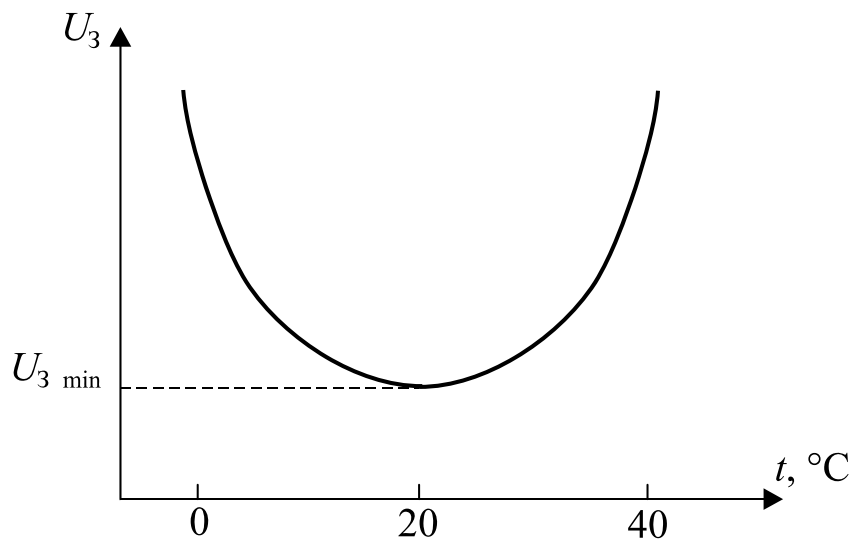


Рис. 57. Влияние температуры окружающей среды на напряжение зажигания лампы

Кроме того, при низких температурах смесь Пеннинга бедна и лампа зажигается хуже. По этой же причине ПУЭ запрещает эксплуатацию ламп низкого давления при температурах ниже  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При высоких температурах возрастает давление в лампе, снижается длина свободного пробега, что требует более высокого напряжения для возникновения разряда.

### ***Влияние влажности на напряжение зажигания лампы***

При высокой влажности на стенках лампы образуется конденсат и создается проводящая пленка. Напряженность поля между электродом лампы и этой пленкой становится выше, чем между электродами лампы (рис. 58).

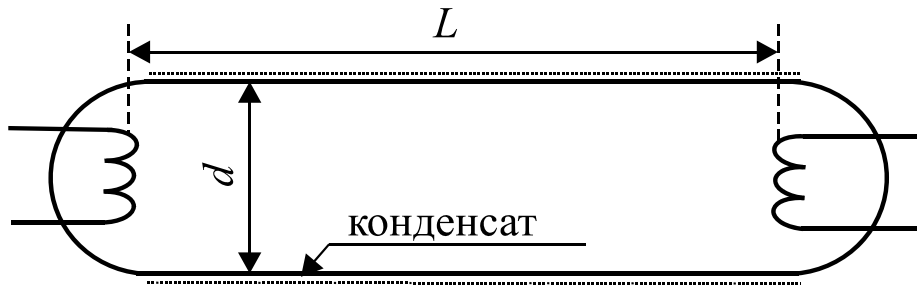


Рис. 58. Схема выпадения конденсата от влажности в лампе

Напряженность поля между электродами лампы намного меньше, чем между электродом и пленкой конденсата, т.к.  $d/2 \ll L$ :

$$E_1 = \frac{U}{L} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{U}{d/2}.$$

При малой влажности (60...70%) сопротивление внутренней стенки лампы снижается, стенка заряжается у катода и отрицательный заряд распространяется скачкообразно вдоль трубки к аноду. Напряжение зажигания снижается. При влажностях 75...80% сопротивление стенки трубки возрастает (более 10 кОм), токи утечки увеличивают время зарядки стенки и снижают её заряд. Это приводит к снижению напряженности поля и увеличению напряжения зажигания.

### *Расположение лампы в пространстве*

В зависимости от расположения лампы в пространстве и нахождения различных предметов вблизи нее, напряжение зажигания будет различным (рис. 59).

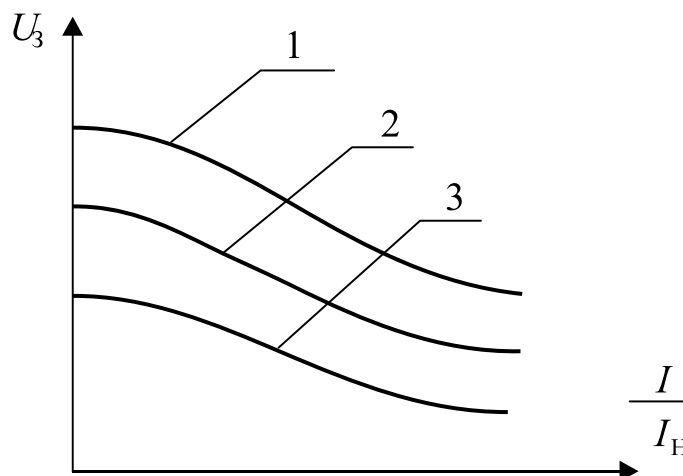


Рис. 59. Влияние окружающих предметов на напряжение зажигания лампы:  
1 — одиночная лампа; 2 — лампа в светильнике;  
3 — наличие проводящей полоски вдоль лампы

- Лампа находится вдали от предметов, особенно заземленных. Напряженность поля определяется напряжением и расстоянием между электродами. Поэтому отсутствуют условия повышения напряженности (рис. 60, а).

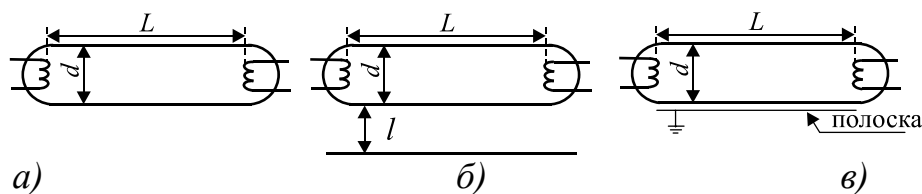


Рис. 60. Расположение ламп в пространстве

- Лампа находится в светильнике (рис. 60, б).

В этом случае напряженность поля определяется половиной диаметра лампы и расстоянием от лампы до корпуса светильника:

$$E_1 = \frac{U}{d/2+l}; \quad E_2 = \frac{U}{L}.$$

Так как  $L \gg (d/2+l)$ , то  $E_1 \gg E_2$ .

- Вдоль лампы находится металлическая полоска (рис. 60, в).

В этом случае напряженности поля  $E_1$  и  $E_2$  определяются выражениями:

$$E_1 = \frac{U}{d/2} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{U}{L}, \quad \text{отсюда} \quad E_1 \gg E_2.$$

### **Влияние внешних факторов на светоотдачу лампы**

Значительное влияние на светоотдачу оказывают температура окружающей среды и ток лампы (рис. 61).

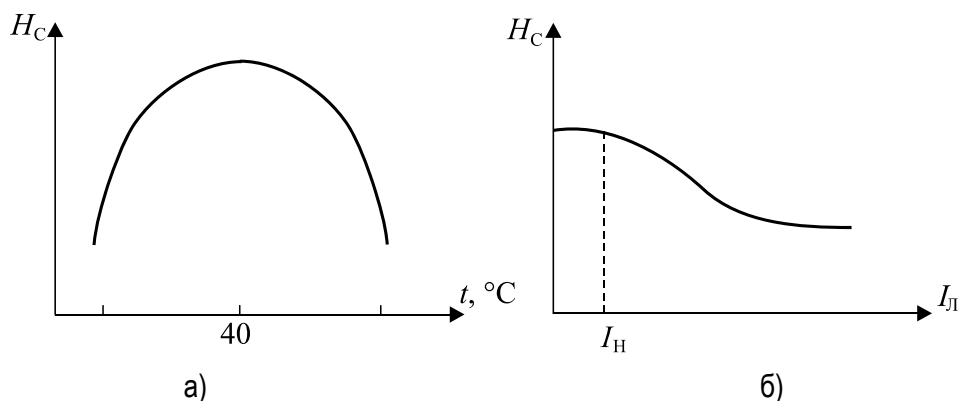


Рис. 61. Влияние на светоотдачу температуры окружающей среды (а) и тока лампы (б)

При низких температурах давление в лампе невелико и поэтому будет большая длина свободного пробега электронов и ионов. Большинство электронов достигает энергии ионизации и только небольшое их количество

энергии возбуждения. Поэтому количество квантов снижается, снижается и светоотдача (рис. 61, а). С увеличением температуры и давления в лампе длина свободного пробега снижается и все больше электронов достигает энергии возбуждения. Светоотдача увеличивается. При дальнейшем увеличении температуры еще больше растет давление и снижается длина свободного пробега электронов, они не успевают достичь энергии возбуждения атомов ртути, поэтому меньше образуется квантов УФ-излучения.

С увеличением тока снижается и светоотдача, так как имеется большое количество ионизированных атомов, а возбужденных мало. Кроме того, увеличивается доля излучения с длиной волны  $\lambda = 185$  нм, которые разрушают люминофор и не успевают в нем преобразоваться в видимое излучение.

### ***Влияние внешних факторов на срок службы лампы***

На срок службы лампы значительное влияние оказывают напряжение питания и способ зажигания её (рис. 62).

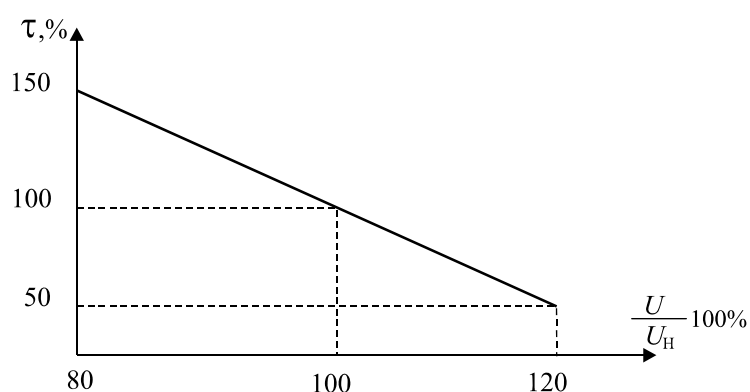


Рис. 62. Влияние напряжения сети на срок службы лампы

При увеличении напряжения на лампе срок службы сокращается, т.к. чаще всего выходят из строя электроды лампы в результате распыления металла.

Холодное зажигание лампы при низких температурах электродов (<800 °С) создаёт сильные толчки тока. Приходится увеличивать напряжение сети, что приводит к разрушению электродов и снижению срока службы. Поэтому лучше всего электроды предварительно разогреть.

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Как устроена люминесцентная лампа? 2. Каковы преимущества и недостатки люминесцентной лампы перед лампой накаливания? 3. Как электрическая энергия в люминесцентной лампе преобразуется в световую? 4. Устройство стартера и его назначение. 5. Как влияет ток подогрева электродов на напряжение зажигания люминесцентной лампы? 6. Почему при низких и высоких температурах окружающей среды люминесцентная лампа плохо зажигается? 7. Как влияет расположение люминесцентной лампы в пространстве на напряжение её зажигания и светоотдачу?

## **9. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ**

- Схемы включения люминесцентной лампы
- ПРА импульсного зажигания с предварительным подогревом электродов
- Схема последовательного включения люминесцентных ламп
- Схема включения люминесцентных ламп с расщепленной фазой
- Схема быстрого зажигания
- Схема мгновенного зажигания

### **9.1. Схемы включения люминесцентной лампы**

Люминесцентные лампы подключаются к электрической сети с помощью специальных схем, которые обеспечивают:

- необходимый режим зажигания и разгорания;
- стабилизацию разряда;
- улучшают коэффициент мощности;
- подавляют радиопомехи, возникающие при зажигании и работе;
- снижают коэффициент пульсации.

Совокупность всех элементов, обеспечивающих вышеуказанные функции и оформленные в виде единого блока или отдельных блоков, называется пускорегулирующим аппаратом (ПРА).

В зависимости от особенностей и режима зажигания лампы ПРА подразделяются:

- на ПРА импульсного зажигания с предварительным подогревом электродов с помощью полупроводникового стартера или стартера тлеющего разряда.
- ПРА горячего зажигания с постоянным подогревом электродов.
- ПРА мгновенного зажигания при холодных электродах.

Основными элементами схемы включения с использованием стартера тлеющего разряда являются дроссель в качестве балластного сопротивления и стартер.

### **9.2. Пускорегулирующие аппараты импульсного зажигания с предварительным подогревом электродов**

Рассмотрим ПРА импульсного зажигания с предварительным подогревом электродов и процесс зажигания лампы.

Процесс зажигания люминесцентной лампы рассмотрим на примере включения ее в сеть с индуктивным балластом (рис. 63).

Основным элементом пускорегулирующего аппарата импульсного зажигания с предварительным подогревом электродов является стартер (рис. 64).

Стартер VL — лампа низкого давления VL с тлеющим разрядом и с биметаллическим электродом. Служит стартер для замыкания цепи с целью разогрева электродов и дальнейшего разрыва цепи с целью получения повышенного импульса напряжения.

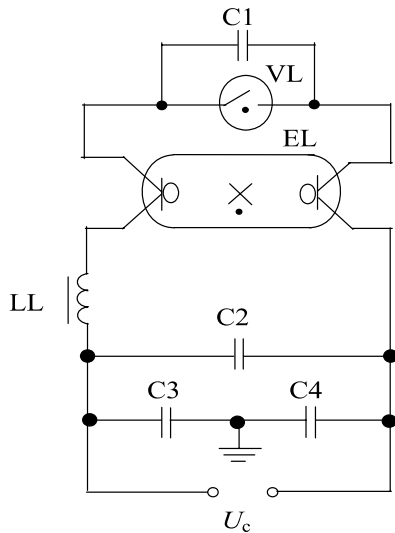


Рис. 63. Схема включения люминесцентной лампы в сеть

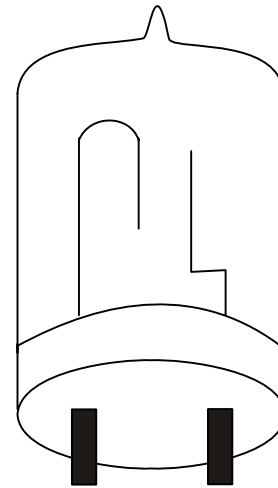


Рис. 64. Схема стартера тлеющего разряда

Колба лампы наполняется инертным газом (неоном) или смесью инертных газов. Расстояние между электродами и давление инертного газа выбираются таким образом, чтобы напряжение зажигания тлеющего разряда в стартере было меньше напряжения сети, но больше рабочего напряжения на лампе. При возникновении тлеющего разряда нагревается газ, а от него и электроды. Биметаллический электрод распрямляется и замыкает цепь.

Пока контакты стартера замкнуты, через электроды лампы протекает ток, нагревающий их до температуры 800...900 °С. В результате термоэлектронной эмиссии в приэлектродном пространстве лампы создается электронное облако. Нагревается приэлектродное пространство, испаряется ртуть, образуется смесь Пеннинга, которая снижает потенциал ионизации.

В это время электроды стартера остывают, и через 0,2...0,6 с они размыкаются. Для нормального запуска лампы продолжительность разогрева электродов должна составить 1,5...2 с, поэтому стартер за время одного пуска лампы делает в среднем от 2 до 5 попыток. При разрыве цепи стартера ток резко уменьшается, и в дросселе наводится электродвижущая сила, зависящая от индуктивности и скорости изменения тока. Совместно с напряжением сети (второй закон Кирхгофа) на лампе создается импульс повышенного напряжения. Создаваемое в лампе электрическое поле, разгоняя электроны, сообщает им кинетическую энергию. Если напряженность поля достаточна, то в лампе в результате ударной ионизации создается лавина электронов и ионов. По лампе пойдет ток.

Скорость разрыва цепи стартером составляет около 1...2 мкс, а ЭДС самоиндукции — несколько киловольт. Для увеличения длительности импульса высокого напряжения параллельно стартеру устанавливают конденсатор C1, который уменьшает скорость изменения тока в цепи, а следова-

тельно, и ЭДС самоиндукции (до 500...1500 В), но увеличивает длительность его существования до 100 мкс. Это способствует более устойчивому зажиганию лампы. Кроме того, этот конденсатор предотвращает искрение и образование дуги в стартере, так как напряжение на нем в момент коммутации и образования ЭДС самоиндукции равно нулю (второй закон коммутации). Пока заряжается конденсатор до рабочего напряжения лампы, электроды стартера раздвигаются и напряженности поля в нем недостаточно для возникновения разряда и искры, дуги нет.

Кроме этого, конденсатор  $C_1$  снижает радиопомехи, так как через него замыкаются высокочастотные составляющие несинусоидального тока лампы.

При горении лампы и прохождения по ней тока часть напряжения (приблизительно  $0,5 U_C$ ) падает на дросселе, поэтому напряжения на стартере будет недостаточно для его зажигания.

Дроссель LL служит для ограничения тока во время запуска лампы и её работы, а также для получения импульса повышенного напряжения.

Конденсатор  $C_2$  (2...10 мкФ) служит для повышает  $\cos \varphi$  схемы в целом.

Конденсаторы  $C_3$ ,  $C_4$  (0,02...0,05 мкФ) служат в качестве фильтра для защиты сети от высших гармоник.

Достоинствами стартеров тлеющего разряда являются простота устройства и дешевизна. К недостаткам следует отнести нестабильность параметров, в результате чего:

- разрыв цепи может происходить при недостаточном разогреве электродов лампы;
- контакты стартера могут привариваться друг к другу, и разрыва цепи не последует, лампа не загорится;
- промежуток между электродами стартера может уменьшаться, и напряжение зажигания стартера станет равным или меньшим, чем рабочее напряжения лампы, в результате чего лампа будет непрерывно зажигаться и гаснуть до тех пор, пока не выйдет из строя;
- если импульс не обладает достаточной энергией или недостаточно прогрелись электроды лампы, она при подаче импульса вспыхивает и тут же гаснет.

В силу перечисленных недостатков стартеры часто значительно снижают срок службы люминесцентных ламп.

### **9.3. Схема последовательного включения люминесцентных ламп**

Эта схема применяется тогда, когда напряжение сети больше напряжения лампы (рис. 65).

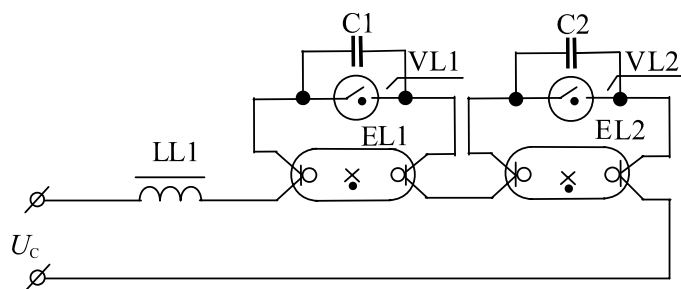


Рис. 65. Схема последовательного включения люминесцентных ламп

Зажигание ламп происходит гораздо хуже, так как характеристики ламп и стартеров различны, и они срабатывают не одновременно.

Эта схема применяется при включении двух ламп мощностью по 20 Вт на напряжение сети 220 В или две лампы по 40 Вт на напряжение сети 380 В. В этом случае применяется дроссель на 40 и 80 Вт соответственно.

Преимущество её заключается в возможности использования только одного дросселя. Однако работа ламп при этом взаимосвязана. Поэтому наряду с этой простейшей схемой с двумя стартерами используются схемы с одним общим стартером и дополнительной обмоткой на дросселе.

#### 9.4. Схема включения люминесцентных ламп с расщепленной фазой

Основной недостаток люминесцентных ламп — наличие большого коэффициента пульсации.

Для снижения коэффициента пульсации применяют двухламповую схему со сдвигом фаз тока в лампах таким образом, чтобы излучения светового потока в лампах были в различные моменты времени (рис. 66).

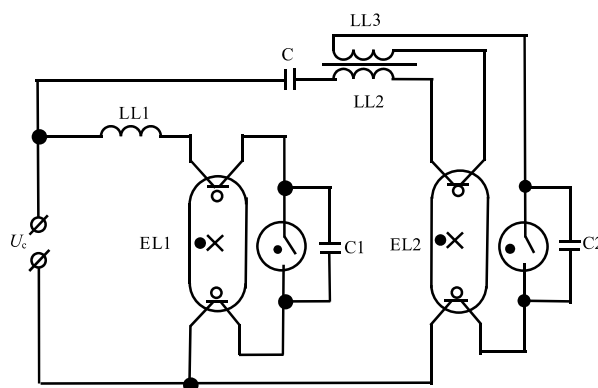


Рис. 66. Двухламповая схема включения люминесцентных ламп

Наиболее распространенная схема — двухламповое пускорегулирующее устройство с расщепленной фазой. В этой схеме одна из ламп включается по обычной схеме с индуктивным балластом, а другая — с индуктивно-емкостным. Такая схема обеспечивает коэффициент мощности до 0,95...0,98 и уменьшает коэффициент пульсации светового потока.



Коэффициент мощности в отстающей цепи  $\cos \varphi = 0,5$  — это соответствует углу  $\varphi = 60^\circ$ . Для компенсации столь низкого коэффициента мощности необходим в опережающей цепи сдвиг на  $60^\circ$ . Это достигается путем включения в опережающую цепь индуктивно-емкостного балласта.

Если полное сопротивление первой лампы  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}$ , то во второй, при включении емкости,  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (X_L - X_C)^2}$ . Видим, что  $Z_2 < Z_1$  и  $I_2 > I_1$ . Поэтому лампа с индуктивно-емкостным балластом быстро перегорит. Для устранения этого недостатка в опережающую цепь включают индуктивно-емкостный балласт с соотношением

$$X_C = 2X_L.$$

Основная цель достигнута. Теперь лампы излучают световой поток в различные моменты времени, что снижает коэффициент пульсации. Но зато лампа в опережающей цепи стала хуже зажигаться, так как импульс повышенного напряжения, создаваемый дросселем, подается не только на лампу, но и на емкость. Для снижения этого влияния в опережающую цепь включают дополнительную индуктивность  $LL_3$ .

### 9.5. Схема быстрого зажигания

Как уже говорилось, самым ненадежным элементом в схемах включения ламп является стартер. Он выдерживает 60-100 тыс. включений, но часто залипает, что приводит к перегоранию электродов или дросселей. Поэтому часто применяют бесстартерные схемы включения ламп. Бесстартерные схемы делятся на схемы *быстрого зажигания* и *схемы мгновенного зажигания*.

В схеме быстрого зажигания в момент включения обеспечивается предварительный подогрев электродов лампы с одновременной подачей напряжения на нее, достаточного для зажигания (рис. 67).

В этой схеме подогрев электродов осуществляется с помощью вторичных обмоток автотрансформатора. Сопротивление первичной обмотки автотрансформатора значительно больше сопротивления дросселя LL. Поэтому, пока лампа не горит, напряжение на ней примерно равно напряжению сети. После загорания лампы на дросселе LL возникает падение напряжения и на первичной обмотке автотрансформатора напряжение снижается, что приводит к снижению токов подогрева электродов. Наличие проводящей полоски вдоль лампы значительно снижает напряжение зажигания. В схеме эта полоска соединяется через защитное сопротивление или заземляется.

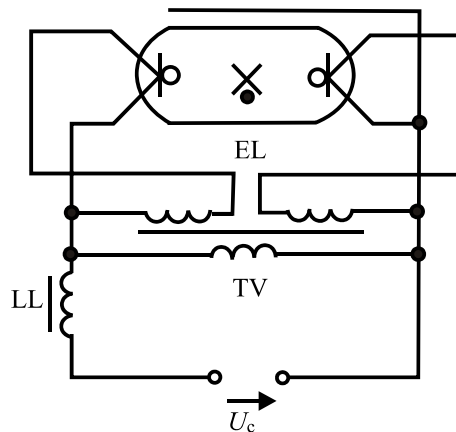


Рис. 67. Схема быстрого зажигания лампы

К недостаткам такой схемы относится большее количество металла и большие, чем в стартерной схеме, потери мощности в ней.

### 9.6. Схема мгновенного зажигания

Бесстартерные схемы мгновенного (холодного) зажигания предназначены для зажигания люминесцентных ламп путем увеличения напряжения на лампе достаточного для зажигания лампы без предварительного разогрева электродов (рис. 68).

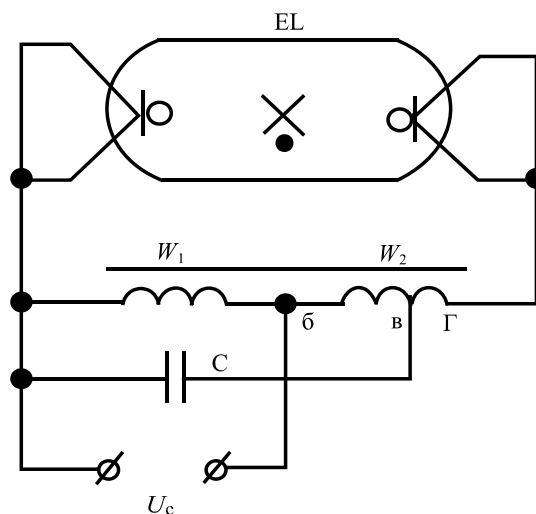


Рис. 68. Резонансная схема включения люминесцентных ламп

За счет резонанса напряжений в контуре, образованном конденсатором  $C$  и частью  $б$  – в обмотки автотрансформатора  $TV$ , к электродам лампы прикладывается напряжение  $400...500$  В, и лампа практически мгновенно зажигается. Часть  $б$  –  $г$  обмотки выполняет роль балластного сопротивления. После зажигания лампы по части автотрансформатора  $б$  –  $г$  пойдет ток, изменится ее индуктивное сопротивление, и напряжение на лампе снизится до номинального.

Недостатками такой схемы являются большие размеры автотрансформатора и значительные потери мощности в ПРА, достигающие до 30...40% мощности лампы.

### ***Пускорегулирующие аппараты для люминесцентных ламп***

Пускорегулирующие аппараты для люминесцентных ламп подразделяются на стартерные, бесстартерные, токограничивающие.

Стартерные ПРА предназначены для ограничения тока при разогреве и работе лампы и для создания импульса повышенного напряжения.

Бесстартерные ПРА подразделяются на ПРА быстрого и мгновенного зажигания. ПРА быстрого зажигания служат для предварительного разогрева электродов и ограничения тока при работе лампы.

ПРА мгновенного зажигания обеспечивают подачу достаточного для зажигания лампы напряжения и ограничивают ток при работе лампы.

Бесстартерные ПРА горячего зажигания имеют больше недостатков, чем стартерные:

- большой расход стали и цветного металла;
- после зажигания лампы по нити проходит ток подогрева, что снижает срок службы лампы.

ПРА мгновенного зажигания чаще всего имеют индуктивность и емкость. За счет резонанса напряжений в таком контуре обеспечивается надежное зажигание лампы, подключенной к одному из элементов. Отпадает надобность в предварительном подогреве электродов. Напряжения зажигания в 2...2,5 раза выше напряжения сети.

Структура условного обозначения ПРА:



- 1) количество ламп;
- 2) одна буква, характеризующая  $\cos \varphi$  (И — индуктивный, Е — емкостный; К — компенсационный);
- 3) мощность одной лампы, Вт;
- 4) одна буква, характеризующая группу аппарата по условиям шума (Н — нормальный; П — пониженный; А — особо низкий; С — очень низкий);
- 5) две цифры (01...99), номер серии;
- 6) три цифры (001...999), номер исполнения;
- 7) климатическое исполнение и категория размещения (ХЛ — холодный, У — умеренный, Т — тропический климатический пояс), цифры 1..5 — категория размещения.

### ***Специальные люминесцентные лампы***

Люминесцентные лампы специального назначения включают в себя:

- малогабаритные люминесцентные лампы, предназначенные для местного освещения;
- фигурные *U*- и *W*-образные и кольцевые люминесцентные лампы, предназначенные для освещения жилых и общественных помещений;
- люминесцентные лампы с направленным светораспределением — рефлекторные, предназначенные для освещения промышленных помещений, а также для карнизного освещения, освещения витрин;
- высокоинтенсивные люминесцентные лампы с повышенным световым потоком и яркостью свечения за счёт повышенной удельной мощности.

Цветные люминесцентные лампы предназначены для декоративного освещения и световой рекламы, главным образом, внутри помещений. По размерам они взаимозаменяемы со стандартными лампами, но рассчитаны на работу в схеме быстрого пуска.

Сигнальные малогабаритные люминесцентные лампы тлеющего разряда с рабочим током около 3 мА предназначены для систем автоматики и радиоэлектроники, выпускаются с различными люминофорами, определяющими цвет свечения лампы: оранжевый, зелёный, голубой и жёлтый.

Газосветные лампы (трубки), применяемые в световой рекламе, представляют собой лампы тлеющего разряда, в которых используется излучение положительного столба разряда и свечение люминофора, нанесенного на трубку и возбуждаемого излучением разряда. В последнем случае в трубку вводится доза ртути.

Рефлекторные люминесцентные лампы (рис. 69) предназначены для работы в светильниках без отражателей.

ЛБР — рефлекторная люминесцентная белая применяется для освещения промышленных предприятий, карнизов и витрин.

Эритемные (витальные) люминесцентные лампы служат для генерирования потока в области УФ-В. Промышленность выпускает лампы ЛЭ-15; ЛЭ-30; ЛЭР-40; эти лампы генерируют излучение в области А — 45%; В — 35%, а остальное — в видимой области. В области С излучение отсутствует.

Конструктивно они отличаются от люминесцентных ламп стеклом и составом люминофора. Стекло кварцевое или увиолевое, пропускающее УФ-излучение, а люминофор преобразует УФ-излучение 254 нм в УФ-излучение 297 нм.

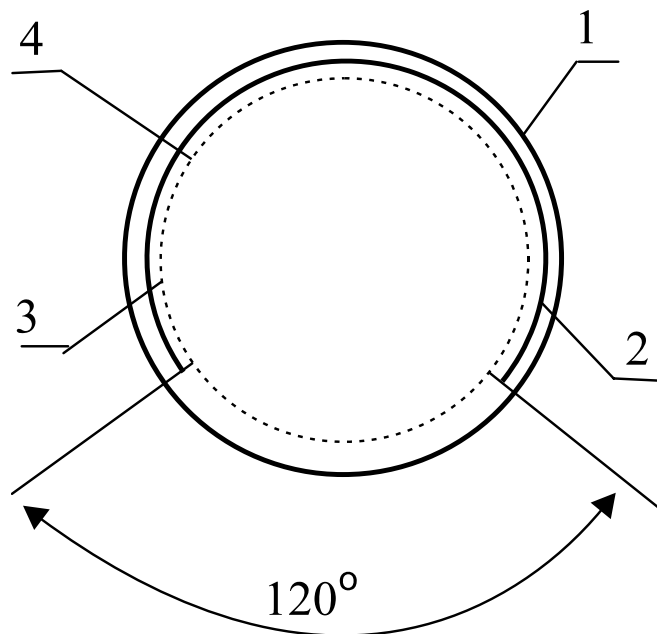


Рис. 69. Конструкция рефлекторной люминесцентной лампы:  
 1 — колба лампы, силикатное стекло; 2 — отражатель (рефлектор)  
 из порошкового алюминия; 3 — люминофор; 4 — внутреннее пространство,  
 как и у ламп низкого давления

Лампа ЛЭР имеет такую же конструкцию, как ЛБР.

### ***Бактерицидные лампы***

Служат для генерирования УФ лучей в области С. Это лампы ДБ-15; ДБ-30; ДБ-60. Стекло в этих лампах кварцевое, люминофор отсутствует.

Генерируют лучи в области: С — 85%; В — 2%; А — 2%; 1% — в видимой области.

### ***Лампы для облучения растений***

Разработаны для облучения рассады в теплицах такие лампы, как ЛФ 40-1, ЛФ 40-2, ЛФР 80, ЛФР 150. Эти лампы генерируют излучение в области первого и второго максимумов спектральной чувствительности растений — синяя и желто-красная части спектра. Требуемый спектральный состав ламп ЛФ-40 обусловлен подбором компонентов люминофора. Других отличий от осветительных ламп нет.

### ***Безэлектродные люминесцентные лампы***

Безэлектродные лампы практически не требуют обслуживания, обладая сверхвысоким сроком службы (60 000 часов). Принцип их действия основан на возникновении газового разряда при отсутствии электродов за счет индуцированных электромагнитным полем вихревых токов (рис. 70).

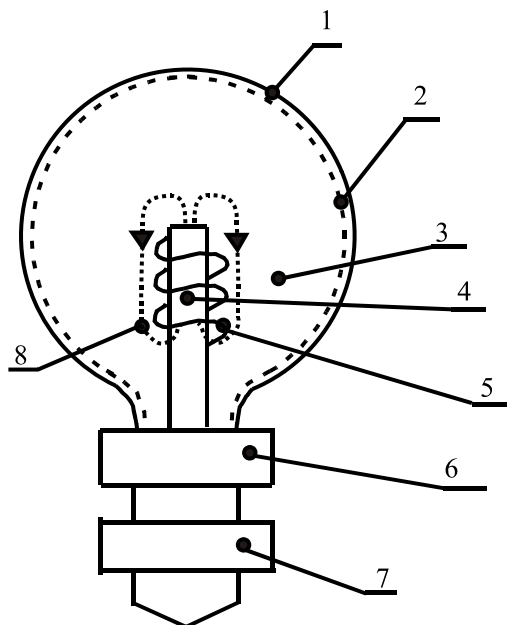


Рис 70. Схема безэлектродной люминесцентной лампы:  
 1 — колба (силикатное стекло); 2 — люминофор; 3 — внутреннее пространство (аргон и ртуть); 4 — ферритовый стержень; 5 — остеклованная обмотка;  
 6 — пускорегулирующий аппарат; 7 — преобразователь частоты; 8 — магнитное поле

Фирмой Philips выпускаются лампы с частотой 2,65 МГц, мощностью 55, 85 и 150 Вт со световым потоком 3500, 6000 и 11000 лм соответственно. Светоотдача таких ламп 65...70 лм/Вт.

### ***Компактные люминесцентные лампы***

Компактные люминесцентные лампы — обычные газоразрядные лампы. Отличие их состоит в том, что, во-первых, стеклянная трубка изогнута в виде компактной спирали или каналами и заканчивается обычным цоколем, что позволяет вворачивать ее в патрон лампы накаливания. Во-вторых, вместо громоздкого дросселя используется компактный электронный балласт, работающий на высокой частоте, производимой специальным полупроводниковым генератором (рис.71).

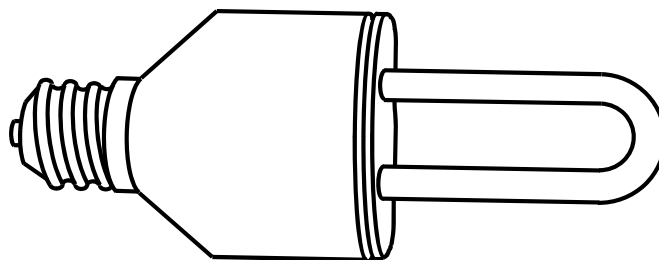


Рис. 71. Компактная люминесцентная лампа

В резьбовом цоколе находится печатная плата, на которой собран преобразователь для ее питания.

Рассмотрим работу энергосберегающей лампы на примере наиболее распространенной схемы (рис. 72). Схема состоит из цепей питания, включающих помехозащитный дроссель LL2, предохранитель FU1, диодный мост и фильтрующий конденсатор C4. Схема запуска состоит из элементов VD1, C2, R6 и динистора VS. VD2, VD3, R1 и R3 выполняют защитные функции.

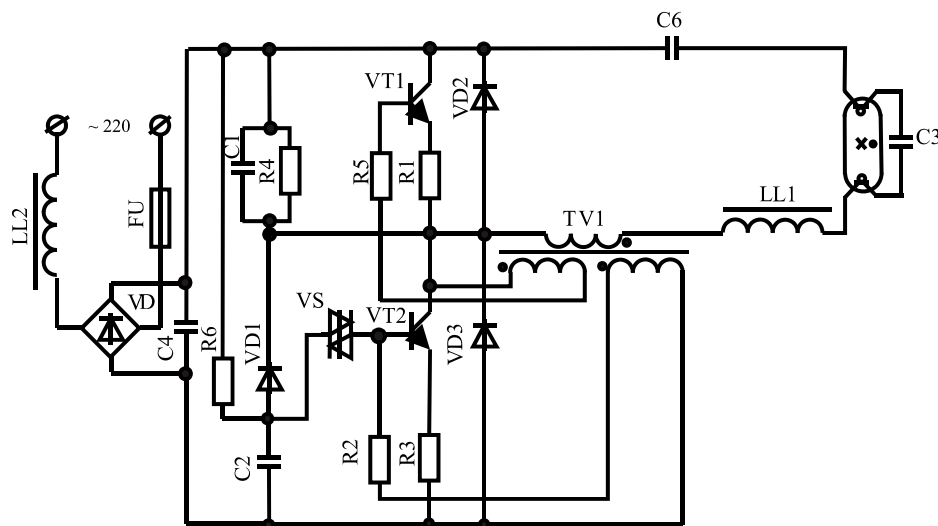


Рис. 72. Схема электронного ПРА

При включении лампы, R6, C2 и динистор формируют импульс, подающийся на базу транзистора VT2, приводящий его к открытию. После запуска эта часть схемы блокируется диодом VD1. После каждого открытия транзистора VT2, конденсатор C2 разряжается. Это предотвращает повторное открытие динистора.

### *Светоизлучающий диод*

Светоизлучающий диод (светодиод) — полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию в энергию оптического излучения на основе явления инжекционной электролюминесценции в полупроводниковом кристалле либо контактом металл-полупроводник. В светодиоде при протекании в нем постоянного или переменного тока в область полупроводника, прилегающему к такому переходу (контакту), инжектируются избыточные носители тока — электроны и дырки; их рекомбинация сопровождается излучением.

В отличие от тепловых источников, такое излучение имеет более узкий спектр ( $\approx 0,05$  мкм), которое воспринимается как одноцветное. Цвет излучения определяется как полупроводниковым материалом, так и легирующими примесями. Для изготовления излучающих диодов чаще всего применяют GaAs, GaP, SiC и твердые растворы ( $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и др.).

В качестве легирующих примесей используют: в GaP — цинк и кислород (красные излучающие диоды) либо азот (зеленые излучающие диоды); в GaAs — кремний либо цинк и теллур (инфракрасные излучающие диоды).

В 90-е годы прошлого столетия, благодаря разработке новых эпитаксиальных технологий изготовления гетероструктур, световая отдача светодиодов из AlGaInP возросла в желто-красной области спектра до 30-40 лм/Вт, что превышает светоотдачу ламп накаливания (15-22 лм/Вт).

Преимущества светодиодных осветительных приборов состоят в нижеследующем.

1. Светоотдача выше, чем у ламп накаливания. Ожидается в перспективе 100-150 лм/Вт, что превысит светоотдачу люминесцентных ламп (80-90 лм/Вт).
2. Возможность получения широкого спектра свечения от красного до фиолетового и белого.
3. Возможность создания светодиодов с управляемым цветом излучения;
4. Возможность получения квазимонохроматических источников излучения.
5. Малое энергопотребление светодиодов и приборов на их основе.
6. Безопасность при соприкосновении с корпусом.
7. Малое тепловыделение.
8. Высокая механическая прочность.
9. Высокое быстродействие.
10. Большой срок службы (до 100000 часов).

Конструкция некоторых светодиодных осветителей (СО) представлена на рисунке 73.

Излучающие кристаллы 1 имеют повышенную площадь излучения (до 1 мм<sup>2</sup>), что позволило увеличить рабочий ток, световой поток и снизить тепловое сопротивление кристалла. Для увеличения светового потока в некоторых конструкциях применяются несколько кристаллов, соединенных последовательно (рис. 73 б, в). Кристаллы размещаются на теплоотводящих поверхностях 2 внутри отражателей бокового излучения 3. Полимерная линза 4 с определенным соотношением расстояния от кристалла до поверхности линзы и радиуса линзы определяет ширину диаграммы направленности излучения.

Вся эта конструкция размещается на подложке 5.

Применение эллиптического купола позволяет снизить потери на сферическую абберацию.



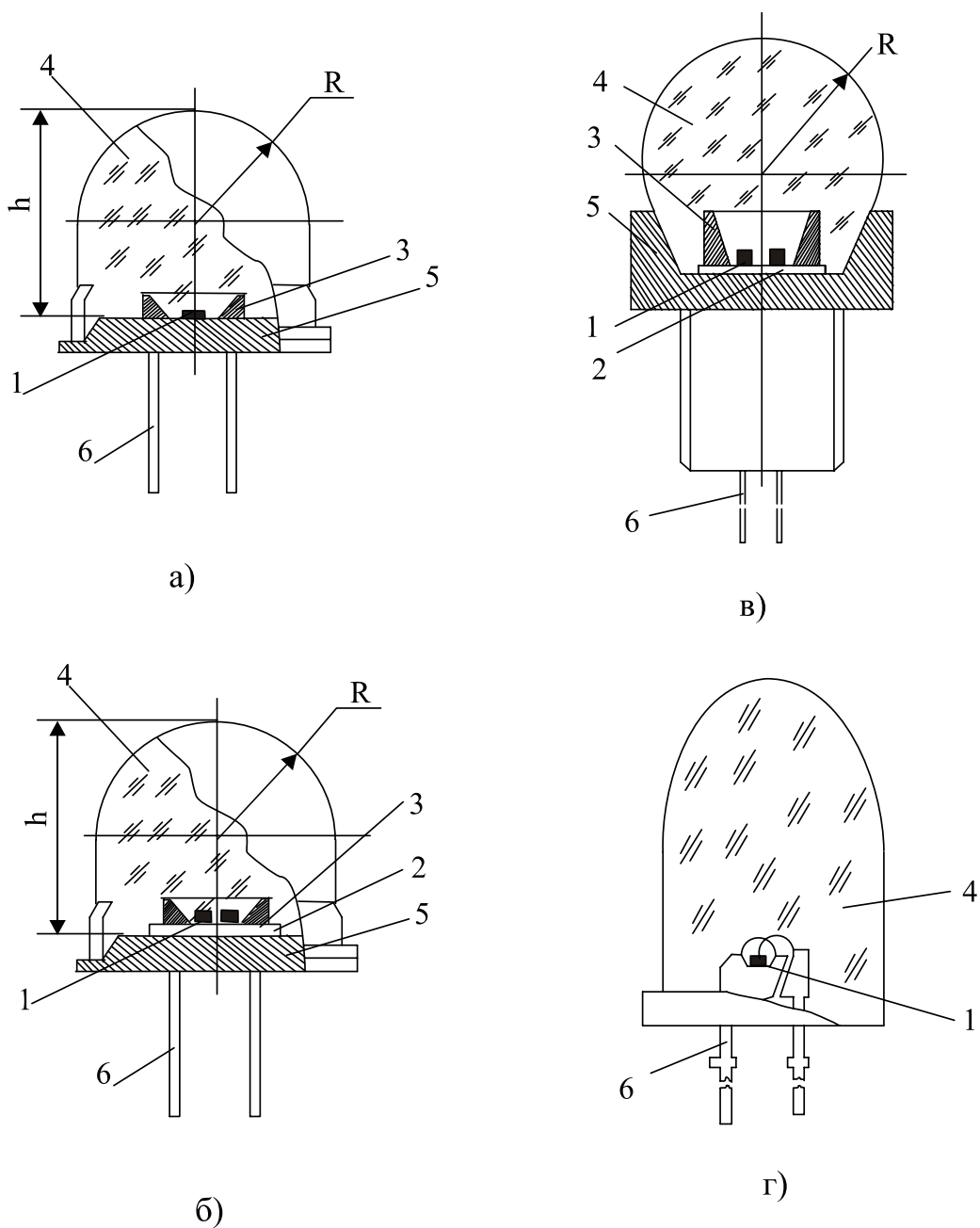


Рис. 73. Устройство СО типов У-266 (а), У-276 (б), У-332 (в), У-164 Бл (г)

Разработанные СО характеризуются высокими световыми параметрами (табл. 5).

В СО белого свечения направленного излучения типа У-164Бл излучающий кристалл InGaN с люминофорным покрытием находится во втором от преломляющей поверхности фокусе эллиптического полимерного купола.

На основе модулей белого свечения производится аккумуляторные фонари — фары «ЭКОТОН».

Основные световые и электрические параметры некоторых светодиодных излучателей приведены в таблице 5.

Таблица 5. Основные световые и электрические параметры светодиодных осветителей

Тип СО	Входные электрические параметры		Световые параметры						$H_C$ , лм/Вт	Излучающая герероструктура
	$I_{ЛР}$ , мА	$U_{ЛР}$ , В	$\Phi_C$ , лм	$I$ , кд	$P_C$ , мВт	$2\theta_{0,5}$ , град	Цвет свечения $\lambda_{МАХ}$ , нм			
У-267БФ-2	70	5,7	6-10	10-20	40-65	$50 \pm 5$	красный 640 $\pm 5$	20	AlGaInP/GaP	
У-267БФ-4	70	11	15-17	17-22	95-110	$55 \pm 5$	красный 640 $\pm 5$	18	AlGaInP/GaP	
У-332БФ-4	70	11	15-18	27-37	100-120	$35 \pm 5$	красный 640 $\pm 5$	19	AlGaInP/GaP	
У-266Д-1	400	2,5	15-19	27-45	30-38	$35 \pm 5$	желтый 592 $\pm 2$	19	AlGaInP/GaP	
У-332Д-1	200	8,2	25-35	55-65	55-65	$45 \pm 5$	желтый 592 $\pm 2$		AlGaInP/GaP	
У-266И	350	4,0	10-15	17-23	20-25	$40 \pm 5$	зеленый 525 $\pm 5$	9,5	InGaN	
У-266Т	350	4,0	8-10	15-20	23-28	$40 \pm 5$	сине-зеленый 515 $\pm 5$	7	InGaN	
У-266С	350	4,0	3-4	4-6	30-40	$40 \pm 5$	синий 470 $\pm 5$	4,3	InGaN	
У-164Бл	30	4,0	2-3	30-50	5-7	$8 \pm 2$	белый	22	InGaN	

### *Вопросы для самопроверки*

1. Что такое ПРА и каково его назначение?
2. Каково назначение дросселя и конденсатора  $C1$  в стартерной схеме включения люминесцентной лампы?
3. Объясните процесс зажигания люминесцентной лампы с индуктивным балластом.
4. Почему стартер не срабатывает после загорания лампы?
5. Перечислите преимущества и недостатки последовательного включения люминесцентных ламп в сеть.
6. Почему снижается коэффициент пульсации в схеме включения люминесцентных ламп с расщепленной фазой?
7. Каково назначение  $LL3$  в схеме включения люминесцентных ламп с расщепленной фазой?
8. Расскажите о процессах в схемах быстрого и мгновенного зажигания люминесцентных ламп.
9. Чем отличаются бактерицидные и эритемные лампы от лампы ЛБ?
10. Расскажите об особенностях люминесцентных ламп для растений.
11. Какие преимущества и недостатки компактных люминесцентных ламп перед линейными.
12. В чем преимущества и недостатки светоизлучающих диодов перед другими источниками света?

## 10. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

- Газоразрядные лампы высокого давления
- Схема включения двухэлектродной лампы ДРТ
- Схема включения четырехэлектродной лампы ДРТ
- Лампы ДРЛ
- Металлогалогенные дуговые лампы

### 10.1. Газоразрядные лампы высокого давления

Дуговой разряд в парах ртути при давлениях до 0,3 мПа позволяет создать источники света с очень высокой световой отдачей. Такими источниками света являются газоразрядные лампы высокого (ГЛВД) и сверхвысокого давления (ЛСВД).

Эти лампы в основном классифицируются по конструктивным параметрам:

- газоразрядные лампы высокого давления ГЛВД;
- ГЛВД с исправленной цветностью (ДРЛ);
- трубчатые сверхвысокого давления (ЛСВД) с естественным охлаждением;
- капиллярные ЛСВД с принудительным охлаждением;
- шаровые ЛСВД с естественным охлаждением.

Рассмотрим первый класс — газоразрядные лампы высокого давления типа ДРТ (дуговые ртутные трубчатые) (рис. 74).

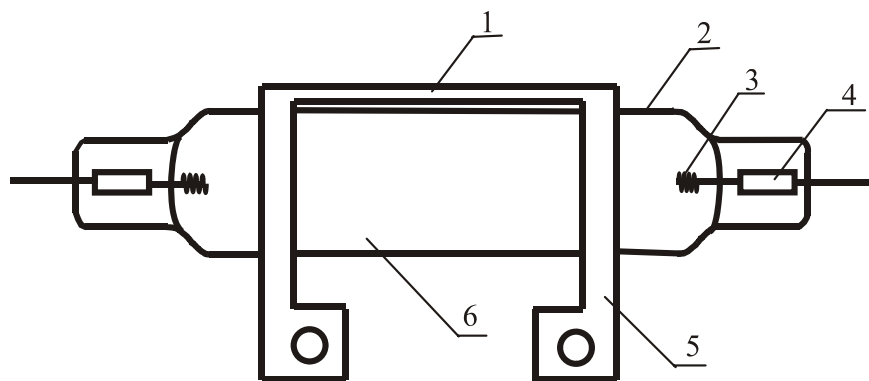


Рис. 74. Конструкция лампы ДРТ

Эти лампы представляют из себя кварцевую трубку 2, по концам которой впаяны активированные самокалящиеся вольфрамовые электроды 3.

Внутри трубки 6, после тщательного вакууммирования и уничтожения остатков газа, вводится дозированное количество ртути и чистый аргон до давления 1...3 кПа.

Аргон служит:

- для облегчения зажигания разряда;
- для защиты электродов от распыления в начальной стадии разгорания.

Металлическая фольга 1 служит для облегчения зажигания лампы, молибденовая фольга 4 имеет коэффициент теплового расширения равный коэффициенту расширения стекла, а кронштейн 5 служит для крепления лампы.

Мощность таких ламп от 80 Вт до 2,5 кВт, светоотдача 45...55 лм/Вт. На работу лампы влияет температура окружающей среды и условия охлаждения. Понижение температуры может привести к конденсации ртути и значительному снижению напряжения на РЛВД, её мощности и потока излучения. При повышении температуры сокращается срок службы за счёт потемнения и соляризации кварцевого стекла.

Полезный срок службы лампы ДРТ составляет 1,5...3 тыс. часов.

Лампы ДРТ применяют как источники ультрафиолетового излучения в медицине, сельском хозяйстве, измерительной технике и в других областях. Специальные типы ламп применяются в светокопировальных аппаратах. Для освещения не применяются из-за плохой цветопередачи.

Ртутные лампы высокого давления делятся:

- на двухэлектродные;
- четырёхэлектродные.

## 10.2. Схема включения двухэлектродной лампы ДРТ

Схема включения двухэлектродной лампы ДРТ представлена на рисунке 75.

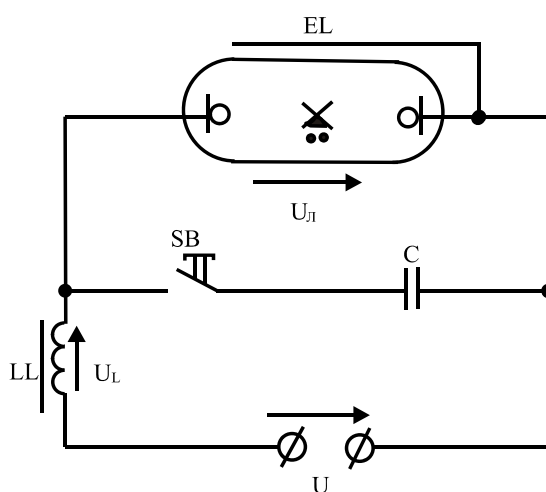


Рис. 75. Резонансная схема включения двухэлектродной лампы ДРТ

На данной схеме закрашенный уголок означает, что это ультрафиолетовая лампа, две точки (••) означают, что это лампа высокого давления.

Так как в начальный момент времени в лампе очень мало носителей зарядов, то напряжение зажигания выше напряжения сети, поэтому необходимо создать такую напряженность поля, чтобы эти электроны получили достаточную энергию для создания ударной ионизации на длине свободного пробега:

$$\vec{E} = \frac{\vec{U}_л}{l},$$

где  $l$  — расстояние между электродами.

Сила, действующая на заряды:

$$\vec{F} = \vec{E}q.$$

Работа, совершаемая полем, по перемещению заряда и увеличивающая кинетическую энергию электрона:

$$A = \vec{F}\lambda = ma \Rightarrow \frac{mv^2}{2},$$

где  $\lambda$  — длина свободного пробега.

При наличии полоски вдоль трубки напряженность поля возрастает, т.к.  $d \ll l$ .

В начальный момент времени  $U_л = U_0$  лампа не работает, и ток равен нулю. Нет условий зажигания лампы — наличие достаточной напряженности поля, а значит определенной кинетической энергии электронов. При замыкании ключа SB проходит ток по емкости и индуктивности.

При равенстве реактивных сопротивления индуктивности и емкости  $X_L = X_C$  возникает резонанс напряжений.

При нажатии кнопки SB по цепи пойдет ток  $I = \frac{U}{Z}$ , где  $Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}$ . При  $X_L = X_C$  — условие резонанса напряжений и  $Z = r$ .

Тогда электрический ток  $I = \frac{U}{r}$  очень велик. Напряжение на конденсаторе, включенного параллельно лампе,  $U_C = IX_C = \frac{U}{r}X_C$ . Если  $X_C \gg r$ , то  $U_C \gg U$  и условие зажигания может быть выполнено. Лампа загорится.

Для зажигания лампы нет необходимости добиваться резонанса напряжений. Но обязательное условие — прохождение и прерывание тока через дроссель (индуктивность).

При нажатии кнопки SB по цепи пойдет ток, в дросселе возникнет магнитное поле, обладающее определенной энергией. При прерывании тока в дросселе возникнет ЭДС самоиндукции, пропорциональная ин-

дуктивности и скорости изменения тока, которая стремится поддержать уменьшающийся ток. Если ЭДС совпадет с приложенным напряжением, то на лампе создается повышенное напряжение и лампа загорится.

После зажигания дугового разряда происходит нагревание разрядного промежутка и испаряется ртуть. Давление паров ртути возрастает, возрастает и общее давление, и изменяются все характеристики: напряжение на лампе растет; растет потребляемая мощность, КПД. Разряд стягивается в яркий светящийся шнур по оси трубки. Этот процесс разгорания лампы длится 5...10 минут, до тех пор, пока не испарится вся ртуть и не установится тепловое равновесие с окружающей средой. Чем объяснить такой характер разжигания трубки, (рис. 76), все величины растут во времени, а ток уменьшается?

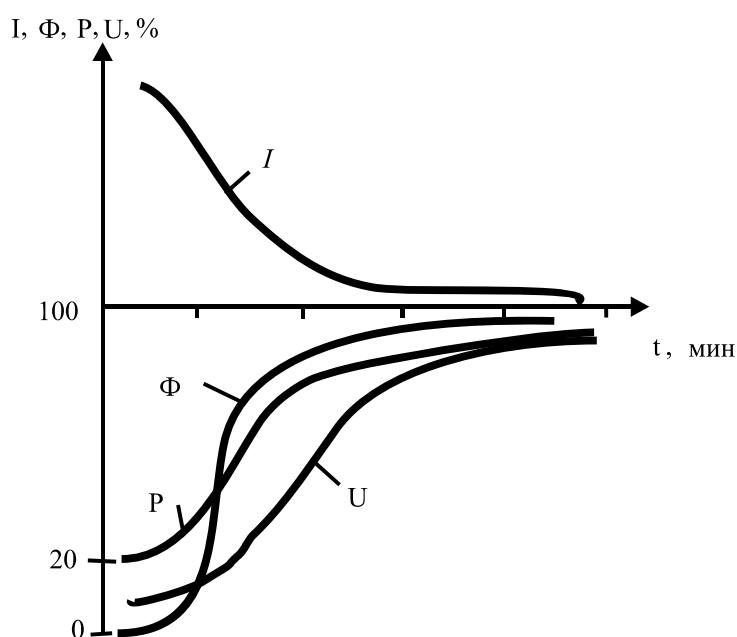


Рис. 76. Изменение параметров лампы в процессе разгорания

В первый момент времени лампа холодная, давление в ней не велико, длина свободного пробега электронов большая и почти все они достигают энергий ионизации. Ионизированных молекул много, а возбужденных мало, поэтому малы поток излучения, напряжение на лампе и мощность. Почти вся потребляемая мощность идет на ионизацию. При прохождении по лампе тока она нагревается, повышается давление, снижается длина свободного пробега и электроны чаще сталкиваются с атомами, удар происходит с меньшей силой и количество возбужденных атомов увеличивается, а ионизированных — снижается. Возрастает и кинетическая энергия молекул, т.е. возрастает температура. При дальнейшем разгорании лампы интенсивность ударной ионизации снижается, а в разгоревшейся лампе устанавливается равновесие между ионизацией и рекомбинацией. Ток в лам-

пе поддерживается не столько за счет ударной ионизации, сколько за счет термоэлектронной эмиссии с электродов, которые разогреваются в результате бомбардировки их положительными ионами.

Если лампа погаснет, то зажечь ее можно только после ее остывания и увеличения длины свободного пробега электронов, достаточной для ударной ионизации. Это произойдет через 8...10 минут.

### 10.3. Схема включения четырёхэлектродной лампы ДРТ

В этой лампе условие зажигания — достаточная напряженность поля, осуществляется уменьшением расстояния между электродами (рис. 77).

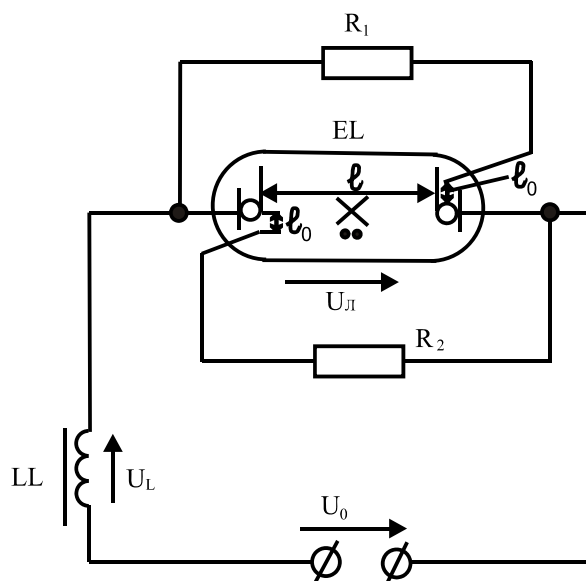


Рис. 77. Схема включения четырехэлектродной лампы

В начальный момент времени, когда лампа не горит — токов нигде нет, нет и падений напряжений. Поэтому напряжение между основными электродами и между основным и дополнительным равны напряжению сети.

Напряжённость электрического поля между основными электродами:

$$E = \frac{U_0}{\ell}.$$

Напряженность поля между основным электродом и дополнительным:

$$E_0 = \frac{U_0}{\ell_0}.$$

Но так как  $\ell_0 \ll \ell$ , то  $E_0 \gg E$  и здесь возникает разряд. По сопротивлению  $R_1$  или  $R_2$  пойдет электрический ток, возникнет падение напряжения на этих сопротивлениях и напряженность поля между основными электродами станет больше, чем между основным и дополнительным. Поэтому электрический ток пойдет между основными электродами.



Лампы ДРТ дают излучение в области УФ-С — 22%, УФ-В — 34%, остальное в области УФ-А и в видимой зоне. Основным недостатком этих ламп — отсутствие излучения в оранжево-красной части спектра. Температура окружающей среды оказывает существенное влияние на работу лампы. При сильном охлаждении ток лампы будет возрастать, напряжение на ее зажимах будет уменьшаться, снизятся температура и давление газов, часть ртути сконденсируется и все это приведет к смещению максимума спектральной плотности излучения в сторону коротких волн — 254 и 185 нм. Поэтому холодные ртутные лампы являются мощными источниками УФ-С излучения. Нужно помнить, что увеличенный ток может привести к перегреву дросселя и выходу его из строя.

Срок службы ламп ДРТ — 1,5...3 тысячи часов и главным образом определяется прозрачностью кварцевого стекла. УФ-лучи, воздействуя на стекло, вызывают ее *соляризацию* — переход из аморфного состояния в кристаллическое, а также происходит потемнение за счет оседания на стенках колбы паров распыленного вольфрама.

Применяются такие лампы в лампах ДРЛ, как источники ультрафиолетового излучения в медицине, в облучательных установках, для люминесцентного анализа, в светокопировании, измерительной технике и т.д.

#### 10.4. Лампы ДРЛ

Выпускаются лампы ДРЛ (дуговые ртутные люминесцентные) мощностью 50, 80, 125, 250, 400, 700, 1000, 2500 Вт как двухэлектродные, так и четырехэлектродные (рис. 78).

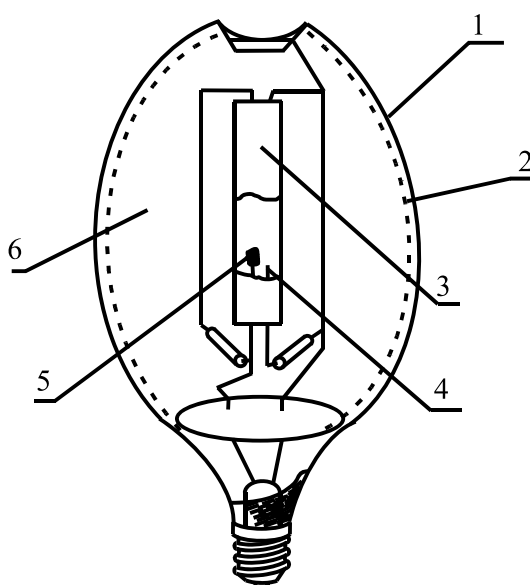


Рис. 78. Конструкция лампы ДРЛ

Эти лампы предназначены для генерирования видимого излучения. Светоотдача их 40...60 лм/Вт, что меньше, чем лампы ЛБ (до 90 лм/Вт).

Преимущества лампы ДРЛ:

- источник большой мощности в небольшом объеме;
- может работать при температурах от  $-50$  до  $+50$  °С.

Лампа представляет из себя колбу 1 (см. рис. 78) из силикатного стекла, на внутреннюю поверхность которой нанесен люминофор 2.

Лампа содержит горелку 3 в виде трубки из кварцевого стекла с основными 5 и дополнительными вольфрамовыми электродами 4 в торцах. Дополнительные электроды подключены через токоограничивающие резисторы к основным электродам на противоположном торце горелки. В полости горелки содержатся аргон и дозированное количество ртути. Форма колбы обеспечивает во время горения лампы температуру, необходимую для эффективной работы люминофора, и равномерное распределение её по поверхности. Полость колбы заполнена углекислым газом для стабилизации свойств люминофора и уменьшения коэффициента теплопередачи.

### Схемы включения двухэлектродной лампы ДРЛ

Схемы зажигания ламп ДРЛ могут быть самыми различными (рис. 79).

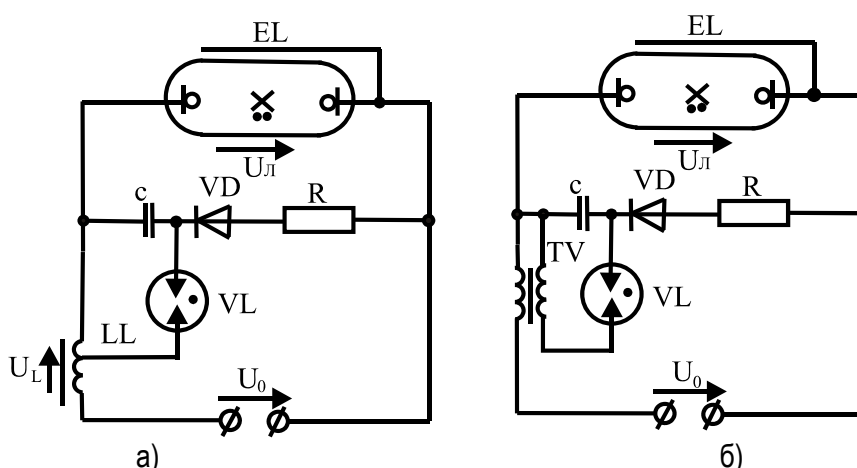


Рис. 79. Схемы включения двухэлектродной лампы ДРЛ:  
а — схема с разрядником, б — трансформаторная схема

Чтобы зажечь лампу, необходимы три условия: 1) наличие свободных зарядов; 2) достаточная длина свободного пробега электронов и 3) достаточная напряженность поля для создания ударной ионизации. Небольшое количество свободных зарядов в лампе всегда есть за счет космического излучения и радиации земли. Первое условие будет всегда выполняться. Второе условие определяется конструкцией лампы, т.е. начальным давлением и температурой окружающей среды, при определенных температурах будет тоже выполнено. Третье условие — достаточная напряженность поля определяется конструкцией лампы — расстоянием между электродами и наличием соответствующего напряжения зажигания. Чаще всего для зажигания лампы необходимо выполнить последнее условие.

Напряжение зажигания можно создать различными путями — резонансным методом (см. рис. 74), путем создания импульса повышенного напряжения за счет ЭДС самоиндукции в дросселе (как в стартерной схеме зажигания люминесцентной лампы) или трансформаторным методом.

Рассмотрим второй и третий метод применительно к лампе ДРЛ.

При включении двухэлектродной лампы с разрядником (см. рис. 78, *а*), под действием напряжения сети заряжается конденсатор *C* через сопротивление *R*, выпрямитель *VD* и дроссель *LL*. Когда напряжение на конденсаторе достигнет величины, достаточной для пробоя разрядника, произойдет разряд конденсатора на часть витков автотрансформатора, роль которого играет дроссель *LL*. В дросселе трансформируется импульс высокого напряжения, вызывающего разряд в лампе. Импульс повышенного напряжения на лампе получается в результате геометрической суммы напряжения на дросселе и напряжения сети. Рабочий режим в лампе устанавливается через 5...7 минут. Разрядник в рабочем режиме лампы не работает, так как напряжение на нем мало в результате падения напряжения на дросселе.

Аналогично происходит процесс зажигания в трансформаторной схеме (рис. 78, *б*). Здесь конденсатор разряжается на первичную обмотку трансформатора *TV*. На вторичной обмотке, служащей дросселем, индуктируется высокое напряжение и, складываясь с напряжением сети, подается на лампу.

### 10.5. Металлогалогенные дуговые лампы

Лампы общего освещения типа ДРИ (дуговая ртутная с излучающими добавками) по конструкции подобны лампам типа ДРЛ с двухэлектродными горелками типа ДРТ (рис. 80).

Лампа содержит трубчатую горелку *3* из кварцевого стекла с помещёнными в её торцы вольфрамовыми электродами. Полость горелки заполнена аргоном, строго дозированным количеством ртути, йодидов редкоземельных металлов (гольмия, тулия, таллия, цезия). Горелка помещена во внешнюю прозрачную термостойкую колбу *1* с вакуумным внутренним пространством *2*, обеспечивающим необходимый температурный режим горелки и устраняющим возможность электрического пробоя между токоведущими частями лампы.

Схема включения (см. рис. 80, *б*), содержит трансформатор *TV1*, вторичная обмотка которого выполняет роль балластного сопротивления, стабилизирующего разряд между электродами. Первичная обмотка трансформатора *TV1* является частью зажигающего устройства, содержащего, кроме того, трансформатор *TV2*, конденсатор *C* и разрядник *VL*.

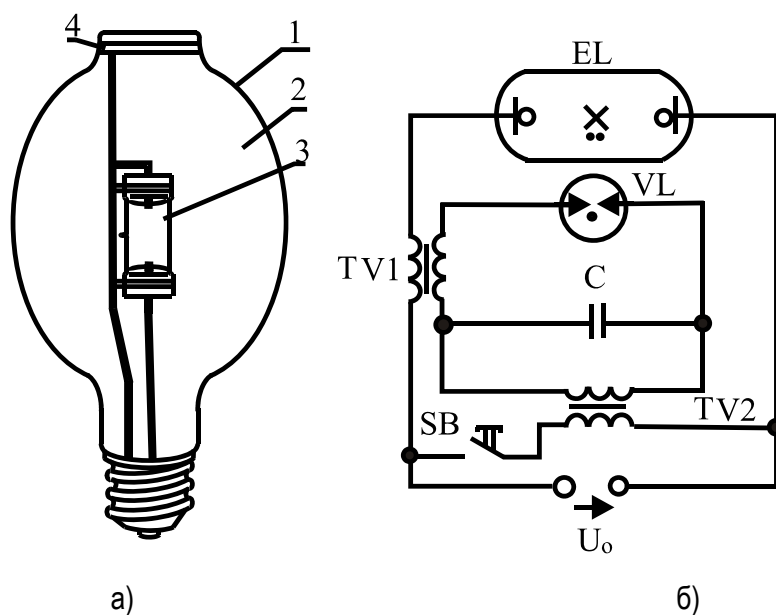


Рис. 80. Общий вид (а) и схема включения лампы ДРИ (б)

Напряжение сети, приложенное к электродам лампы, недостаточно для возникновения разряда между ними. При включении кнопкой SB на первичную обмотку трансформатора TV2 подается напряжение и конденсатор C на протяжении части полупериода сети заряжается от вторичной обмотки TV2 до напряжения пробоя VL. В момент пробоя по первичной обмотке TV1 протекает импульс тока разряда конденсатора, а во вторичной обмотке трансформатора TV1 возникает импульс напряжения с амплитудой 2...3 кВ, обеспечивающий зажигание разряда в горелке лампы.

В парах аргона и ртути зажигается дуга, в которую попадают йодиды, а состав каждого из них определяет цвет свечения. Этим можно добиться любого цвета излучения.

Лампы ДРИ применяют в теплицах, в фото-, теле- и киностудиях.

Светоотдача ламп достигает 95 лм / Вт, что ставит их в ряд наиболее эффективных источников света. Промышленностью выпускаются лампы мощностью от 50...2000 Вт.

Достоинством ламп ДРИ является:

- выше КПД, т.к. отсутствует преобразование излучения в видимое;
- выше светоотдача 90...95 лм/Вт;
- можно получить любой спектр по нашему желанию;
- появляется возможность вводить щелочные металлы (Li, Na) и др. агрессивные по отношению к стеклу металлы (Zn), которые в виде галогенов не агрессивны;
- нечувствительность к внешним условиям среды.

Недостатки:

- меньший срок службы, чем у ДРЛ (ДРЛ 1500...3000 ч, ДРИ-2000);
- значительная чувствительность к колебаниям напряжения сети;
- требуется высокое напряжение зажигания, а значит необходимость дополнительного зажигающего устройства.

Применение:

- для общего освещения;
- в теплицах;
- для освещения телестудий цветного телевидения и кино.

### *Газоразрядные лампы, используемые в растениеводстве*

Несмотря на высокую эффективность, фитолампы низкого давления не нашли широкого применения из-за малой единичной мощности. Поэтому приходилось их собирать в кассеты по 6-12 штук, а днем поворачивать эти кассеты так, чтобы не затенять растения.

Для снижения этих недостатков специально для теплиц разработана лампа ДРЛФ (дуговая ртутная люминесцентная, фито) конструктивно сходная с лампами ДРЛ соответствующей мощности (рис. 81, а).

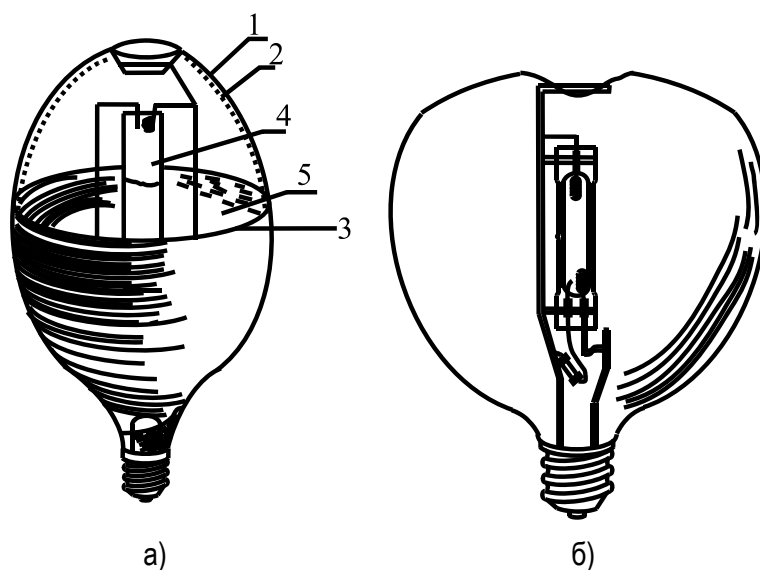


Рис. 81. Общий вид:  
а — дуговой ртутной лампы ДРЛФ-400, б — лампы ДРФ-1000

Кварцевая горелка 4 заполнена аргоном и парами ртути с добавками йодидов лития и индия. Колба 1 выполнена из термостойкого стекла, устойчивого против растрескивания при попадании на его поверхность капель воды. На внутреннюю поверхность колбы нанесён отражающий слой 2 из алюминия и его окислов, обеспечивающего требуемое распределение потока излучения лампы в пространстве.

Верхняя часть колбы покрыта люминофором 3, служащего для преобразования УФ-излучения в видимое и как отражатель. Внутренне пространство 5 заполнено углекислым газом.

Основные электроды выполнены из вольфрама, активированного окислами тория. Дополнительный вольфрамовый электрод включён через ограничительный резистор с сопротивлением 10...15 кОм.

Так же разработаны лампы типа ДРВ-750 со встроенным балластом внутри колбы лампы в виде вольфрамовой спирали. Это позволяет сократить капитальные затраты на облучательную установку в 5...6 раз по сравнению с индуктивным балластом. Но эффективность их в 1,5...2 раза ниже, чем с индуктивным балластом. Разработана также специальная лампа ДРФ-1000 (рис. 81, б). В этой лампе кварцевая горелка заполнена парами ртути с добавлением иодидов ртути и индия. Введение в полость горелки йодидов металлов позволило получить фитопоток, равный 90 фт, при фитоотдаче 90 мфт/Вт.

Дальнейшей разработкой явился выпуск трехфазной металлогалогенной лампы ДМ 4-6000-О (или Т). Эти лампы предназначены для облучения рассады огурцов или томатов.

Конструкция лампы и схема ее включения представлены на рисунке 82 а, б.

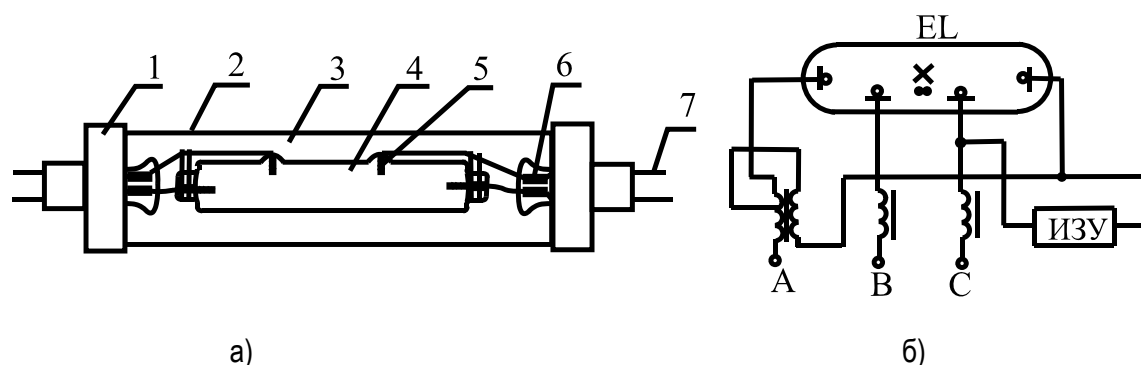


Рис. 82. Общий вид (а) и схема включения (б) лампы ДМ4-6000

Колба из термостойкого стекла 2 закреплена в стальных наколенниках 1. Внутреннее пространство 3 заполнено углекислым газом. Кварцевая горелка 4 заполнена парами ртути с добавлением иодидов щелочноземельных металлов. В горелку впаяны четыре вольфрамовых электрода 5 активированные окислами тория. Для предотвращения разрушения стекла в лопаточку 6 впаяны молибденовые лепестки. Выводы 7, как правило, гибкие.

### **Натриевые лампы высокого давления**

Устройство натриевой лампы высокого давления ДНаТ показано на рисунке 83.

Лампа содержит тонкостенную трубчатую горелку 3 из поликристаллической окиси алюминия — керамики, хорошо пропускающей световое излучение и устойчивой к длительному воздействию насыщенных паров натрия с температурой 1570...1670 К, содержащихся в горелке во время работы лампы. Кроме паров натрия, горелка заполнена ксеноном и парами ртути. На торцы горелки напаяны металлические колпачки с вольфрамовыми активированными электродами. Горелка помещена в колбу 1 из термостойкого стекла, из которой откачан воздух для теплоизоляции горелки 2.

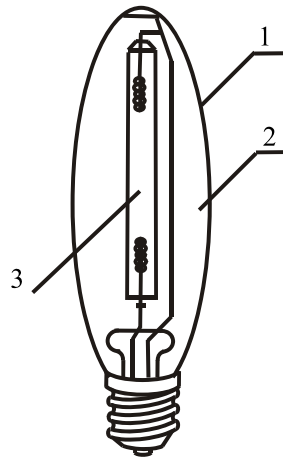


Рис. 83. Устройство натриевой лампы ДНаТ  
1 — колба (стекло); 2 — внутреннее пространство (вакуум);  
3 — горелка (внутреннее пространство — аргон, пары ртути и натрия)

Максимум спектральной плотности излучение натрия  $\lambda = 586$  нм. Коэффициент спектральной чувствительности глаза при этой длине волны  $K_\lambda = 0,76$ , т.е. излучение близко к максимуму спектральной чувствительности глаза человека. Поэтому светоотдача таких ламп 130 лм/Вт. Теоретическая светоотдача для абсолютно черного тела составляет 400 лм/Вт.

Для работы лампы необходимо балластное устройство в виде дросселя, ограничивающего и стабилизирующего ток разряда (рис. 84, а) и импульсное зажигающее устройство ИЗУ. ИЗУ — генератор импульсов с частотой 500 Гц, образующихся в результате периодического разряда конденсатора на первичную обмотку импульсного трансформатора, включённого параллельно лампе (рис. 84, б). На вторичной обмотке автотрансформатора индуктируются импульсы напряжения с амплитудой около 4,5 кВ, обеспечивающего зажигание разряда в горелке. После зажигания лампы зажигающее устройство прекращает работу из-за падения напряжения на балласте.

При включении ИЗУ в сеть через RC2, W2, W3 и W4 пойдет ток. Заряжается конденсатор C2. Параллельно его обкладкам подключен стабилитрон VD2. Когда напряжение на конденсаторе достигнет напряжения стабилизации, пойдет ток по цепи управляющего электрода тиристора. Он открывается и конденсатор C<sub>2</sub> разряжается через тиристор и диод VD1, по обмотке W1 пойдет ток, в обмотках W2, W3 и W4 индуцируется ЭДС, величина которого зависит от подключения точки 2, 3 или 4, и напряжение на лампе станет больше напряжения сети.

Диод VD1 защищает тиристор по обратному напряжению.

Выпускаются натриевые лампы высокого и низкого давления.

Лампы низкого давления изготавливаются из накладного стекла (двойное стекло). Внутри — боратное стекло, особо стойкое к парам натрия. Снаружи — известково-натриевое стекло. Светоотдача таких ламп достигает 130-140 лм/Вт.

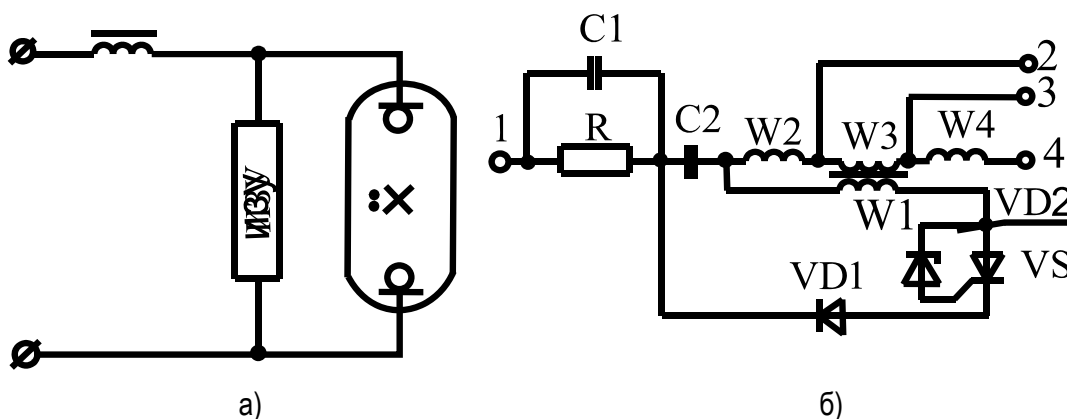


Рис. 84. Схемы:  
а — включения лампы ДНаТ в сеть; б — ИЗУ

Выпускается такая лампа ДНаО-80, ДНаО-140 — дуговые натриевые для освещения.

Лампы высокого давления ДНаТ-250, ДНаТ-400, ДНаТ-700 применяются:

- для уличного освещения;
- теплиц;
- освещения обширных пространств, стоянок техники, площадок складирования, улиц и автострад.

Преимущества:

- наивысшая светоотдача — 130 лм/Вт;
- интервал температур от  $-60...+40$  °С;
- дает желто-оранжевое излучение, что способствует хорошей контрастности объектов.



Недостатки ламп ДНаТ:

- чувствительны к отклонениям напряжения сети. Отклонения напряжения от +10 до –10% вызывают отклонения светового потока лампы на +13 ... 15%, мощности лампы — на +28 ... –20%);
- из-за желто-оранжевого излучения дает плохую цветопередачу.

### *Лампы сверхвысокого давления*

Дуговые ксеноновые трубчатые лампы ДКсТВ относятся к группе газоразрядных ламп сверхвысокого давления, в которых стабилизация тока может осуществляться без помощи балластного сопротивления. Это объясняется тем, что в таких лампах разряд происходит в плазме и плотность тока почти не зависит от степени ионизации газа, так как рост числа электронов приводит к пропорциональному уменьшению длины их свободного пробега и снижению энергии ионизации.

Общий вид трубчатой ксеноновой лампы высокого давления показан на рисунке 85.

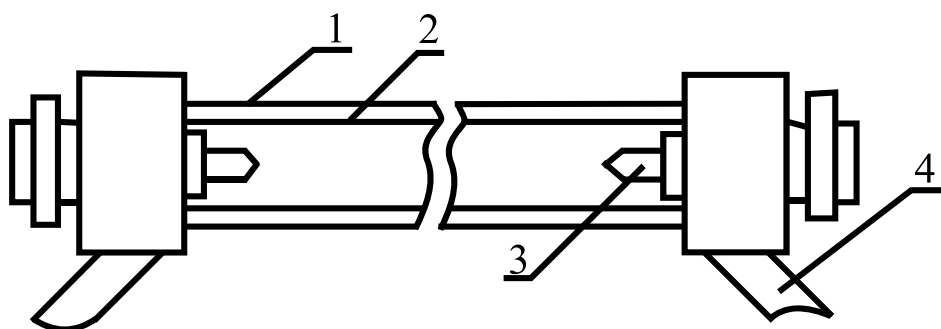


Рис. 85. Общий вид ксеноновой лампы с водяным охлаждением:  
1 — колба (стекло); 2 — разрядная трубка (кварц);  
3 — электрод (вольфрам); 4 — патрубок для охлаждающей воды

Лампа имеет разрядную трубку 2 из кварцевого стекла с двумя электродами 3 из торированного вольфрама. Вводы лампы выполнены из молибденовой фольги. Разрядная трубка заполнена ксеноном при давлении 0,05 МПа.

Разрядная трубка расположена соосно со стеклянным цилиндром 1, образующим полость для циркуляции охлаждающей воды. Дистиллированная вода омывает разрядную трубку винтообразно за счёт смещения осей патрубков 4 относительно плоскости, проходящей через ось лампы.

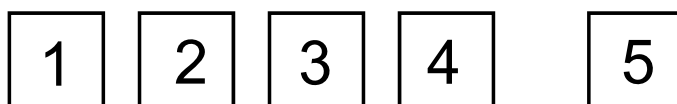
Кроме ламп с водяным охлаждением, отечественная промышленность выпускает ксеноновые лампы ДКсТ с естественным воздушным охлаждением. Лампы отличаются простотой конструкции и удобством эксплуатации. Светоотдача таких ламп  $H_c \approx 20...45$  лм/Вт.

В видимой области излучение близко к солнечному, что обеспечивает качественную цветопередачу.

Лампы классифицируются по конструктивным и параметрам.

1. Трубочатые лампы высокого давления с естественным и водяным охлаждением.
2. Лампы сверхвысокого давления с короткой дугой с воздушнымё или водяным охлаждением (естественно и принудительно).
3. Специальные лампы (лампы-светильники).

Маркировка ламп:



- 1) одна буква, Д (дуговая);
- 2) две буквы, Кс (ксеноновая);
- 3) одна буква, Т (трубочатые);
- 4) одна буква, Ш (шаровые), В (водяного охлаждения), Э (эритемные);
- 5) мощность, Вт.

Применяется:

- в сельском хозяйстве для облучения растений, один облучатель на  $33 \text{ м}^2$ ;
- в прожекторных установках — архитектурное освещение, освещение больших площадей.

Выпускаются лампы мощностью 10, 20, 50, 100 кВт.

Недостатки:

- мала светоотдача;
- требуются специальные зажигающие устройства;
- высокое напряжение зажигания  $U_3$ ;
- лампа взрывоопасна.

Схема включения лампы в сеть представлена на рисунке 86.

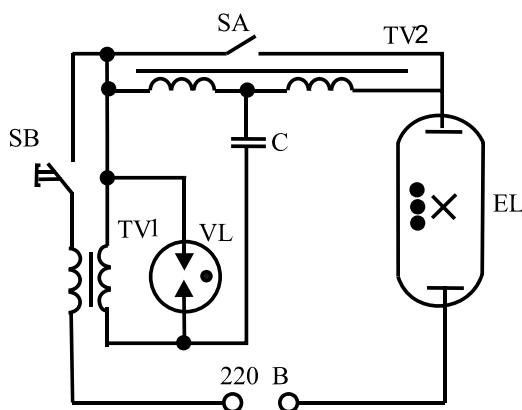


Рис. 86. Схема включения лампы ДКСТ в сеть

При включении кнопки SB зажигающего трансформатора TV1 конденсатор С заряжается от вторичной обмотки трансформатора TV1 до напряжения пробоя разрядника VL. При пробое конденсатор С разряжается через часть обмотки трансформатора TV2, на электроды лампы подается высоковольтный импульс зажигания, вызывающий пробой и ионизацию межэлектродного пространства лампы. В лампе начнется разряд.

После зажигания лампы обмотка импульсного трансформатора шунтируется выключателем SA.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите классификацию ламп высокого и сверхвысокого давления. 2. Какова конструкция лампы ДРТ? 3. Расскажите о процессе зажигания двухэлектродной лампы ДРТ. 4. Почему в процессе разгорания лампы высокого давления все величины возрастают, а ток уменьшается? 5. Как происходит зажигание четырехэлектродной лампы ДРТ? 6. Конструкция лампы ДРЛ. 7. Процессы при зажигании двухэлектродной лампы ДРЛ с разрядником. 8. Назовите преимущества металлогалогенных дуговых ламп перед другими источниками излучения. 9. Перечислите особенности конструкции ламп, используемых в растениеводстве. 10. Назовите преимущества и недостатки ламп сверхвысокого давления. 11. Почему после зажигания лампы сверхвысокого давления балласт закорачивается ?

## 11. СВЕТОВЫЕ ПРИБОРЫ И ОБЛУЧАТЕЛИ

- Общие сведения
- Классификация светильников по классу светораспределения и светораспределению в пространстве
- Классификация светильников по исполнению защиты от воздействия окружающей среды
- Классификация светильников по назначению

### 11.1. Общие сведения

Многие источники оптического излучения (ОИ) обладают большой яркостью, от слепящего действия которой необходима защита. Кроме этого, источники света, как правило, распределяют световой поток по всем направлениям, в то время как требуется, чтобы он был направлен на освещаемые поверхности. Часто приходится защищать источник света от механических повреждений и разрушающего действия окружающей среды. Эти причины заставляют использовать световой прибор.

Световой прибор — это совокупность источника света и арматуры.

Существует два типа световых приборов — светильники и прожекторы.

*Светильник* — световой прибор, предназначенный для освещения помещений, открытых пространств и отдельных предметов на расстоянии до 20 размеров светильника. Он состоит из источников света и арматуры, предназначенной для рационального перераспределения светового потока, защиты глаз от чрезмерной его яркости, предохранения источников от механических повреждений и загрязнения, а также для крепления источника и подведения к нему электрического тока (рис. 87).

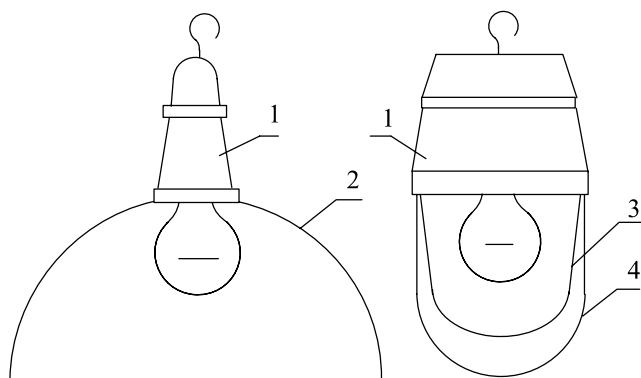


Рис. 87. Общий вид светильников:

1 — узел ввода; 2 — отражатель; 3 — рассеиватель; 4 — решетка

Светильники классифицируются:

- по классу и кривым светораспределения;
- по степени защиты от воздействия окружающей среды;
- по назначению светильников.

## 11.2. Классификация светильников по классу светораспределения и по светораспределению в пространстве

*Класс светораспределения* показывает долю светового потока, падающего в верхнюю или нижнюю полусферу.

По ГОСТ 17677—82 все светильники подразделяются на пять классов в зависимости от доли светового потока, падающего в нижнюю полусферу (табл. 6).

Таблица 6. Классификация светильников по распределению светового потока в верхнюю и нижнюю полусферы

Условное обозначения класса	Класс светораспределения	Доля светового потока, падающего в нижнюю полусферу, %	Примечание
П	Прямого света	>80	
Н	Преимущественно прямого света	60...80	
Р	Рассеянного света	40...60	
В	Преимущественно отраженного света	20...40	
О	Отраженного света	<20	

Светораспределение в пространстве характеризуется кривыми силы света.

Кривая силы света (КСС) — линия, образуемая сечением фотометрического тела плоскостью, проходящей через центр симметрии этого тела. ГОСТ (13828—74) устанавливает 7 типовых кривых силы света, (табл. 7, рис. 88). В зависимости от формы КСС различают СП симметричные и несимметричные. Симметричные — имеющие ось симметрии, несимметричные — нет.

Таблица 7. Классификация светильников по светораспределению в пространстве

Наименование типовой кривой силы света	Обозначение типовой кривой силы света	Зона направления максимальной силы света, град
Концентрированная	К	0...15
Глубокая	Г	0...30, 180...150
Косинусная	Д	0...35, 180...145
Полуширокая	Л	35...55, 145...125
Широкая	Ш	55...85, 123...95
Равномерная	М	0...90, 180...90
Синусная	С	70...90, 110...90

*Примечание.* Светильники с полуширокой (Л) и с широкой (Ш) применяются в уличных светильниках; К, Г — для освещения высоких помещений; М, Д — для освещения нормальных и бытовых помещений.

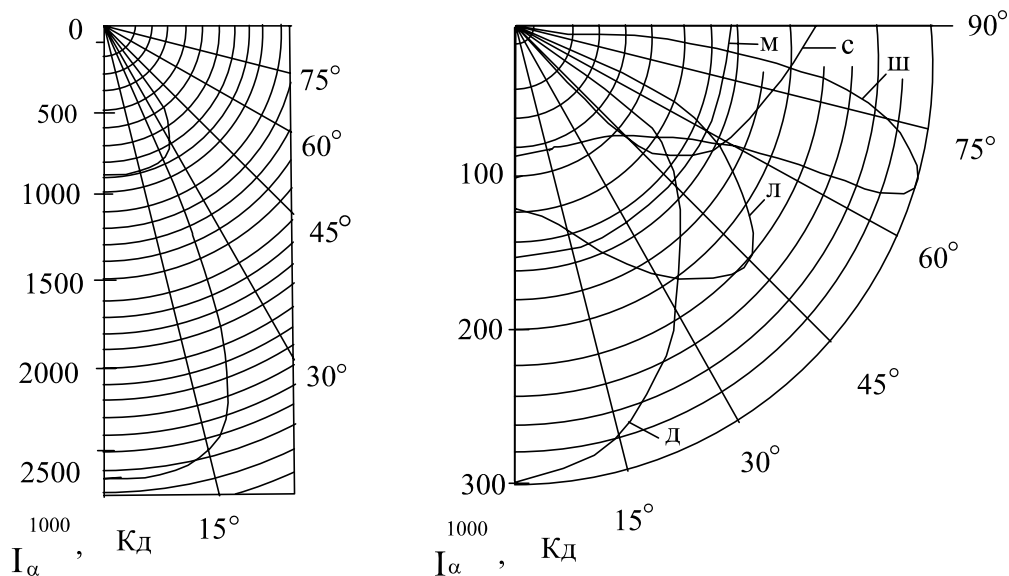


Рис. 88. Характеристики светораспределения светильников

В настоящее время выпускается более 3000 типоразмеров светильников.

К светотехническим характеристикам светильников также относятся — коэффициент формы кривой, коэффициент усиления, КПД и защитный угол.

Коэффициент формы кривой есть отношение максимальной силы света к средней в данной полусфере.

Коэффициент усиления характеризует усиление светильником силы света лампы в данном направлении:

$$K_y = \frac{I_{\alpha св}}{I_{\alpha л}}$$

Для светильников  $K_y \leq 10$ .

Под КПД светильника понимают отношение светового потока светильника к световому потоку лампы. Иногда общий КПД светильника подразделяют на КПД в верхнюю и нижнюю полусферы —  $\eta_{\uparrow}$ ,  $\eta_{\downarrow}$ .

*Защитный угол* определяет степень защиты глаз от воздействия ярких частей источника света. Этот угол ограничивается линией, проходящей через тело накала лампы и линией, соединяющей крайнюю точку тела накала с противоположным краем отражателя (рис. 89). Его значение определяют по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h}{R + r},$$

где  $\beta$  — защитный угол светильника;

$h$  — минимальная высота от края входного отверстия до светящегося тела источника, м.

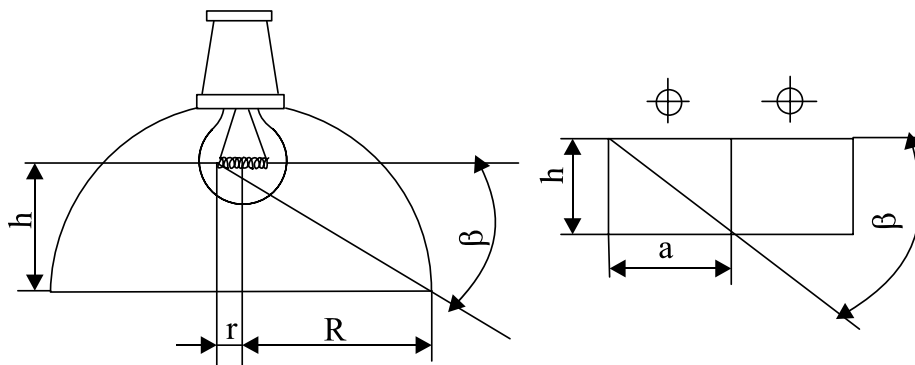


Рис 89. Защитный угол светильников

Для светильников с люминесцентными лампами — это отношение высоты элементов решетки  $h$  к расстоянию между элементами  $a$ .

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h}{a}.$$

### 11.3. Классификация светильников по исполнению защиты от воздействия окружающей среды

По ГОСТ 17677—82 все светильники делятся на шесть классов по степени защиты от пыли и на девять по степени защиты от влаги.

Обозначения степени защиты состоит из двух прописных букв латинского алфавита *IP* (*International Protection* — международная защита) и двух цифр, первая из которых обозначает степень защиты от пыли, вторая — от воды (например, *IP 53*). Для светильников, у которых степень защиты источника света и узла ввода различны, в обозначении отсутствуют *IP* и присутствуют после первой цифры, указывающей степень защиты от пыли, знак «штрих» (например, *5'3*).

Первая цифра обозначает:

- 2 — открытый, пыленезащищенный. Токоведущие части и колба лампы не защищены от попадания пыли;
- 2' — перекрытый, пылезащищенный. Попадание пыли ограничивается неуплотненными, светопропускающими оболочками;
- 5' — частично пылезащищенный. Токоведущие части защищены от попадания пыли в количествах, достаточных для нарушения удовлетворительной работы светильника;
- 5 — полностью пылезащищенный. Токоведущие части и колба лампы защищены от попадания пыли в количествах, достаточных для нарушения удовлетворительной работы светильника;
- 6' — частично пыленепроницаемый. Токоведущие части защищены от попадания пыли;
- 6 — токоведущие части и колба лампы полностью защищены от попадания пыли.

Вторая цифра означает:

- 0 — водонезащищенный;
- 2 — каплезащищенный. Защита от попадания капель, падающих по углом к вертикали  $< 15^\circ$ ;
- 3 — дождезащищенный. Защита от попадания капель или струй, падающих сверху под углом к вертикали менее  $< 60^\circ$ ;
- 4 — брызгозащищенный. Защита от попадания капель или брызг;
- 5 — струезащищенный. Защита от попадания воды при обливании водой;
- 7 — водонепроницаемый. Защита от попадания воды при погружении в воду.
- 8 — герметичный. Защита от попадания воды при неограниченно долгом погружении в воду.

#### 11.4. Классификация светильников по назначению

По назначению светильники классифицируются:

- светильники для общественных помещений;
- светильники для производственных помещений;
- специальные светильники.

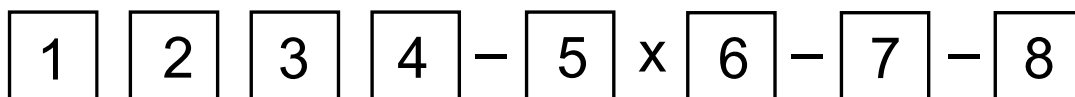
Для общественных помещений наиболее важным является эстетика, потом светораспределение, а степень защиты учитывается в последнюю очередь или вовсе не учитывается.

Наиболее важным для светильников производственных помещений является светораспределение, потом степень защиты и в последнюю очередь — эстетика.

К специальным светильникам относятся светильники, предназначенные только для определенных целей — переносные, уличные, рудничные, железнодорожные, автомобильные, судовые и т.д.

#### *Маркировка светильников*

Каждому светильнику присваивают шифр. Структура условного обозначения светильников по ГОСТ 17677—82:



- 1) буква, обозначающая источник света: *H* — лампа накаливания, *P* — ртутная лампа, *L* — люминесцентная лампа, *И* — галогенная лампа, *Г* — металлогалогенная лампа, *Ж* — натриевая лампа, *Ф* — фигурная люминесцентная лампа;
- 2) буква, обозначающая способ установки светильника: *С* — подвесные, *П* — потолочные, *Б* — настенные, *В* — встраиваемые, *К* — консольные, *Т* — напольные и венчающие, *Р* — ручные сетевые, *Ф* — ручные аккумуляторные и т.д.;



- 3) буква, обозначающая основное назначение: *П* — промышленные, *О* — общественные, *У* — наружные, *Б* — бытовые, *Р* — рудничные);
- 4) двузначное число 01...99, номер серии;
- 5) число, обозначающее количество ламп в светильнике (число 1 не указывается);
- 6) цифра, обозначающая мощность лампы, Вт;
- 7) трехзначное число 001...999, обозначающее номер модификации;
- 8) буква и цифра, обозначающее климатическое исполнение и категорию размещения светильника: *У* — умеренный климат, *УХЛ* — умеренный и холодный климат, *ХЛ* — холодный климат, *Т* — тропический климат и т.д.; *1* — на открытом воздухе; *2* — под навесом; *3* — в закрытых неотапливаемых помещениях, *4* — в закрытых отапливаемых помещениях, *5* — в сырых помещениях.

*Пример обозначения:* НСП 01×100 02-У1 — светильник с лампой накаливания, подвесной, для промышленных помещений, с одной лампой мощностью 100 Вт, второй модификации, рассчитанный для работы в умеренном климате, на открытом воздухе.

Наряду с условными обозначениями светильникам присваиваются собственные или фирменные имена, например: «Астра», «Бирюза» (НСП 21), «Орфей» (НББ 02), «Лада» и др. По последнему ГОСТ 17677—82 эти наименования должны указываться только после условного обозначения.

В сельском хозяйстве встречаются светильники, имеющие только условное фирменное наименование, например: ПСХ, Н4Б, ВЗГ, СПО, ЛД, ПВЛП, ПВЛМ, УПДДРЛ и др. Следует отметить, что светильники ПСХ, НСП 02, НСП 03, РПП 01, РСР 29, ЛСХ 10, ЛСП 15, ЛСП 21, ЛСП 23 разработаны специально для сельского хозяйства и применяются в коровниках, свинарниках, птичниках и т.д. с агрессивной средой, повышенной запыленностью и влажностью.

Светильники ЛСП 09 предназначены для освещения птичников с многоярусным содержанием птицы.

Для освещения низких с.-х. помещений с тяжелыми условиями среды — пыльных, влажных, сырых, с агрессивными условиями предлагаются новые светильники с энергоэкономичными лампами типа: РПП 01, ЖПП 01, ЖСП 20, ЛСП 18, ЛСП 23 и т.д.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Что такое светильник?
2. Назовите назначение арматуры светильников.
3. Как классифицируются светильники?
4. Что такое класс светораспределения?
5. Назовите основные характеристики светильников.
6. Что такое защитный угол светильника и как его определить?
7. Как классифицируются светильники по степени защиты от воздействия окружающей среды?
8. Какие бывают светильники по назначению?
9. Как маркируются светильники?

## 12. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

- Правила и нормы проектирования осветительных установок
- Принципы нормирования освещенности
- Расчет освещенности от точечного источника света
- Расчет освещенности от линейного источника света

### 12.1. Правила и нормы проектирования осветительных установок

Нормирование осветительных установок предусматривает определение количественных и качественных показателей искусственного освещения, значения которых обеспечивают необходимые условия для зрительной работы человека, а в сельском хозяйстве также требуемую продуктивность животных и птицы.

Более высокому уровню освещенности соответствует большая производительность труда и меньшая зрительная утомляемость, но до определенного предела, начиная с которого утомляемость растёт. Это отрицательно сказывается на качестве труда.

К количественным показателям освещения относятся его продолжительность и уровень освещенности. Качество освещения характеризуется распределением излучения по спектру, в пространстве и во времени.

Нормирование тех или иных показателей зависит не только от характера производства, но и от зрительного напряжения.

*Осветительная установка (ОУ)* — это совокупность светотехнических устройств, предназначенных для освещения, и включают в себя светильники с источниками света, приборы управления и защиты, проводку.

Производительность осветительной установки — количество эффективной энергии, производимой установкой в единицу времени:

$$W_{эф} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{t_1}^{t_2} \varphi(\lambda, t) k(\lambda, t) dt d\lambda,$$

где  $\varphi(\lambda, t)$  — спектральная плотность излучения источника в зависимости от времени;

$k(\lambda, t)$  — коэффициент спектральной чувствительности приемника;

$t$  — время;

$\lambda$  — длина волны электромагнитного излучения.

Если принять, что неизменны во времени  $\varphi(\lambda, t)$  и  $k(\lambda, t)$ , то

$$W_{эф} = \Phi_{эф} t.$$

На практике это не осуществляется, т.к. все изменяется во времени. Поэтому, чтобы не рассчитывать производительность установки  $W_{эф}$ , применяют косвенные методы расчета осветительных установок.

1. *Яркость* — отношение силы света, излучаемой поверхностью в данном направлении, к проекции светящей поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению (рис. 17).

$$L = \frac{I_{\alpha}}{S_1 \cos \alpha},$$

где  $I_{\alpha}$  — сила излучения в данном направлении;

$S_1$  — площадь излучающей поверхности;

$\alpha$  — угол между падающим лучом и нормалью к излучающей поверхности;

$S_1 \cos \alpha$  — площадь проекции светящей поверхности на плоскость, перпендикулярной силе излучения, или площадь излучающей поверхности видимой из расчетной точки.

2. *Контраст* — отношение разности яркости объекта  $L$  и яркости фона  $L_{\phi}$  к яркости фона:

$$K = \frac{L - L_{\phi}}{L_{\phi}}.$$

Значения контраста бывают большим, средним и малым (табл. 8).

Таблица 8. Значения контраста

Контраст	Величина контраста $K$	Фон	Коэффициент отражения, $\rho$
Большой	0,5	Светлый	$\rho > 0,4$
Средний	0,2	Средний	$\rho = 0,2 \dots 0,4$
Малый	$< 0,2$	Темный	$\rho < 0,2$

Разность яркостей объекта  $L$  и яркости фона  $L_{\phi}$ , при которой с заданной вероятностью обнаруживается (не обнаруживается) объект на фоне, называется пороговым контрастом  $K_{пор}$ :

$$K_{пор} = \frac{\Delta L_{пор}}{L_{ТМ}},$$

где  $\Delta L_{пор}$  — такая минимальная разность яркости между яркостью объекта и яркостью фона, когда начинаешь отличать объект от фона с данной вероятностью:

$$\Delta L_{пор} = \lim_{p \rightarrow 0} (L \pm L_{ТМ});$$

$L_{ТМ}$  — яркость темного фона с коэффициентом отражения  $\rho = 0$ .

$K_{пор}$  зависит от углового размера объекта, длительности наблюдения и вероятности зрительного опознания формы объекта.

3. *Видимость* — характеризует зрительную способность обнаружения объекта.

*Освещённость* (облучённость) от точечного источника в точке А, расположенной на плоскости, пропорциональна силе излучения (силе света) от этого источника в направлении к точке, косинусу угла падения луча на плоскость и обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником и точкой  $l$  (см. рис. 17, 18):

$$E = \frac{I_{\alpha \cos \beta}}{l^2} = \frac{LS \cos \varphi \cdot \cos \beta}{l^2}.$$

## 12.2. Принципы нормирования освещённости

По точности зрительной работы производственные помещения разделяются на восемь разрядов, из которых первые шесть характеризуются размерами объектов наблюдения, седьмой разряд регламентирует работы с самосветящимися материалами, а восьмой разряд относится к работам, связанным с общим наблюдением за ходом производственного процесса.

Для осветительных установок искусственного освещения зрительные задачи подразделяются не только по точности (размер объекта различения), но и по сложности, которая в основном определяется контрастом объекта с фоном. Кроме того, известно, что глаз реагирует на яркость, а не на освещённость, которая устанавливается нормами. Поэтому каждый разряд (от I до V) разделён на подразряды (а, б, в и г), которые характеризуются сочетанием контраста объекта с фоном и коэффициентом отражения последнего.

Требования к освещению регламентируются СНиП 23.05.95 «Естественное и искусственное освещение». Принципы нормирования освещённости приведены в таблице 9 на примере 1 разряда зрительной работы.

Таблица 9. Принципы нормирования освещённости

Характеристика зрительной работы	Размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Общая освещённость
Наивысшей точности	< 0,15	1	а	Малый	Тёмный	1500
			б	Малый Средний	Средний Тёмный	1250
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Тёмный	750
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	400

I группа — помещения, в которых зрительная работа производится при фиксации зрения работающих на рабочей поверхности (рабочие кабинеты классные комнаты, аудитории, чертежные залы и т.д.).

II группа — помещения, в которых производится различение объекта без фиксации зрения (торговые залы магазинов, залы столовых, выставочные залы, картинные галереи).

III группа — помещения, в которых производятся кратковременное, периодическое различение объектов (концертные залы, зрительные залы, комнаты ожидания и т.д.).

IV группа — помещения, в которых производится общая ориентировка в пространстве (проходы, коридоры, санузлы и т.д.).

### ***Нормирование качественных показателей***

Регламентируются качественные показатели промышленных осветительных установок: показатели ослеплённости, коэффициент пульсации освещённости и неравномерность распределения освещённости по рабочей поверхности в производственных помещениях.

Для большинства производственных, бытовых, учебных и других помещений нормированию подлежит показатель ослеплённости  $P$ :

$$P = (S - 1)10^3; \quad S = \frac{V}{V_s},$$

где  $S$  — *ослеплённость*: отношение видимости  $V$  в отсутствие слепящих объектов в поле зрения к видимости в присутствии таких объектов  $V_s$ .

Показатель ослеплённости регламентируется в пределах  $P = 20 \dots 60$  в зависимости от точности зрительных работ.

Ослепляющий объект — обычный светильник, расположенный ниже угла  $47^\circ$  над линией зрения, если он не имеет защитного угла.

У источников света на переменном токе имеет место пульсация светового потока:

$$K_n = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2\Phi_{cp}}.$$

*Коэффициент пульсации* — отношение изменения освещённости к двойному среднему значению. Коэффициент пульсации устанавливается нормами в пределах  $K_n = 10 \dots 20\%$ , а при отсутствии в помещении условий для возникновения стробоскопического эффекта допускается при грубых работах повышать его значение до  $30\%$ .

Коэффициент неравномерности обусловлен неравномерностью освещённости на рабочей поверхности. Коэффициент неравномерности приводит к утомлению зрительного аппарата и к ошибкам наблюдения. Колебания освещённости во времени вызываются колебаниями напряжения питающей сети (для ламп накаливания и люминесцентных ламп) и механическими перекрытиями светильников:

$$Z = \frac{E_{CP}}{E_{min}}$$

Показатель неравномерности регламентирован нормами в пределах 1,5...3,0 в зависимости от точности работ и вида светильника (круглосимметричный или вытяжённый).

### 12.3. Расчёт освещённости от точечного и линейного источника света

#### 1. Расчет освещенности от точечного источника света.

Рассмотрим освещенность от точечного источника света с симметричным светораспределением:

$$I_{\alpha} = f(\alpha).$$

Пусть имеется источник света  $O$  и площадка  $Q$ , произвольно расположенная в пространстве, например, под углом  $\theta$  к горизонту (рис. 90).

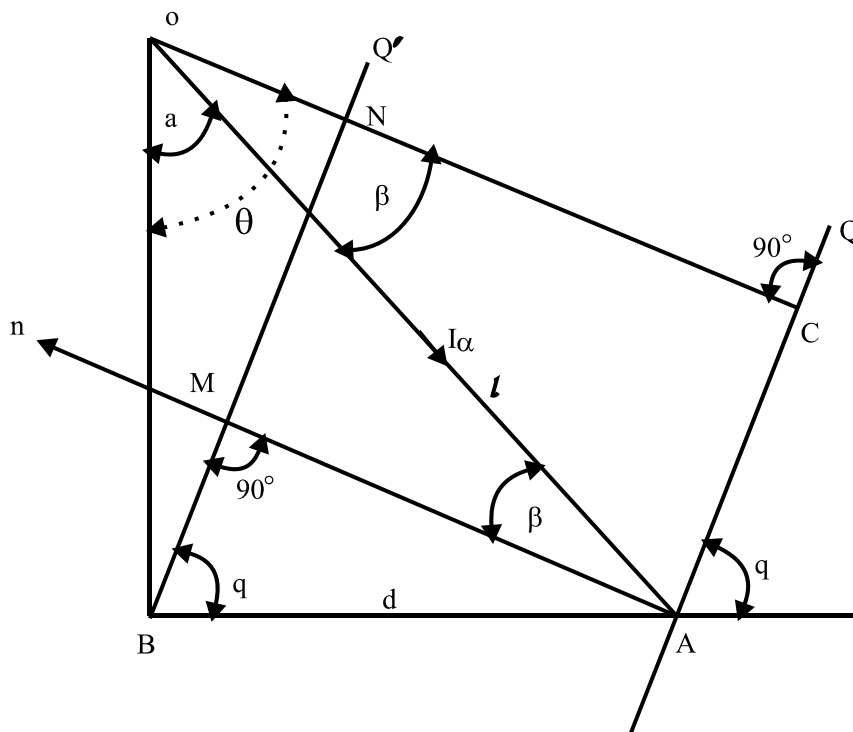


Рис. 90. К расчету освещенности от точечного источника света

Здесь  $OA = l$  — длина хода луча (расстояние от источника света до расчетной точки);  $OB = H_p$  — расчетная высота;  $BA = d$  — проекция луча на плоскость (расстояние от перпендикуляра до расчетной точки);  $I_\alpha$  — сила света в направлении расчетной точки;  $\alpha$  — угол между направлением силы света и перпендикуляром к горизонтальной плоскости;  $\beta$  — угол между направлением силы света к расчетной точке и нормалью к плоскости, в которой находится расчетная точка. Из основного закона светотехники известно, что

$$E = \frac{I_\alpha \cos \beta}{l^2}. \quad (1)$$

Эта формула трудно применима для расчета освещенности в любой плоскости. Так как обычно известна кривая силы света, то удобнее выразить освещенность через угол  $\alpha$ .

Из треугольника  $OCA$  следует, что:

$$\cos \beta = \frac{OC}{l}. \quad (2)$$

Проведем плоскость  $Q'$  из точки  $B$  параллельно плоскости  $Q$ . Из рисунка следует, что  $OC = ON + NC$ . В свою очередь  $ON = H_p \cos \Theta$  и  $NC = MA = d \sin \Theta$ .

Отсюда:

$$\cos \beta = \frac{OC}{l} = \frac{H_p \cos \Theta + d \sin \Theta}{l}. \quad (3)$$

Из  $\triangle OBA$  видим, что:

$$\cos \alpha = \frac{H_p}{l}. \quad (4)$$

Отсюда:

$$H_\Theta = 2 \int_0^{\theta_K} \frac{I_{\Theta\alpha} \cos^3 \alpha}{H_p^2} dt. \quad (5)$$

Подставим (4) и (5) в (1), тогда

$$E_A = \frac{I_\alpha \cos^2 \alpha (\cos \Theta \pm \frac{d}{H_p} \sin \Theta)}{(\frac{H_p}{\cos \alpha})^2 p} = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{H_p} (\cos \Theta + \frac{d}{H_p} \sin \Theta), \quad (6)$$

Это выражение уже применимо к инженерному расчету освещенности плоскости наклонной к горизонту на угол  $\Theta$ .

Если считать, что расчетная точка находится в горизонтальной плоскости, т.е.  $\Theta = 0$  и  $\sin \Theta = 0$ :

$$E_{A\Gamma} = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{H_p^2} \text{ при } \theta = 0. \quad (7)$$

Если расчетная точка находится в вертикальной плоскости, то  $\Theta = 90^\circ$  и  $\cos \Theta = 0$ , тогда

$$E_{AB} = \frac{I_\alpha \cos^3 \alpha}{H_p^2} \frac{d}{H_p} = E_{AG} \frac{d}{H_p} \quad (8)$$

где  $E_{AG}$  и  $E_{AB}$  — составляющие векторы результирующей освещенности, это можно трактовать так: общая освещенность не изменяется при изменении наклона плоскости, в которой находится расчетная точка.

#### 12.4. Расчёт освещённости от линейного источника

Светильники с люминесцентными лампами располагают обычно в непрерывную линию или в линию с разрывами так, чтобы ось светящей линии была параллельно расчетной плоскости.

Пусть светящаяся линия BC расположена параллельно расчетной плоскости Q (рис. 91).

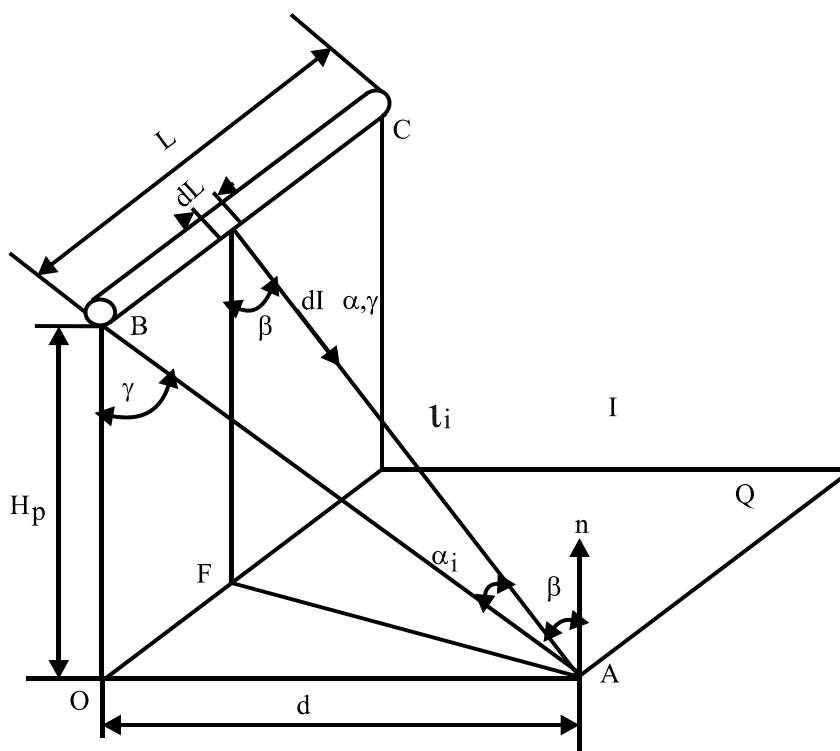


Рис. 91. К расчету освещенности от линейного источника света

Рассмотрим частный случай, когда расчетная точка A расположена напротив конца светящей линии:

- $L$  — длина светящей линии;
- $H_p$  — расчетная высота;
- $d$  — расстояние от расчетной точки до проекции светящей линии на расчетную плоскость.



Рассмотрим участок светящей линии  $dL$ . Сила света от этого участка  $dI_{\alpha,\gamma}$  и освещенность в точке  $A$ :

$$dE_A = \frac{dI_{\alpha,\gamma} \cos \beta}{l_i^2}.$$

Определим  $\cos \beta$ . Для этого опустим перпендикуляр из элемента светящей линии  $dL$  до плоскости в которой находится расчетная точка. Из треугольника  $dLAF$  следует, что  $\cos \beta = \frac{H_p}{l_i}$ .

Из треугольника  $dLAB$  следует, что  $\cos \alpha_i = BA/l_i$ , а из треугольника  $BOA$  —  $\cos \gamma = H_p / BA$ .

Подставляя значения  $H_p$  и  $l_i$  в предыдущую формулу, получим  $\cos \beta = \frac{H_p}{l_i} = \cos \alpha_i \cos \gamma$ .

Если рассмотреть предельный случай, когда  $dL$  стремится в точку  $B$ , тогда  $\beta \equiv \gamma$ ,  $\alpha_i = 0$  и  $\cos \beta = \cos \alpha_i \cos \gamma$ .

Исследования показали, что распределение светового потока от светящей линии происходит по закону косинуса:

$$dI_{\alpha,\gamma} = I_\gamma dL \cos \alpha_i = I_\gamma l_i d\alpha_i,$$

где  $I_\gamma$  — сила света с одного метра линии.

Для малых углов можно считать, что  $\sin \alpha = \alpha$ :

$$\text{Отсюда } dE_A = \frac{I_\gamma l_i d\alpha_i \frac{H_p}{l_i}}{\frac{H_p^2}{\cos^2 \alpha_i \cos^2 \gamma}} = \frac{I_\gamma \cos^2 \gamma}{H_p} \cos^2 \alpha_i d\alpha_i.$$

Освещенность создаваемая всей линией:

$$E_A = \frac{I_\gamma \cos^2 \gamma}{H_p} \int_0^{\alpha_K} \cos^2 \alpha_i d\alpha_i.$$

Вспомним:  $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 1 - 2\sin^2 \alpha = 2\cos^2 \alpha - 1$ ;

$$\cos^2 \alpha = \frac{\cos 2\alpha + 1}{2},$$

$$\text{тогда } \int_0^\alpha \frac{\cos 2\alpha + 1}{2} d\alpha = \frac{1}{2} \left[ \int_0^\alpha d\alpha_i + \int_0^\alpha \cos 2\alpha_i d\alpha_i \right] = \frac{1}{2} \left[ \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] \text{ и ос-}$$

$$\text{вещенность в точке } A: E_A = \frac{I_\gamma \cos^2 \gamma}{H_p} \left( \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right).$$

По этой формуле можно сосчитать освещенность точки, находящейся напротив конца лампы или линии ламп, но нельзя сосчитать, если точка находится посередине лампы. В этом случае разбивают лампу или линию ламп на составляющие участки таким образом, чтобы расчетная точка находилась напротив конца участка (рис. 92, а).

Если расчетная точка находится вне лампы или линии ламп, то линию ламп продолжают так, чтобы её конец находился напротив расчетной точки (рис. 92, б).

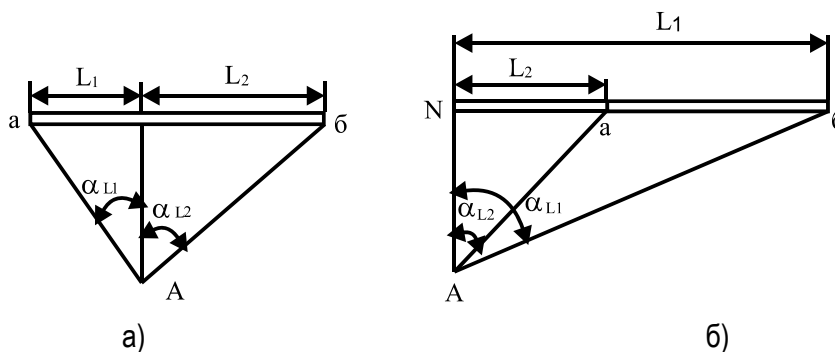


Рис. 92. Расположение расчетной точки:  
а — внутри лампы и б — вне лампы

В первом случае освещенность расчетной точки складывается из двух составляющих — освещенности от линии L1 и линии L2:

$$E_A = E_{L1} + E_{L2}.$$

Во втором случае — разность освещенностей от L1 и L2:

$$E_A = E_{L1} - E_{L2}.$$

### Вопросы для самопроверки

1. Что такое яркость? 2. Что такое контраст? 3. Перечислите принципы нормирования освещенности. 4. Что такое ослепленность, коэффициент пульсации и коэффициент неравномерности? 5. Как выполнить расчет освещенности от точечного источника света? 6. Как рассчитать освещенность от линейного источника света?

## **13. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

- Последовательность проектирования осветительной установки
- Выбор вида и системы освещения
- Выбор нормированной освещенности и коэффициента запаса
- Выбор светового прибора
- Размещение светильников
- Расчет мощности осветительной установки

### **13.1. Последовательность проектирования осветительной установки**

При проектировании осветительной установки приходится решать три вопроса:

- 1) светотехнический;
- 2) электротехнический;
- 3) технико-экономический.

Светотехнический раздел включает:

- выбор вида и системы освещения;
- выбор нормированной освещенности и коэффициента запаса;
- выбор типа светильника;
- размещение светильников;
- расчет мощности осветительной установки;
- проверка освещенности в контрольных точках;
- составление светотехнической ведомости.

### **13.2. Выбор вида и системы освещения**

Существует две системы освещения — общая (равномерная, локализованная) и комбинированная (общее с местным освещением).

Равномерное освещение — освещение, при котором светильники расположены равномерно над освещаемой площадкой. Локализованное освещение — освещение, при котором возникает необходимость увеличивать освещенность какой-либо точки или участка путём увеличения количества светильников или мощности ламп.

Местное освещение — освещение, при котором возникает необходимость увеличить освещенность какого-либо малого участка рабочей поверхности.

Общее освещение применяется там, где:

- нормируется горизонтальная освещенность;
- работа выполняется по всей рабочей поверхности;
- не требуется большого зрительного напряжения (5 разряд и старше, глава 12).

При общем освещении допускаются отклонения освещённости от нормированной от +20% до –10%

Общее освещение применяется в животноводческих помещениях и там, где освещённость не превышает 100 лк.

Комбинированная система освещения применяется в том случае, если нормированная освещённость больше 150 лк при люминесцентных лампах и 75 лк при лампах накаливания. В этом случае освещённость от светильников общего освещения должна быть более 20% нормируемой. Систему комбинированного освещения целесообразно применять при высокой точности выполняемых работ (с 1 по 4 разряд), особых требованиях к качеству освещения, ограниченности рабочей поверхности и наличии широких затемняющих конструкций, возможности перестановки рабочих мест.

Одно местное освещение применять запрещено.

В сельскохозяйственных помещениях предусматривают следующие виды освещения: рабочее, технологическое, эвакуационное, аварийное, дежурное и т. п.

*Рабочее освещение* должно обеспечивать нормированную освещённость во всех точках рабочей поверхности и должно иметь соответствующее качество, которое определяется отклонением питающего напряжения; пульсацией светового потока; равномерностью освещения; направлением света и спектральным составом

*Технологическое освещение* — освещение, обеспечивающее нормальный технологический процесс, который определяется режимом освещения и уровнем освещённости. Это освещение выполняется теми же светильниками, что и рабочее, но располагаются в зоне обитания животных. Технологическое освещение может являться рабочим освещением.

*Дежурное освещение* предусматривают во всех помещениях, где содержатся животные и служит для наблюдения за ними в ночное время. Для дежурного освещения выбирают светильники из числа общего рабочего освещения. Освещённость дежурного освещения принимается 15% от нормированной при содержании животных и 20% в родильных отделениях. К дежурному освещению можно отнести освещение проходов и наружное освещение.

*Аварийное освещение* обеспечивает продолжение работ в случае внезапного отключения рабочего освещения, если отключение может вызвать взрыв, пожар, отравление людей или длительное нарушение технологического процесса — инкубаторные станции, подстанции, зернопункты, имеющие протравливатели, ветпункты, сушильные установки и т.д. Наименьшая освещённость рабочих поверхностей принимается в пределах 5% от рабочего освещения, но не менее 2 лк внутри помещений и 1 лк для наружных площадок.

Эвакуационное освещение устраивается в местах, опасных для прохода людей, а также в основных проходах и на лестницах, служащих для эвакуации людей при числе эвакуирующихся более 50 человек; в производственных помещениях с постоянно работающими в них людьми, где их выход из помещения связан с опасностью травматизма из-за продолжения работы производственного оборудования, а также в производственных помещениях, где одновременно могут пребывать более 100 человек. Эвакуационное освещение должно обеспечивать освещённость на полу (земле) основных проходов и на ступенях лестниц не менее 0,5 лк в помещениях и 0,2 лк на открытых территориях.

Светильники эвакуационного и аварийного освещения должны отличаться от светильников рабочего освещения типом, размером или специально нанесённым на них знаком. Они должны присоединяться к сети, независимой от сети рабочего освещения, начиная от щита подстанции или ввода в здание (при наличии только одного ввода). Автономная сеть — наиболее надёжное питание аварийного освещения от аварийного источника.

### **13.3. Выбор нормируемой освещенности и коэффициента запаса**

Осветительная установка должна обеспечивать требуемые условия видения с наименьшими затратами денежных средств и электроэнергии.

Нормируемая освещённость выбирается в зависимости от размеров объекта, контраста этого объекта с фоном, характеристик фона, удалённости объекта наблюдения и вида источника света. Выбору освещённости в каждом конкретном случае должен предшествовать длительное знакомство с технологическим производством и особенностями зрительных работ.

Основным нормативным документом при выборе освещённости являются Строительные нормы и правила — СНиП 23.05.95 и отраслевые нормы освещения с.-х. предприятий, зданий, сооружений.

При выборе освещённости необходимо решать вопрос об источнике света. В отраслевых нормах для освещения с.-х. помещений и территорий рекомендуется применять газоразрядные лампы. Лампы накаливания следует применять только для освещения вспомогательных помещений. Использование их для освещения основных помещений допускается только при наличии технико-экономического обоснования.

При эксплуатации осветительных установок освещённость на рабочих местах снижается из-за снижения светового потока в результате старения ламп, загрязнения осветительной арматуры, ламп, стен и потолка освещаемого помещения.

Чтобы освещенность не снизилась ниже нормируемого значения, на стадии проектирования ОУ вводят коэффициент запаса  $K_3$ , повышающий расчетное значение освещенности по сравнению с нормируемой или мощность осветительной установки:

$$K_3 = K_1 K_2 K_3 K_4,$$

где  $K_1$  — коэффициент, учитывающий старение ламп;  
 $K_2$  — коэффициент, учитывающий загрязнение ламп;  
 $K_3$  — коэффициент, учитывающий загрязнение светильника;  
 $K_4$  — коэффициент, учитывающий количество перегоревших ламп.

Значения коэффициента запаса для сельскохозяйственных помещений:

- для ламп накаливания:  $K_3 = 1.5 \dots 1.7$ ;
- для люминесцентных ламп:  $K_3 = 1.3 \dots 2.1$ .

### 13.4. Выбор светового прибора

#### *Выбор светового прибора по конструктивному исполнению*

Разумный выбор типа источника света и светильника для каждого конкретного случая в значительной мере предопределяет техническую и экономическую эффективность проектируемой осветительной установки, её долговечность и надёжность работы светового прибора.

Выбор светового прибора определяется назначением, характером окружающей среды, требованием к светораспределению, ограничением слепящего действия и экономической целесообразностью.

*По конструктивному исполнению* выбирают светильник по степени защиты, соответствующий условиям окружающей среды, безопасности по отношению к пожару, взрыву, поражению электрическим током, а также удобству обслуживания. Прежде чем выбрать светильник, необходимо знать, к какой категории по условиям окружающей среды относится данное помещение (сухое, влажное, сырое, жаркое, пыльное, с химически активной средой, пожароопасное, взрывоопасное и т. д.)

При выборе светового потока надо стремиться к тому, чтобы степень защиты светильников соответствовала характеру окружающей среды.

Для сырых, особо сырых, для помещений с химически активной средой, а также для наружного освещения рекомендуются светильники со степенью защиты не ниже IP53.

#### *Выбор светового прибора по светотехническим характеристикам*

Качество освещения зависит от распределения светового потока в верхнюю и нижнюю полусферы, от формы кривой силы света (КСС). С увеличением доли потока, направленной в верхнюю полусферу, смягчаются тени, уменьшается блескость, улучшаются условия освещения раз-

лично ориентированных поверхностей, но зато возрастает мощность осветительной установки. Поэтому для производственных помещений обычно применяют СП прямого или преимущественно прямого света с КСС типа К, Г или Д, табл. 7, глава 11; для административных, общественных и жилых помещений применяют светильники рассеянного и преимущественно отраженного света с КСС М, Л или Ш. Для очень высоких помещений рекомендуются светильники с КСС К, для помещений средней высоты — с КСС Г или Д, для низких — с КСС М.

### ***Выбор светового прибора по экономическим показателям***

При выборе СП необходимо помнить, что у светильников прямого света класса П и преимущественно прямого света класса Н более высокий КПД, а значит, требуется меньшая мощность лампы для создания одинаковой освещенности рабочих поверхностей. Есть у них и недостаток — возможное затенение рабочих поверхностей, особенно от рядом стоящих громоздких предметов.

Экономическую целесообразность принимаемого решения в выборе СП и лампы необходимо учитывать на всех стадиях проектирования. Выбрать необходимо тот вариант, который дает минимум приведенных затрат при равноценных светотехнических показателях.

Основными составляющими приведенных затрат являются: стоимость электроэнергии, зависящая от мощности ламп; капитальные вложения — стоимость светильников и их монтажа и лампы затраты на обслуживание осветительной установки, т.к. стоимость электроэнергии обычно преобладает в общей сумме приведенных затрат, в практике проектирования на стадии выбора ограничиваются только сопоставлением установленной мощности осветительной установки и капитальных затрат.

От правильного выбора светильника зависит экономичность, безопасность и надежность работы осветительной установки.

### **13.5. Размещение светильников**

Существует два вида размещения СП — равномерное и локализованное. При локализованном способе размещения светильников вопрос места установки их решается в каждом случае индивидуально на основе детального знакомства с технологическим процессом и размещения освещаемых объектов.

При проектировании из всех возможных решений выбирается наиболее выгодное, при котором для обеспечения заданной освещенности и необходимого качества освещения требуется наименьший суммарный световой поток, то есть наименьшая установленная мощность.

Распределение освещенности по освещаемой поверхности определяется характером кривой силы света светильников и относительным расстоянием между ними. Относительное расстояние между светильни-

ками  $\lambda$  представляет собой отношение расстояния между ними к высоте подвеса над рабочей поверхностью  $L/H_p$ . Для каждой кривой силы света существует наиболее выгодное относительное расстояние между светильниками, обеспечивающее наибольшую равномерность распределения освещённости (табл. 10):

$$\lambda_c H_p \leq L \leq \lambda_3 H_p,$$

где  $\lambda_c, \lambda_3$  — относительные светотехнические и энергетические расстояния между светильниками;

$H_p$  — расчетная высота — высота между светильником и плоскостью, в которой находится расчетная точка, м (рис. 93);

$L$  — расстояние между светильниками, м.

Таблица 10. Рекомендуемые значения  $\lambda$  для светильников с типовыми КСС

Типовая КСС	$\lambda_c$	$\lambda_3$
Концентрированная, К	0,4-0,7	0,6-0,9
Глубокая, Г	0,8-1,2	1,0-1,4
Косинусная, Д	1,2-1,6	1,6-2,1
Полуширокая, Л	1,4-2,0	1,8-2,3
Равномерная, М	1,8-2,6	2,6-3,4

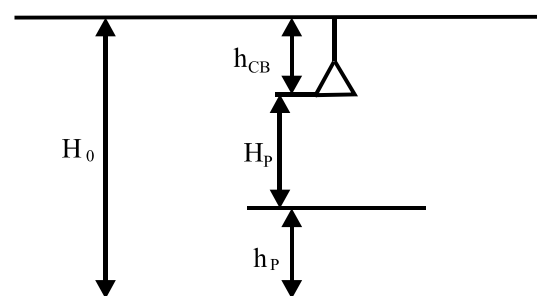


Рис. 93. К определению расчетной высоты.

$\lambda_c$  обеспечивает такое размещение светильников, при котором распределение освещенности рабочей поверхности наиболее равномерное. Увеличение  $\lambda_c$  сверх рекомендуемого значения ухудшает равномерность освещения, но снижает установленную мощность ламп.

$\lambda_3$  обеспечивает минимальную мощность источников света. С увеличением  $\lambda_3$  повышается и мощность источников света.

Расчетная высота установки светильников определяется по формуле

$$H_p = H_0 - h_{CB} - h_p.$$

где  $H_p$  — высота помещения;

$h_{CB}$  — высота свеса светильников (0...0,5) м;

$h_p$  — высота рабочей поверхности от пола.



Так как  $\lambda_c$  и  $\lambda_э$  имеют разброс, то для начала расчета принимают среднее значение  $\lambda$ :

$$\lambda_{CP} = \frac{\lambda_c + \lambda_э}{2},$$

и рассчитывают расстояние между светильниками:

$$L = H_p \lambda_{CP}.$$

Крайние светильники устанавливают на расстоянии  $l = (0,3 \dots 0,5)L$  от стены. Светильники с люминесцентными лампами располагают рядами параллельно стенам с окнами или длинной стороне помещения. В зависимости от уровня нормируемой освещенности светильники располагают непрерывными рядами или рядами с разрывами. Расстояние между рядами  $L$  определяется так же, как и в случае одиночных светильников.

В помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, с точки зрения поражения электрическим током, высота установки светильников над полом, за исключением светильников с люминесцентными лампами, должна быть более 2,5 м. Можно располагать их и на меньшей высоте, но в этом случае конструкция светильников должна быть такой, чтобы исключить доступ к лампе без специального инструмента.

Если есть необходимость установки светильников в помещениях с повышенной опасностью, то напряжение не должно превышать 42 В.

Количество светильников по длине помещения, т.е. в ряду, определяют по формуле

$$N_A = \frac{A - 2l}{L} + 1,$$

где  $A$  — длина помещения;

$l$  — расстояние от стены до крайнего светильника.

Аналогично определяется количество светильников по ширине помещения:

$$N_B = \frac{B - 2l}{L} + 1,$$

где  $B$  — ширина помещения.

При  $l = 0,5L$ :

$$N_A = \frac{A}{L}; \quad N_B = \frac{B}{L}.$$

Принимая целое значение количества светильников для газоразрядных ламп в меньшую сторону, а для ламп накаливания — в большую сторону, получим расстояние между светильниками:

$$L_A = \frac{A}{N_A}; \quad L_B = \frac{B}{N_B}.$$

### 13.6. Расчёт мощности осветительной установки

Светотехнические расчеты осветительных установок в значительной мере унифицированы и обеспечены значительным объемом справочных материалов.

В практике расчета осветительных установок наиболее известны три метода:

- точечный метод;
- метод коэффициента использования светового потока осветительной установки;
- метод удельной мощности.

#### *Точечный метод*

Точечный метод применяется при расчёте осветительной установки как общего, так и локализованного освещения, при расчете как угодно расположенных поверхностей, при расчете больших площадей, как при наличии затеняющих объектов, так и при их отсутствии, как при тёмных, так и светлых ограждающих конструкциях, для местного и общего освещения, при расчете наружного освещения.

Сущность метода состоит в том, что при известной кривой пространственного распределения силы света светильников освещенность в любой точке А может быть определена по основному закону светотехники:

$$E_A = \frac{I_\alpha \cos \beta}{l^2},$$

где  $I_\alpha$  — сила света светильника в направлении контрольной точки, Кд;

$\alpha$  — угол между осью светильника и линией, соединяющей источник света и освещаемой точкой;

$\beta$  — угол между нормалью к освещаемой поверхности и направлением силы света.

Известно, что все КСС даны для условного источника света, т.е. для светильника со световым потоком 1000 лм. С учетом этой освещенности рассчитывают световой поток каждого светильника.

Ввиду того, что световой поток светильников ещё не известен, вычисляют не истинную освещённость, а условную, то есть освещённость, которая была бы создана в этих точках, если бы в светильниках выбранного типа находился условный световой поток в 1000 лм:

$$e_A = \frac{I_\alpha^{1000} \cos^3 \alpha}{H_p^2}.$$

С учетом этой освещенности рассчитывают световой поток каждого светильника:

$$\Phi = \frac{1000 E_H K_3}{\mu \sum_{i=1}^{i=n} e_i},$$

где  $\mu = 1,1$  — коэффициент, учитывающий дополнительную освещенность от удаленных светильников и отраженные составляющие;

$\sum_{i=1}^{i=n} e_i$  — суммарная условная освещенность контрольной точки от отдельных светильников;

1000 — световой поток условного светильника, т.е. светильника со световым потоком 1000 лм;

$E_H$  — нормированная освещенность, лк.

Для упрощения расчетов при нахождении  $\sum_{i=1}^{i=n} e_i$  для каждой КСС определены пространственные изолюксы условной горизонтальной освещенности, где за основу приняты  $H_p$  и  $d$  (рис. 94).

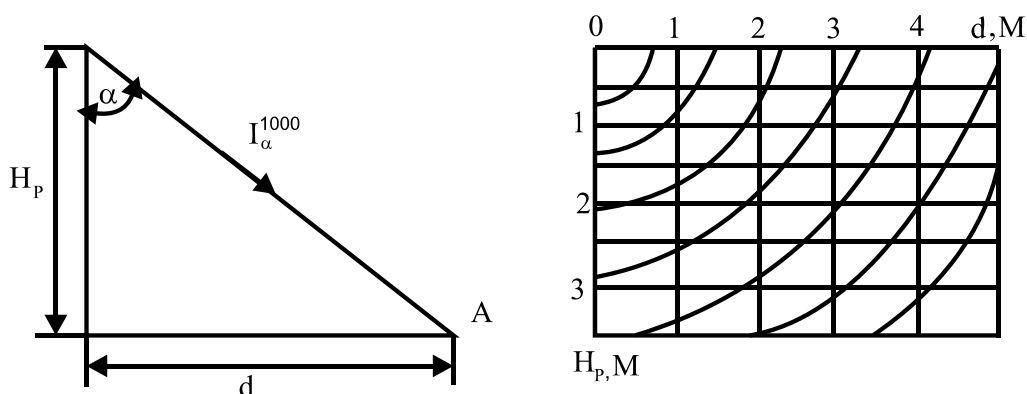


Рис. 94. К определению угла  $\alpha$  и условной горизонтальной освещенности

По расчетному потоку подбирается ближайшая стандартная лампа, световой поток которой  $\Phi_L$  должен отличаться от расчетного  $\Phi$  в пределах «-10.....+20%»:

$$0,1 \leq \frac{\Phi_L - \Phi}{\Phi} \leq 0,2.$$

Если подобрать лампу невозможно, то изменяют расстояние между светильниками и повторяют расчет.

При выборе лампы необходимо стремиться к тому, чтобы мощность её совпадала с допустимой для выбранного светильника.

Выбор контрольной точки является неясным и обоснованным моментом расчета осветительной установки. Обычно в качестве контрольной точки принимают точку с минимальной освещенностью. В качестве такой точки не следует принимать точку где-нибудь у стены или в углу, если даже там расположена рабочая поверхность. Там освещенность лучше подкорректировать местным освещением. Рекомендуется принимать контрольные точки между светильниками, например, посередине.

Еще один трудный вопрос. Сколько ламп учитывать при расчете суммарной условной освещенности? Ясно, что не должны учитываться светильники, не создающие реальной освещенности в контрольной точке. Чаще всего считают до того светильника, который дает освещенность не менее  $0,1 e_{\max}$ . При расчете освещенности вертикальной или наклонной плоскости она рассчитывается через горизонтальную освещенность (глава 12):

$$E_h = E_r (\cos \theta \pm \frac{d}{H_p} \sin \theta).$$

*Точечный метод расчета применительно  
к линейным источникам света*

Световой прибор считают линейным, если его длина больше  $0,5H_p$ .

В этом случае световой поток светильника, приходящийся на 1 м его длины, рассчитывается по формуле

$$\Phi' = \frac{1000 E_H K_3 H_p}{\mu \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i},$$

где  $\sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i$  — суммарная, условная относительная освещенность — освещенность, создаваемая светильником длиной в 1 м со световым потоком 1000 лм на расстоянии от него в 1 м. Эта условная, относительная освещенность для различных КСС приведена в справочниках (рис. 95).

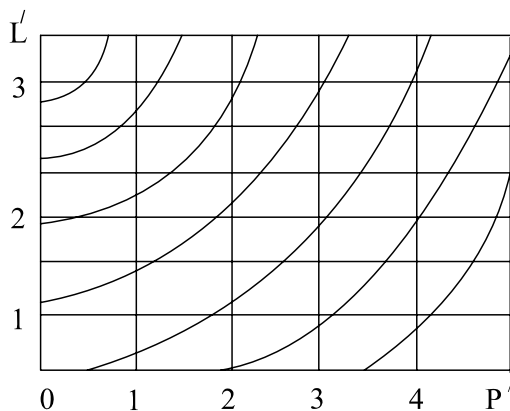


Рис. 95. К расчету условной относительной освещенности

Здесь  $L'$  и  $P'$  — относительная длина светильника и относительное расстояние от контрольной точки до светильника на плане  $L' = \frac{L}{H_p}$ ;  $P' = \frac{P}{H_p}$  (см. рис. 95).

Полный световой поток светящей линии, требующийся для обеспечения нормированной освещенности в контрольной точке:

$$\Phi = \Phi' L.$$

Результаты расчета заносят в таблицу 11.

Таблица 11. Результаты расчета условных относительных освещенностей

№ контр. точки	№ светильника	$l_1$	$l_1'$	$l_2$	$l_2'$	$\rho$	$\rho'$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon$	$\sum \varepsilon$
А											
В											

### Порядок расчета осветительной установки точечным методом

1. После выбора светильника определяют расстояние между ними  $L$ :

$$L = H_p \lambda_{CP}.$$

2. Определяют количество светильников по длине и ширине помещения:

$$N_A = \frac{A - 2l}{L} + 1; \quad \Phi_0 = \frac{-GK\alpha \ln \frac{n_{CP}}{n_0}}{\eta_{II}}.$$

3. Уточняют расстояние между светильниками.

$$L_A = \frac{A - 2l}{N_A - 1}; \quad N_B = \frac{B - 2l}{N_B - 1}.$$

4. Размещают светильники на плане помещения и назначают контрольные точки с предполагаемой максимальной и минимальной освещенностями.

5. В выбранных контрольных точках рассчитывают условные освещенности от отдельных светильников:

$$e_i = \frac{I_{ai}^{1000} \cos^3 \alpha_i}{H_p^2}.$$

6. Подсчитывают суммарную условную освещенность в выбранных контрольных точках

7. За расчетную точку принимают точку с минимальной освещенностью и вычисляют световой поток светильника

$$\Phi = \frac{1000 E_H K_3}{\mu \sum_{i=1}^n e_i}.$$

8. По каталогу выбирают тип лампы и рассчитывают отклонение светового потока лампы от расчетного значения.

9. Результаты расчетов заносят в таблицу 12.

Таблица 12. Результаты расчета условной освещенности

№ контр. точки	№ светильника	$d$ , м	$I_{\alpha}^{1000}$ , кд	$\cos^3 \alpha$	$\alpha$ , град	$e_i$ , лк	$\sum e_i$
А							
В							

### Метод коэффициента использования светового потока

Метод применяется при расчете общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей в помещениях со светлыми ограждающими поверхностями и при отсутствии крупных затеняющих предметов.

Средняя освещенность поверхности, где нормируется освещенность:

$$E_{-p} = \frac{\Phi}{S},$$

где  $E_{cp}$  — средняя освещенность, лк;

$\Phi$  — световой поток, падающий на освещаемую поверхность, лм;

$S$  — площадь освещаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

Но при расчете освещенности используется не средняя освещенность, а минимальная, которую можно определить из коэффициента неравномерности распределения освещенности по освещаемой поверхности:

$$Z = \frac{E_{cp}}{E_{min}}, \quad Z \geq 1,$$

где  $E_{min}$  — нормируемая освещенность.

Для светильников при расположении их, близком к наивыгоднейшему, коэффициент  $Z$  принимается равным 1,1...1,2.

Известно, что не весь световой поток осветительной установки достигает освещаемой площадки. Часть потока поглощается ограждающими конструкциями.

Долю светового потока, достигающего рабочей поверхности, определяет коэффициент использования светового потока:

$$\eta_{o,y} = \frac{\Phi}{\Phi_{CB} N},$$

где  $\eta_{o,y}$  — коэффициент использования светового потока осветительной установки;

$\Phi_{CB}$  — световой поток светильника;

$N$  — количество светильников в помещении.

$\eta_{o,y}$  — это ни что иное, как КПД осветительной установки с учетом характеристик помещения и его оптических свойств:

$\eta_{o,y} = f(KCC, КПД, H_p, \rho_{пот}, \rho_{стен}, \rho_{раб.пов.}, \text{формы помещения})$ ,

где  $\rho_{ПОТ}$ ,  $\rho_{СТЕН}$ ,  $\rho_{РАБ-ПОВ}$  — коэффициенты отражения потолка, стен и рабочей поверхности. Чем больше светового потока достигает рабочей поверхности, тем больше  $\eta_{0У}$ , чем больше  $H_p$ , тем меньше  $\eta_{0У}$  и чем выше отражающие свойства помещения, тем выше и  $\eta_{0У}$ .

Тогда

$$\Phi = \eta_{0У} \Phi_{СВ} N.$$

С учетом коэффициента полезного действия светильника, коэффициента неравномерности и коэффициента запаса получим

$$\Phi_{Л} = \frac{SE_{\min} ZK_3}{\eta_{0У} \eta_{СВ} N}.$$

На практике значение  $\eta_{0У}$  сводятся в справочные таблицы, где уже учитываются все вышеуказанные факторы, в том числе и КПД светильника  $\eta_{СВ}$ .

С учетом этого:

$$\Phi_{Л} = \frac{E_{\min} SZK_3}{\eta_{0У} N}.$$

#### *Порядок расчета мощности осветительной установки методом коэффициента использования*

1. Определяют тип источника света и тип светильника, нормированную освещенность, расстояние между светильниками по ширине и длине помещения и количество светильников.
2. Определяют общее количество светильников  $N = N_A N_B$ .
3. Определяют коэффициенты отражения потолка, стен и рабочей поверхности.
4. Определяют индекс помещения:

$$i = \frac{AB}{(A+B)H_p}.$$

По справочнику в соответствии с  $\rho$ ,  $i$  и типом светильника, его КСС определяют  $\eta_{0У}$ . После этого вычисляют световой поток лампы, по каталогу выбирают лампу и рассчитывают отклонение его от расчетного значения.

#### **Метод удельной мощности**

Метод удельной мощности является упрощенной формой расчёта методом коэффициента использования светового потока.

Применяется для ориентировочной оценки мощности осветительной установки или на начальной стадии проектирования.

В основе этого метода лежит метод коэффициента использования осветительной установки:

$$P_{O.Y} = P_{уд} S,$$

где  $P_{уд} = f(S, Z, E_H, \rho, K_3, H_p, КСС)$ .

Величина удельной мощности приводится в справочниках.

Количество светильников (ламп) определяется исходя из выбранной мощности светильника (лампы):

$$N = \frac{P_{O.Y}}{P_{\text{СВЕТИЛЬНИКА (ЛАМПЫ)}}}.$$

Но так как коэффициенты отражения ограждающих конструкций, КПД светильников и нормированная освещенности различны, чаще всего величину удельной мощности приводят к стандартным значениям:

$$P_{уд} = \frac{P_{уд.ТАБЛ} K_3 E_H}{K_{3.ТАБЛ} E_{ТАБЛ} КПД}.$$

После расчета удельной мощности определяют общую мощность осветительной установки, выбирают светильники и рассчитывают их количество:

$$N = \frac{P_{O.Y}}{P_{СВ}}.$$

Принимают целое их число и рассчитывают отклонение мощности светильника от расчетного значения:

$$-0,1 \leq \frac{P_{СВ} - P_{РАСЧ}}{P_{РАСЧ}} \leq +0,2.$$

### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите порядок проектирования осветительной установки. 2. Что такое локализованное освещение? 3. Перечислите виды освещения. 4. Как выбрать источник света? 5. Порядок выбора светильников. 6. Как определить количество светильников в помещении? 7. Как определить мощность светильника точечным методом от точечных источников света? 8. Что такое условная освещенность? 9. Как определить мощность светильника точечным методом от линейных источников света? 10. Что такое условная относительная освещенность? 11. Порядок расчета осветительной установки методом коэффициента использования. 12. Физический смысл коэффициента использования осветительной установки. 13. Как рассчитать осветительную установку методом удельной мощности?



## 14. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

- Выбор напряжения и источников питания
- Компоновка осветительных сетей
- Выбор марки проводов и способов их прокладки
- Расчет сечения проводов и кабелей
- Выбор защитной аппаратуры
- Разработка схемы управления осветительными установками
- Выбор щита управления

### 14.1. Выбор напряжения и источников питания

Питание осветительной сети осуществляется от трансформаторов (10-6/0,38 кВ) при фазном напряжении 220 В и линейном напряжении 380 В. Для опасных и особо опасных помещений используют напряжение 42 В, и если светильники располагаются ниже 2,5 м. Аварийное освещение запитывают от отдельных источников питания.

### 14.2. Компоновка осветительных сетей

На этой стадии проектирования решаются вопросы о месте расположения осветительных щитов, о числе групп и количестве проводов на участках сети. При решении этих вопросов добиваются рационализма и экономии.

При компоновке сети следует учитывать:

1. Согласно ПУЭ предельный ток в группе не должен превышать 25 А, а если присоединены лампы высокого давления — 63 А.
2. В каждой однофазной группе не должно быть более 20 ламп накаливания, ДРЛ, ДРИ, ДНаТ, а также розеток.
3. В однофазной группе можно применять до 100 люминесцентных ламп мощностью до 20 Вт, 75 люминесцентных ламп мощностью до 40 Вт и 60 ламп мощностью 60 Вт.
4. Рекомендуется применять четырёхпроводную группу длиной около 80 м, трёхпроводную — около 60 м и двухпроводную — 35 м.
5. Светильники дежурного и наружного освещения лучше всего включить в отдельную группу.

Приборы управления размещают так, чтобы были видны управляемые светильники.

Заканчивают этот раздел составлением расчётной схемы, на которой указывают все осветительные щиты и группы, число проводов и длину групп, мощность источников света и розеток, а также места ответвления.

### 14.3. Выбор марки проводов и способов их прокладки

Виды осветительных электропроводок определяются в зависимости от условий среды, назначения помещений, требования к надёжности, электро- и пожарной безопасности, эстетики, удобству эксплуатации, особенностей строительных конструкций.

Согласно ПУЭ разрешается использовать провода только с двойной изоляцией независимо от способа прокладки. Провода с одинарной изоляцией прокладываются только в трубах.

#### 14.4. Расчёт сечения проводов и кабелей

Расчёт электрических осветительных сетей заключается в определении сечения проводов и кабелей, при которых рабочий ток не вызывает перегрева проводов, обеспечиваются требуемые уровни напряжения на лампах и достаточная механическая прочность.

Расчёт сети основывается на определении нагрузок и тока на отдельных участках сети, тока защитного аппарата, разработке предложений по повышению  $\cos \varphi$  и стабилизации напряжения.

Сечение провода определяется:

- по потерям напряжения;
- по минимальному расходу проводникового материала;
- по току нагрузки;
- по механической прочности проводов.

При расчёте линий учитывается одновременная нагрузка на все светильники, то есть расчётная нагрузка должна быть равна установленной. Установленная мощность — мощность всех ламп и розеток сети, а для газоразрядных ламп с учетом потерь мощности в ПРА:

- для люминесцентных ламп со стартерной схемой — 20%;
- для люминесцентных ламп бесстартерной схемы — 30%;
- для мощных ламп (таких как ДРЛ) — 10%.

Для определения расчетной нагрузки питающей сети вводится коэффициент спроса  $K_C$  — отношение расчетной мощности к установленной:

$$K_C = \frac{P_P}{P_V}.$$

Для большинства сельскохозяйственных помещений  $K_C = 1$ .

#### *Расчет сечения проводов по потере напряжения*

Напряжение, подводимое к лампе, очень сильно влияет на её световой поток. Поэтому в ПУЭ регламентируется допустимое напряжение на лампах. В осветительных сетях рабочего освещения производственных и общественных зданий допускается потеря напряжения на самых удаленных лампах не более 4%.

В общем виде падение напряжения в сети определяется законом Ома.

Например, для двухпроводной линии длиной  $l$  и сечением  $S$  для чисто активной нагрузки:

$$\Delta U = IR.$$

С учетом реактивного сопротивления проводов:

$$\Delta U = I(R \cos \varphi + X_L \sin \varphi).$$

Активное сопротивление провода:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление провода, Ом·м;

$l$  — длина провода;

$S$  — площадь сечения провода, м<sup>2</sup>;

$\gamma$  — удельная проводимость проводника, См/м.

Если пренебречь реактивной составляющей сопротивления  $X_L \sin \varphi$ , а сечение выразить в мм<sup>2</sup>, то  $\Delta U = IR \cos \varphi = I \cos \varphi \frac{l}{\gamma S 10^{-6}}$ .

$$\text{Для двухпроводной линии } \Delta U = 2I \frac{l}{\gamma S 10^{-6}} \cos \varphi.$$

Выразив  $\Delta U$  в процентах от номинального напряжения  $U_H$ , а ток через мощность в кВт, то потери напряжения можно выразить так:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_H} 100 = \frac{2lP \cdot 100}{\gamma S \cdot 10^{-6} \cdot U_H^2 \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot M}{\gamma S \cdot 10^{-5} \cdot U^2} = \frac{M}{CS},$$

где  $M = lP$  — электрический момент нагрузки, равный произведению мощности нагрузки, кВт, на длину линии, м;

$$C = \frac{\gamma U^2}{2 \cdot 10^5} \text{ — характерный коэффициент сети.}$$

Как видим, потеря напряжения не зависит от коэффициента мощности сети, но зависит от момента нагрузки, сечения проводов и постоянной  $C$ , зависящей от материала проводов, системы напряжения сети, числа проводов и рода тока.

Значения  $C$  для различной системы напряжения сети, числа проводов и рода тока приведены в таблице 13.

Таблица 13. Значения коэффициента  $C$

$U_H, \text{ В}$	Система и род тока	$C$	Значения $C$ для проводников	
			медных	алюминиевых
380/220	3-фазная с нулем	$\frac{\gamma U_{\text{л}}^2}{10^5}$	72	44
380	3-фазная без нуля		72	44
220/127	3-фазная с нулем		24	14,7
220	3-фазная без нуля		24	14,7
380/220	двухфазные	$\frac{\gamma U_{\text{л}}^2}{2,25 \cdot 10^5}$	32	19,5
220/127			10,7	6,5
220	2-проводная переменного или постоянного тока	$\frac{\gamma U^2}{2 \cdot 10^5}$	12	7,4
127			4	2,46

Расчет сечения проводов по потере напряжения производится из условия, что потеря напряжения у самой отдаленной лампы не превышает 4%.

Рассмотрим пример (рис. 96).

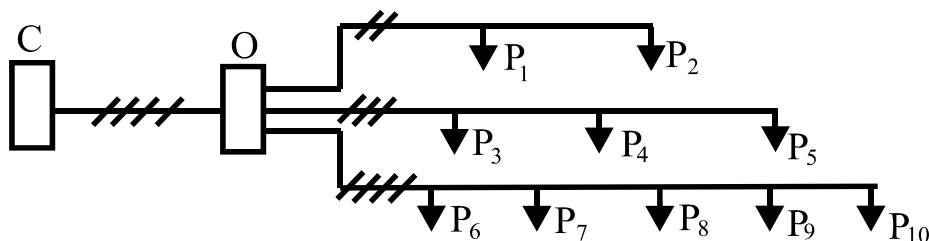


Рис. 96. К расчету сечения проводов

Расчет производят исходя из того, что произвольно разбивают предполагаемую потерю напряжения по участкам. Например, потеря напряжения от силового щита до осветительного составит 0,2%, а от осветительного щитка до самой дальней лампы составляет 3,8%.

Электрический момент определяют как произведение мощности  $i$ -го светильника на расстояние от щита или от точки разветвления до этого светильника:

$$M_{ГР1} = P_1 l_{OP1} + P_2 l_{OP2};$$

$$M_{ГР2} = P_3 l_{OP3} + P_4 l_{OP4} + P_5 l_{OP5};$$

$$M_{ГР3} = P_6 l_{OP6} + P_7 l_{OP7} + P_8 l_{OP8} + P_9 l_{OP9} + P_{10} l_{OP10};$$

$$M_{CO} = l_{CO} \sum_{i=1}^{i=10} P_i l_i.$$

По найденным моментам определяют сечения проводов:

$$S_{CO} = \frac{M_{CO}}{C_4 \Delta U_{CO}} = \frac{M_{CO}}{44 \cdot 0,2}; \quad S_{ГР1} = \frac{M_{ГР1}}{C_2 \Delta U_{ГР1}} = \frac{M_{ГР1}}{7,4 \cdot 3,8};$$

$$S_{ГР2} = \frac{M_{ГР2}}{19,5 \cdot 3,8}; \quad S_{ГР3} = \frac{M_{ГР3}}{44 \cdot 3,8}.$$

Полученные значения сечения проводов округляют до ближайшего большего стандартного сечения и проверяют на нагрев и механическую прочность.

Расчет сечения проводов более сложной схемы компоновки сети производится из условия произвольного выбора потери напряжения на отдельных участках.

Например (рис. 97), располагаемую потерю напряжения 4% произвольно разбиваем по участкам:  $\Delta U_{CO} = 0,2\%$ ;  $\Delta U_{OA} = 0,5\%$ ;  $\Delta U_{AB} = 1\%$ ;  $\Delta U_{Aa} = 3,3\%$ ;  $\Delta U_{Bb} = \Delta U_{B8} = 2,3\%$ .

Вычисляем моменты и производим расчет сечения проводов.

Согласно ПУЭ сечение алюминиевых жил проводов и кабелей должно быть не менее  $2,5 \text{ мм}^2$  по механической прочности, а при прокладке на изоляторах — не менее  $4 \text{ мм}^2$ .

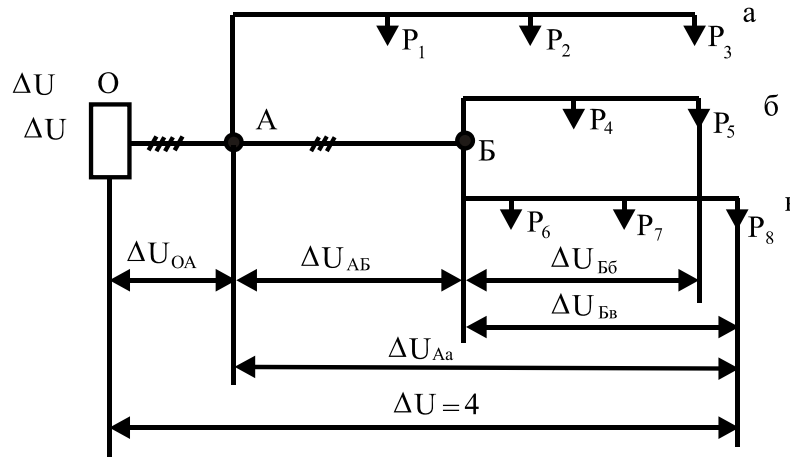


Рис. 97. К расчету сечения проводов сети сложной схемы

Так как выбор потерь напряжения на участках цепи и сечения проводов получаются произвольными, то может случиться так, что сечение последующих участков может быть меньше, чем предыдущих. В этом случае снова принимают потери напряжения на участках и снова производят расчет. Произвольного подбора сечения проводов лишен метод расчета сечения проводов на минимальный расход проводникового материала.

### **Расчет сечения проводов на минимум проводникового материала**

Этот метод предполагает, что все электрические моменты расчетного и всех последующих участков находятся на расчетном участке.

Сечение проводов определяют по формуле

$$S = \frac{M_{\text{пр}}}{C\Delta U} = \frac{\sum M + \sum \alpha_i m_i}{C\Delta U},$$

где  $M_{\text{пр}}$  — приведенный момент  $M_{\text{пр}} = \sum M_i + \sum \alpha_i m_i$ ;

$M_i = \sum P_i l_i$  — сумма моментов рассчитываемого и всех последующих участков с тем же числом проводов, что и рассчитываемого участка;

$\sum \alpha_i m_i$  — сумма моментов всех ответвлений с другим числом проводов, чем у рассчитываемого участка, кВт м;

$\alpha_i$  — коэффициент приведения моментов, зависящий от числа проводов расчетного участка и в ответвлениях (табл. 14).

Таблица 14. Значения коэффициентов приведения моментов

Линия	Ответвление	Коэффициент приведения моментов $\alpha$
Трехфазная с нулем	Однофазное	1,85
Трехфазная с нулем	Двухфазное с нулем	1,39
Двухфазная с нулем	Однофазное	1,33
Трехфазная без нуля	Двухпроводное	1,15

По известному значению располагаемых потерь напряжения в осветительных сетях 4% определяют сечения проводов следующим образом:

Например, для схемы (рис. 98).

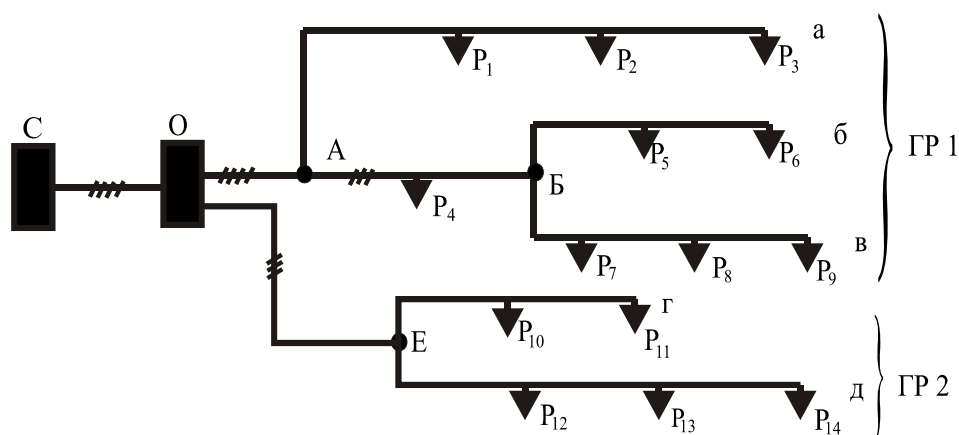


Рис. 98. К расчету сечения проводов на минимум проводникового материала

1. Для расчета сечения проводов необходимо определить электрические моменты всех ветвей и участков, например:

$$M_{Aa} = P_1 l_{AP1} + P_2 l_{AP2} + P_3 l_{AP3};$$

$$M_{OA} = l_{OA} \sum_{i=1}^{i=9} P_i l_i;$$

$$M_{AB} = P_4 l_{AP4} + \sum_{K=5}^{K=9} P_K l_{AB};$$

$$M_{Bб} = P_5 l_{BP5} + P_6 l_{BP6} \text{ и т.д.}$$

2. Расчет начинают с головного участка  $S_{CO}$ , полагая, что вся осветительная сеть находится на этом участке:

$$S_{OA} = \frac{M_{IP}}{4C_4} = \frac{M_{CO} + M_{OA} + \alpha_3(M_{AB} + M_{Oe}) + \alpha_2(M_{Aa} + M_{Bб} + M_{Bв} + M_{Ez} + M_{Ed})}{4C_4}$$

3. Принимают ближайшее стандартное сечение провода и определяют действительную потерю напряжения на этом участке:

$$\Delta U_{CO} = \frac{M_{CO}}{S_{CO.СТ} C_4}.$$

4. Определяют потерю напряжения на оставшихся участках — это потеря напряжения на обеих группах:

$$\Delta U_1 = 4 - \Delta U_{CO}.$$

5. Определяют приведенный момент первой группы:

$$M_{ГР1} = M_{OA} + \alpha_3 M_{AB} + \alpha_2 (M_{Aa} + M_{Bb} + M_{Bb}).$$

6. Определяют сечение провода на головном участке этой группы:

$$S_{OA} = \frac{M_{ГР1}}{C_4 \Delta U_1}.$$

7. Определяют фактическую потерю напряжения на этом участке:

$$\Delta U_{OA} = \frac{M_{OA}}{S_{OA.СТ} \Delta U_1}.$$

8. Далее определяют действительную потерю напряжения на оставшихся участках:

$$\Delta U_2 = \Delta U_1 - \Delta U_{OA}$$

и производят расчет сечения проводов на них:

$$S_{AB} = \frac{M_{ПРАБ}}{C_3 \Delta U_2} = \frac{M_{AB} + \alpha_1 (M_{Bb} + M_{Bb})}{C_3 \Delta U_2}.$$

9. Принимают ближайшее стандартное значение провода и вычисляют действительную потерю напряжения на этом участке:

$$\Delta U_{AB} = \frac{M_{AB}}{C_3 S_{AB.СТ}}.$$

10. Вычисляют сечения проводов оставшихся участков и находят действительную потерю напряжения на них.

11. Вычисляют действительную потерю напряжения на группе:

$$\Delta U = \Delta U_{CO} + \Delta U_{OA} + \Delta U_{AB} + \Delta U_B.$$

При учете потерь напряжения параллельных ветвей принимается ветвь с наибольшей потерей напряжения.

### **Расчет проводов по току нагрузки**

Расчет сечения проводов по току нагрузки сводится к определению тока, при длительном протекании которого нагрев проводов не превышает допустимого, определенного ПУЭ для данной конструкции проводов.

*Длительно допустимый ток* — это наибольший ток, не вызывающий перегрева проводов данной марки и при определённых условиях прокладки, фактически определяется классом изоляции и условиями теплопередачи.

Количество теплоты, выделенное в проводнике за единицу времени, определяется законом Джоуля-Ленца, рассеивается в окружающую среду:

$$Q = I^2 R = kF(t_2 - t_1),$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи теплоты в окружающую среду;  
 $F$  — площадь теплоотдачи проводника;  
 $t_1, t_2$  — соответственно температура поверхности проводника и окружающей среды.

Расчётное значение тока для каждого участка сети определяют по формуле с учетом равномерности распределения нагрузки по фазам:

$$I_p = \frac{P}{m U_{\text{тм}} \cos \varphi},$$

где  $P$  — расчётная нагрузка, Вт;  
 $U_{\phi}$  — фазное напряжение, В;  
 $\cos \varphi$  — коэффициент мощности нагрузки;  
 $m$  — количество фаз сети.

Для однофазной сети:

$$I_p = \frac{P}{U_{\phi} \cos \varphi}.$$

Для двухфазной сети:

$$I_p = \frac{P}{2U_{\phi} \cos \varphi}.$$

Для трёхфазной сети:

$$I_p = \frac{P}{3U_{\phi} \cos \varphi}.$$

Так как для различных нагрузок  $\cos \varphi$ , различен, то принимают средневзвешенный  $\cos \varphi$ :

$$\cos \varphi_{CP} = \frac{\sum P_i \cos \varphi_i + \sum P_k \cos \varphi_k + \sum P_j \cos \varphi_j}{\sum P_i + \sum P_k + \sum P_j}.$$

По допустимому нагреву проверяют все участки электрической сети на выполнение условия:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p.$$

Выполнение этого условия гарантирует пожарную безопасность и нормируемый срок службы проводов.

Провода и кабели в электрических сетях должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы не допускать обрывов во время монтажа, при протягивании через трубы, при натяжке и креплении на опорах, противостоять при возможных повреждениях при эксплуатации. Поэтому рассчитанное сечение проводов должно быть проверено и на механическую прочность:

$$S_{\text{пр}} \geq S_{\text{мин. доп}}.$$



При выборе площади поперечного сечения нулевого провода необходимо учитывать следующие соображения:

1. В четырех проводных трех фазных сетях с лампами накаливания при равномерной нагрузке площадь поперечного сечения нулевого провода должна быть не менее половины сечения фазного провода.

2. В однофазных и двухфазных линиях, в линиях, где предусмотрена возможность пофазного отключения, в линиях с газоразрядными лампами площадь поперечного сечения нулевого провода должна быть равна площади поперечного сечения фазного провода.

#### 14.5. Выбор защитной аппаратуры

Все осветительные сети подлежат защите от токов короткого замыкания. Кроме того, требуется защита от токов перегрузок для сетей жилых и общественных зданий, торговых предприятий, пожаро-... и взрывоопасных помещений. Аппараты защиты устанавливаются:

- на линиях, отходящих от щитов и других распределительных устройств;
- на вводах в здания при питании от отдельных подстанций;
- со стороны высшего и низшего напряжения понижающих трансформаторов;
- в местах, где происходит уменьшение сечения линии.

Аппараты защиты должны устанавливаться в местах непосредственного присоединения проводов к линии. Допускается устанавливать их на расстоянии до 3 м от точки присоединения, а в труднодоступных местах — при ответвлении до 30 м. Но в последнем случае этот участок должен быть выполнен проводом с негорючей изоляцией.

Защитные и отключающие аппараты нельзя устанавливать в нулевых проводах, кроме двухпроводных линий во взрывоопасных помещениях.

Номинальные токи аппаратов защиты должны быть не меньше расчетных токов защищаемых участков сети и не отключать установку при включении ламп.

Полный выбор этих аппаратов сложен, поэтому при выполнении курсовой работы нужно выбрать только токи уставок автоматических выключателей и токи вставок предохранителей и согласовать их с допустимыми токами проводов.

Ток плавкой вставки предохранителя рассчитывается по формуле

$$I_B = kI_p,$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий пусковые токи ламп;

$I_p$  — расчетный ток группы.

Для ламп накаливания мощностью до 300 Вт и для газоразрядных ламп низкого давления  $k = 1$ ; для ламп накаливания мощнее 300 Вт и для ламп высокого давления  $k = 1,2$ .

Для защиты осветительной сети используются и автоматические выключатели с тепловыми, электромагнитными и комбинированными выключателями. Ток уставки теплового  $I_T$  и комбинированного  $I_K$  расцепителей определяется по формуле

$$I_T = I_K = k'I_P$$

Для газоразрядных ламп низкого давления и всех ламп накаливания коэффициент, учитывающий пусковые токи, —  $k' = 1$ . Для ламп высокого давления  $k' = 1,4$ .

После выбора плавкой вставки  $I_{B.CT}$  или уставки расцепителя  $I_{Y.CT}$  их согласовывают с допустимым током провода  $I_D$ .

Если сеть защищается только от токов короткого замыкания, то:

- для предохранителей  $I_D \geq 0,33I_{B.CT}$ ;
- для электромагнитного расцепителя  $I_D \geq I_{Э.CT}$ ;
- для теплового расцепителя  $I_D \geq 0,66I_{Y.CT}$ .

Если сеть защищается от длительных токов перегрузок, то

$$I_D \geq 1,25I_{B.CT}; \quad I_D \geq 1,25I_{T.CT}; \quad I_D \geq 1,25I_{K.CT}.$$

#### **14.6. Разработка схемы управления осветительными установками**

Важнейшими параметрами, обеспечивающими нормальный рост, развитие и продуктивность животных и птиц, являются периодичность освещения, уровень освещённости и спектральный состав.

Периодичность освещения — изменение продолжительности дня и ночи в течение года влияют на сроки размножения животных, линьку и рост волос, скорость обмена веществ и на продуктивность.

Увеличение освещённости увеличивает продуктивность коров на 9%, снижает расход кормов на единицу продукции от 8 до 24%, стимулирует обменные процессы, рост молодняка и плодовитость. Снижение освещённости снижает удои, но увеличивает накопление жира у свиней и массы птицы.

Существенным резервом экономии электроэнергии в птицеводстве является режим прерывистого освещения. Исследования показали, что многократное отключение света в птичниках позволяет сэкономить от 30 до 50% электроэнергии и повысить продуктивность птицы и прирост цыплят.

Для изменения продуктивности животных и птиц необходимы схемы управления освещением, которые бы позволили изменять уровень освещённости по заданной программе: имитировать «рассвет» и «закат».

Один из способов регулирования освещённости состоит в ступенчатом или плавном изменении светового потока светильников путём изменения напряжения питания источников света.

Управление осветительными установками в с. х. помещениях должны выполняться с учетом следующих требований:

1. Управление осветительными установками небольших помещений осуществляется выключателями, которые располагают в помещениях со стороны дверной ручки, а для помещений редко посещаемых — снаружи помещений (кладовые, вентиляционные камеры и т.д.).

2. В помещениях, где есть различная естественная освещенность, управление должно быть раздельным.

3. В помещениях, где имеется несколько входов, управление освещением должно осуществляться с каждого входа по коридорной схеме.

4. При токах нагрузки больше допустимого тока выключателя, переключателя (6...10 А), а также при двух и трехфазных линиях управления осуществляется с помощью магнитных пускателей.

5. Во взрывоопасных помещениях аппараты защиты и управления устанавливаются и в нулевой провод.

6. Желательно видеть управляемые светильники с места управления.

7. Дежурное освещение управляется отдельно от рабочего.

В с.-х. помещениях используется местное и дистанционное, ручное и автоматическое управление. Местное управление осуществляется выключателями, переключателями и автоматическими выключателями. Автоматическое управление осуществляется, как правило, в функции времени, естественной освещенности или напряжения сети.

В широких помещениях с окнами целесообразно управлять осветительными установками в функции естественной освещенности. Для этого используют различные фотореле. Основными элементами фотореле являются газонаполненные или вакуумные фотоэлементы или фоторезисторы, у которых сопротивление уменьшается при попадании на них светового потока. Так как значение тока фотодатчиков недостаточно для включения катушки контакторов, то этот ток усиливается до тока срабатывания реле. Рассмотрим, например, работу фотореле ФР-2 (рис. 99).

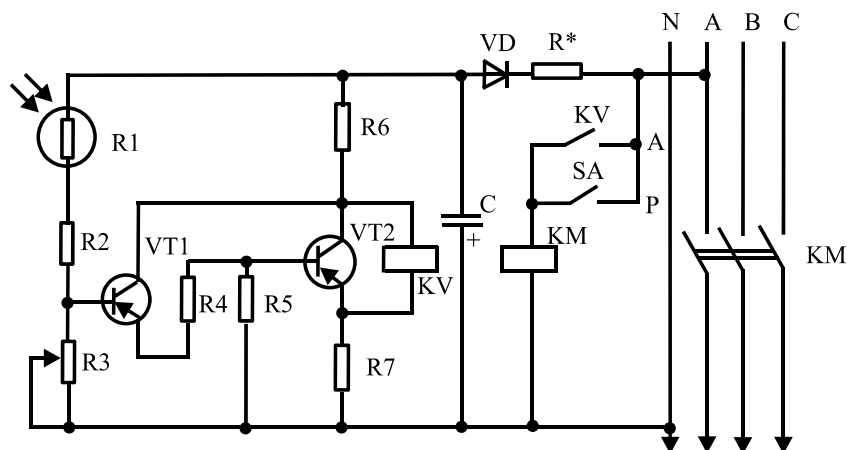


Рис. 99. Принципиальная схема фотореле ФР-2

Фоторезистор R1 и резисторы R2 и R3 составляют делитель напряжения. В сумерках, когда сопротивление фоторезистора R1 велико, ток в этой цепи мал и падение напряжения на резисторе R3 невелико, ток базы транзистора VT1 мал, транзистор VT1 закрыт и ток через него не течет. Нет тока в сопротивлении R5, нет на нем падения напряжения и транзистор VT2 тоже закрыт. Реле KV питается от сети через однополупериодный выпрямитель на диоде VD с гасящим резистором R\* и сглаживающим пульсацию напряжения конденсатором C. Так как VT2 закрыт, то реле KV находится под напряжением и его контакты в цепи магнитного пускателя KM замкнуты и осветительная установка включена магнитным пускателем KM.

При увеличении освещенности сопротивление фоторезистора R1 уменьшается, возрастает ток делителя напряжения, возрастают падение напряжения на резисторе R3 и ток базы транзистора VT1, увеличивается ток эмиттера VT1, возрастает потенциал на базе транзистора VT2 из-за увеличения падения напряжения на резисторе R5, и он, открываясь, шунтирует катушку реле KV. Ток через катушку снижается, и он разрывает цепь катушки магнитного пускателя KM, который в свою очередь выключает освещение помещения.

Другой способ регулирования освещенности состоит в ступенчатом или плавном изменении светового потока светильников путем изменения напряжения питания источников света.

Регулирование напряжения можно осуществлять путем включения в цепь светильников постоянного резистора, при помощи автотрансформаторов, магнитных усилителей или управляемых резисторов. Основными недостатками этих способов являются существенные потери энергии, тепловыделения у резисторов и реостатов, большие металлоемкости и массы.

Полупроводниковые приборы свободны от этих недостатков. Полупроводниковые тиристоры и симисторы позволяют регулировать действующие значения выходного напряжения длительностью включенного состояния тиристорного ключа VS в каждом полупериоде напряжения сети (рис. 100).

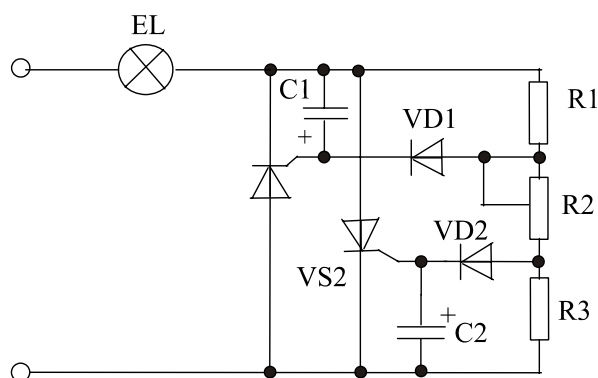


Рис. 100. Электрическая принципиальная схема фазоимпульсного регулирования

При фазоимпульсном управлении тиристорами на их управляющий электрод, в определенный момент времени, подается импульс напряжения, после чего он открывается и остается открытым до конца полупериода (рис. 101).

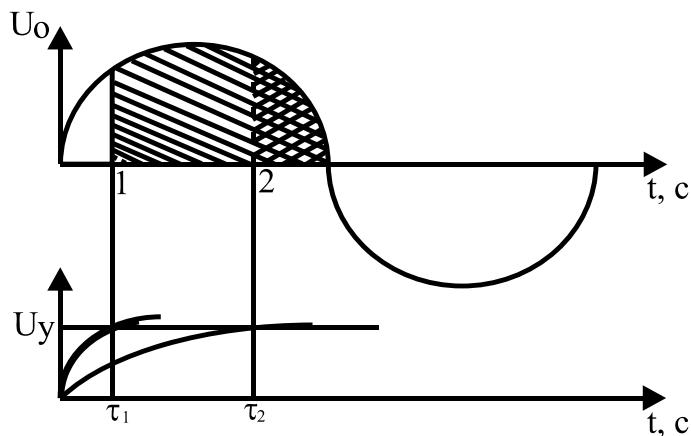


Рис. 101. Регулирование напряжения фазоимпульсным методом

В схеме (см. рис. 100) регулирование времени открывания тиристоров осуществляется путем изменения постоянной времени  $\tau = RC$ . Например, в первый полупериод, когда положительный потенциал находится на лампе, электрический ток определяется делителем напряжения R1-R2-R3 и происходит зарядка конденсатора C2 по цепи лампа-R1-R2-VD2-C2. Когда напряжение на конденсаторе (например, в момент времени  $t_1$ , см. рис. 105) достигнет  $U_Y$  — напряжения открывания тиристора VS2, он откроется и по лампе пойдет ток с этого момента и до конца полупериода. При увеличении сопротивления R2 увеличивается время зарядки конденсатора C2 до напряжения открывания и тиристор VS2 открывается позже, тем самым снижается среднее значение напряжения на лампе.

В следующем полупериоде он остается закрытым, а симистор может быть открыт очередным импульсом управления.

При тиристорном регулировании форма выходного напряжения искажается, в ней наряду с основной гармоникой появляются высшие гармонические составляющие, увеличиваются пульсации светового потока ламп и радиопомехи, для борьбы с которыми следует применять соответствующие фильтры.

#### 14.7. Выбор щита управления

Для приема и распределения электрической энергии и защиты отходящих линий в осветительных сетях применяют вводно-распределительные устройства и вводные щиты. Их устанавливают в местах, удобных для обслуживания и ближе к центру электрических нагрузок.

Распределительные устройства выбирают по следующим признакам:

- по назначению (совмещенные, этажные, квартирные);
- по способу установки (навесные, стоячие и т.д.);
- по виду защиты от воздействия окружающей среды;
- по схемам электрических соединений: для четырех-, трех- или двухпроводных отходящих линий;
- по типу автоматических выключателей или предохранителей.

В каждом конкретном случае в зависимости от окружающей среды, назначения, количества групп, схем соединений, аппаратов защиты выбирают то или иное вводно-распределительное устройство.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Порядок компоновки осветительной сети. 2. Как выбрать марку проводов и способ прокладки? 3. Перечислите методы расчета сечения проводов. 4. Как выполнить расчет сечения проводов по потере напряжения? 5. Что учитывает характерный коэффициент сети? 6. Как выполнить расчет сечения проводов на минимум проводникового материала? 7. Что такое приведенный момент? 8. Что такое допустимый ток провода? 9. Как выбрать предохранитель? 10. Как выбрать уставку автоматического выключателя? 11. Требования, предъявляемые к управлению осветительными установками. 12. Расскажите о принципе работы фотореле. 13. Перечислите способы регулирования освещенности. 14. Расскажите о фазоимпульсном способе регулирования напряжения.

## 15. ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

- Облучательные установки и их классификация
- Бактерицидные облучательные установки
- Источники бактерицидного излучения
- Применение бактерицидного излучения в сельскохозяйственном производстве
- Классификация бактерицидных облучательных установок
- Основы расчета бактерицидных облучательных установок
- Порядок расчета бактерицидных облучательных установок
- Примеры расчета бактерицидных облучательных установок

### 15.1. Облучательные установки и их классификация

Оптическое излучение (ОИ) — один из важных факторов микроклимата животноводческих и птицеводческих помещений, которое оказывает существенное влияние на развитие и продуктивность животных и птицы. Использование ОИ — важный резерв повышения эффективности производства.

Человек использует в своей деятельности ОИ с длинами волн  $80...10^6$  нм.

Видимое излучение с длинами волн  $380...760$  нм служит для непосредственной деятельности человека. Роль этого излучения рассматривалась в лекции №1.

Ультрафиолетовые облучательные установки можно подразделить на:

- а) бактерицидного действия;
- б) терапевтического действия;
- в) мутагенного действия.

Биологическое действие УФ-лучей зависит от различных спектральных областей.

Излучение с длинами волн  $200...280$  нм оказывает сильное бактерицидное действие и применяется для обеззараживания воды, воздуха, тары, оборудования, помещений, пищевых продуктов.

Излучение с длинами волн  $280...315$  нм вызывает своеобразное покраснение кожи (эритему) и поэтому называется эритемным (витальным, вита — жизнь). Оно обладает антирахитным действием и способно превращать витамин D в активно действующий витамин  $D_3$ .

Излучение с длинами волн  $315...400$  нм биологически малоактивно и используется для люминесцентного анализа и возбуждения светящихся составов в сигнальных и других устройствах, а также для определения качества сельхозпродукции. Кроме этого, длительное воздействие этого излучения приводит к наследственным изменениям, которое используется для выведения новых сортов растений и других организмов с новыми свойствами.

Излучение с длинами волн 300...760 нм является фотосинтетически активным и используется в фотосинтезе растений.

И последний класс облучательных установок — инфракрасные облучательные установки (ИК-ОБУ). В этих установках используется излучение от 760 нм до 1 мм. Такое излучение используется:

- для обогрева молодняка;
- сушки лакокрасочных покрытий и нагрева деталей;
- сушки сельскохозяйственных продуктов;
- пастеризации молока и соков и т.д.

## 15.2. Бактерицидные облучательные установки

В свое время, рассматривая спектр электромагнитных колебаний, мы говорили, что УФ-излучение подразделяется на три зоны — область С с длинами волн 210...280 нм, область В — 280...315 нм и область А — 315...380 нм. Все эти области используются в сельскохозяйственном производстве.

Бактерицидное облучение относится к ультрафиолетовому излучению с диапазоном волн 200...280 нм, это ультрафиолетовое излучение области С. Бактерицидное излучение оценивается по его бактерицидному действию, т.е. способности уничтожать бактерии. От действия этого излучения разрушаются белковые связи и бактерии гибнут. Наиболее чувствительны живые клетки к длинам волн 250...265 нм, а наибольшим бактерицидным действием обладает излучение с длиной волны 254 нм. Разные виды микроорганизмов обладают различной чувствительностью к УФ-лучам. Устойчивость их определяется не только природой, но и фазой их развития. Бактерии, находящиеся в воздухе в капельной фазе, наиболее чувствительны к воздействию УФ-лучей. А вот споровые формы бактерий наиболее устойчивы. Недостаточное облучение их может привести не к гибели, а даже к интенсивному размножению.

Эффективность бактерицидного (летального) излучения характеризуется кривой относительной спектральной чувствительности (рис. 102).

Бактерицидный поток  $\Phi_B$ , бк (бакт):

$$\Phi_B = \int_{\lambda_1=280_1}^{\lambda_2=280} \varphi(\lambda)k(\lambda)_B d\lambda.$$

Единицей измерения бактерицидного потока служит бк (бакт), численно равный излучению мощностью 1 Вт при  $\lambda = 254$  нм.

Облучённость бактерицидного потока  $E_B$ , Бк/м<sup>2</sup>:

$$E_B = \frac{d\Phi_B}{dS}.$$

Сила бактерицидного излучения  $I_B$ , Бк/м<sup>2</sup>:

$$I_B = \frac{d\Phi_B}{d\omega}.$$



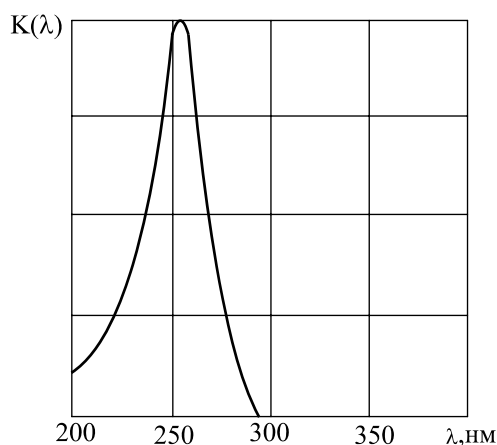


Рис. 102. Коэффициент спектральной чувствительности бактерий

Количество бактерицидного облучения  $H_B$ , бк·с/м<sup>2</sup>:

$$H_B = \int_{t_1}^{t_2} E_B dt .$$

### 15.3. Источники бактерицидного излучения

Источниками бактерицидного излучения могут быть газоразрядные лампы как низкого, так и высокого давления — это лампы низкого давления ДБ15, ДБ30, ДБ60. Это обычные люминесцентные лампы. Только колба выполнена из увиолевого стекла или из кварцевого и отсутствует люминофор. КПД этих ламп по бактерицидному потоку составляет 64%, т. е. выше, чем у люминесцентных ламп (20%), т.к. отсутствует преобразование УФ-излучения в видимое.

Лампы высокого давления — это ДРТ-100, 125, 250, 400, 1000, 2500 и лампы сверхвысокого давления, например ДРШ-1000. Эти лампы более компактны, но КПД по бактерицидному потоку примерно в три раза меньше, чем у ламп низкого давления, так как они генерируют больше теплового излучения.

### 15.4. Применение бактерицидного излучения в сельскохозяйственном производстве

Ультрафиолетовое излучение применяется в сельском хозяйстве более чем в 20 отраслях.

1. Водоснабжение сельских населенных пунктов чаще всего производится из колодцев, рек, водохранилищ. В этой воде может содержаться до 1000 микроорганизмов в 1 литре. Поэтому перед употреблением эта вода должна быть очищена и обеззаражена. В настоящее время для обеззараживания воды чаще всего применяют хлорирование или озонирование.

Применение ультрафиолетового излучения для обеззараживания воды перед ее хлорированием не меняет вкусовые качества и химические свойства воды, излучение губительно действует на все виды бактерий вплоть до спорообразующих, эксплуатация ультрафиолетовых установок проще и удобнее, чем установок хлорирования, стоимость обработки воды излучением в 2...3 раза ниже. Расход электрической энергии на обработку воды из подземных источников составляет 10...15 Вт час/м<sup>3</sup>, а из открытых источников — 30 Вт час/м<sup>3</sup>.

2. Обеззараживание животноводческих стоков перед использованием их в качестве удобрения — весьма важная и сложная проблема, связанная с охраной окружающей среды от загрязнения и предохранением людей и животных от гельминтового заражения. Исследования показали, что при облучении свободно стекающей по поверхности бактерицидной лампы слоя жидкости толщиной 1,5 мм уже через 3...4 секунды гибнут яйца фасциол и 20...30% яиц свиной аскариды.

3. Пастеризация молока ультрафиолетовым излучением с длиной волны 254 нм в 6...8 раз дешевле тепловой обработки. Пастеризация производится при температуре 10...20 °С и содержание микроорганизмов в молоке снижается на 93...99%, повышается содержание витамина D, а свойства молока не изменяются.

4. Обеззараживание воздуха ультрафиолетовым излучением применяют в продуктовых складах, овощехранилищах, молочных отделениях, профилакториях и пунктах искусственного осеменения. Так, например, в птичнике с применением ламп ДБ-30 из расчета одна лампа на 50 м<sup>3</sup>, при облучении три раза в сутки по 1 часу микрофлора сокращается на 50...70%, а за счет ионизации воздуха повышается яйценоскость кур на 5...7%.

Для обеззараживания воздуха и предотвращения переноса инфекционных болезней аэрогенным путем наиболее перспективным является применение бактерицидных ламп в вентиляционных каналах. Исследованиями доказано, что при использовании 10 ламп ДБ-60 на каждый осевой вентилятор приточной камеры птичников с размещением их на расстоянии 10 см друг от друга загрязненность воздуха снизилась на 80...95%, улучшился ионный состав, снизилась концентрация сероводорода и углекислоты, а образующийся озон оказал дезодорирующее действие.

4. Стерилизация посуды, тары и одежды — хорошо известная у нас в стране и за рубежом область применения ультрафиолетового излучения. По данным ВНИИЖ, обработка молочных емкостей двумя лампами ДБ-30 в течение 40 мин. бактериальная загрязненность снижается на 84...90%, а лампами ДРТ-400 за 24 мин на 100%, ДРТ-1000 за 3...6 мин. Облучение деревянных поверхностей досок для разделывания мяса лампами ДБ-15 с расстояния 20 см за 30 секунд уничтожается 90...95% микроорганизмов. Естественная шероховатость значительно снижает эффект облучения. В этом случае необходимо увеличивать время экспозиции и поворачивать облучаемую поверхность относительно лампы.

5. Обработка семенного материала в оптимальных дозах позволяет увеличить всхожесть, энергию прорастания семян, а в итоге сократить сроки созревания и увеличить урожайность. Так, если облучить семена кормовой моркови УФ-лучами, то она имеет на 3...5% большую всхожесть, на 10...15% большую энергию прорастания и урожай созревает на 3...5 дней быстрее. Обработка семян сахарной свеклы увеличивает урожайность на 6...9% и содержание сахара на 15...19%.

6. Всё большее применение в сельском хозяйстве и рыболовном промысле имеет фототаксис — привлечение насекомых и косяков рыб. При помощи УФ-лучей в ночное время насекомые привлекаются к ловушкам, где они уничтожаются с помощью высокого напряжения.

### **15.5. Классификация бактерицидных облучательных установок**

Бактерицидные установки классифицируются как погружные и открытые.

Погружные облучательные установки находятся в обрабатываемой среде.

Открытые облучательные установки — вне обрабатываемой среды.

Погружные облучательные установки можно подразделить на установки для стерилизации воздуха и установки для обеззараживания воды. Для стерилизации воздуха применяют установки ОБУ-1-15 с одной лампой ДБ 15, ОБУ-1-30 с одной лампой ДБ 30.

Обычно облучатели размещают под потолком таким образом, чтобы один облучатель приходился на 40...50 м<sup>3</sup> помещения. Для получения более равномерной облученности рекомендуется размещать облучатели во взаимно перпендикулярных плоскостях. Максимальная облученность для птиц не должна превышать 0,3 бк/м<sup>2</sup>. Время облучения 8...10 часов.

Для обеззараживания вентиляционного воздуха бактерицидные лампы помещают в воздуховодах рядами. Расстояние между лампами порядка 10 см, время обработки — 5...20 секунд.

Для дезинфекции воздуха в больших помещениях используют облучатели типа ОБПе-450 с шестью открытыми бактерицидными лампами ДБ 30. Включение в течение 10...15 мин достаточно для обработки 100 м<sup>3</sup>.

Для постоянной дезинфекции воздуха во время операции или перевязки применяют облучатель ОБШ 150 с двумя лампами ДБ 30 и отражателем, поворачивающимся на 180°.

Для обеззараживания воды применяют установки как открытого типа, так и погружные.

Отечественная промышленность выпускает установки открытого типа ОВ-1П, ОВ-3П с лампами ДБ 30 и ДБ 60, ОВ-АКХ-1 с лампами ДРТ 1000, ОВ-1П-РКС с лампами ДРТ 2500 и расчётной производитель-

ностью в стандартных условиях  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ОВ-3П-РКС с тремя лампами ДРТС 2500 и производительностью  $150\text{...}200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ОВ-ПК-РКС с погружными кассетами из ламп ДРТ 2500 для городских систем водоснабжения производительностью  $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Установка ОВУ-6П АКХ имеет кварцевые чехлы с щёточным механизмом для очистки чехлов от осадка, приводимым во вращение потоком воды (рис. 103).

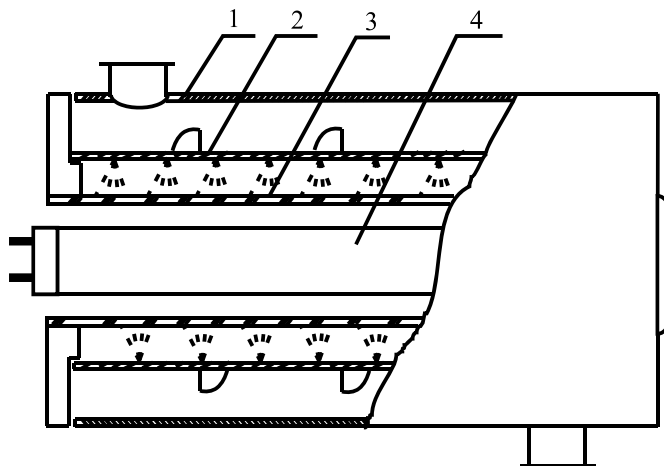


Рис. 103. Разрез секции установки ОВУ-6П для обеззараживания воды:  
1 — цилиндрический корпус; 2 — щёточное устройство; 3 — кварцевый чехол;  
4 — дуговая бактерицидная лампа

В установках открытого типа имеется несколько лотков, над которыми в параболических отражателях расположены бактерицидные лампы (рис. 104).

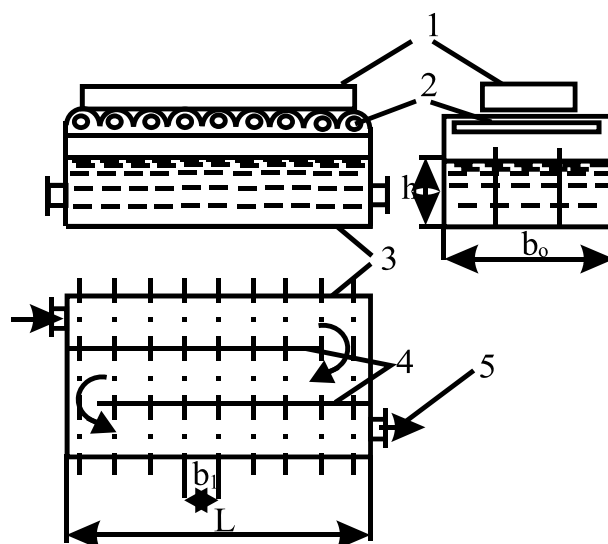


Рис. 104. Установка обеззараживания воды открытого типа:  
1 — пускорегулирующие аппараты; 2 — бактерицидные лампы;  
3 — корпус; 4 — перегородки; 5 — поток воды

## 15.6. Основы расчёта бактерицидных облучательных установок

Для работы установок по обеззараживанию воды первостепенное значение имеет ее прозрачность для УФ-лучей и сопротивляемость микроорганизмов бактерицидным лучам. При прохождении лучей через облучаемые вещества происходит снижение лучистого потока, характеризующееся законом Ламберта-Бугера:

$$E = E_0 e^{-\alpha \cdot l},$$

где  $E_0$  — начальная облучённость возле лампы, бк/м<sup>2</sup>;

$E$  — облучённость после прохождения среды, Бк/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  — коэффициент поглощения среды, 1/м;

$L$  — длина хода луча, м.

Коэффициент поглощения для некоторых сред приведен в таблице 15.

Таблица 15. Коэффициенты поглощения УФ-лучей некоторыми средами

Среда	Источник или помещение	Коэффициент поглощения, $\alpha$
Вода	Поверхностный источник (река, озеро)	20...30
	Родник, колодец	15
	Артезианский колодец	10
Воздух	Животноводческое, птицеводческое помещение	0,1...0,3
	Сухое непыльное помещение	0,05...0,07
	Сырое помещение	до 0,3

Количество энергии, необходимой для обеззараживания, устанавливают на основании изучения бактерицидного потока на бактерии кишечной палочки — бактерии Коли (эти бактерии близки по устойчивости к бактериям тифа, дизентерии, холеры).

Пусть исходное количество бактерий  $n$ . Под действием бактерицидного излучения погибнет  $-dn$  бактерий:

$$-dn = n \frac{dH_B}{K} = n \frac{dE_B t}{K} = n E_B \frac{dt}{K},$$

где  $K$  — коэффициент сопротивляемости бактерий. Это количество энергии, необходимой для разрушения такого количества белковых связей, что бактерия уже не может их восстановить. Например, для палочки Коли, находящейся в воде  $K = \text{бк} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ , а для палочки, находящейся в воздухе, —  $K = 3 \dots 13 \text{ бк} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ .

Разделим обе части предыдущего уравнения на  $n$  и проинтегрируем:

$$-\frac{dn}{n} = E_B \frac{dt}{K}; \quad \int \frac{dn}{n} = -\frac{E_B}{K} \int dt,$$

в результате получим  $\ln n = -\frac{E_B t}{K} + \ln C$

или  $\ln n - \ln C = -\frac{E_B t}{K}; \quad \ln \frac{n}{C} = -\frac{E_B t}{K}.$

Спотенцируем и найдем значение постоянной  $C$ :

$$\frac{n}{C} = e^{-\frac{E_B t}{K}} \quad \text{и} \quad n = C e^{-\frac{E_B t}{K}}.$$

При  $t = 0$  получаем  $n = C$  или  $n = n_0$  — начальное количество бактерий. Отсюда  $n = n_0 e^{-\frac{E_B t}{K}}$ .

Эту формулу обычно используют в таком виде:

$$E_B = -\frac{K}{t} \ln \frac{n}{n_0}.$$

### **15.7. Порядок расчёта бактерицидных облучательных установок**

1. Устанавливают исходные данные (начальную и предельно допустимую концентрацию микроорганизмов  $n_0$  и  $n$ ).
2. Устанавливают вид микроорганизмов, так как у каждого микроорганизма свой коэффициент сопротивляемости.
3. Определяют производительность установки и время облучения.
4. Находят облучённость, необходимую для уничтожения микроорганизмов:

$$E_B = -\frac{K}{t} \ln \frac{n}{n_0}.$$

5. Определяют расчетную бактерицидную облучённость:

$$E_{БР} = E_B e^{-\alpha t}.$$

6. Выбирают тип облучателя и лампу.

7. Находят расстояние между облучателями и размещают их в помещении для обработки воздуха или в обрабатываемой среде:

$$L = H_p \lambda_c, \quad \lambda_c = 1,4,$$

$$N_A = \frac{A}{L}, \quad N_B = \frac{B}{L}.$$

8. Назначают контрольные точки и определяют условные относительные облучённости в них:

$$\varepsilon_i = \frac{I_{\alpha B} \cos^3 \alpha}{H_p^2}.$$

9. Определяют бактерицидный поток, приходящийся на 1 м длины источника:

$$\Phi_B = \frac{E_{BP} \cdot 1000 k_3 H_p}{\sum \varepsilon_i}.$$

10. Определяют поток всей установки и количество ламп:

$$\Phi_i = \Phi_B L, \quad N = \frac{\Phi_{\delta}}{\Phi_{\delta n}}.$$

### 15.8. Примеры расчёта бактерицидных облучательных установок

Рассмотрим обеззараживание воды в открытой облучательной установке (рис. 105).

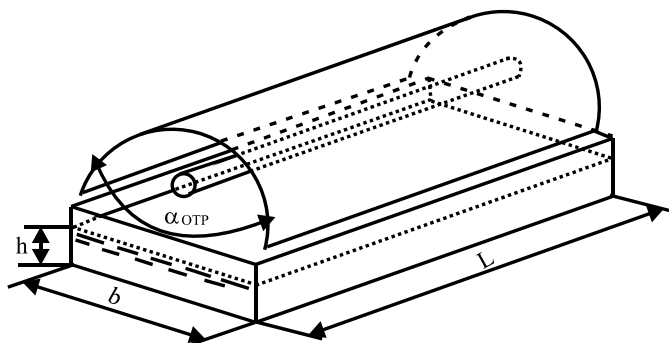


Рис. 105. К расчету установки для обеззараживания воды

Движение воды в лотках носит турбулентный характер, поэтому весь расчет ведется по средним значениям  $n_{CP}$ ,  $t_{CP}$ ,  $E_{BCP}$ .

$$E_{BCP} = -\frac{K}{t_{CP}} \ln \frac{n_{CP}}{n_0}. \quad (1)$$

На основании закона Ламберта-Бугера средняя облученность на заданной глубине  $h$  при коэффициенте поглощения  $\alpha$ :

$$E_{CP} = \frac{1}{h} \int_0^h E_0 e^{-\alpha l} dl.$$

После интегрирования при  $l = h$  имеем:

$$E_{CP} = \frac{E_0}{\alpha h} (1 - e^{-\alpha h}), \quad (2)$$

средняя продолжительность облучения:

$$t_{CP} = \frac{L}{v_{CP}}, \quad (3)$$

где  $L$  — длина пути, проходимая водой под облучателем (длина поверхности облучения), м;

$v_{CP}$  — средняя скорость потока воды, м/с.

Средняя скорость потока воды в лотке прямоугольного сечения:

$$v_{CP} = \frac{G}{bh}, \quad (4)$$

где  $G$  — количество облучаемой воды в единицу времени (расход воды), м<sup>3</sup>/с;

$b$  — ширина лотка, м;

$h$  — глубина слоя воды, м.

Подставляя (4) в (3), получим:

$$t_{CP} = \frac{hbL}{G}, \quad (5)$$

И, приравнявая выражения (1) и (3), получим:

$$\frac{E_0}{\alpha}(1 - e^{-\alpha h}) = -\frac{KG}{bL} \ln \frac{n_{CH}}{n_0}. \quad (6)$$

Коэффициент  $1 - e^{-\alpha h}$  называют коэффициентом использования интенсивности бактерицидного потока  $\eta_{II}$ :

$$\eta_{II} = 1 - e^{-\beta h}; \quad 1 - \eta_{II} = e^{-\alpha h}. \quad (7)$$

Прологарифмируем последнее выражение и получим глубину слоя воды

$$h = -\frac{\ln(1 - \eta_{II})}{\alpha}.$$

Преобразуем выражение (6):

$$\ln \frac{n_{CP}}{n_0} = -\frac{E_0 b L}{K G \alpha} (1 - e^{-\alpha h}).$$

Выражение  $E_0 b L$  — это общий бактерицидный поток, падающий на облучаемую поверхность:

$$\Phi_0 = E_0 b L.$$

Отсюда, количество обеззараживаемой воды с учетом выражения (7):

$$G = -\frac{\Phi_0 \eta_{II}}{K \alpha \ln \frac{n_{CP}}{n_0}}. \quad (8)$$

Если задан расход воды, то необходимый бактерицидный поток у поверхности воды

$$\Phi_0 = \frac{-G K \alpha \ln \frac{n_{CP}}{n_0}}{\eta_{II}}. \quad (9)$$

В открытых бактерицидных установках часть бактерицидного потока ламп поглощается отражателем.



В этом случае бактерицидный поток ламп должен быть больше, чем у поверхности:

$$\Phi_0 = \Phi_{\text{БПОВ}} + \Phi_{\text{БОТР}},$$

где  $\Phi_{\text{БПОВ}}$  — часть бактерицидного потока, падающая непосредственно на поверхность воды;

$\Phi_{\text{БОТР}}$  — часть бактерицидного потока, отраженная отражателем

Прямой бактерицидный поток, падающий на поверхность воды:

$$\Phi_{\text{БПОВ}} = \frac{\Phi_B \alpha_{\text{ОТР}}}{360},$$

где  $\Phi_B$  — бактерицидный поток лампы;

$\alpha$  — центральный угол, образованный прямыми, соединяющими источник и точки соприкосновения поверхности воды с отражателем.

Величину отраженного потока можно определить как:

$$\Phi_{\text{БОТР}} = \frac{\Phi_B (360 - \alpha_{\text{ОТР}})}{360} \kappa_{\text{ОТР}},$$

где  $\kappa_{\text{ОТР}}$  — коэффициент отражения отражателя, табл. 16, тогда бактерицидный поток у поверхности:

$$\Phi_{\text{БПОВ}} = \frac{\Phi_B \alpha_{\text{ОТР}}}{360} + \frac{\Phi_B (360 - \alpha_{\text{ОТР}})}{360} \kappa_{\text{ОТР}} = \frac{\Phi_B}{360} [\alpha_{\text{ОТР}} + \kappa_{\text{ОТР}} (360 - \alpha_{\text{ОТР}})].$$

Таблица 16. Коэффициенты отражения некоторых материалов

Материал	$\kappa_{\text{ОТР}}$
Алюминий:	
– необработанная поверхность	0,4...0,6
– обработанная	0,6...0,9
– напыленный на стекло	0,75...0,85
Краска алюминиевая	0,55...0,75
Сталь нержавеющая	0,25...0,3
Жесть белая	0,25...0,3

Отсюда  $\Phi_B$ :

$$\Phi_B = \frac{360 \Phi_{\text{БПОВ}}}{\alpha_{\text{ОТР}} + \kappa_{\text{ОТР}} (360 - \alpha_{\text{ОТР}})}.$$

Если взять отношение  $\frac{\Phi_{\text{БПОВ}}}{\Phi_B} = \eta_{\text{И}}$  и обозначить как коэффициент

использования бактерицидного потока, получим:

$$\eta_{\text{И}} = \frac{\alpha_{\text{ОТР}} + \kappa_{\text{ОТР}} (360 - \alpha_{\text{ОТР}})}{360}.$$

Тогда формулы (8) и (9) можно записать:

$$G = \frac{\Phi_B \eta_{II} \eta_{II}}{K \alpha \ln \frac{n_{CP}}{n}} \text{ и } \Phi_B = \frac{GK \alpha \ln \frac{n_{CP}}{n}}{\eta_{II} \eta_{II}}.$$

Как правило, отражатели изготавливают из материалов, хорошо отражающих бактерицидные лучи. В таблице 16 приведены коэффициенты отражения некоторых материалов.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Классификация ультрафиолетовых облучательных установок. 2. Применение бактерицидного излучения в сельскохозяйственном производстве. 3. Назовите бактерицидные облучательные установки. 4. Порядок расчета бактерицидных облучательных установок. 5. Как рассчитать бактерицидную установку для обеззараживания воды?

## 16. ЭРИТЕМНЫЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

- Эритемные облучательные установки
- Источники эритемного излучения
- Дозирование эритемного облучения
- Классификация облучательных установок
- Расчет стационарных эритемных облучательных установок
- Расчет подвижных эритемных облучательных установок

### 16.1. Эритемные облучательные установки

Рассмотрим область В. Это область эритемного излучения, вызывающая покраснение кожи. Излучение этой области оказывает очень большое влияние на жизнедеятельность животных птицы и человека. Биологическое действие УФ-излучения на живой организм проявляется через фотохимические реакции в кожных покровах, а также через действие озона, окислов азота и аэроионов, возникающих при УФ-излучении.

Под действием УФ-излучения в кожных покровах происходит реакция преобразования пассивного витамина *D* в активный *D*<sub>3</sub>. Витамин *D*<sub>3</sub> играет важную роль в регулировании обмена веществ. При недостатке его в организме нарушается солевой, минеральный и жировой обмен. Вследствие чего развиваются болезни рахит, ацитоз, остеомалария и др. Задерживается рост и развитие молодняка, учащаются заболевания, снижается продуктивность животных и птиц.

#### *Технологическая эффективность*

Под влиянием УФ-излучения улучшается усвояемость кормов, увеличиваются удои коров на 5...13%; увеличивается привес цыплят, поросят и яйценоскость кур на 10...15%; выводимость цыплят при инкубации на 5...8%, привес молодняка крупного рогатого скота на 7...13%. Кроме этого, усиливается у животных воспроизводительная функция, приплод становится более жизнеспособным и устойчивым к заболеваниям.

В осенне-зимний период, когда количество естественного УФ-излучения, достигающего поверхности земли, снижается в десятки раз, а в закрытых помещениях и вовсе отсутствует, животные нуждаются в его восполнении.

Применяется эритемное облучение и для лечения желтухи. У новорожденных желтуха возникает при нарушении обмена веществ под действием вещества билирубина. Под действием УФ-лучей с длиной волны 430...500 нм билирубин разлагается до форм, растворимых в воде, и выводится из организма. Производится лечение хронических кожных заболеваний, например, дерматоз. Под действием УФ-лучей с длинами волн 320...400 нм полное излечение достигается при получении 50...55 сеансов.

## 16.2. Источники эритемного излучения

Отечественной промышленностью выпускаются специальные эритемные лампы — ЛЭ 15, ЛЭ 30, ЛЭР 40, ДРВЭД 250. Их конструкции и схемы включения мы уже рассматривали.

Для этих же целей часто используются лампы высокого давления типа ДРТ, которые дают излучение в области С — 22%, а в области В — 34%. Т.е. они генерируют кроме эритемного излучения еще бактерицидное.

## 16.3. Дозирование эритемного облучения

При эритемном облучении громадное значение имеет количество энергии, полученной животными, птицей или человеком. Особо опасна передозировка, при которой возникает угнетающее воздействие и вместо пользы может быть вред — потеря шерстяного покрова, ожог и даже гибель.

Как известно, количество эритемного потока  $\Phi_{\text{э}}$ , эр, определяется из выражения

$$\Phi_{\text{э}} = \varphi(\lambda)_{\text{МАКС}} \int_{280}^{315} f(\lambda)_{\text{э}} k(\lambda)_{\text{э}} d\lambda.$$

Эритемная облученность  $E_{\text{э}} = \frac{d\Phi_{\text{э}}}{dS}$ , а количество эритемного облучения  $H_{\text{э}}$ , эрс/м<sup>2</sup>:

$$H_{\text{э}} = \int_0^t E_{\text{э}} dt.$$

Для каждого вида животных экспериментально установлена оптимальная величина количества эритемной энергии, при которой возникает наибольший положительный эффект. Эту величину принято называть дозой эритемного облучения. Значения этой дозы приводят в справочниках. Доза эритемного облучения, например, для телят — 500 эрс/м<sup>2</sup>, для коров — 1000 эрс/м<sup>2</sup>, поросят — 100...300 эрс/м<sup>2</sup>, для взрослых людей — 300 эрс/м<sup>2</sup>, для детей — 150 эрс/м<sup>2</sup>.

Как видно из последнего выражения, одну и ту же дозу облучения можно получить при различных облученностях и времени облучения. С целью повышения продуктивности животных предпочтительней сочетать малую облученность с продолжительным облучением, не превышая световой день.

Облучение животных обычно начинают с 1/4 дозы и за 5...10 дней доводят до нормы. При этом необходимо вести контроль за облученностью. Для этого применяют различные уфиметры и фотоэкспозиметры, например УФИ-73.

## 16.4. Классификация облучательных установок

Эритемные облучательные установки подразделяются на стационарные, подвижные и передвижные.

Отечественной промышленностью выпускаются стационарные облучательные установки с лампами типа ЛЭ 15, ЛЭ 30 и ЛЭР 40. Принципиально облучательные установки ничем не отличаются от осветительных. Установка ЭО-1-30 с лампой ЛЭ 30 содержит отражатель и дроссель. Установка ЭО-1-30М — с бесстартерной схемой зажигания. Аналогичны установки ОЭ-1, ОЭ-2. Следует особо отметить осветитель-облучатель ОЭСР-02 2x40, где применяется одна лампа ЛЭР 40 для облучения и одна лампа ЛБР 40 — для освещения, причем управление у них отдельно, а схема включения — как обычный двухламповый светильник с расщепленной фазой. Применяются и облучатели с дуговыми ртутными лампами ДРТ 400 в арматуре ПРК-2М, например, облучатель ОРКШ для профилактического облучения животных.

## 16.5. Расчет стационарных эритемных облучательных установок

Начнем расчет со стационарных облучательных установок.

Стационарные установки применяются в случаях, когда животные свободно перемещаются по всему помещению или по значительной его части.

Методика расчета таких установок аналогична расчету осветительных установок точечным методом. В осветительных установках выбирают мощность источника по минимальной освещенности, здесь же — по максимальной облученности.

1. Определяют исходные данные (вид и возраст животного, высоту и площадь помещения).

2. Выбирают суточную дозу облучения для данного вида животного, эрс/м<sup>2</sup>.

3. Выбирают расчётную высоту по формуле

$$H_p = \frac{R}{2\sqrt{\sqrt{z}-1}},$$

где  $R$  — радиус площади облучения, м;

$z$  — коэффициент неравномерности:

$$z = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}.$$

Коэффициент неравномерности должен быть  $z \geq 0.8$ .

Как правило, расчётную высоту принимают по рекомендациям заводов-изготовителей.

4. Выбирают тип облучателя.

5. Размещают облучатели в соответствии с расстоянием между ними:

$$L = H_p \lambda,$$

где  $\lambda = 1,4$  принимается для косинусного светораспределения.

По известному значению  $L$ , длине  $A$  и ширине  $B$  помещения определяют число облучателей по длине и ширине:

$$N_A = \frac{A}{L}, \quad N_e = \frac{B}{L}.$$

6. Определяют расчетную облучённость  $e_i$ , эр/м<sup>2</sup>, в контрольных точках с предполагаемой минимальной и максимальной облученностями:

$$e_i = \frac{I_{ai} \cos^3 \alpha}{H_p^2}.$$

7. Подсчитывают  $\sum e_{i \min}$  и  $\sum e_{i \max}$ , за расчетную облученность принимают максимальное значение  $\sum e_{i \max}$ .

8. Сравнивают максимальную облученность с предельно допустимой:

$$\sum e_{i \max} \leq e_{\text{ПРЕД}}$$

9. Определяют коэффициент неравномерности  $z$ .

10. Рассчитывают время облучения  $t$ , с:

$$t = \frac{H_{\text{доза}}}{\sum e_{i \max}}.$$

### 16.6. Расчёт подвижных эритемных облучательных установок

Особенностью расчета таких установок является то, что облученность объекта непрерывно изменяется.

Расчет подвижной установки УФ-облучения сводится к определению количества облучения за один проход облучателей и количества проходов при известной расчетной высоте подвеса облучателей и скорости их перемещения.

Пусть облучательная установка расположена в коровнике привязного содержания (рис. 106), тогда количество эритемного облучения за один проход определится как

$$H_{\text{э}} = 2 \int_0^{t_K} E_{\text{э}} dt,$$

где  $E_{\text{э}}$  — облученность точки от подвижного облучателя, эр/м<sup>2</sup>,

$t$  — время облучения, с;

$t_K$  — время достижения облучателем крайнего положения;

$L$  — половина длины прохода.

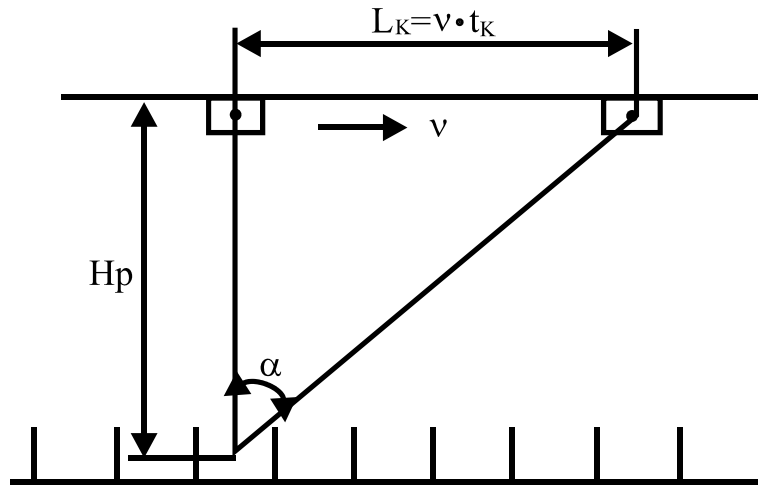


Рис. 106. К расчету подвижной облучательной установки

Будем считать, что распределение эритемного излучения происходит по закону косинуса.

Эритемная облученность

$$E_{\text{э}} = \frac{I_{\text{э}\alpha} \cos^3 \alpha}{H_p^2},$$

где  $I_{\text{э}\alpha}$  — сила эритемного излучения в данном направлении, эр/ср;

$\alpha$  — угол между направлением силы излучения к расчетной точке и нормалью к поверхности. Подставляя значение  $E_{\text{э}}$  в предыдущее выражение, получим:

$$H_{\text{э}} = 2 \int_0^{t_K} \frac{I_{\text{э}\alpha} \cos^3 \alpha}{H_p^2} dt,$$

заменяем  $dt$  через  $H_p$ ,  $L_K$  и  $\alpha$ :

$$t = \frac{L_K}{v}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{L_K}{H_p}; \quad t = \frac{H_p}{v} \operatorname{tg} \alpha; \quad dt = \frac{H_p}{v} \frac{1}{\cos^2 \alpha} d\alpha.$$

Будем считать, что угол  $\alpha$  тождествен времени движения горелки  $\alpha_K = t_K$ , тогда:

$$H_{\text{э}} = 2 \int_0^{\alpha_K} \frac{I_{\text{э}\alpha} \cos^3 \alpha}{H_p^2} \frac{H_p}{v \cdot \cos^2 \alpha} d\alpha = 2 \int_0^{\alpha_K} \frac{I_{\text{э}\alpha} \cos \alpha}{H_p v} d\alpha = 2 \frac{1}{H_p v} \int_0^{\alpha_K} I_{\text{э}\alpha} \cos \alpha \cdot d\alpha.$$

Сделаем еще допущение, что  $I_{\text{э}\alpha} = I_{\text{э}0} \cos \alpha$ , тогда

$$H_{\text{э}} = \frac{2}{H_p v} \int_0^{\alpha_K} I_{\text{э}0} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha.$$

Проинтегрировав последнее выражение, получим

$$H_{\text{э}} = \frac{I_{\text{э}0}}{H_p v} \left( \alpha_K + \frac{\sin 2\alpha_K}{2} \right).$$

Зная дозу облучения, определяют количество проходов:

$$n = \frac{H_{\text{ДОЗА}}}{H_{\text{Э}}}$$

*Вопросы для самопроверки*

1. Зачем облучать животных и людей? 2. Какова технологическая эффективность эритемных облучательных установок? 3. Перечислите источники эритемного излучения. 4. Чем отличается лампа ЛЭ от ЛБ? 5. Как классифицируются эритемные облучательные установки? 6. Как вычислить время облучения при стационарных облучательных установках? 7. Каково назначение облучателя УО-4М? 8. В каких единицах измеряется эритемный поток?



## 17. ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Особенности инфракрасного нагрева
- Биологическое действие инфракрасного излучения
- Источники инфракрасного излучения и облучательные установки
- Особенности включения и работы некоторых облучателей
- Расчет установки для инфракрасной пастеризации молока
- Расчет установок инфракрасного обогрева молодняка
- Расчет инфракрасной установки для сушки, предпосевной обработки и дезинсекции зерна

### 17.1. Особенности инфракрасного нагрева

Инфракрасное излучение относится к излучению с длинами волн от 760 нм до 1 мм и подразделяется на три области:

1. ИК-А — 760...1500 нм.
2. ИК-В — 1500...3000 нм.
3. ИК-С — 3000 нм ... 1 мм.

Особенностью инфракрасного нагрева является то, что энергия передается излучением непосредственно обогреваемому объекту, что позволяет оптимизировать процесс нагрева и получить значительный технологический и экономический эффект.

Физическая сущность инфракрасного излучения состоит в том, что оно появляется в результате вращательных и колебательных движений молекул (твёрдых, жидких и газообразных).

Облучательные установки инфракрасного излучения применяются для обогрева молодняка животных и птицы; пастеризации сельскохозяйственных продуктов; сушки сельскохозяйственных продуктов; сушки лакокрасочных покрытий, обмоток электрических машин; предпосевной обработки семян и дезинсекции зерна.

Поскольку известны другие способы нагрева, то, естественно, возникает вопрос — какие же преимущества дает ИК-нагрев по сравнению, например, с конвективным или газовым теплоносителем. При газовом теплоносителе количество передаваемой теплоты:

$$Q_1 = kF(t_2 - t_1),$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи, Дж/(м<sup>2</sup>град);

$F$  — площадь нагреваемой поверхности, м<sup>2</sup>;

$t_2 - t_1$  — разность температур теплоносителя и нагреваемой поверхности.

При лучистом же нагреве количество передаваемой теплоты, определяемой по закону Стефана-Больцмана, пропорционально разности четвертых степеней температур излучателя и нагреваемого тела:

$$Q_2 = C \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right],$$

где  $T_2, T_1$  — соответственно температура излучателя и нагреваемого тела, К;

$C$  — коэффициент пропорциональности.

При сравнении теплопередачи газовым теплоносителем и лучистым потоком при температурах более 400...500 °С лучистый нагрев позволяет передать большее количество теплоты, чем газовый теплоноситель, а при температуре более 1500 °С передача теплоты лучистым нагревом оказывается в 4...5 раз интенсивнее, чем передача конвекцией.

Отсюда преимущества облучательных установок инфракрасного излучения:

- 1) лучистый нагрев имеет большую интенсивность теплопередачи, чем конвективный;
- 2) даёт возможность фокусировать лучистый поток на нагреваемом объекте;
- 3) даёт возможность селективного нагрева путем подбора длины волны излучения. ИК-лучи хорошо поглощаются водой, а насекомые или их личинки содержат больше влаги, чем зерно, нагреваются сильнее и гибнут;
- 4) инфракрасное излучение проникает на некоторую глубину внутрь объекта и там преобразуется в теплоту, что позволяет производить сушку изнутри;
- 5) инфракрасные источники излучения обладают высоким КПД, малой инерционностью, металлоемкостью и массой;
- 6) ИК-источники легко поддаются регулированию и управлению при помощи средств автоматизации.

## **17.2. Биологическое действие инфракрасного излучения**

Большая часть территории нашей страны характеризуется осенне-зимним периодом, который длится 5...8 месяцев и считается наиболее трудным для содержания с.-х. животных. В этот период особенно необходимо тепло молодняку, у которого в первые дни жизни механизм терморегуляции несовершенен.

Низкая температура и высокая влажность воздуха в помещении неблагоприятно сказываются на росте и развитии молодняку, приводят к нарушению обмена веществ, возникновению рахита, простудных заболеваний, расстройству пищеварения и даже к гибели.

Необходимый температурный режим при выращивании молодняка достигается общим обогревом помещения или комбинированной системой общего и локального обогрева. Более целесообразным является применение комбинированной системы обогрева, позволяющей создавать повышенную температуру непосредственно в зоне нахождения молодняка.

Для местного обогрева используют различные нагревательные устройства и установки — обогреваемые полы, коврики, панели и т.д. Широкое применение в практике с.-х. производства получил ИК-обогрев молодняка, обладающего благотворным действием на организм животных и птицы.

При падении лучистого потока на поверхность тела животного часть излучения отражается, остальная поглощается в коже или подкожных тканях. Степень проникновения ИК-излучения через кожу зависит от ее состояния (влажности, густоты шерстяного или пухо-перьевого покрова, пигментации).

Органами чувств, которые получают раздражение при поглощении ИК-излучения, служат тепловые рецепторы, расположенные в коже. Их реакция на это раздражение вызывает ощущение теплоты. Действие излучения основывается на поглощении энергии водой, кровью и молекулами живой ткани.

Спектральный коэффициент поглощения кожи и подкожных слоев человека приведен на рис. 107.

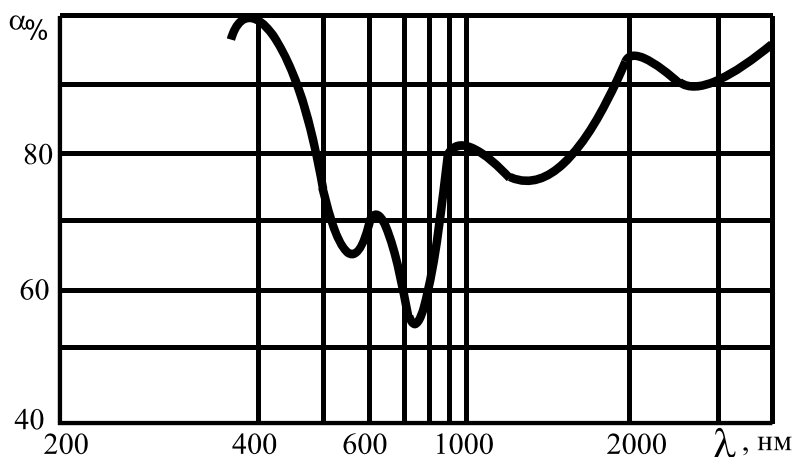


Рис. 107. Спектральный коэффициент поглощения кожи человека

Как видим, наибольшее отражение ( $\approx 30\%$ ) наблюдается в видимой части спектра, особенно в красной области ( $\lambda = 400\text{...}700$  нм).

В области ИК-А отражение составляет  $\approx 20\%$ , в области ИК-В —  $\approx 10\%$ , а в области ИК-С отражение всего  $\approx 5\%$ , т. е. почти вся длинноволновая часть спектра ИК-излучения проникает в кожу и подкожную ткань.

Длинноволновое ИК-излучение более 2 мкм поглощается верхними слоями кожи, а излучение с длиной волны 5 и более мкм полностью непроницаемо.

Поглощаемая в коже энергия ИК-излучения превращается в теплоту, вызывая нагрев тканей; усиливается ток крови в слоях кожи, происходит переполнение кровеносных сосудов кровью, увеличивается обмен между кровью и тканями.

ИК-излучение действует через кожу и на нервную систему, а через нее и на внутренние органы. В коже усиливается выделение токсинов и она, словно эндокринная железа, действует лучше в этих условиях. Образование пигментов, регенерация пораженных клеток эпидермиса (верхний защитный слой кожи) стимулируются ИК-излучением.

Наряду с тепловым действием, ИК-излучение действует на вегетативные нервные сплетения, а также на кровеносные сосуды. Достигая глубоко лежащих слоев, проникающее ИК-излучение через реакции крови и нервной системы воздействует на функции желез и общий обмен веществ; таким образом, усиливается реакция общей защиты организма, создается барьер на пути проникновения холода в организм животного. Нервные и гуморальные влияния при оптимальных режимах ИК-облучения нормализуют тонус вегетативной системы, положительно сказываются на состоянии, развитии, привесах, а также на сохранности молодняка животных и птицы.

При прерывистом режиме ИК-облучения и попеременном воздействии высоких и низких температур на животных подвергает их сосудистую систему своеобразной тренировке, закаливает организм.

Коротковолновое ИК-излучение оказывает и терапевтическое воздействие, вызывая в коже активную гиперемия (тепловую эритему), что улучшает питание тканей, ускоряет рассасывание опухолей, т.е. ИК-излучение способствует лечению различных воспалительных процессов, усиливает питание поврежденных тканей, регенерацию клеток, в результате ускоряется заживление ран, язв и т.д. В организме животного происходит активизация кроветворных органов и наблюдается увеличение в крови числа эритроцитов и лейкоцитов, содержание гемоглобина, повышается иммунитет к различным заболеваниям.

Таким образом, ИК-облучение, в отличие от других средств местного обогрева, не только предохраняет животное от переохлаждения, но и вызывает усиление биологических процессов в организме, способствует повышению тонуса и естественных защитных сил организма.

### 17.3. Источники инфракрасного излучения и облучательные установки

При любой температуре (кроме абсолютного нуля) все тела являются источниками инфракрасного излучения.

Источниками инфракрасного излучения являются лампы накаливания общего назначения, галогенные лампы, специальные лампы типа ИКЗ, ИКЗК и ИКЗС, кварцевые галогенные КГ и с йодидами КИ, а также низкотемпературные инфракрасные излучатели, в частности, трубчатые электронагреватели (ТЭН).

В зависимости от спектрального состава источники инфракрасного излучения делятся на светлые и тёмные. Светлые источники — лампы накаливания с температурой тела накала свыше 2500 К. Эти лампы испускают частично видимое излучение и значительную долю (от 80 до 90%) инфракрасного излучения.

Тёмные источники генерируют в длинноволновой области ИК-спектра (нихромовые спирали, ТЭНы).

Максимум спектральной плотности излучения в зависимости от температуры лежит в области 3...5 мкм.

Характеристики некоторых облучателей, применяемых в сельскохозяйственном производстве, приведены в таблице 17.

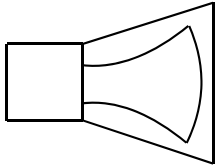
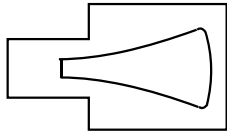
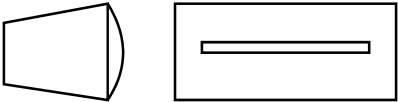
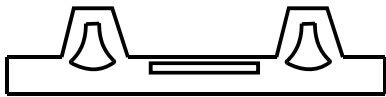
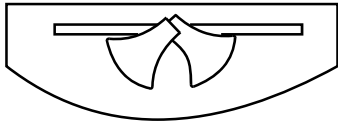
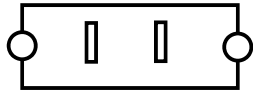
В СОЖ-1 лампа ИКЗК 220-250 служит в качестве балласта для ламп ДРТ.

Для инфракрасного обогрева и УФ-облучения молодняка телят или свиноматок с поросятами и одновременного освещения в ВИЭСХ была разработана комбинированная установка ЭРИКО-1, которая содержит 125 ИК-облучателей, 70 пылевлагозащищенных витально-осветительных облучателей с лампами ЛЭ 30 и ЛБ 30, 10 светильников дежурного освещения и шкафа управления.

Для ультрафиолетового облучения 200 коров, 12 тысяч кур-несушек или 25 тысяч цыплят напольного содержания, а также для освещения 1600...1800 м<sup>2</sup> площади помещения и одновременной дезинфекции воздуха в птичниках и коровниках в ВИЭСХ была создана еще одна установка ОЭРБА. ОЭРБА состоит из 100 витально-осветительных бактерицидных облучателей типа ОЭРБА 3x30 с лампами ЛЭ 30-1, ЛБ 30, ДБ 30-1, из 10 светильников дежурного освещения и шкафа управления.

В облучательных установках используют ИК-облучатели ССП О1-250, ОРИ-1, ОРИ-2, ОВИ-1, «ЛатВИКО».

Таблица 17. Облучательные установки

Тип облучателя	Источник	Мощность, Вт	Примечание
Светлые источники			
ССП-01	ИКЗК-220-250	250	«Астра» с решеткой
ССП-05	ИКЗК-220-250	250	Корпус из жаропрочной пластмассы
ОРИ-1	ИКЗК-220-500	500	КСС — «К»
ОРИ-2	ПС-70	375	
ОВИ-2	ИКЗК-220-250	250	
«Латвико»	КИ-220-1000	1000	
ОЭИ-500	2 ИКЗК-220-250	2×250	Аналогичен «Латвико»
Темные источники			
БП-1, БП-1А	4 ТЭН СКБ-5546×250	4×250	В виде шестиугольного зонта
ОКБ-1376	3 ТЭН×400	3×400	Параболический отражатель из стали покрыт эмалью. Стенки кожуха двойные
ОКБ-3296	1 ТЭН×500	500	
Комбинированные			
ИКУФ-1	2 ИКЗК 220-250 + 1 ЛЭ-15	520	
ЛУЧ	то же	520	
СОЖ-1	2 ИКЗК 220-250+ДРТ - 100+ДРТ2 -100	740	

### 17.4. Особенности включения и работы некоторых облучателей

Электробрудер БП-1 предназначен для обогрева 500...600 цыплят при содержании их на полу.

Брудер представляет собой конструкцию в виде полой шестигранной усеченной пирамиды. Под зонтом брудера смонтированы четыре ТЭНа мощностью по 250 Вт каждый (рис. 108)

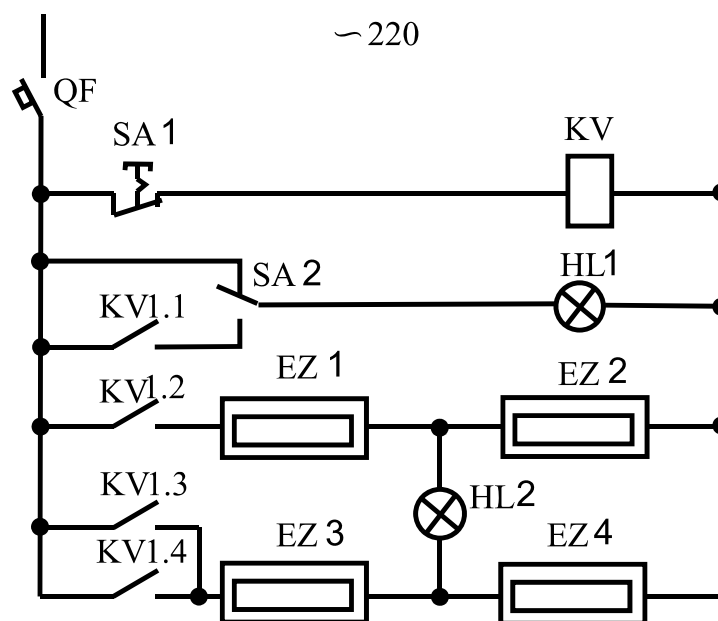


Рис. 108. Электрическая схема брудера БП-1

Излучатели собраны в схему равновесного моста, в диагональ которого включена сигнальная лампа HL2, загорающая при перегорании одного из ТЭНов.

Температура под зонтом брудера поддерживается на заданном уровне с точностью 2...3 градуса температурным реле на базе сильфона с легко испаряющейся жидкостью. При повышении температуры выше заданной жидкость в сильфоне испаряется, объем сильфона увеличивается, воздействует на микровыключатель и выключает установку. При понижении температуры процесс идет обратным порядком.

Автоматизированные установки ИКУФ-1, ИКУФ-1М, «ЛУЧ» предназначены для одновременного инфракрасного обогрева и ультрафиолетового облучения молодняка сельскохозяйственных животных и птицы. В состав одной установки входят 40 облучателей и пульт управления. Каждый облучатель содержит две инфракрасные лампы ИКЗК 220-250 и одну эритемную лампу ЛЭ 15 с пускорегулирующим устройством. Для обогрева молодняка птицы используют инфракрасные лампы только с окрашенной колбой.

ИКУФ-1 и ИКУФ-1М аналогичны по конструкции. Отличие их заключается в том, что в ИКУФ-1М использованы герметичные патроны и держатели стартеров, применение резиновых сальниковых уплотнений делают ее пылевлагодонепроницаемой, а также не содержит переключателей для управления ИК- и УФ-лампами.

Подвешивают эти облучатели над зоной отдыха молодняка на тресе или подвесках из стальной проволоки за специальные дужки.

Электрическая схема управления ИК- и УФ-лампами представлена на рисунке 109.

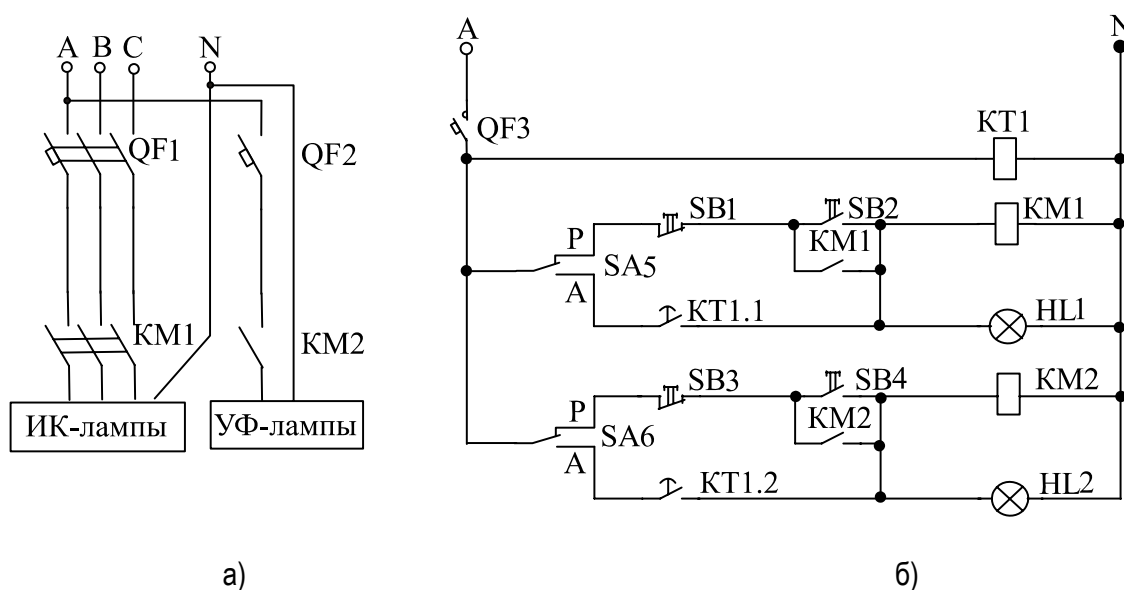


Рис. 109. Схемы управления установкой ИКУФ

В щите управления установкой ИКУФ смонтированы два понижающих трансформатора 220/127 В, четыре автоматических выключателя, четыре магнитных пускателя, реле времени и рубильник. Электрическая схема управления ИК- и УФ-лампами предусматривает два режима работы — автоматический и ручной. При автоматическом режиме работы (SA5 и SA6 в положении А) управление производится с помощью двух программного реле времени, которое и обеспечивает работу ИК- и УФ-лампами по программе в соответствии с биологическим режимом жизни животных.

При ручном режиме лампы управляются вручную. Схема управления облучателя ИКУФ в ручном режиме представлена на рисунке 110.

Автоматизированная установка «Луч» состоит из 40 облучателей, 20 ответвительных коробок, регулятора напряжения, из двух трансформаторов типа АТ-10 и пульта управления.





Рис. 110. Управление облучателем ИКУФ

Облучатель представляет собой жесткую овальную конструкцию с двумя лампами ИКЗК 220-250 и одной ЛЭ-15. Конструкция кронштейна для крепления ИК-ламп позволяет устанавливать их под углом 90, 68 и 45 градусов к обогреваемой поверхности, что позволяет использовать установку для различных видов и технологий выращивания молодняка. Трансформатор служит для регулирования напряжения на ИК-лампах, что позволяет регулировать температурный режим в процессе роста молодняка. Для изменения мощности ИК-ламп можно использовать и тиристорный регулятор напряжений.

Принципиальная электрическая схема установки «Луч» приведена на рисунке 111.

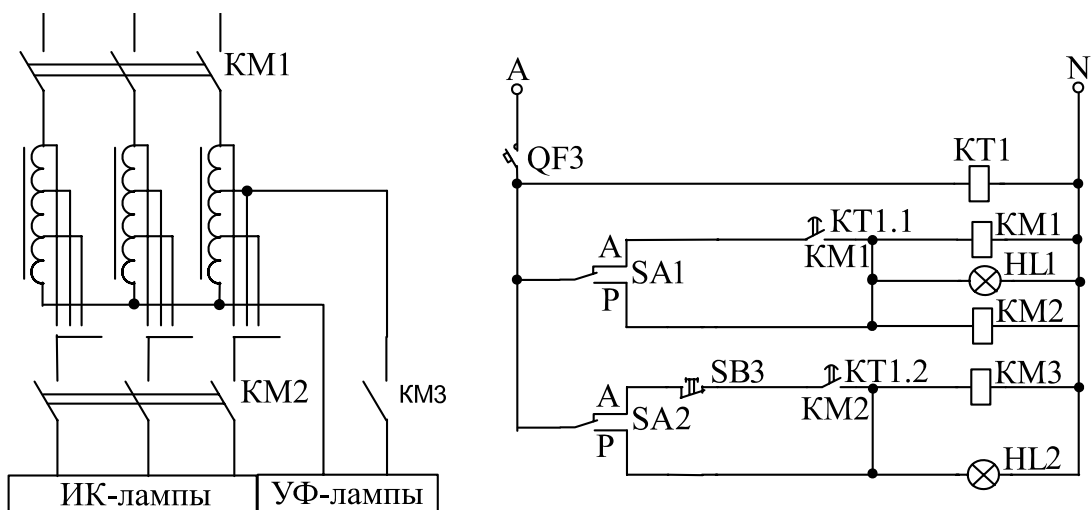


Рис. 111. Принципиальная электрическая схема облучателя «Луч»

Установка ЭМПОС-2 предназначена для облучения семян сельскохозяйственных культур инфракрасным и видимым излучением.

## 17.5. Расчет установки для инфракрасной пастеризации молока

Пастеризация молока инфракрасным излучением обладает существенными преимуществами перед традиционным способом обработки молока в теплообменных аппаратах. При воздействии инфракрасного излучения за 3...4 с уничтожается 99,8% бактерий, после чего молоко может храниться при температуре +5 °С в течение 8...10 суток. Исследователи отмечают сохранение естественного вкуса, быстроту обработки, сокращение удельных затрат энергии на пастеризацию молока в два раза. В качестве источника инфракрасного излучения предлагается использовать кварцевые галогенные лампы накаливания КГ 220-1000.

Для пастеризации молока (нагрев до температуры гибели вредных микроорганизмов) ИК-лучами можно проводить двумя способами — открытыми пастеризаторами и закрытыми.

Схема закрытого пастеризатора представлена на рисунке 112.

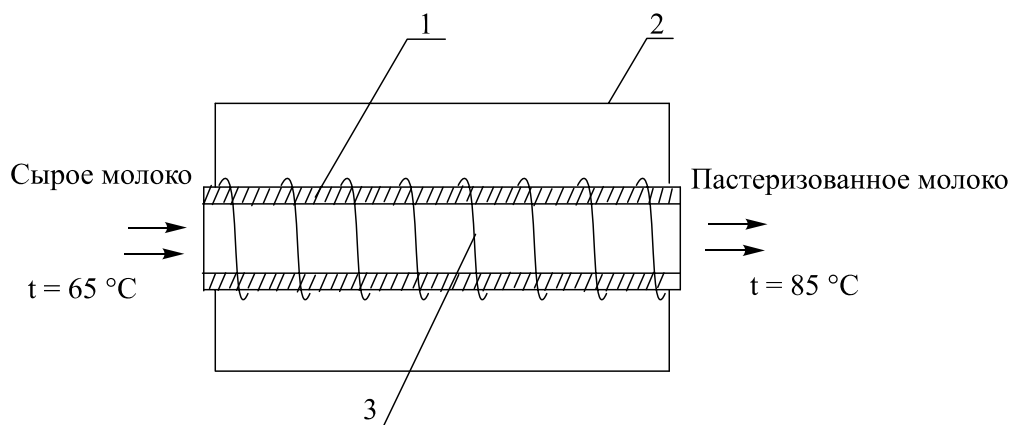


Рис. 112. Схема закрытого пастеризатора молока

Пастеризатор молока состоит из кварцевой трубки 1 с внутренним диаметром 8 мм и наружным — 12 мм, хорошо отражающего чехла 2 и нихромовой проволоки 3.

При инфракрасной пастеризации применяются длины волн 1...3 мкм, время пастеризации — до 20 с.

### *Порядок расчета пастеризационной установки*

1. Устанавливают исходные данные:

- а) производительность установки  $\Pi$ , кг/с;
- б) начальная и конечная температуры:  $t_1 = 60$  °С,  $t_2 = 85$  °С;
- в) время обработки  $\tau = 20$  с;
- г) теплоемкость молока  $C = 3,92$  кДж/(кг·К) или воды  $C = 4,19$  кДж/(кг·К);
- д) плотность молока  $\delta = 1029$  кг/м<sup>3</sup> или воды  $\delta = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Определяют мощность пастеризатора:

$$P = \frac{ПС\Delta t}{\eta_{II}},$$

где  $\Delta t = t_2 - t_1$  — разность температур пастеризованного и сырого молока, К;

$\eta_{II}$  — КПД пастеризатора. При наличии алюминиевого экрана принимают:

$$\eta_{II} = (0,85...0,9).$$

3. Определяют основные размеры пастеризатора:

а) суммарное внутреннее сечение трубки  $A_{\Sigma}$ , м<sup>2</sup>:

$$A_{\Sigma} = \frac{П_V}{v},$$

где  $П_V$  — объемная производительность, м<sup>3</sup>/с;

$v$  — скорость молока в трубках, м/с.

б) определяют длину трубки:

$$L = vt;$$

в) определяют количество параллельных трубок:

$$N = \frac{A_{\Sigma}}{A_{TR}}.$$

4. Определяют оптимальную температуру провода  $T_{ОПТ}$ , К, по закону смещения Вина:

$$T_{ОПТ} = \frac{2896}{\lambda_{ОПТ}},$$

где  $\lambda_{ОПТ} = 1...3$  мкм.

5. Расчетная температура провода  $t_{РАСЧ}$ , °С:

$$t_{РАСЧ} = (T_{ОПТ} - 273)K_M K_C,$$

где  $K_M$  — коэффициент монтажа, учитывающий влияние способа монтажа на температуру провода. Принимают  $K_M = 0,8$ ;

$K_C$  — коэффициент, учитывающий состояние воздуха между спиралью и экраном. Для спокойного воздуха  $K_C = 1$ .

6. Определяют расчетный ток:

$$I_P = \frac{P}{mU_{\phi} \cos \varphi},$$

где  $m$  — число фаз;  $\cos \varphi = 1$ .

7. По кривым связи  $S = f(I_p)$  и при  $t = var$  находят сечение провода.

8. Определяют длину провода на фазное напряжение  $l$ , м:

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{U_{\phi}^2 S}{P_{\phi} \rho}.$$

9. Определяют шаг спирали:

$$l_{ш} = (2...6)d,$$

где  $d$  — диаметр провода.

10. Определяют число витков спирали:

$$n = \frac{l}{\sqrt{\pi(d_{НАР})^2 + l_{ш}^2}}.$$

### 17.6. Расчет установок инфракрасного обогрева молодняка

Для инфракрасного обогрева применяются специальные облучатели, которые были рассмотрены выше.

#### *Порядок расчета инфракрасных облучательных установок для обогрева молодняка*

1. Устанавливают исходные данные — вид, возраст животного, условия содержания.

2. Устанавливают температуру воздуха в помещении  $T_B$ .

3. Рассчитывают ощущаемую температуру животного  $T_{Ж}$  или температуру воздуха, ощущаемую животным:

$$T_{Ж} = mT_p + (1 - m)T_B,$$

где  $m$  — коэффициент, учитывающий свойства помещения:

– для коровника — 0,3;

– для свинарника — 0,4;

– для жилых помещений — 0,5;

$T_p$  — радиационная температура ограждающей конструкции.

4. Рассчитывают необходимую инфракрасную облученность, чтобы достичь ощущаемую температуру:

$$E = \frac{T_0 - T_{Ж}}{k_1 k_2},$$

где  $T_0$  — оптимальная температура, необходимая для животного;

$k_1$  — коэффициент восприятия инфракрасного излучения животными, считается  $k_1 = 1$ ;

$k_2$  — коэффициент, связывающий инфракрасную облученность с лучистой температурой (или коэффициент перевода облученности, Вт),  $k_2 = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Дальнейший расчет ведется методом коэффициента использования.

5. Выбирают тип облучателя.

6. Определяют расчетную высоту:

$$h_p = \sqrt{\frac{I_0^{1000} P \eta_{ИК}}{1000 E}},$$

где  $I_0^{1000}$  — сила излучения по оси облучателя со световым потоком 1000 лм;

$P$  — мощность облучателя;

$\eta_{ИК}$  — КПД облучателя по инфракрасному излучению;

1000 — световой поток условной лампы 1000 лм;

$E$  — облученность, Вт/м<sup>2</sup>.

7. Определяют индекс облучательной установки:

$$i = \frac{AB}{(A+B)H_p},$$

где  $A$  и  $B$  — длина и ширина помещения.

8. Определяют коэффициент использования ИК-потока  $\eta_{ОБУ}$ .

9. Определяют количество облучателей:

$$N = \frac{AEK_3}{\Phi_L \eta_{ОБУ}},$$

где  $\Phi_L = 0,8P_L$ .

### 17.7. Расчет инфракрасной установки

#### для сушки, предпосевной обработки и дезинсекции зерна

Инфракрасное излучение оказывает благотворное влияние на посевные качества семян сельскохозяйственных культур. При этом зерно подсушивается, подвергается дезинсекции, проходит предпосевную обработку, повышающую всхожесть, энергию прорастания и, в конечном итоге, урожайность.

Для сушки и предпосевной обработки зерна используются обычные транспортеры (рис. 113).

#### Методика расчета

1. Определяют количество теплоты, необходимой для нагрева:

$$Q = c m \Delta t + m_{И} r,$$

где  $c$  — теплоемкость, кДж/(кг·град);

$m$  — масса зерна, кг;

$\Delta t$  — разность температур нагретого и холодного зерна, град;

$m_{И}$  — масса испаряемой жидкости, кг;

$r$  — теплота испарения жидкости, кДж/кг.

2. Определяют необходимую мощность:

$$P = \frac{Q}{t},$$

где  $t$  — время обработки, с.

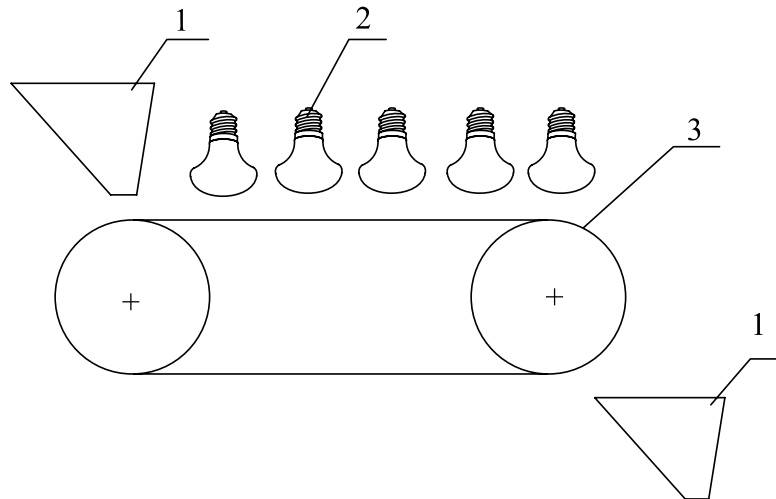


Рис. 113. Схема установки для предпосевной обработки семян:  
1 — бункер; 2 — ИК-лампы; 3 — транспортер

3. Выбирают тип облучателя или лампу.
4. Выбирают расчетную высоту  $H_p = 0,1 \dots 0,2$  м.
5. Определяют индекс облучательной установки

$$i = \frac{ab}{(a+b)H_p},$$

где  $a$  и  $b$  — соответственно длина и ширина транспортера.

6. Определяют коэффициент использования. Как правило, коэффициент использования  $\eta = 0,8$ .

7. Определяют электрический КПД установки:

$$\eta_{\text{э}} = \eta \beta,$$

где  $\beta = 0,8 \dots 0,9$  — коэффициент полезного действия по инфракрасному излучению.

8. Определяют суммарную мощность ламп:

$$P_{\Sigma} = P / \eta_{\text{э}}.$$

9. Определяют количество ламп:

$$n = P_{\Sigma} / P_{\text{л}}.$$

Также рассчитываются установки для дезинсекции зерна, тары, для сушки лакокрасочных покрытий.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Как возникает инфракрасное излучение? 2. Перечислите области применения инфракрасного излучения в сельском хозяйстве. 3. В чем преимущество лучистого нагрева перед конвективным? 4. Биологическое действие инфракрасного излучения. 5. Как классифицируются источники инфракрасного излучения? 6. Какие Вы знаете облучательные установки инфракрасного излучения? 7. Чем отличаются облучатели «ЛУЧ» от «ИКУФ»? 8. Как сделать расчет установки инфракрасной пастеризации молока? 9. В чем особенности расчета установки инфракрасного обогрева молодняка?

## 18. ОБЛУЧАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАСТЕНИЙ

- Применение облучательных установок в растениеводстве
- Расчет фотосинтетического потока
- Классификация облучательных установок
- Характеристики источников света и облучателей для выращивания растений
- Методика расчета фитоустановок

### 18.1. Применение облучательных установок в растениеводстве

Среднегодовая потребность человека в овощах составляет 120...130 кг, в том числе капусты и помидор по 25...40 кг, моркови, лука, огурцов по 10...15 кг. Для обеспечения равномерности снабжения населения овощами 75% всего их количества необходимо выращивать в защищенном грунте.

В настоящее же время в теплицах производится всего около 10% овощей и на каждого человека приходится около 0,5 м<sup>2</sup>.

Основным сдерживающим фактором роста площадей теплиц является отсутствие надежных, экономичных и долговечных источников оптического излучения, а также высокая цена на энергоносители.

Облучательные установки для растений применяются в оранжереях и тепличных комбинатах при ускоренном выведении новых сортов, размножении ценного материала на селекционных станциях.

Применение облучательных установок в тепличном овощеводстве позволяет повысить на 20...40% урожай огурцов, на 15...20% томатов, на 70...80% салата, получать плоды томатов и огурцов в течение круглого года.

На физиологические процессы растений оказывает влияние излучение всего оптического диапазона:

- более 1000 нм — только тепловое действие;
- 1000...700 нм — в основном приводит к вытягиванию растений;
- 700...400 нм — основная область для фотосинтеза. Эта область называется фотосинтетически активной радиацией;
- 400...300 нм — ответственная часть за формирование кроны растений;
- менее 300 нм оказывает губящее действие.

Применение досвечивания для ускорения сроков созревания и увеличения урожая экономически целесообразно только при выращивании рассады. На взрослой культуре томатов расход электроэнергии 180...200 кВт·ч на один килограмм овощей. В то же время съем с 1 м<sup>2</sup> составляет 20...22 кг огурцов и 8...10 кг томатов.

Самым лучшим источником оптического излучения для растений является солнце. За свою эволюцию растения приспособились именно к его спектру.

В настоящее время применяют различные источники искусственного освещения.

Искусственное освещения растений начали применять еще с 1865 года. В качестве источника света А.С. Фамильцын применил керосиновые лампы. С 1880 года появились дуговые лампы, а позднее — лампы накаливания и люминесцентные лампы. В дальнейшем и по настоящее время применяются лампы ДРЛ, ДРЛФ, МГЛ, ЛФ, ДРИ и т.д.

## 18.2. Расчет фотосинтетического потока

Как известно, способность растений воспринимать оптическое излучений оценивается спектральной чувствительностью (рис. 114).

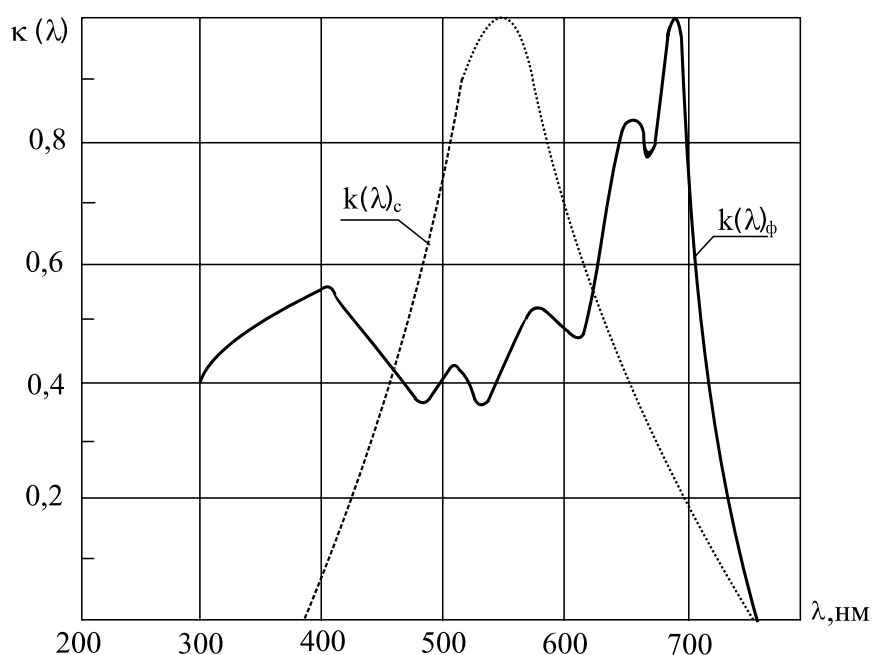


Рис. 114. Коэффициенты спектральной чувствительности растений и глаза человека

Величина фитопотока  $\Phi_\phi$ , фит, определяется эффективным потоком:

$$\Phi_\phi = \varphi(\lambda)_{\text{МАКС}} \int_{\lambda=300}^{\lambda=750} f(\lambda)k(\lambda)d\lambda .$$

Для лучшего восприятия растениями оптического излучения источник должен обладать именно этими длинами волн. Наиболее подходящим для этих целей является световой поток  $\Phi_C$ , лм:

$$\Phi_C = \varphi(\lambda)_{\text{МАКС}} \int_{\lambda=380}^{\lambda=760} \varphi(\lambda)k(\lambda)d\lambda .$$

Графически фитопоток определяется площадью  $A_\phi$ , как эффективный поток (рис. 115).



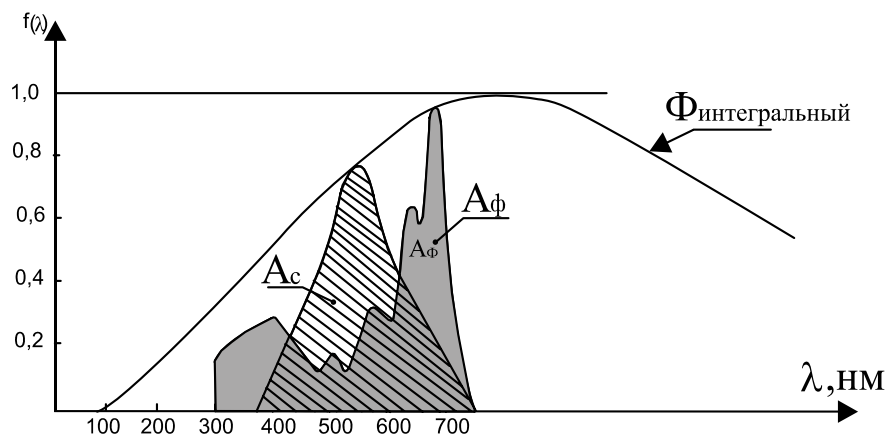


Рис. 115. Световой и фитопоток

Как видно из рисунка, чем больше площадь  $A_{\phi}$ , тем лучше источник излучения.

Для сравнения различных источников и оценки их фотосинтетической способности применяют сравнение фитопотока и видимого излучения коэффициентом фотосинтеза  $K_{\phi C}$ , фт/лм:

$$K_{\phi C} = \frac{A_{\phi}}{A_c} = \frac{\Phi_{\phi}}{\Phi_c} = \frac{\varphi(\lambda)_{\text{МАКС}} \int_{300}^{750} f(\lambda)k(\lambda)d\lambda}{\varphi(\lambda)_{\text{МАКС}} \int_{380}^{760} f(\lambda)k(\lambda)d\lambda}$$

и эта величина обычно приводится в справочниках.

Значения коэффициента фотосинтеза некоторых источников оптического излучения приведены в таблице.18.

Таблица 18. Значения коэффициентов фотосинтеза некоторых источников света

Тип источника света	$K_{\phi C}$	Тип источника света	$K_{\phi C}$
Солнце	$3 \cdot 10^{-3}$	ДРЛФ	$1,42 \cdot 10^{-3}$
Лампа накаливания	$2,7 \cdot 10^{-3}$	ЛФ	$3,1 \cdot 10^{-3}$
ДРЛ	$1,5 \cdot 10^{-3}$	ДРИ	$2,9 \cdot 10^{-3}$
ЛД	$1,85 \cdot 10^{-3}$	ДНаТ	$3,1 \cdot 10^{-3}$
ЛБ	$1,51 \cdot 10^{-3}$	ДКсТЛ	$1,58 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, требования, предъявляемые к источникам света для светокультуры растений, следующие:

- 1) соответствие спектральной плотности излучения источника к спектральной чувствительности растений;
- 2) максимум светоотдачи, фт/лм;
- 3) наибольший КПД;
- 4) достаточная концентрация мощности излучения в единице объема.

### 18.3. Классификация облучательных установок

До недавнего времени облучательные установки подразделялись по конструктивному исполнению на стационарные, подвижные и передвижные. По типу источника классифицировались — с лампами накаливания и водяным охлаждением; с люминесцентными лампами; с лампами высокого давления и с лампами сверхвысокого давления.

В настоящее время применяют только стационарные облучательные установки.

Стационарные облучательные установки с лампами накаливания в СССР начали применять с 1927 г. Примерно до 1953 г. лампы накаливания были практически единственными источниками излучения для теплиц в осенне-зимний период. Чаще всего применялись лампы мощностью от 200 до 500 Вт и напряжением 127 и 220 В. Для лучшего использования лучистого потока лампы помещали в светильники типа «Астра», УПД и зеркальные лампы без отражателей. Размещали их на высоте не менее 0,7 м.

Недостатки таких установок:

- очень большая удельная мощность — 500...700 Вт/м<sup>2</sup>;
- спектр излучения беден сине-фиолетовыми лучами, что приводит к сильному вытягиванию растений;
- большое количество инфракрасного излучения приводит к перегреву и ожогам растений;
- неравномерность освещения и затенение растений арматурой в дневное время.

Для уменьшения теплового воздействия применяли водяные фильтры. В этом случае на 1 м<sup>2</sup> устанавливали до 16 ламп накаливания мощностью в 200...300 Вт каждая и удельная мощность достигала 3,2...4,8 кВт/м<sup>2</sup>.

Установки с люминесцентными лампами в СССР стали применять после Великой Отечественной войны с 1946 г. профессором А.Ф. Клешиным в институте физиологии растений им. К.А. Тимирязева и Б.С. Мошковым в лаборатории светофизиологии Агрофизического института. До 1955 г. все установки с люминесцентными лампами были стационарными. Лампы располагались параллельными рядами на рамах. Расстояние между лампами было 60...90 мм и располагались они на высоте 40...60 см над растениями. Дроссели располагались на рамах. По мере надобности лампы могли подниматься. Для лучшего использования светового потока на лампы клали белую бумагу, что повышало освещенность до 1,6 раза. В некоторых установках рамы могли поворачиваться на шарнирах из горизонтального в вертикальное положение, что снижало затененность в дневное время. Выпускались облучатели ОТ 6×40 и ОТ 10×40 на рамах с расстояниями между лампами 120...160 мм. Установленная мощность достигала 600 Вт/м<sup>2</sup>. Растения, выращенные под лампами, практически ничем не отличались от растений, выращенных под солнцем.

Недостатки таких установок:

- затеняли естественный свет;
- отсутствовала ИК-область спектра;
- затрудняли обработку почвы;
- громоздкость и большие затраты на обслуживание.

Для восполнения инфракрасной области применяли сочетание люминесцентных ламп 1 и ламп накаливания 2 (рис 116).

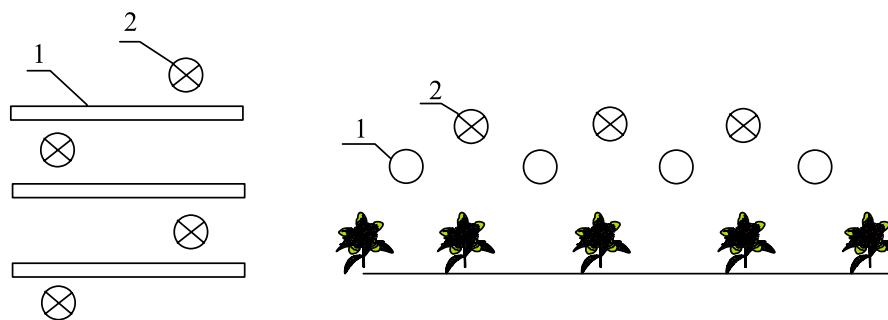


Рис. 116. Схема расположения ламп в теплице

В этом случае лампы накаливания применяются в качестве балласта для люминесцентных ламп.

#### 18.4. Характеристика источников света и облучателей для выращивания растений

В современных промышленных теплицах для создания оптимального режима облучения расходуется около 50% всей потребляемой теплицами электроэнергии, а в селекционных сооружениях — 75% и более. Это указывает на особую важность оптимизации процесса облучения, создание экономичных облучательных установок, а также источников света.

Источниками оптического излучения в растениеводстве являются в настоящее время газоразрядные лампы ДРЛ, ДРЛФ, ДРИ, ДНаТ, ДНаЗ, ДРВ, ДМ4 и др.

Облучатели — ОТ 400, ОТ 1000, «ФОТОС-1», «ФОТОС-6», «СВЕТОТРОН», ГСП 26, УОРТ-6000.

ГСП 26-400, ГСП 26-1000 — облучатели с отражателем типа УПД и лампой ДРИ мощностью 400 и 1000 Вт. Балласт устанавливается отдельно от облучателя на расстоянии не более 4 м. Располагают их рядами на расстоянии 2 м при 400 Вт и 3 м при 1000 Вт.

В ангарных теплицах с пролетами 14 и 18 м наиболее приемлемой для облучения рассады и взрослой культуры в недавнем времени применялась установка УОРТ 1-6000. Она состоит из облучателя типа ОТ 6000 с лампой ДМ 4-6000 и блока управления. Облучатель имеет корпус с отражателем и универсальное импульсное зажигающее устройство типа УИЗУ-220.

В установке предусмотрена защита от аномальных режимов — защита от выхода из строя одного или нескольких электродов и от обрыва одной из фаз.

Трехфазная металлогалогенная лампа имеет существенные преимущества по сравнению с облучателем ДРЛФ 400. Масса ПРА в три раза меньше, заменяет 36 ламп ДРЛФ 400, снижает расход электроэнергии в 2,5 раза. Установленная мощность 175 Вт/м<sup>2</sup>.

Урожайность огурцов на 5% больше, чем от ОТ 400, сокращается срок выращивания на 10...11 дней, сокращаются трудозатраты примерно в два раза.

Высота установки от 2,8 до 4 м с шагом 6 м по длине теплицы и 4,5 м по ширине.

### **18.5. Методика расчета фитоустановок**

Расчет фитоустановок производят в следующем порядке:

- 1) производят выбор облученности;
- 2) производят выбор источника оптического излучения и облучатель;
- 3) выбирают высоту подвеса облучателей и коэффициент неравномерности;
- 4) размещают облучатели на плане помещения;
- 5) рассчитывают мощность источника оптического излучения;
- 6) окончательно размещают облучатели;
- 7) выбирают продолжительность облучения.

#### **1. Выбор облученности**

Искусственное облучение должно обеспечить нормальный рост и развитие растений, т.е. обеспечить нормальный фотосинтез. Для этих целей необходимо обеспечить соответствующую облученность и продолжительность облучения. Овощи, выращенные в теплицах при низкой облученности (менее 6 тыс. люкс), имеют пониженное содержание витаминов, органических кислот, минеральных солей и сухого вещества, но зато имеют значительное количество нитратов. Основными факторами, определяющими качество овощей, являются интенсивность света и его спектральный состав.

Значения минимальной облученности и продолжительности облучения некоторых овощей приведены в таблице 19.

#### **2. Выбор источника оптического излучения и облучателя**

Об источниках излучения и облучателях мы уже говорили. В каждом конкретном случае требуется определенный источник и облучатель.

Таблица 19. Значения минимальной облученности и продолжительности облучения некоторых растений

Наименование культуры		Общая продолжительность облучения, ч	Продолжительность искусственного облучения, ч	Минимальная облученность, фт/м <sup>2</sup>	Минимальная освещенность, тыс. лк	Облученность ФАР, Вт/м
Огурцы	Рассада	12-14	6-8	11-13	4-5	20-25
	Плоды	10-16	С учетом естеств. облученности	11-15	7-8	25-34
Томаты	Рассада	14-16	С учетом светового дня	11-13	4-5	25-30
	Плоды	16		14-15	7-8	30-34
Редис		12-14		6-8	3-4	4-5

### 3. Выбор высоты подвеса и неравномерности облучения

Чтобы не обжечь растения, высота подвеса облучателей с различными источниками должна быть различной:

- для люминесцентных ламп — 2...5 см;
- для ламп ДРЛ, ДРЛФ — 0,25...0,7 м;
- для ДКсТ — 1,5 м;
- для ДРОТ, ДРИ, ДМ4 — 2...4 м.

Неравномерность облучения определяется выражением:

$$Z = E_{\text{МИН}} / E_{\text{СР}} \geq 0,7.$$

При меньших значениях неравномерности растения будут развиваться неравномерно.

### 4. Размещение облучателей

Облучатели, как и светильники, размещают по вершинам прямоугольников или квадратов со стороной  $L = H\rho\lambda_C$ . Для большинства облучателей и их косинусного светораспределения  $\lambda_C = 1,4$ .

На плане теплицы наносят облучатели и выбирают контрольные точки — одну с предполагаемой максимальной облученностью, другую — предполагаемой минимальной.

Производят расчет условных освещенностей в контрольных точках как в светотехническом расчете.

5. Расчет мощности источника оптического излучения  
 Выбор мощности источника оптического излучения производят по формуле:

$$\Phi_{\phi} = \frac{E_{\phi} 1000 K_{\phi}}{\mu \sum e_{\text{МАКС}}},$$

где  $\Phi_{\phi}$  — рассчитываемый фитопоток лампы;

$\mu$  — коэффициент, учитывающий влияние удаленных ламп,  $\mu = 1,1$ ;

$E_{\phi}$  — фитооблученность контрольной точки, фит/м<sup>2</sup>.

Фитооблученность рассчитывают по формуле:

$$E_{\phi} = \frac{E}{1000 K_{\phi}},$$

где  $E$  — освещенность в контрольной точке, лк;

$K_{\phi}$  — коэффициент пересчета освещенности в облученность (см. табл. 18).

Освещенность контрольной точки рассчитывают по формуле:

$$E = \frac{\mu \sum e_{\text{МАКС}} \Phi_{\text{С}}}{1000}.$$

где  $\Phi_{\text{С}}$  — световой поток выбранного облучателя, лм.

6. Вычисляют коэффициент неравномерности  $Z$ , сравнивают облученности расчетную и табличную:

$$0,1 \leq \frac{E_{\phi} - E_{\text{ФТАБЛ}}}{E_{\text{ФТАБЛ}}} \leq 0,2.$$

Если коэффициент неравномерности  $Z < 0,7$ , то изменяют расчетную высоту, переставляют облучатели плотнее и производят снова расчет.

7. Выбор продолжительности досвечивания производят из расчета:

$$t_{\text{ДОСВ}} = t - t_{\text{СВ.ДНЯ}},$$

где  $t$  — время, необходимое для развития растений;

$t_{\text{СВ.ДНЯ}}$  — продолжительность светового дня.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Экономическая целесообразность применения облучательных установок в растениеводстве. 2. Как рассчитать фотосинтетический поток? 3. Классификация облучательных установок для растений. 4. Как рассчитать облучательную установку для растений?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газалов, В.С. Светотехника и электротехнология. Ч. 1. Светотехника : учебное пособие. — Ростов-на-Дону : ООО «Терра», 2004. — 344 с.
2. Баранов, Л.А. Светотехника и электротехнология / Л.А. Баранов, В.А. Захаров. — М. : КолосС, 2006. — 344 с.
3. Живописцев, Е.Н. Электротехнология и электрическое освещение / Е.Н. Живописцев, О.А. Косицын. — М. : Агропромиздат, 1990. — 303 с.
4. Жилинский, Ю.М. Электрическое освещение и облучение / Ю.М. Жилинский, В.Д. Кумин. — М. : Колос, 1982. — 272 с.
5. Кнорринг, Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг, И.Ф. Фадин, В.Н. Сидоров. — СПб. : Энергоатомиздат, 1992, — 448 с.
6. Лямцов, А.К. Электроосветительные и облучательные установки / А.К. Лямцов, Г.А. Тищенко. — М. : Колос, 1983, — 224 с.
7. Козинский, В.А. Электрическое освещение и облучение / В.А. Козинский. — М. : Агропромиздат, 1991. — 239 с.
8. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 593 с.
9. Айзенберг, Ю.Б. Основные итоги, направления и перспективы развития светотехники / Ю.Б. Айзенберг // Светотехника, 1993. — № 5-6. — С. 3-5.
10. Серия энергоэкономичных компактных люминесцентных ламп с колбой спиральной формы / К.Р. Елисеев, С.Н. Поливан, С.П. Ременов и др. // Светотехника. — 1997. — № 6. — С. 29-31.
11. Коган, Л.М. Новые светодиоды и устройства на их основе / Л.М. Коган // Светотехника. — 1997. — № 3. — С. 27-30.
12. Коган, Л.М. Светоизлучающие диоды: дальнейшее развитие / Л.М. Коган // Светотехника. — 1999. — № 4. — С. 23-27.
13. Коган, Л.М. Светодиодные осветительные приборы / Л.М. Коган // Светотехника. — 2002. — № 5. — С. 16-20.
14. Кривоzubов, В.М. Об электронных ПРА для компактных люминесцентных ламп / В.М. Кривоzubов, А.А. Спирин // Светотехника. — 1992. — № 5. — С. 8-11.
15. Троицкий, А.М. Энергетическая эффективность облучательных установок защищенного грунта / А.М. Троицкий // Светотехника. — 1996. — № 7. — С.10-13.
16. Алферова, Л.К. Многоцелевой ультрафиолетовый облучатель для животноводческих помещений / Л.К. Алферова, В.В. Козырева, С.А. Овчукова // Светотехника. — 1998. — № 3. — С. 34-36.

17. Применение ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздушной среды в помещениях организаций пищевой промышленности, общественного питания и торговли продовольственными товарами : методические указания МУ 2.3.975-00 // Светотехника. — 2001. — № 1. — С. 21-31.

18. Методические указания по применению бактерицидных ламп для обеззараживания воздуха и поверхностей в помещении : приказ Министерства здравоохранения и мед. промышленности РФ № 11-16/03-06 от 28.02.95 // Светотехника. 1995. — № 6. — С. 2-19.

19. Лямцов, А.К. Искусственное освещение и облучатели в животноводстве / А.К. Лямцов, Г.С. Сарычев // Светотехника. — 1993. — № 5-6. — С. 25-27.

20. Краснопольский, А.Е. Автоматизация управления освещением — насущная проблема светотехники / А.Е. Краснопольский, Е.А. Краснопольский, В.Б. Соколов // Светотехника. — 1997. — С. 2-4.

21. Соловьев, А.А. Автоматическое регулирование искусственного освещения и его эффективность / А.А. Соловьев // Светотехника. — 1990. — № 5. — С. 2-4.

22. Пашковский, Р.И. О правилах выполнения электропроводок / Р.И. Пашковский // Светотехника. — 1999. — № 6. — С. 33-36.



*Учебно-теоретическое издание*

**Электрическое освещение** : учебник для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / сост. Н.А. Фалилеев. — Караваево : Костромская ГСХА, 2015. — 210 с.

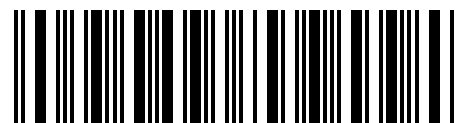
Гл. редактор Н.В. Киселева  
Редактор выпуска Т.В. Тарбеева  
Корректор Т.В. Кулинич

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромская государственная сельскохозяйственная академия" 156530, Костромская обл., Костромской район, пос. Караваево, уч. городок, д. 34, КГСХА

Компьютерный набор. Подписано в печать 20/08/2015.  
Заказ №607. Формат 84x60/16. Тираж 40 экз. Усл.  
печ. л. 12,72. Бумага офсетная. Отпечатано 05/11/2015.  
Цена 176,00 руб.

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в академической типографии на цифровом дубликаторе. Качество соответствует предоставленным оригиналам.  
вид издания: первичное (редакция от 17.08.2015 № 889)

Цена 176,00 руб.



2015\*607