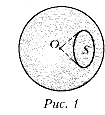
**Фотометрия**

В.А. Емельянов, Автодорожный лицей им. А.А.Николаева, г. Москва

Тела, излучающие свет, называются источниками света. Раздел оптики, изучающий методы и приемы измерения действия видимого света на глаз человека, называется фотометрией.

Световой поток – величина, равная световой энергии (оцениваемой по зрительному ощущению), проходящей через заданную поверхность за единицу времени: где W – количество световой энергии, проходящей через заданную поверхность за время t. Единицей светового потока в СИ является люмен (лм).



Часть пространства, ограниченная конической поверхностью, называется телесным углом. Этот угол называется центральным телесным углом (рис. 1), если его вершина совмещена с центром сферы.

Телесный угол измеряется отношением , где S – площадь части поверхности сферы радиусом R, на которую опирается данный угол. Единицей измерения телесного угла служит стерадиан (ср). Полный пространственный угол равен ср.



Величина, измеряемая световым потоком, приходящимся на единицу телесного угла по заданному направлению, называется силой света источника где Ф – световой поток внутри достаточно малого телесного угла w. Сила света в СИ измеряется в канделах (кд).



Точечным источником света называется источник, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до места наблюдения и который излучает свет равномерно во всех направлениях.

Полный световой поток от точечного источника света равен .



Освещенностью поверхности называется величина, равная световому потоку, падающему на единицу площади равномерно освещаемой поверхности.

В СИ освещенность измеряется в люксах (лк).

Первый закон освещенности: освещенность поверхности точечным источником прямо пропорциональна силе света источника и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности:



Второй закон освещенности: освещенность поверхности прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей:



Объединенный закон освещенности: освещенность, создаваемая точечным источником света на некоторой площадке, прямо пропорциональна силе света источника и косинусу угла падения лучей и обратно пропорциональна квадрату расстояния до площадки от источника:



Освещенность поверхности, создаваемая несколькими источниками света, равна арифметической сумме освещенностей, создаваемых каждым источником в отдельности.

Если источник света нельзя считать точечным, то для его характеристики вводятся величины светимость и яркость.

Светимость определяется отношением светового потока, испускаемого поверхностью, к площади этой поверхности:



Единицей измерения светимости в СИ служит люкс. Если светимость тела обусловлена его освещенностью, то M = kE, где k – коэффициент отражения.

Яркостью светящейся поверхности в направлении наблюдения называется величина, равная отношению силы света к площади проекции этой поверхности на плоскость, перпендикулярную к этому направлению:



где – угол между нормалью к поверхности и направлением наблюдения. Яркость в СИ измеряется в нитах (нт).



Приборы, служащие для определения силы света одного источника на основании сравнения с силой света источника- эталона, называются фотометрами. Фотометры, приспособленные для непосредственного измерения освещенности, называются люксметрами.

**Примеры решения задач**

Задача 1. Над центром круглого стола диаметром 1,5 м на высоте 1 м подвешен точечный источник силой света 200 кд. Определите световой поток, падающий на горизонтальную поверхность стола, и среднюю освещенность этой поверхности.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано:  D = 1,5 м,  H = 1 м,  I = 200 кд.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  F – ? E – ?  Решение |  |

Световой поток, падающий на поверхность стола, определяется по формуле – телесный угол.



Для определения телесного угла соединим точку O

(рис. 2), где находится точечный источник света, с точкой A края стола. Перемещая прямую линию OA вокруг неподвижной точки O, получим прямой конус. Основанием конуса является круг, диаметр которого равен диаметру стола, а высота проходит через центр основания и равна расстоянию от источника света до центра стола. Поместим вершину O полученного конуса в центр сферы радиусом R. Пересекаясь со сферой, боковая поверхность конуса вырезает на ней сегментную поверхность АBD. Площадь сегментной поверхности равна произведению длины окружности большого круга на высоту сегмента, то есть где h – высота сегмента, равная длине отрезка BC.



Известно, что телесный угол при вершине конуса равен отношению площади сегментной поверхности к квадрату радиуса сферы:



Радиус сферы определяем из прямоугольного треугольника OCD:



Из рисунка видно, что высота сегмента h = R – H = 0,25 м.

Подставляя найденные значения R и h в формулу

получаем:



Тогда величина светового потока, падающего на поверхность стола, равна:



Освещенность поверхности стола определяется по формуле



где – площадь поверхности стола. Подставляя числовые значения, получаем:



Задача 2. Над серединой стола на высоте 1,2 м висит точечный источник, сила света которого 100 кд. Определите наибольшую и наименьшую освещенность поверхности стола, если его длина 2 м, а ширина 1 м.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано:  H = 1,2 м,  I = 100 кд,  a = 2 м,  b = 1 м.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_  Eмакс – ?  Eмин – ?  Решение |  |

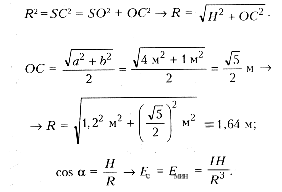
Освещенность, создаваемая точечным источником света, равна Из этой формулы видно, что освещенность максимальна в наиболее близкой к источнику точке стола и минимальна – в наиболее удаленной точке. На рис. 3 такими точками являются соответственно точка O и угловая точка стола, например точка C. По условию задачи SO = H, уголпадения лучей в точку O равен нулю. Следовательно:



Для определения освещенности в точке C находим расстояние от источника до этой точки и угол падения лучей :



.



Подставляя числовые значения в формулы для нахождения максимальной и минимальной освещенностей, получаем:



Задача 3. Точечный источник света S освещает горизонтальную поверхность (рис. 4). Определите, как изменится освещенность в точке A, в которую лучи падают перпендикулярно к поверхности, если сбоку от источника, на таком же расстоянии, поместить плоское зеркало, отражающее свет в эту точку. Коэффициент отражения зеркала считайте равным единице.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано:  SA = SB = R,  k = 1.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  Е/Е0– ?  Решение |  |

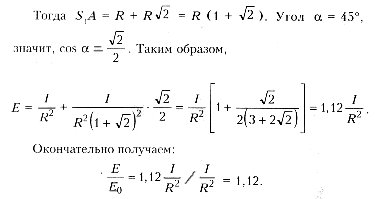
При отсутствии плоского зеркала освещенность в точке A определяется по формуле:



Если сбоку поместить плоское зеркало, то освещенность в точке A будет равна сумме освещенностей, создаваемых двумя источниками: реальным источником S и мнимым S1, имеющими одинаковую силу света. Следовательно,

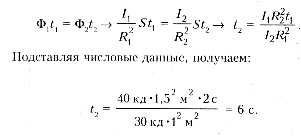


Из построения следует, что треугольник SBS1 равнобедренный, следовательно, SB = S1B = R. Расстояние от мнимого источника света S1 до точки A



Задача 4. При фотографировании объекта, помещенного на расстоянии 1 м от электрической лампочки силой света 40 кд, требовалось экспонирование в течение 2 с. Определите продолжительность экспонирования при использовании лампочки силой света 30 кд на расстоянии 1,5 м от объекта. Предполагается, что световая энергия, полученная объектом в обоих случаях, одинакова.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано:  I1 = 40 кд,  R1 = 1 м,  t1 = 2 с,  I2 = 30 кд,  R2 = 1,5 м,  W1 = W2.  \_\_\_\_\_\_\_\_\_  t2 – ? | Решение:  Освещенность объекта равна:  Так как W1=W2, nj |



Вопросы и задачи

Первый уровень

1. Что называется источником света?

2. Назовите естественные и искусственные источники света.

3. Что изучает фотометрия?

4. Что называется световым потоком и какими единицами он измеряется?

5. Что называется телесным углом и какова единица его измерения?

6. Что такое сила света? Дайте определение единицы измерения силы света в СИ.

7. Какой источник света называется точечным?

8. Чему равен полный световой поток точечного источника света?

9. Что называется освещенностью и какова единица ее измерения?

10. В чем сущность первого закона освещенности?

11. Какое влияние на освещенность окажет удвоение расстояния от источника света? утроение? сокращение расстояния вдвое?

12. Как зависит освещенность от угла падения лучей?

13. Почему под действием солнечных лучей снег тает на освещаемых склонах быстрее, чем на горизонтальных участках?

14. Сформулируйте объединенный закон освещенности.

15. Какое отношение имеет смена времен года к законам освещенности?

16. Какими величинами характеризуются протяженные источники света?

17. Что такое светимость? Назовите единицу измерения светимости.

18. Что называется яркостью источника и какова единица ее измерения?

19. Имеются два светящихся шарика разного диаметра, равномерно испускающие свет одинаковой силы во все стороны. Каковы освещенности, создаваемые каждым из этих шариков, на одинаковых расстояниях от их центров? Какой из шариков будет более ярким?

20. Источник света представляет собой равномерно светящуюся сферическую поверхность. Как будет изменяться яркость источника, если приближаться к нему? Удаляться от него?

21. Для какой цели применяется фотометр?

22. Как с помощью фотометра определяют силу света источника?

23. Какими приборами измеряется освещенность?

Второй уровень

24. Точечный источник света, находящийся в вершине телесного угла 0,50 ср, излучает в него световой поток 50 лм. Определите силу света источника.

25. Определите телесный угол, внутри которого проходит световой поток 4 лм от точечного источника силой света 50 кд.

26\*. Полный световой поток, излучаемый лампой накаливания, равен 6280 лм. Определите силу света этой лампы.

27. Световая отдача электрической лампочки силой света 75 кд составляет 9,42 лм/Вт. Определите мощность лампочки и ее полный световой поток.

28. На хромированную отражающую поверхность падает световой поток 1000 лм. Определите отраженный и поглощенный световые потоки, если коэффициент отражения хрома 0,65.

29. На книгу перпендикулярно ее поверхности, падают солнечные лучи. Световой поток составляет 37 лм. Определите, какой световой поток будет падать на книгу, если ее отклонить на угол 30°.

30. Световой поток 1200 лм падает от каждого из десяти светильников на рабочую площадку 400 м2. Определите освещенность площадки.

31. Определите световой поток, падающий на участок поверхности Земли площадью 100 см2 в ясный солнечный полдень, если освещенность достигает 105 лк.

32. Освещенность поверхности равна 50 лк при падении на нее светового потока 40 лм. Определите площадь освещаемой поверхности.

33. Сила света точечного источника 100 кд. Определите освещенность участка поверхности, расположенного перпендикулярно направлению лучей и находящегося на расстоянии 3 м.

34. Освещенность книги при чтении должна быть 100 лк. Определите необходимую силу света электрической лампочки, если она висит на высоте 50 см над рабочим местом.

35. На каком расстоянии точечный источник света создает освещенность 0,1 лк при перпендикулярном падении лучей, если сила его света равна 40 кд?

36. Поверхность освещалась электрической лампочкой силой света 75 кд. Ее заменили электролампочкой в 25 кд. Определите, во сколько раз нужно уменьшить расстояние от лампочки до поверхности, чтобы освещенность осталась прежней.

37. Над горизонтальной поверхностью стола на высоте 60 см висит электрическая лампочка. Освещенность стола 40 лк. Определите освещенность поверхности, если лампочку поднять на 20 см.

38. Точечный источник света 300 кд отстоит от экрана на расстояние 2 м и создает освещенность 60 лк. Определите угол падения света на экран.

39. Освещенность площадки лучами, падающими под углом 60°, равна 100 лк. Определите освещенность этой же площадки, если ее развернуть перпендикулярно лучам.

40. Определите силу света электрической лампы, если освещенность фасада здания, находящегося на расстоянии 10 м от лампы, равна 2,5 лк при угле падения лучей 60°.

41. Свет от электрической лампы силой 200 кд падает на стол под углом 45° и создает освещенность 141 лк. Определите расстояние от стола до лампы.

42. Освещенность поверхности Земли при угловой высоте Солнца над горизонтом 45° равна 90 000 лк. Определите освещенность при угловой высоте Солнца 15°.

43. На столбе на высоте 3 м от земли висит электрическая лампа силой света 500 кд. Определите освещенность на расстоянии 5 м от лампы.

44. На площадку нормально падает пучок света. Определите угол, на который необходимо отклонить площадку, чтобы ее освещенность уменьшилась вдвое.

45. Спираль электрической лампочки силой света 100 кд заключена в матовую сферическую колбу диаметром 5 см. Определите светимость и яркость лампочки. Потерей света в оболочке колбы пренебречь.

46. В корпусе фонаря сделано окно размером 10 ґ 10 см, закрытое плоским молочным стеклом. Сила света в направлении, составляющем угол 60° с нормалью, равна 10 кд. Определите яркость светящегося окна.

47. Определите яркость источника площадью 1 мм2, который испускает внутри телесного угла в 0,03 ср световой поток 12 лм.

48. С левой стороны от фотометра на расстоянии 15 см находится эталонная лампа силой света 25 кд. Определите силу света испытуемой лампы, расположенной справа на расстоянии 45 см от фотометра, если обе половины фотометра освещены одинаково.

Третий уровень

49. Наименьший световой поток, воспринимаемый глазом, равен 10–13 лм. Определите наибольшее расстояние, на кото-ром глаз может зарегистрировать световое излучение точечного источника силой света 25 кд, если площадь зрачка 0,4 см2

50. Электрическая лампочка силой света 200 кд висит над центром круглого стола диаметром 3 м. Определите наибольшую и наименьшую освещенность стола, если расстояние от его центра до лампочки равно 2 м.

51. На мачте высотой 15 м подвешена электрическая лампа, создающая освещенность 1,63 лк на расстоянии 8 м от основания мачты. Определите силу света лампы.

52. Над серединой площадки диаметром 26 м висит электрическая лампа силой света 500 кд. Определите освещенность края площадки, если высота подвеса лампы равна 3, 6, 9, 15 и 25 м. Постройте график изменения освещенности в зависимости от высоты подвеса.

53. Горизонтальная площадка удалена от точечного источника на расстояние 4 м. В точке, в которую лучи падают отвесно, освещенность составляет 25 лк. Определите освещенность площадки в точках, удаленных от нее на 3 м.

54. Над центром круглой площадки висит электрическая лампочка. Освещенность в центре равна 40 лк, на краю 5 лк. Определите угол падения лучей на край площадки.

55. Над центром квадратной плоской площадки на высоте 3 м, вдвое меньшей длины стороны квадрата, установлен точечный источник света. Определите освещенность площадки в точках, удаленных от ее центра на 4 м, если падающий на нее световой поток составляет 628 лм.

56. На высоте 5 м над землей подвешена электролампа силой света 200 кд. Определите площадь круга на земле, внутри которого освещенность не меньше 1 лк.

57. Открытая танцевальная площадка освещается одинаковыми фонарями, установленными на высоте 6 м по углам правильного шестиугольника со стороной 8 м. Сила света каждого 500 кд. Принимая фонари за точечные источники, определите освещенность в центре площадки.

58. Над центром стола висят две электрические лампочки. Нижняя лампочка находится в 4 раза ближе к поверхности стола, чем верхняя, и создает в центре освещенность 32 лк, а верхняя – 3 лк. Определите освещенность в центре стола после перемены лампочек местами. Считайте, что лампочки не загораживают друг друга.

59. По обе стороны от точечного источника света, на расстоянии 1 м от него, помещены параллельные друг другу плоское зеркало и экран. Определите освещенность в центре экрана, если сила света источника 9 кд.

60. Лампа, подвешенная к потолку, имеет в горизонтальном направлении силу света 60 кд. Определите величину светового потока, падающего на вертикально висящую в 4 м от лампы на стене картину площадью 0,5 м2, если на противоположной стене на расстоянии 2 м от лампы находится зеркало.

61. Круглый зал диаметром 20 м освещается электрической лампой, укрепленной в центре потолка. Определите высоту зала, если наименьшая освещенность стены зала в два раза больше наименьшей освещенности пола.

62. На двух вертикальных столбах на высоте 4 м от земли укреплены по одной электрической лампе силой света 200 кд и 500 кд. Определите освещенность на земле под каждой лампой, если расстояние между ними 3 м.

63. На столбах уличного освещения высотой 6 м закреплено по одной электрической лампе силой света 300 кд. Определите расстояние между двумя соседними столбами, при котором освещенность земли в точке, находящейся посередине между ними, составляет не меньше 0,24 лк.

64. Два одинаковых точечных источника света установлены на высоте 6 м от земли и на расстоянии 16 м друг от друга. Определите полный световой поток, создаваемый каждым источником, если освещенность в точке, расположенной на земле посередине между источниками, составляет 7,2 лк.

65. Определите, на какой высоте над листом матовой белой бумаги должна находиться электрическая лампочка силой света 100 кд, чтобы яркость бумаги была равна 1 нт, если ее коэффициент отражения равен 0,8.

66. Яркость Солнца равна 109 нт, диаметр 1,4 млн км. Определите силу света Солнца, наблюдаемую с Земли, и освещенность поверхности Земли, создаваемую нормально падающими солнечными лучами. Расстояние от Земли до Солнца равно 1,5 • 108 км.

67. При печатании фотоснимка негатив освещался в течение 3 с лампочкой силой света 15 кд с расстояния 50 см. Определите время, в течение которого нужно освещать негатив лампочкой силой света 60 кд с расстояния 2 м, чтобы получить отпечаток с такой же степенью почернения, как и в первом случае.

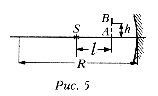
68. Две электрические лампы силой света 100 кд и 400 кд расположены на расстоянии 3 м друг от друга. Где нужно поместить между ними непрозрачный экран, чтобы он был одинаково освещен с обеих сторон?

Четвертый уровень

69. В главном фокусе вогнутого зеркала радиусом кривизны 50 см находится точечный источник света. На расстоянии 25 м от фокуса, перпендикулярно главной оптической оси зеркала, помещен экран. Во сколько раз уменьшится освещенность в центре экрана, если убрать зеркало? Потерями света в воздухе и при отражении пренебречь.

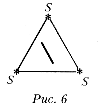
70. На высоте h >> 1 м над поверхностью стола подвешена электрическая лампа силой света 25 кд. Определите освещенность стола непосредственно под лампой, если между ней и столом поместить собирающую линзу оптической силой 1 дптр так, чтобы лампа оказалась в фокусе линзы.

71. Перед сферическим зеркалом радиусом R, в фокусе которого находится точечный источник света S, на высоте h от оптической оси и на расстоянии l от источника помещена небольшая пластинка, плоскость которой перпендикулярна оси зеркала (рис. 5). Определите отношение освещенностей левой и правой сторон пластинки.



72. Проекционный аппарат имеет объектив с фокусным расстоянием 5 см. Квадратный диапозитив площадью 10 см2 находится на расстоянии 5,1 см от объектива и пропускает световой поток 10 лм. Определите освещенность экрана, на котором получено изображение слайда. Рассеянием светового потока пренебречь.

73. Три точечных источника света расположены в вершинах равностороннего треугольника. В центре треугольника, перпендикулярно его плоскости и параллельно одной из сторон, расположена непрозрачная пластинка (рис. 6).



Определите освещенность обеих сторон этой пластинки, если сила света каждого из источников I, а длина стороны треугольника l.

74. Над центром стола, на некоторой высоте, установлена лампочка, а над нею, на высоте, в три раза большей, подвешена другая лампочка. Во сколько раз следует уменьшить высоту подвеса нижней лампочки после выключения верхней, чтобы освещенность в центре стола не изменилась, если известно, что при перемене горящих лампочек местами освещенность в центре стола увеличивается в 4 раза? Считать, что лампочки не загораживают друг друга.

Ответы

13. На склоне та же площадь в единицу времени поглощает большую энергию.

19. Освещенности, создаваемые каждым шариком, на одинаковых расстояниях от их центров одинаковы; маленький шарик более яркий, чем большой.

20. Яркость не изменяется.

24. 100 кд.

25. 0,08 ср.

26. 500 кд.

27. 100 Вт, 942 лм.

28. 650 лм, 350 лм.

29. 32 лм.

30. 30 лк.

31. 1 000 лм.

32. 0,8 м2.

33. 11 лк.

34. 25 кд.

35. 20 м.

36. В 1,73 раза.

37. 22,5 лк.

38. 38°.

39. 200 лк.

40. 500 кд.

41. 1 м.

42. 3,3 • 104 лк.

43. 12 лк.

44. 60°.

45. 16 • 104 лк; 51 • 103 нт.

46. 2 • 103 нт.

47. 4 • 108 нт.

48. 225 кд.

49. 225 км.

50. 50 лк; 25,6 лк.

51. 530 кд.

52. 0,63 лк; 1,02 лк; 1,14 лк; 1,08 лк; 0,96 лк; 0,56 лк.

53. 12,8 лк.

54. 60°.

55. 7,2 лк.

56. 235,5 м2.

57. 18 лк.

58. 50 лк.

59. 10 лк.

60. 2,34 лк.

61. 5 м.

62. 28,5 лк; 37,65 лк.

63. 48 м.

64. 7536 лм.

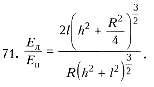
65. 1,6 м.

66. 1,5 • 1027 кд;67•103 лк.

67. 12 с.68. На расстоянии 1 м от лампы силой света 100 кд.

69. В 9 801 раз.

70. 25 лк.



72. 4 лк.

- одинакова для всех сторон пластинки.

