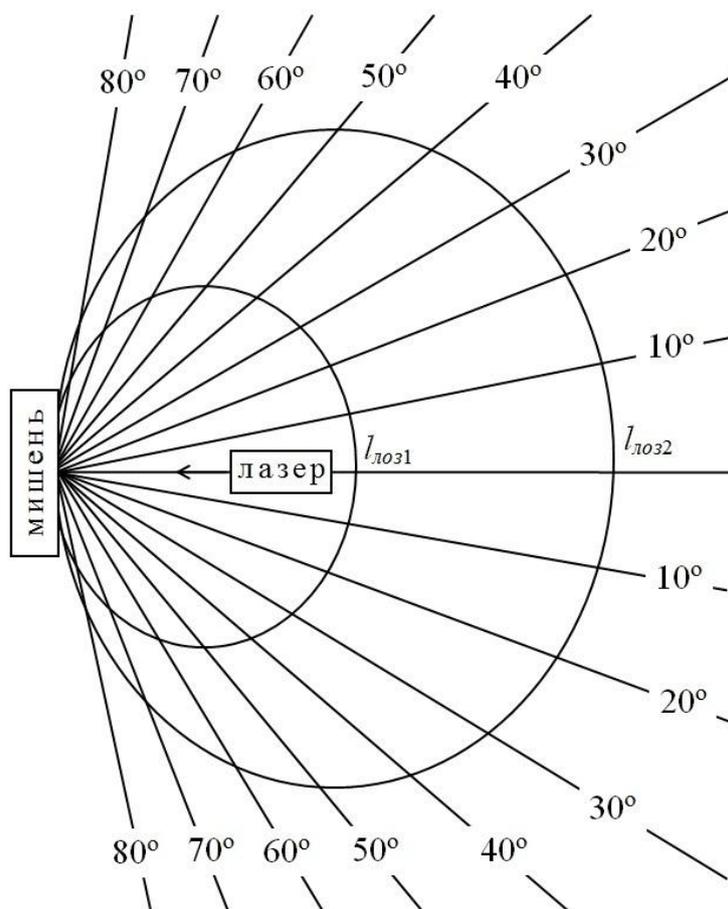


ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Б.Ю. Новиков, Ю.В. Колосов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ
СИСТЕМ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2012

Новиков Б.Ю., Колосов Ю.В. Проектирование и расчет систем и средств обеспечения безопасности труда. Учебное пособие / Под ред. Вейко В.П. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 74 с.

В учебном пособии рассмотрены методики расчёта безопасности труда при работе с лазерным излучением, при организации производственного освещения и защитного заземления. Пособие может быть использовано при выполнении заданий по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» и написании соответствующей главы в выпускной квалификационной работе. Учебное пособие подготовлено на кафедре лазерных технологий и экологического приборостроения для студентов всех специальностей НИУ ИТМО.

Рекомендовано к печати Ученым Советом инженерно-физического факультета 12 апреля 2011 г, протокол № 4.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012

© Новиков Б.Ю., Колосов Ю.В., 2012

Содержание

Р а з д е л 1. Лазерная безопасность	4
Словарь терминов	5
1.1. Определение параметров лазерного пучка	9
1.1.1. Общие характеристики воздействия	9
1.1.2. Энергетические и пространственные параметры лазерного пучка	10
1.1.3. Параметры лазерного пучка, преобразованного оптической системой	13
1.2. Параметры лазерного излучения при рассеянии в среде	16
1.3. Расчёт предельно допустимых уровней лазерного излучения при воздействии на глаза и кожу	18
1.3.1. Предельно допустимые уровни в диапазоне 180 – 380 нм	19
1.3.2. Предельно допустимые уровни в диапазоне 380 – 1400 нм	21
1.3.3. Предельно допустимые уровни в диапазоне 1400 – 10 ⁵ нм	25
1.4. Границы лазерно опасной зоны	26
1.5. Средства защиты от лазерного излучения	29
1.6. Расчёт лазерной безопасности	30
Р а з д е л 2. Искусственное освещение производственных помещений	43
2.1. Системы искусственного освещения	43
2.2. Общие вопросы проектирования осветительных установок	45
2.3. Расчёт искусственного освещения	45
2.3.1. Расчёт искусственного освещения по методу коэффициента использования светового потока	45
2.3.2. Расчёт искусственного освещения точечным методом	53
Р а з д е л 3. Защитное заземление	58
3.1. Назначение, принцип действия и область применения	58
3.2. Типы заземляющих устройств	61
3.3. Расчёт защитного заземления	63
Приложения	66
Список литературы	74

Р а з д е л 1. ЛАЗЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В начале XXI века лазерные технологии получили практическое применение во всех сферах деятельности. Использование лазерного излучения незаменимо во многих технологиях, например, для высокоточной обработки материалов, для многих методов анализа и контроля, в областях нанотехнологий, волоконно-оптических систем, устройств записи информации... Интенсивное развитие области лазерных технологий неразрывно взаимосвязано с современным научно-техническим прогрессом. Постоянное усовершенствование лазерного оборудования ведёт к достижению всё больших мощностей, расширению режимов воздействия лазерного излучения.

Однако функционирование современных технологических установок неизбежно связано с использованием потенциально опасных технологий и возможностью возникновения многих вредных эффектов. В СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» указано, что при эксплуатации лазерных установок на обслуживающий персонал могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы:

- лазерное излучение (прямое, отражённое и рассеянное);
- сопутствующие ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения от источников накачки, плазменного факела и материалов мишени;
- высокое напряжение в цепях управления и источниках электропитания;
- электромагнитное излучение от рентгеновского до радиочастотного диапазона, которое может возникать от элементов лазерной установки;
- повышенная температура поверхностей обрабатываемого изделия;
- шум;
- вибрация;
- продукты взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами;
- токсические газы и пары от лазерных систем с прокачкой, систем охлаждения и др.;
- опасность взрыва в системах накачки лазеров;
- напряженность анализаторных (зрение, слух) и моторных функций;
- возможность взрывов и пожаров при попадании лазерного излучения на горючие материалы.

Лазерное излучение обладает рядом замечательных свойств, которые позволяют выполнить множество технологических операций над разнообразными материалами, но эти же характеристики обуславливают высокую опасность лазерного излучения для человека. Пучок лазерного излучения несёт большое количество энергии, которая может вызвать в тканях организма тепловые, фотохимические, ударно-акустические и другие эффекты. Высокая мощность лазерного излучения ведёт к угрозе повреждения биоткани за короткое время. Малый размер пучка способствует тому, что плотность энергии излучения достигает высоких, поражающих значений. Пучок

при распространении изменяется незначительно благодаря малой расходимости, следовательно, сохраняется риск поражения на больших расстояниях. Причём, если распространяется невидимое излучение, то наличие опасности может быть неочевидно (и даже видимое излучение будет заметно в воздухе лишь при наличии взвешенных частиц). Повреждения биоткани зависят от параметров лазерного излучения, площади облучаемого участка, а также от биологических и физико-химических особенностей облучаемых тканей и органов. Человеку может угрожать поверхностный либо проникающий ожог кожи, опасное повышение внутриглазного давления, повреждение сред глаза. Например, лазерное излучение с длиной волны от 380 до 1400 нм наибольшую опасность представляет для сетчатой оболочки глаза, а излучение с длиной волны от 180 до 380 нм и свыше 1400 нм – для передних сред глаза.

Согласно требованиям СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» при работе с лазерным излучением предусмотрено использование защитных очков, лицевых щитков и насадок, защитной спецодежды, наличие предупреждающих надписей и опознавательных знаков, проведение медицинского осмотра персонала, применение средств дозиметрического контроля, наличие устройств сигнализации и блокировки, прерывающих работу излучателя в случае опасности. Все части лазерных технологических установок по возможности помещаются в защитный корпус (кожух).

В данной работе мы проведём расчёт допустимых и наблюдаемых параметров лазерного излучения, определим границы лазерно опасной зоны. Чтобы рассчитать эти условия безопасности могут быть использованы параметры, указанные в технической документации лазеров: длина волны излучения, расходимость излучения, диаметр пучка на выходе из лазера, мощность (при непрерывном режиме работы), энергия в импульсе, частота следования и длительность импульсов (при импульсном режиме работы).

Словарь терминов

1. Апертура – отверстие в защитном корпусе лазера, через которое испускается лазерное излучение.

2. Блокировка и сигнализация – системы, информирующие о работе лазерного изделия, режиме его работы и препятствующие доступу персонала в лазерно опасную зону и к электрическим цепям высокого напряжения.

3. Гауссово распределение интенсивности – распределение интенсивности в поперечном сечении пучка лазерного излучения, которое можно аппроксимировать функцией Гаусса.

4. Диаметр пучка лазерного излучения – диаметр поперечного сечения пучка лазерного излучения, внутри которого проходит заданная доля энергии или мощности.

5. Длительность воздействия (облучения) – длительность импульса, серии импульсов или непрерывного излучения, попадающего на тело человека.

6. Диффузно отраженное лазерное излучение – излучение, отраженное от поверхности, соизмеримой с длиной волны, по всевозможным направлениям в пределах полусферы.

7. Дозиметрия лазерного излучения – комплекс методов для определения значений параметров лазерного излучения в заданной точке пространства с целью выявления степени опасности и вредности для организма человека.

8. Закрытые лазерные установки – установки с экранированным пучком лазерного излучения, при работе которых исключено воздействие на человека лазерного излучения любых уровней.

9. Защитный корпус (кожух) – часть лазерного изделия, предназначенная для предотвращения доступа человека к лазерному излучению и высокому электрическому напряжению.

10. Зеркальное отражение – излучение отражается от поверхности под углом, равным углу падения.

11. Импульсное лазерное излучение – излучение в виде кратковременных импульсов с интервалами по времени между ними значительно большими, чем длительность каждого импульса.

12. Коллимированное лазерное излучение – излучение, заключенное в ограниченном телесном угле.

13. Конфокальный параметр (релеевская длина) – расстояние от перетяжки пучка лазерного излучения, на котором сечение пучка увеличивается в $\sqrt{2}$ раза.

14. Коэффициент пропускания – отношение потока излучения, прошедшего сквозь тело, к потоку излучения, упавшего на него.

15. Лазер – генератор электромагнитного излучения, основанный на использовании эффекта вынужденного излучения.

16. Лазерное изделие – лазер и установка, включающая лазер и другие технические компоненты, обеспечивающие ее целевое назначение.

17. Лазерная безопасность – совокупность технических, санитарно-гигиенических, лечебно-профилактических и организационных мероприятий, обеспечивающих безопасные и безвредные условия труда персонала при использовании лазерных изделий.

18. Лазерно опасная зона – часть пространства, в пределах которого уровень лазерного излучения превышает предельно допустимый.

19. Лазерно безопасное расстояние для глаз – наименьшее расстояние, на котором энергетическая экспозиция (энергия) не превышает предельно допустимый уровень для глаза.

20. Модовое распределение интенсивности – наличие неоднородностей интенсивности в сечении пучка излучения. Рассматривают модовое распределение интенсивности по поперечному и продольному сечению пучка.

21. Неколлимированное лазерное излучение – излучение, распространяющееся в нескольких направлениях.

22. Непрерывное лазерное излучение – излучение, существующее в любой момент времени наблюдения.

23. Ограничивающая апертура – круглая диафрагма, ограничивающая поверхность, по которой производится усреднение энергетической освещённости или энергетической экспозиции.

24. Одномодовое распределение интенсивности – наличие единственного максимума интенсивности в поперечном сечении пучка излучения.

25. Однократное воздействие лазерного излучения – воздействие излучения с длительностью, не превышающей $3 \cdot 10^4$ с.

26. Оптическая плотность – десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания.

27. Открытые лазерные установки – установки, конструкция которых допускает выход излучения в рабочую зону.

28. Перетяжка пучка лазерного излучения – плоскость поперечного сечения пучка, при которой сечение имеет наименьший размер.

29. Предельно допустимые уровни лазерного излучения при однократном воздействии – уровни излучения, при воздействии которых существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме работающего. То же – для предельной однократной суточной дозы излучения в диапазоне 180 – 380 нм.

30. Предельно допустимые уровни лазерного излучения при хроническом воздействии – уровни излучения, воздействие которых при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводит к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья работающего в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений. То же – для предельной суточной дозы излучения в диапазоне 180 – 380 нм.

31. Предельный угол – соответствует угловому размеру источника, при котором последний может рассматриваться как точечный.

32. Преобразование пучка излучения – изменение пространственных параметров пучка при его взаимодействии с поверхностью или средой.

33. Пространственная расходимость – плоский или телесный угол на заданном уровне интенсивности, который устанавливается по отношению к её максимальному значению.

34. Протяженный источник – источник лазерного излучения, угловой размер которого больше предельного угла.

35. Рабочая зона – пространство высотой до 2-х метров над уровнем пола или площадки, на которой находятся рабочие места постоянного или временного пребывания работающих.

36. Равномерное распределение интенсивности – интенсивность одинакова по всему поперечному сечению пучка излучения.

37. Рассеяние – изменение пространственного распределения пучка лучей, отклоняемых во множестве направлений поверхностью или средой без изменения длины волны излучения.

38. Рассеяние вперёд – пространственное распределение пучка лучей во множестве направлений, но в основном приблизительно в направлении распространения исходного пучка.

39. Рассеяние назад – пространственное распределение пучка лучей во множестве направлений, но в основном приблизительно в направлении, обратном распространению исходного пучка.

40. Расходимость лазерного излучения – плоский или телесный угол, характеризующий ширину диаграммы направленности лазерного излучения в дальней зоне по заданному уровню углового распределения энергии или мощности лазерного излучения, определяемому по отношению к его максимальному значению.

41. Точный источник – источник лазерного излучения, диаметр которого много меньше пути распространения пучка.

42. Угловой размер – телесный угол между линиями, соединяющими диаметрально противоположные точки наблюдаемого источника излучения и глаз наблюдателя (системы наблюдения).

43. Хроническое воздействие лазерного излучения – систематически повторяющееся воздействие, которому подвергаются люди, профессионально связанные с лазерным излучением.

44. Частота следования импульсов лазерного излучения – отношение числа импульсов лазерного излучения к единичному интервалу времени наблюдения.

45. Энергетическая освещенность (облученность) – отношение потока излучения, падающего на малый участок поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади этого участка.

46. Энергетическая расходимость – телесный угол, который включает в себе заданную долю энергии или мощности лазерного излучения.

47. Энергетическая экспозиция – физическая величина, определяемая интегралом облученности по времени.

48. Юстировка лазера – совокупность операций по регулировке оптических элементов лазерного изделия для получения требуемых пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения.

1.1. Определение параметров лазерного пучка

1.1.1. Общие характеристики воздействия

При определении безопасности учитываются параметры лазерного излучения и режим работы лазера, которые зависят от конструкции излучателя и от дополнительных устройств. Режим работы лазера определяется характером генерации излучения. *Непрерывное излучение* имеет интенсивность, относительно постоянную в любой момент времени.

Импульсное излучение представляет собой серию импульсов, длительность которых значительно меньше, чем длительность интервалов между ними. Здесь при определении условий безопасности рассматривают случаи воздействия отдельного импульса и серии импульсов. В случае серии импульсов играют роль длительность отдельного импульса τ_u в серии и частота ν следования импульсов.

Параметры пучка лазерного излучения определяются взаимодействием с оптическими элементами и с материалами. *Коллимированное лазерное излучение* заключено в ограниченном телесном угле. Соответственно коллимированный пучок может быть сходящимся или расходящимся, плоскость наименьшего сечения называют *перетяжкой пучка*. Различают прямой пучок, распространяющийся по заданному оптическому пути, и *зеркально отражённый пучок*, то есть отражённый под углом, равным углу падения. Отражённое лазерное излучение может распространиться далеко за пределы рабочей зоны, почти не теряя мощности. Несмотря на меры защиты, такая ситуация может возникнуть за счёт отражения от оптических элементов оборудования или посторонних предметов. На производстве используется лазерное излучение высокой мощности, поэтому прямое и отражённое лазерное излучение почти всегда опасно и для глаз, и для кожи.

Неколлимированное лазерное излучение возникает в случае рассеяния или диффузионного отражения. *Рассеянное лазерное излучение* отклоняется на поверхности или внутри среды таким образом, что изменяется пространственное распределение – излучение рассеивается сразу во множестве направлений (без изменения длины волны излучения). И если излучение отражается от шероховатой поверхности, неровности на которой соизмеримы с длиной волны, то это излучение будет равномерно направлено по всем направлениям в пределах полусферы. В этом случае имеет место *диффузно отражённое лазерное излучение*. Если излучение имеет высокую мощность, то оно представляет опасность даже в рассеянном виде, что наблюдается, например, при резке и сварке.

Коллимированный пучок обычно наблюдается на выходе излучателя, такой пучок называют *точечным источником* лазерного излучения. Неколлимированный пучок называют *протяжённым источником* излучения, если

угловой размер источника больше некоторого предельного угла (разного в каждом случае). Существует следующее выражение для определения видимого *углового размера* α источника излучения, рад:

$$\alpha = \frac{2}{l} \sqrt{r^2 \cos \Omega}, \quad (1.1)$$

где r – радиус поперечного сечения пучка излучения, м; l – расстояние от точки наблюдения до источника, м; Ω – угол между нормалью к поверхности источника и направлением визирования, рад.

В соответствии с СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» условия облучения определяются систематичностью действия излучения на человека. *Однократное воздействие* соответствует случайному воздействию излучения с длительностью, не превышающей $3 \cdot 10^4$ с. Такое воздействие считается безопасным, если существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме работающего.

Хроническое воздействие отвечает систематическому повторению воздействия лазерного излучения. На практике хроническое облучение получает только профессиональный персонал при ежедневной круглогодичной работе с лазерами. В этом случае воздействие считается безопасным, если при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводит к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья работающего в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

1.1.2. Энергетические и пространственные параметры лазерного пучка

Лазерный излучатель является источником пучка фотонов, и каждый излученный фотон обладает одинаковой энергией. В резонаторе лазера формируются особые конфигурации электромагнитного поля (моды), поэтому количество фотонов в разных частях пучка на практике неоднородно, следовательно, распределение интенсивности в поперечном сечении пучка неравномерно, энергия на разных участках неодинакова. Распределение интенсивности учитывают при определении таких параметров как диаметр и расходимость лазерного пучка.

В зависимости от распределения интенсивности выделяют три типа пучков. При *одномодовом режиме* существует единственный максимум интенсивности в сечении пучка. Для таких пучков распределение интенсивности с хорошей точностью можно аппроксимировать функцией Гаусса, поэтому их называют *гауссовы пучки*. Известно большое число промышленно выпускаемых лазеров, работающих в одномодовом режиме.

При *многомодовом режиме* интенсивность распределена в сечении пучка случайным образом. Множество пиков интенсивности характерно, например, для импульсных лазеров.

При *равномерном режиме* интенсивность лазерного излучения одинакова по всему сечению пучка.

Распределение интенсивности по сечению лазерного пучка является определяющим для многих других параметров излучения, например, для расходимости θ и диаметра d . При расчёте условий безопасности мы будем рассматривать только пучки с гауссовым и равномерным распределением интенсивности. В многомодовых пучках распределение интенсивности будет разным в каждом случае, поэтому они сложны для описания.

Рассмотрим пространственные параметры для случая **гауссова пучка**. Под расходимостью лазерного излучения могут понимать разные характеристики. *Пространственная расходимость* определяется плоским или телесным углом на заданном уровне интенсивности, который устанавливается по отношению к её максимальному значению. Ещё различают *энергетическую расходимость*, определяемую по заданной доле энергии или мощности, заключенной внутри конуса расходимости. *Диаметр лазерного пучка*, связанный линейно с расходимостью, определяется аналогично как диаметр поперечного сечения пучка лазерного излучения, внутри которого проходит заданная доля энергии или мощности. Проще говоря, считают, что если интенсивность излучения на некоторых участках сечения пучка меньше заданного уровня, то эти части пучка не могут оказать заметное действие на материал, и потому не будут учитываться.

Обозначим уровень ограничения пространственной расходимости через m , пространственную расходимость – θ_m , рад; соответствующий радиус сечения лазерного пучка – r_m , м. Уровень ограничения энергетической расходимости обозначим через n , энергетическую расходимость – θ_n , рад; соответствующий радиус сечения пучка – r_n , м. Наиболее употребительными значениями уровней ограничения m в настоящее время являются: 0,5; $1/e$; $1/e^2$ (ограничение по интенсивности), а уровня ограничения n – 0,7 и 0,9 (ограничение по доле энергии).

Для гауссовых пучков существует простая связь уровней ограничения m и n :

$$n = 1 - m.$$

Также нетрудно увидеть, что:

$$\theta_{m1} K_1 = \theta_{m2} K_2.$$

Коэффициент приведения K можно определить следующим образом:

$$K = 1/\sqrt{-0,5 \ln m}.$$

В Приложении 1 даны значения расходимости θ и диаметра d на выходе лазера. Но в расчётах будем применять только те значения расходимости и радиуса пучка, которые приведены к уровню ограничения пространственной расходимости θ_m равному $1/e^2$. Для приведения к уровню ограничения $1/e^2$ следует использовать данные из табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1. Приведение параметров гауссова пучка лазерного излучения к уровню ограничения пространственной расходимости $1/e^2$

Уровень ограничения пространственной расходимости m	Уровень ограничения энергетической расходимости n	Коэффициент приведения K	Формулы приведения
0,1	0,9	0,932	$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_m \cdot K \\ r &= r_m \cdot K \end{aligned} \right\}$ $\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_n \cdot K \\ r &= r_n \cdot K \end{aligned} \right\}$
$1/e^2$	0,865	1,000	
0,2	0,8	1,114	
0,3	0,7	1,288	
$1/e$	0,632	1,414	
0,4	0,6	1,478	
0,5	0,5	1,698	

Теперь, когда описаны общие характеристики воздействия и уровни ограничения параметров, можно привести выражения для вычисления энергетических и пространственных параметров лазерного пучка. Все формулы и соотношения, которые приведены здесь и далее, даны для лазеров с непрерывным излучением. Для импульсного режима работы лазеров следует в формулах мощность непрерывного излучения P заменить средней мощностью P_{cp} импульсного излучения. Или можно мощность непрерывного излучения P заменить энергией импульсного излучения W , но тогда надо также энергетическую освещенность E заменить энергетической экспозицией H .

Распределение энергетической освещенности в сечении гауссова пучка лазера определяется следующей формулой:

$$E = -\frac{2P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2h^2}{r^2}\right), \quad (1.2)$$

где E – энергетическая освещенность в данной точке сечения пучка, Вт/м²; P – мощность непрерывного излучения, Вт; r – радиус сечения пучка при ограничении расходимости по уровню $1/e^2$, м; h – расстояние от оси пучка до данной точки, м.

С точки зрения безопасности, чаще всего достаточно рассчитать максимальную энергетическую освещенность (на оси пучка) E_{\max} :

$$E_{\max} = \frac{2P}{\pi r^2}. \quad (1.3)$$

Радиус сечения r пучка по мере распространения от выходного отверстия лазера изменяется согласно следующей формуле:

$$r = 0,5 \theta \sqrt{d_n^2 + L^2}, \quad (1.4)$$

где θ – расходимость пучка при ограничении расходимости по уровню $1/e^2$, рад; $2d_l$ – конфокальный параметр, м; L – расстояние от мнимой перетяжки внутри резонатора лазера до данного сечения пучка, которое для простоты будем считать как расстояние от центра лазера до данного сечения пучка, м.

Конфокальный параметр (релеевская длина) $2d_l$ это одна из основных характеристик гауссова пучка. Конфокальный параметр исходного пучка можно рассчитать по паспортным данным лазера:

$$2d_l = \frac{8\lambda}{\pi\theta^2}, \quad (1.5)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, м.

При равномерном распределении интенсивности не могут быть заданы ограничивающие уровни. Для **равномерного пучка** (и при инженерных расчётах) радиус сечения r пучка удобно найти по приближенной формуле:

$$r = r_0 + 0,5\theta l, \quad (1.6)$$

где $r_0 = 0,5 d_0$ – начальный диаметр пучка (на выходе из лазера), м; l – расстояние от выходного зеркала лазера, м.

Для нахождения энергетической освещенности равномерного пучка используется соотношение:

$$E_{рав} = \frac{P}{\pi r^2}, \quad (1.7)$$

где r определяется по формуле (1.6).

1.1.3. Параметры лазерного пучка, преобразованного оптической системой

Лазерные технологические установки обычно снабжены оптической системой. Плоские зеркала и призмы направляют лазерное излучение, сферические зеркала и линзы позволяют изменить диаметр и расходимость пучка излучения. Расчёт параметров безопасности для пучка, прошедшего оптическую систему, аналогичен расчёту для прямого гауссова пучка: при этом за исходные данные принимаются параметры преобразованного пучка с учетом ослабления мощности на оптических элементах. Если известны параметры оптической системы (фокальные характеристики элементов, потери на отражение) и исходного пучка лазера (размер и расходимость), то параметры преобразованного пучка рассчитываются. В многокомпонентной оптической системе последовательно вычисляются параметры пучка после преобразования каждым элементом оптической системы.

На рис. 1.1 показаны основные параметры гауссова пучка до и после преобразования на оптическом элементе. Лазерный пучок преобразуется и приобретает новые пространственные параметры. Показанное преобразование пучка носит аналогичный характер при разных случаях передачи пучка оптическими элементами:

- при фокусировке пучка собирающей (положительной) линзой (рис. 1.1);
- при фокусировке пучка вогнутой зеркальной поверхностью (рис. 1.2, а);
- при расфокусировке пучка рассеивающей (отрицательной) линзой;
- при расфокусировке пучка выпуклой зеркальной поверхностью (рис. 1.2, б).

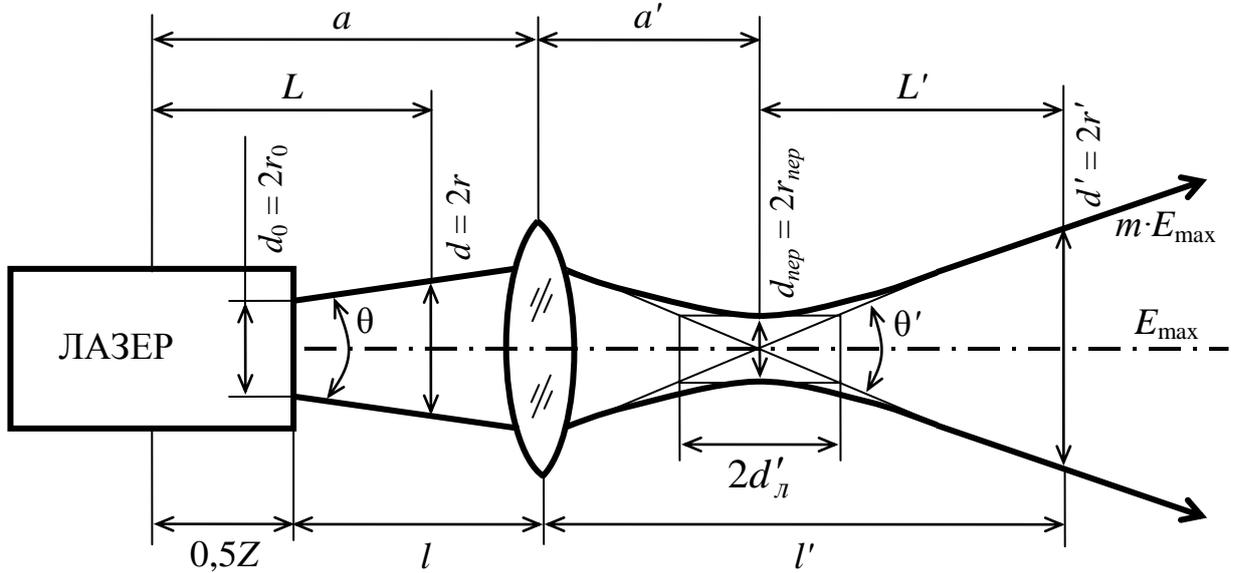


Рис. 1.1. Основные параметры гауссова пучка до и после преобразования на оптическом элементе; пучок ограничен по уровню m

При передаче пучка излучения одинарным оптическим элементом конфокальный параметр $2d'_l$, расходимость θ' и мощность P' преобразованного гауссова пучка определяются по следующим формулам:

$$P' = P \cdot \eta, \quad (1.8)$$

$$2d'_l = \frac{2(f')^2 d_l}{(f' + a)^2 + d_l^2}, \quad (1.9)$$

$$\theta' = \theta \sqrt{d'_l / d_l}, \quad (1.10)$$

где $2d_l$ – конфокальный параметр исходного пучка лазера, м; f' – фокусное расстояние оптического элемента (сферического зеркала, линзы, объектива), м; a – расстояние от центра лазера до оптического элемента, м; η – коэффициент отражения зеркальной поверхности (или коэффициент пропускания линзы, объектива, призмы, полупрозрачной пластины) для длины волны λ лазерного излучения.

Весьма типичным случаем является отражение лазерного пучка от первой поверхности оптической системы (линзы, объектива, призмы и т.п.), а иногда опасные отражения могут быть и от последующих поверхностей оптической системы. Как изменяется форма лазерного пучка при отражении от сферической поверхности показано на рис. 1.2.

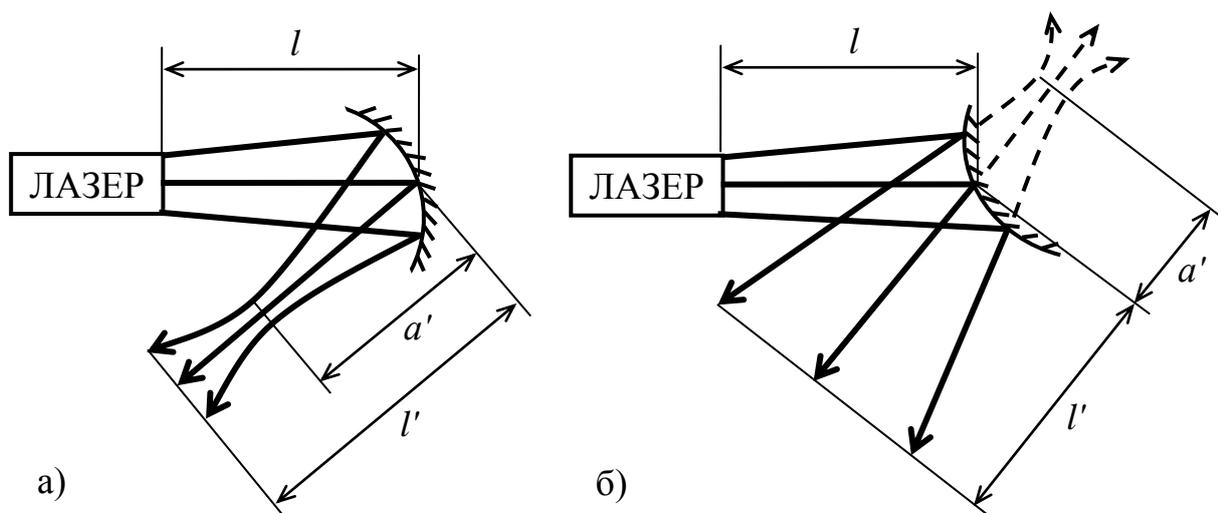


Рис. 1.2. Отражение гауссова пучка лазерного излучения от вогнутой (а) и выпуклой (б) сферических зеркальных поверхностей

Можно определить фокусное расстояние f' сферической зеркальной поверхности радиуса $r_{сф}$:

$$\text{- для вогнутой: } f' = 0,5 r_{сф}; \quad (1.11)$$

$$\text{- для выпуклой: } f' = -0,5 r_{сф}. \quad (1.12)$$

При расчёте многокомпонентной оптической системы нужно будет знать расстояние от отражающей поверхности до перетяжки преобразованного пучка, оно определяется согласно формуле:

$$a' = f' - \frac{(f')^2(f' + a)}{(f' + a)^2 + d_n^2}. \quad (1.13)$$

Радиус преобразованного гауссова пучка r' находится также как при облучении прямым гауссовым пучком согласно формуле (1.4), но при этом вместо L используется расстояние L' от перетяжки преобразованного пучка до данного сечения.

Более точное значение коэффициента отражения η рассчитывается из следующего соотношения:

$$\eta = (n_{np} - 1/n_{np} + 1)^2, \quad (1.14)$$

где n_{np} – коэффициент преломления материала оптического элемента для данной длины волны излучения лазера.

Радиус сечения **преобразованного равномерного пучка** при отражении от зеркальной поверхности вычисляется следующим образом:

$$\text{- от вогнутой при } l' > f': r = (d_0 + \theta l)(l' - 0,5 r_{сф}) / r_{сф}; \quad (1.15)$$

$$\text{- от вогнутой при } l' \text{ близком к } f': r = 0,25 \theta r_{сф}; \quad (1.16)$$

$$\text{- от выпуклой: } r = (d_0 + \theta l)(l' + 0,5 r_{сф}) / r_{сф}. \quad (1.17)$$

где d_0 – диаметр пучка на выходе лазера, м; l – расстояние от выходного зеркала лазера до отражающей поверхности, м; l' – расстояние от отражающей поверхности до данной точки, м; $r_{сф}$ – радиус сферической отражающей поверхности, м.

Расходимость отражённого пучка будет равна:

$$\theta' = 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{d_0 + \theta l}{r_{сф}} \right]. \quad (1.18)$$

Энергетическая освещенность на роговице или коже определяется как:

$$E = \frac{P \eta \tau_{a1} \tau_{a2}}{\pi r^2}, \quad (1.19)$$

где τ_{a1} и τ_{a2} – коэффициенты пропускания среды на пути до отражающего сферического зеркала и после него.

1.2. Параметры лазерного излучения при рассеянии в среде

При прохождении пучка лазерного излучения через атмосферу или воду часть его энергии поглощается, а часть рассеивается по различным направлениям. Распределение рассеянной энергии характеризуется индикатрисой рассеяния $\beta(\varphi)$, которую можно определить следующими способами:

$$\beta(\varphi) = I_e(\varphi) / I_{e\text{рав}} \quad (1.20)$$

$$\text{или } \beta(\varphi) = \mu_p(\varphi) / \mu_p, \quad (1.21)$$

где $I_e(\varphi)$ – сила света рассеянного излучения в направлении под углом φ к оси пучка, Вт/м²; $I_{e\text{рав}}$ – сила света при равномерном рассеянии излучения, Вт/м²; $\mu_p(\varphi)$ – показатель рассеяния излучения в направлении под углом φ к оси пучка; μ_p – показатель аэрозольного рассеяния излучения в объёме.

Процессы рассеяния излучения в атмосфере очень сложны и зависят от большого числа метеорологических факторов, которые достаточно трудно учесть при расчётах. В океане процессы рассеяния излучения в ещё большей степени зависят от состава и солёности вод, наличия живых организмов и т.п. Рассмотрим здесь наиболее важные практические случаи – рассеяние вперёд и назад (системы связи и локации, дальномерные исследования), причем ограничимся условиями относительно прозрачной атмосферы и относительно чистого океана при однократном рассеянии.

При однократном **рассеянии вперёд** для излучения существует следующая зависимость:

$$P = P_0 \delta e^{-\delta} \beta(0) w / 2\pi, \quad (1.22)$$

где P_0 – мощность излучения, падающего на рассеивающую среду, Вт; $\beta(0)$ – значение индикатрисы рассеяния в направлении под углом 0° к оси пучка; w – телесный угол распространяющегося пучка, стеррад; δ – оптическая толщина среды, м.

Оптическую толщину среды δ можно найти из выражения:

$$\delta = \mu_p B, \quad (1.23)$$

где B – геометрическая длина рассеивающего слоя (длина зондируемой трассы), м.

Учет яркости фона **рассеянного назад** излучения особенно важен при лазерной локации рассеивающей среды. Можно определить поток рассеянного излучения, попадающего на приёмный объектив (на наблюдателя), при следующих упрощениях: расстояния от источника излучения и приемника до рассеивающего объема равны; индикатриса рассеяния для углов, близких к 180° , не зависит от угла рассеяния; диаметр приемного объектива много больше диаметра лазерного пучка; углы расходимости пучка и поля зрения приемника малы. Если не учитывать потери в приемной оптической системе, то тогда будет наблюдаться следующая зависимость:

$$P = 2P_0 Q \beta(\pi) \mu_p^2 [\Phi(x_0) - \Phi(x_1)], \quad (1.24)$$

где $\beta(\pi)$ – индикатриса рассеяния для углов, близких к 180° ; Q – площадь приемной оптической системы (площадь облучаемого участка на теле человека), m^2 ; x_0 и x_1 – вспомогательные величины, подставляемые в интегральную показательную функцию второго порядка $\Phi(x)$.

Найти x_0 и x_1 можно следующим образом:

$$x_0 = 2\mu_p b, \quad x_1 = 2\mu_p B, \quad (1.25)$$

где b – минимальное расстояние до рассеивающего объема, м (для типичной схемы расположения приемника и передатчика в лазерном локаторе b обычно равно 4 – 5 м).

Интегральная показательная функция второго порядка $\Phi(x)$ выражается следующим образом:

$$\Phi(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x^2} dx.$$

Также можно найти значение этой функции, выразив её через интегральную показательную функцию $E_i(x)$ в таком виде:

$$\Phi(x) = \frac{e^{-x}}{2x} - \frac{1}{2} \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx, \quad \text{где } E_i(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx.$$

Значения $E_i(x)$ и $\Phi(x)$ можно найти при помощи справочника. Рассчитанные значения $E_i(x)$ и $\Phi(x)$ при некоторых значениях аргумента x даны в Приложении 3.

Характеристики атмосферы и океанской воды для расчёта параметров рассеянного лазерного излучения приведены в табл. 1.2. – 1.5.

Т а б л и ц а 1.2. Индикатриса рассеяния $\beta(\varphi)$ атмосферы на различных углах падения излучения φ

Угол φ , град	0°	10°	20°	160°	170°	180°
$\beta(\varphi)$, безразмерная	4,72	4,50	4,00	0,48	0,48	0,48

Т а б л и ц а 1.3. Показатели аэрозольного рассеяния μ_p излучения различных длин волн λ в атмосфере при различных дальностях видимости S_M

λ , мкм	μ_p , км ⁻¹	
	$S_M = 5$ км	$S_M = 10$ км
0,34	1,24	0,69
0,53	0,61	0,41
0,633	0,68	0,33
0,647	0,65	0,32
0,6943	0,62	0,29
1,064	0,41	0,17
1,57	0,35	0,16
10,6	0,04	0,009

Т а б л и ц а 1.5. Значения показателя рассеяния $\mu_p(\varphi)$ на различных углах φ падения излучения для чистой океанской воды ($\lambda = 546$ нм, 20 °С, солёность 35 промиле)

Угол φ , град	0° – 10°; 170° – 180°	20°; 160°	30°; 150°
$\mu_p(\varphi)$, м ⁻¹	2,0	1,9	1,8

Т а б л и ц а 1.4. Показатели молекулярного рассеяния μ_p для различных длин волн λ излучения в океане (получено в Тихом океане)

λ , мкм	0,473	0,511	0,52	0,532	0,546	0,568	0,601	0,649
μ_p , м ⁻¹	0,16	0,145	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10

1.3. Расчёт предельно допустимых уровней лазерного излучения при воздействии на глаза и кожу

В соответствии с СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров» устанавливаются предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения в диапазоне длин волн 180 – 10⁵ нм при различных условиях воздействия на глаза и кожу человека.

Время и частота воздействия определяют количество энергии, переданной биоткани. Поэтому ПДУ лазерного излучения устанавливаются по-разному для различных условий облучения:

- однократное либо хроническое воздействие,
- непрерывный либо импульсный режим работы лазера.

При нормировании ПДУ лазерного излучения также играют роль параметры источника излучения:

- коллимированное (пучок) или неколлимированное (рассеяние) излучение;
- точечный или протяженный источник.

Излучение различных диапазонов по-разному взаимодействует с биотканью. При оценке ПДУ рассматривают три диапазона длин волн λ лазерного излучения:

- диапазон I: $180 < \lambda \leq 380$ нм;
- диапазон II: $380 < \lambda \leq 1400$ нм;
- диапазон III: $1400 < \lambda \leq 10^5$ нм.

ПДУ лазерного излучения определяется для таких типов биоткани как глаза и кожа.

Нормируемыми параметрами лазерного излучения являются энергетическая экспозиция H и энергетическая освещенность E , а также связанные с ними энергия W и мощность P излучения. ПДУ этих параметров ($H_{ндy}$, $E_{ндy}$, $W_{ндy}$, $P_{ндy}$) могут использоваться независимо в соответствии с решаемой задачей. Данные энергетические параметры связаны соотношениями:

$$H = E \cdot t; \quad H = \frac{W}{\pi r^2}; \quad E = \frac{P}{\pi r^2}. \quad (1.26)$$

В случае неравномерного распределения интенсивности по случайному закону производится усреднение ПДУ этих параметров по ограничивающей апертуре. *Апертура* в нашем случае это отверстие в защитном корпусе лазера или диафрагма, через которую проходит лазерное излучение. При воздействии лазерного излучения на кожу усреднение производится по ограничивающей апертуре диаметром $d_a = 1,1 \cdot 10^{-3}$ м. При воздействии лазерного излучения на глаза в диапазонах I и III усреднение производится также по ограничивающей апертуре диаметром $d_a = 1,1 \cdot 10^{-3}$ м, а в диапазоне II – по апертуре диаметром $d_a = 7 \cdot 10^{-3}$ м. Но мы не будем проводить расчёт для случая неравномерного распределения интенсивности, ограничимся определением условий безопасности для гауссовых и равномерных пучков.

Когда на коже или роговице глаза пучок излучения имеет размер сечения, который равен или меньше диаметра ограничивающей апертуры d_a , тогда максимальное значение энергетической освещенности E и энергетической экспозиции H не должно превышать значений $E_{ндy}$ и $H_{ндy}$ для уже описанных случаев.

Если есть одновременное воздействие лазерного излучения нескольких различных источников, то ПДУ для каждого диапазона и условий облучения устанавливаются независимо.

1.3.1. Предельно допустимые уровни в диапазоне 180 – 380 нм

ПДУ при однократном облучении глаз и кожи

Соотношения для определения $H_{ндy}$, $E_{ндy}$ и $W_{ндy}$, $P_{ндy}$ коллимированного или рассеянного лазерного излучения при однократном воздействии на глаза и кожу одиночных импульсов в диапазоне I ($180 < \lambda \leq 380$ нм) приведены в табл. 1.6.

Для определения ПДУ лазерного излучения в диапазоне I при воздействии на глаза и кожу **серий импульсов** необходимо руководствоваться следующими требованиями:

а) Энергетическая экспозиция H_i или энергетическая освещенность E_i поверхностей роговицы и кожи при воздействии любого отдельного импульса из рассматриваемой последовательности не должны превышать предельно допустимых значений для одиночных импульсов и $E_{n\text{д}y}(\tau_u)$, определяемых по табл. 1.6. Если временной интервал между облучениями отдельными импульсами меньше 600 с, значения $H_{n\text{д}y}$ ($E_{n\text{д}y}$) и $W_{n\text{д}y}$ ($P_{n\text{д}y}$) определяются согласно рекомендациям раздела 1.3.3 по формулам (1.33).

б) Так как воздействие на биологические ткани излучения в диапазоне $180 < \lambda \leq 380$ нм обладает свойством аддитивности (суммирования), при условии выполнения предыдущего требования однократная суточная доза $H^\Sigma(3 \cdot 10^4)$ не должна превышать значений, определяемых в табл. 1.7:

$$H^\Sigma(3 \cdot 10^4) = \sum_{i=1}^M H_i(\tau_u) \leq H_{n\text{д}y}^\Sigma(3 \cdot 10^4), \quad (1.27)$$

где M – количество импульсов в серии.

ПДУ при хроническом облучении глаз и кожи

Для определения предельно допустимых значений $H_{n\text{д}y}$ и $E_{n\text{д}y}$, $W_{n\text{д}y}$ и $P_{n\text{д}y}$, а также предельных суточных доз $H_{n\text{д}y}^\Sigma(3 \cdot 10^4)$ при хроническом облучении глаз и кожи коллимированным или рассеянным лазерным излучением в диапазоне длин волн I необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие предельные значения для однократного облучения.

Т а б л и ц а 1.6. Соотношения для определения ПДУ лазерного излучения при однократном воздействии в диапазоне I

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$H_{n\text{д}y}$, Дж/м ² ; $E_{n\text{д}y}$, Вт/м ²
$180 < \lambda \leq 380$	$t \leq 10^{-9}$	$H_{n\text{д}y} = 25 \cdot 10^7 \sqrt[3]{t^2}$
$180 < \lambda \leq 302,5$	$10^{-9} < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{n\text{д}y} = 25$; $E_{n\text{д}y} = 25/t$
$302,5 < \lambda \leq 315$	$10^{-9} < t \leq 10^{-15} \cdot 10^{0,8(\lambda-295)}$	$H_{n\text{д}y} = 4,4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{t}$
	$10^{-15} \cdot 10^{0,8(\lambda-295)} < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{n\text{д}y} = 0,8 \cdot 10^{0,2(\lambda-295)}$; $E_{n\text{д}y} = 0,8 \cdot 10^{0,2(\lambda-295)}/t$
$315 < \lambda \leq 380$	$10^{-9} < t \leq 10$	$H_{n\text{д}y} = 4,4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{t}$
	$10 < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{n\text{д}y} = 8 \cdot 10^3$; $E_{n\text{д}y} = 8 \cdot 10^3/t$

Во всех случаях: $W_{n\text{д}y} = H_{n\text{д}y} \cdot 10^{-6}$; $P_{n\text{д}y} = E_{n\text{д}y} \cdot 10^{-6}$, λ (нм)

Т а б л и ц а 1.7. **Предельные однократные суточные дозы $H_{нды}^{\Sigma}$ ($3 \cdot 10^4$) лазерного излучения в диапазоне I**

Спектральный интервал λ , нм	$H_{нды}^{\Sigma}$ ($3 \cdot 10^4$), Дж/м ²
$180 < \lambda \leq 302,5$	25
$302,5 < \lambda \leq 315$	$0,8 \cdot 10^{0,2(\lambda-295)}$
305	80
307,5	250
310	$8 \cdot 10^2$
312,5	$2,5 \cdot 10^3$
315	$8 \cdot 10^3$
$315 < \lambda \leq 380$	$8 \cdot 10^3$

1.3.2. Предельно допустимые уровни в диапазоне 380 – 1400 нм

ПДУ при однократном облучении глаз

Соотношения для определения $W_{нды}$ и $P_{нды}$ **коллимированного излучения** при воздействии длительностью менее 1 с на глаза в диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм) приведены соответственно в табл. 1.8 и 1.9.

Если источником **неколлимированного излучения** является протяженный объект, то предельно допустимые значения энергии $W_{нды}^{\alpha}$ и мощности $P_{нды}^{\alpha}$ зависят от видимого углового размера α (см. раздел 1.1.1) этого источника и находятся умножением значений $W_{нды}$ и $P_{нды}$ для коллимированного излучения на поправочный коэффициент C :

$$W_{нды}^{\alpha} = W_{нды} \cdot C; P_{нды}^{\alpha} = P_{нды} \cdot C.$$

Аналитические соотношения для расчёта величины C даны в табл. 1.10. Причем, если $\alpha \leq \alpha_{пред}$, то величина C принимается равной единице.

В случае воздействия **серии импульсов** поправочный коэффициент C определяется для длительности отдельного импульса в серии.

ПДУ при воздействии на глаза **серий импульсов коллимированного излучения** в спектральном диапазоне II ($380 < \lambda \leq 1400$ нм) установлены для случаев, когда длительность отдельного импульса в серии τ_u не превышает 0,25 с, а частота ν следования импульсов в серии больше 0,005 Гц (интервал между отдельными импульсами в серии меньше 200 с).

Если $\nu \leq 0,005$ Гц, воздействие на глаза отдельных импульсов излучения считается независимым. При этом нормируется значение энергии импульса, имеющего максимальную амплитуду:

Если $\nu > 0,005$ Гц, значение предельно допустимой энергии $W_{нды}^c(t)$ серии импульсов излучения длительностью t при воздействии на глаза равно меньшему из двух значений энергии W_1 и W_2 , которые определяются формулами:

$$W_1 = W_{нды}(t); W_2 = W_{нды}(\tau_u) \sqrt[3]{N/\xi}, \quad (1.28)$$

где $W_{ndy}(t)$ и $W_{ndy}(\tau_u)$ – предельно допустимые значения энергий одиночных импульсов длительностью t и τ_u , соответственно; N – количество импульсов в серии; ξ – определяется отношением максимальной энергии отдельного импульса в рассматриваемой серии к среднему значению:

$$\xi = \frac{W^c(\tau_u)_{\max}}{\overline{W}^c(\tau_u)}. \quad (1.29)$$

В тех случаях, когда ξ неизвестно, следует считать $\xi = 1$.

Предельно допустимое среднее значение энергии одного импульса из серии N импульсов будет равно:

$$\overline{W}_{ndy}^c(\tau_u) = \frac{W_{ndy}^c(t)}{N}. \quad (1.30)$$

Когда длительность серии импульсов превышает 1 с, целесообразно определять значение предельно допустимой средней мощности $\overline{P}_{ndy}^c(t)$, которая равна меньшему из двух значений мощности P_1 и P_2 , определяемых формулами:

$$P_1 = P_{ndy}(t); P_2 = \frac{W_{ndy}(\tau_u)}{t} \sqrt[3]{N/\xi}, \quad (1.31)$$

где $P_{ndy}(t)$ – значение предельно допустимой мощности импульса длительностью t для коллимированного излучения.

В случае серии импульсов неколлимированного излучения предельно допустимые значения энергии серии импульсов $W_{ndy}^{cd}(t)$, средней мощности излучения в серии $\overline{P}_{ndy}^{cd}(t)$, энергии одного импульса в серии $W_{ndy}^{ca}(\tau_u)$ определяются умножением предельных значений, заданных формулами (1.28) и (1.31), на поправочный коэффициент C , приведенный в табл. 1.10:

$$W_{ndy}^{cd}(t) = W_{ndy}^c(t) \cdot C, \quad \overline{P}_{ndy}^{cd}(t) = \overline{P}_{ndy}^c(t) \cdot C, \quad W_{ndy}^{ca}(\tau_u) = W_{ndy}^{ca}(\tau_u) \cdot C. \quad (1.32)$$

ПДУ при хроническом воздействии на глаза

Для определения предельно допустимых значений W_{ndy} и P_{ndy} коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне II при хроническом воздействии на глаза необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие предельные значения для однократного облучения.

ПДУ при однократном облучении кожи

Соотношения для определения значений H_{ndy} и E_{ndy} , а также W_{ndy} и P_{ndy} при однократном воздействии на кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне II приведены в табл. 1.11.

Предельно допустимые уровни при облучении кожи **сериями импульсов** определены в разделе 1.3.3.

ПДУ при хроническом облучении кожи

Для определения предельно допустимых значений H_{ndy} , E_{ndy} и W_{ndy} , P_{ndy} при хроническом воздействии на кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне II необходимо уменьшить в 10 раз соответствующие предельные значения для однократного облучения.

Т а б л и ц а 1.8. Соотношения для определения $W_{нды}$ лазерного излучения при однократном воздействии на глаза в диапазоне II

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$W_{нды}$, Дж
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2,3 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,3 \cdot 10^{-11} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-8}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$5,9 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6,5 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6,5 \cdot 10^{-11} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$1,2 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$t \leq 2,5 \cdot 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2,5 \cdot 10^{-10} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$3 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$7,4 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

Т а б л и ц а 1.9. Соотношения для определения $P_{нды}$ лазерного излучения при однократном воздействии на глаза в диапазоне II

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$P_{нды}$, Вт
$380 < \lambda \leq 500$	$1 < t \leq 5 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$5 \cdot 10^{-2} < t \leq 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-3} / t$
	$t > 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-7}$
$500 < \lambda \leq 600$	$1 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^{-5} / \sqrt[3]{t}$
	$2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$	$10^{-2} / t$
	$t > 10^4$	10^{-6}
$600 < \lambda \leq 700$	$1 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$	$2 \cdot 10^{-2} / t$
	$t > 10^4$	$2 \cdot 10^{-6}$
$700 < \lambda \leq 750$	$1 < t \leq 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
$750 < \lambda \leq 1000$	$1 < t \leq 10^4$	$3 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
$1000 < \lambda \leq 1400$	$1 < t \leq 10^4$	$7,4 \cdot 10^{-4} / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	$3,5 \cdot 10^{-5}$

Т а б л и ц а 1.10. Зависимость поправочного коэффициента C от видимого углового размера α протяженного источника лазерного излучения при различных длительностях t облучения

Длительность воздействия t , с	Поправочный коэффициент C	Предельный угол $\alpha_{пред}$, рад
$t \leq 10^{-9}$	$10^3 \cdot \alpha^2 + 1$	10^{-2}
$10^{-9} < t \leq 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^3 \cdot \alpha^2 + 1$	$6 \cdot 10^{-3}$
$10^{-7} < t \leq 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^3 \cdot \alpha^2 + 1$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
$10^{-5} < t \leq 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^4 \cdot \alpha^2 + 1$	$2 \cdot 10^{-3}$
$10^{-4} < t \leq 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^3 \cdot \alpha^2 + 1$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
$10^{-2} < t \leq 1$	$2,8 \cdot 10^3 \cdot \alpha^2 + 1$	$6 \cdot 10^{-3}$
$t > 1$	$10^3 \cdot \alpha^2 + 1$	10^{-2}

Т а б л и ц а 1.11. Соотношения для определения ПДУ лазерного излучения при однократном воздействии на кожу в спектральном диапазоне II

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	$H_{нды}$, Дж·м ⁻² ; $E_{нды}$, Вт·м ⁻²
$380 < \lambda \leq 500$	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{нды} = 2,5 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{нды} = 50 \cdot 10^3 \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{нды} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{нды} = 5 \cdot 10^2$
$500 < \lambda \leq 900$	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{нды} = 7 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 10^2$	$E_{нды} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{нды} = 5 \cdot 10^2$
$900 < \lambda \leq 1400$	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{нды} = 2 \cdot 10^4 \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{нды} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t^4}$
	$t > 10^2$	$E_{нды} = 5 \cdot 10^2$

$W_{нды} = H_{нды} \cdot 10^{-6}$; $P_{нды} = E_{нды} \cdot 10^{-6}$

1.3.3. Предельно допустимые уровни в диапазоне 1400 – 10⁵ нм

ПДУ при однократном облучении глаз и кожи

Соотношения для определения H_{ndy} , E_{ndy} и W_{ndy} , P_{ndy} при однократном воздействии на глаза и кожу импульсного или непрерывного коллимированного или рассеянного излучения в диапазоне III ($1400 < \lambda \leq 10^5$ нм) приведены в табл. 1.12.

Т а б л и ц а 1.12. Соотношения для определения ПДУ лазерного излучения при однократном воздействии в диапазоне III

Спектральный интервал λ , нм	Длительность воздействия t , с	H_{ndy} , Дж·м ⁻² ; E_{ndy} , Вт·м ⁻²
$1400 < \lambda \leq 1800$	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{ndy} = 2 \cdot 10^4 \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{ndy} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t^4}$
	$t > 10^2$	$E_{ndy} = 5 \cdot 10^2$
$1800 < \lambda \leq 2500$	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{ndy} = 7 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 10^2$	$E_{ndy} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ndy} = 5 \cdot 10^2$
$2500 < \lambda \leq 10^5$	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{ndy} = 2,5 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{ndy} = 5 \cdot 10^3 \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{ndy} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{ndy} = 5 \cdot 10^2$

$W_{ndy} = H_{ndy} \cdot 10^{-6}$; $P_{ndy} = E_{ndy} \cdot 10^{-6}$

Предельно допустимые уровни энергетической экспозиции и энергетической освещенности при воздействии на глаза и кожу **серий импульсов** лазерного излучения в диапазоне III устанавливаются для случаев, когда длительность отдельного импульса в серии не превышает 10 с, а частота ν следования импульсов превышает $1,7 \cdot 10^{-3}$ Гц (временной интервал между отдельными импульсами меньше 10 минут).

Значение предельно допустимой энергетической экспозиции серии импульсов $H_{ndy}^c(t)$ коллимированного или рассеянного лазерного излучения определяется как меньшее из двух значений H_1 и H_2 , заданных формулами:

$$H_1 = H_{ndy}(t); H_2 = H_{ndy}(\tau_u) \sqrt{N/\xi}. \quad (1.33)$$

Параметр ξ определен в разделе 1.3.2. при помощи формулы (1.29).

Среднее значение предельно допустимой энергетической экспозиции одного импульса из серии определяется делением $H_{ndy}^c(t)$ на число импульсов в серии N .

Если длительность серии импульсов превышает 1 с, целесообразно определять значение предельно допустимой средней энергетической освещенности $\bar{E}_{ndy}^c(t)$, которая будет равна меньшему из двух значений E_1 и E_2 , определяемых формулами:

$$E_1 = E_{ndy}(t); E_2 = \frac{H_{ndy}(\tau_u)}{t} \sqrt{N/\xi}. \quad (1.34)$$

Во всех случаях $W_{ndy}^c(t) = 10^{-6} \cdot H_{ndy}^c(t)$, $P_{ndy}^c(t) = 10^{-6} \cdot E_{ndy}(t)$.

Если $\nu \leq 1,7 \cdot 10^3$ Гц, то воздействие на глаза и кожу отдельных импульсов излучения считается независимым. При этом нормируется значение энергетической экспозиции для импульсов, имеющих максимальную амплитуду: $H^c(\tau_u)_{\max} \leq H_{ndy}^c(\tau_u)$.

ПДУ при хроническом воздействии на глаза и кожу

Для определения значений H_{ndy} , E_{ndy} и W_{ndy} , P_{ndy} при хроническом воздействии на глаза и кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в спектральном диапазоне III необходимо уменьшить в 5 раз соответствующие предельные значения для однократного облучения.

1.4. Границы лазерно опасной зоны

Лазерно опасная зона (ЛОЗ) это часть пространства, в пределах которого уровень лазерного излучения превышает предельно допустимый. Значение уровней лазерного облучения и положение границ ЛОЗ можно установить измерением уровней излучения в пространстве, окружающем лазерную установку, или расчётным путем. Предварительный расчёт также полезен при экспериментальном определении границ ЛОЗ, что позволяет уменьшить количество измерений. ЛОЗ могут создаваться прямым, отражённым (зеркально или диффузно) излучением от различных поверхностей и материалов, а также излучением, рассеянным в атмосфере.

Схематичный вид границ ЛОЗ для гауссова и равномерного пучков показан на рис. 1.3.

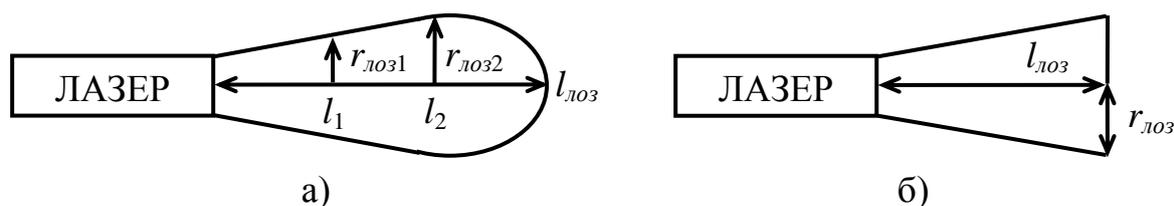


Рис. 1.3. Характер лазерно опасной зоны:

а) гауссов пучок;

б) пучок с равномерным распределением интенсивности

Энергетическая освещенность при **облучении гауссовым пучком** определяется по формуле (1.2). С учётом ослабления в атмосфере и параметры оптической системы прибора наблюдения формула для расчёта энергетической освещенности приобретёт следующий вид:

$$E = -\frac{2P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2h^2}{r^2}\right), \quad (1.35)$$

где τ_a – коэффициент пропускания атмосферы; τ_{np} – коэффициент пропускания телескопической системы прибора наблюдения; Γ_{np} – увеличение этой системы. Для невооруженного глаза ; $\tau_{np} = 1$ и $\Gamma_{np} = 1$.

Границы ЛОЗ определяются из условия: $E = E_{нды}$. С учетом этого условия из выражения (1.35) определяется радиус лазерно опасной зоны $r_{лоз}$ по следующей формуле:

$$r_{лоз} = \frac{r}{\sqrt{2}} \sqrt{\ln \frac{2P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi r^2 E_{нды}}} \quad (1.36)$$

Можно сказать, что $r_{лоз}$ это расстояние от оси пучка, на котором создастся энергетическая освещенность, равная предельно допустимому уровню. Радиус сечения пучка r определяется по формулам (1.4) или (1.6).

Из условия обращения в нуль подкоренного выражения в уравнении (1.36) определяется $l_{лоз}$ – длина лазерно опасной зоны, м:

$$E_{max} = \frac{2P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi r^2} = E_{нды}. \quad (1.37)$$

Тогда из выражения (1.37) снова можно определить радиус сечения пучка r на расстоянии от лазера, равном $l_{лоз}$:

$$r = \sqrt{\frac{2P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi E_{нды}}}. \quad (1.38)$$

Теперь появляется возможность определить параметр $l_{лоз}$ путём приравнивания выражения (1.38) к выражениям (1.4) или (1.6). При этих расчётах необходимо знать величины τ_a , τ_{np} , Γ_{np} .

При расчётах уровней облучения и ЛОЗ **равномерным пучком** можно пользоваться следующими упрощенными формулами. Радиус сечения пучка на расстоянии l от лазера определяется по формуле (1.6). Энергетическая освещенность, создаваемая таким пучком, будет определяться как:

$$E = \frac{P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi r^2}. \quad (1.39)$$

Расстояние, на котором выполняется условие $E = E_{нды}$, соответствует длине лазерно опасной зоны $l_{лоз}$. Непосредственный расчёт $l_{лоз}$ (при известном значении τ_a , τ_{np} , Γ_{np}) осуществляется по формуле:

$$l_{\text{лоз}} = \frac{2}{\theta} \left(\sqrt{\frac{P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi E_{\text{нды}}} - r} \right), \quad (1.40)$$

а наибольший радиус лазерно опасной зоны вычисляется как:

$$r_{\text{лоз}} = r_0 + \sqrt{\frac{P\tau_a\tau_{np}\Gamma_{np}^2}{\pi E_{\text{нды}}}}. \quad (1.41)$$

где r_0 – начальный радиус пучка (на выходе из лазера, на оптическом элементе), м.

Определение границ ЛОЗ, создаваемой отражённым (преобразованным в оптической системе) пучком, производится так же, как и для прямого облучения, но за исходные данные принимаются параметры пучка, преобразованного оптической системой.

Совсем по-другому происходит преобразование пучка при **диффузном отражении**, которое часто встречается на практике. Диффузно отражающая поверхность является отражающей по закону Ламберта (идеально диффузной) в том случае, если излучение отражается во все стороны равномерно, то есть яркость отражённого излучения не зависит ни от угла падения исходного пучка, ни от угла, под которым производится наблюдение. В большинстве случаев при расчётах считают диффузно отражающую поверхность идеально матовой. Обычно это дает завышенные результаты при расчёте уровней облучения, что оправдано с точки зрения безопасности.

При расстояниях l_2 от отражающей поверхности до глаза (кожи), намного превышающих размер светового пятна на отражающей поверхности, энергетическая освещенность роговицы глаза (кожи) не зависит от характера распределения интенсивности по сечению лазерного пучка:

$$E = \frac{P\eta\varepsilon\tau_{a1}\tau_{a2}}{\pi l_2^2} \cos \Omega, \quad (1.42)$$

где ε – коэффициент энергетической яркости (отношение энергетической яркости облученной поверхности к энергетической яркости идеально матовой поверхности); Ω – угол наблюдения, рад. Далее будет приниматься $\varepsilon = 1$.

ЛОЗ, создаваемые диффузно отражённым излучением, определяются так: задается ряд направлений от светового пятна на отражающей поверхности, и для каждого направления задается ряд расстояний от поверхности; для каждого расстояния рассчитывается уровень облучения. С учётом коэффициентов пропускания атмосферы τ_{a1} и τ_{a2} расстояние $l_{\text{лоз}}$, на котором уровень облучения равен ПДУ для каждого направления определяется согласно формуле:

$$l_{\text{лоз}} = \sqrt{\frac{P\eta\varepsilon\tau_{a1}\tau_{a2}}{\pi E_{\text{нды}}} \cos \Omega}. \quad (1.43)$$

Характер лазерно опасной зоны при диффузном отражении лазерного излучения от экрана показан на рис. 1.4.

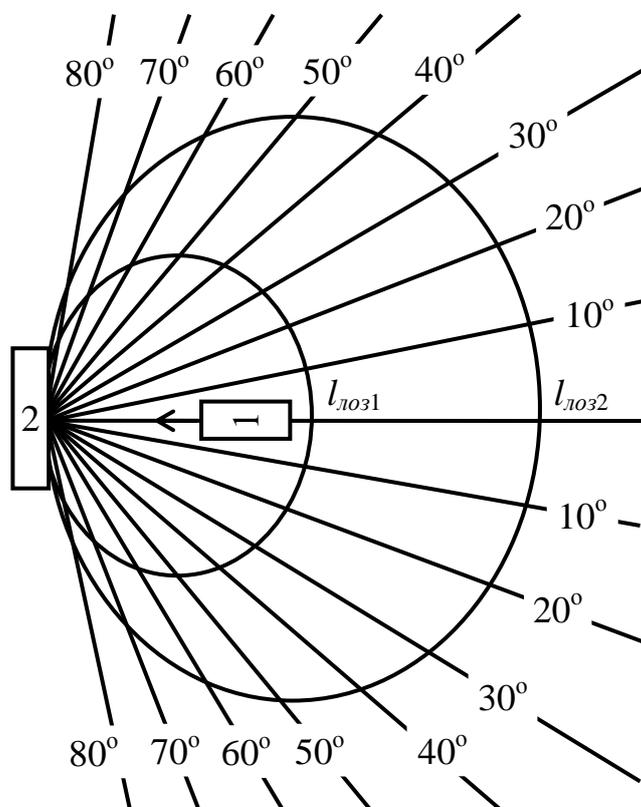


Рис. 1.4. Схема лазерно опасной зоны при диффузном отражении. Здесь: 1 – лазер, 2 – рассеивающая мишень, $l_{\text{лoз}1}$ – граница зоны опасной для кожи, $l_{\text{лoз}2}$ – граница зоны опасной для глаз

1.5. Средства защиты от лазерного излучения

Средства защиты должны снижать уровни лазерного излучения, действующего на человека, до величин ниже ПДУ. Средства защиты от лазерного излучения подразделяются на коллективные и индивидуальные. Выбор средства защиты в каждом конкретном случае осуществляется с учетом требований безопасности для данного процесса. Средства индивидуальной защиты от лазерного излучения включают в себя средства защиты глаз и лица (защитные очки, щитки, насадки), средства защиты рук, специальную одежду.

При выборе средств индивидуальной защиты необходимо учитывать:

- рабочую длину волны излучения;
- оптическую плотность светофильтра.

Оптическая плотность светофильтров, применяемых в защитных очках, щитках и насадках, для диапазонов лазерного излучения I и III должна удовлетворять требованиям:

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{H_{\text{max}}}{H_{\text{пoдy}}} \quad \text{либо} \quad D_{\lambda} \geq \lg \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{пoдy}}} \quad (1.44)$$

а для диапазона II:

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{W_{\max}}{W_{\text{ндy}}} \text{ или } D_{\lambda} \geq \lg \frac{P_{\max}}{P_{\text{ндy}}}, \quad (1.45)$$

где H_{\max} , E_{\max} , W_{\max} , P_{\max} – максимальные значения энергетических параметров лазерного излучения в рабочей зоне, $H_{\text{ндy}}$, $E_{\text{ндy}}$, $W_{\text{ндy}}$, $P_{\text{ндy}}$ – предельно допустимые уровни энергетических параметров при хроническом облучении.

1.6. Расчёт лазерной безопасности

Порядок расчёта лазерной безопасности зависит от того, как используется лазерное излучение.

Для случаев передачи пучка лазерного излучения элементами оптической системы расчёт должен решить следующие задачи:

- определить параметры пучка лазерного излучения на выходе лазера;
- определить параметры пучка лазерного излучения при последовательном преобразовании на элементах оптической системы;
- определить предельно допустимые уровни лазерного излучения;
- определить границы лазерно опасной зоны;
- оценить лазерную безопасность;
- определить параметры защитных средств.

Для случаев рассеяния лазерного излучения в среде расчёт должен решить следующие задачи:

- определить параметры пучка лазерного излучения на выходе лазера;
- определить параметры лазерного излучения при рассеянии в среде;
- определить предельно допустимые уровни лазерного излучения;
- оценить лазерную безопасность;
- определить параметры защитных средств.

Для всех вариантов заданий принимаются такие параметры атмосферы и условий наблюдения лазерного пучка: $\tau_{a1} = \tau_{a2} = 1$; $\tau_{on} = 1$; $G_{np} = 1$; $\tau_{oc} = 1$.

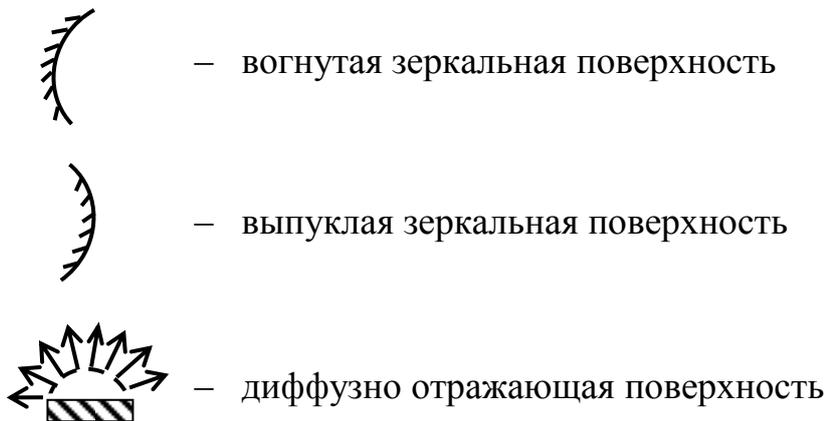
Все приведенные формулы и соотношения даны для лазеров с непрерывным излучением. Для импульсного режима работы лазеров следует в формулах мощность непрерывного излучения P заменить средней мощностью P_{cp} импульсного излучения.

Расчёт параметров пучка лазерного излучения на выходе лазера

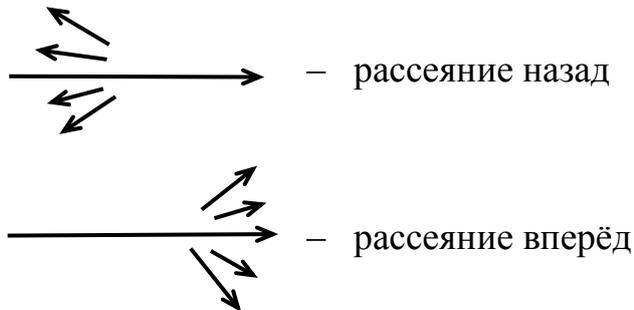
1. Проводим анализ оптической схемы. В вариантах а – д исследуется взаимодействие пучка излучения с оптическими элементами. Определим типы оптических элементов:



- плоская зеркальная поверхность
(в П р и л о ж е н и и 2 у таких зеркал указано значение $r_{cf} = \infty$)



В вариантах е – з наблюдается рассеяние пучка излучения в атмосфере либо в океане. Определим характер рассеяния:



2. Определим пространственные параметры пучка лазерного излучения на выходе лазера.

Сначала вычислим радиус r сечения пучка на выходе лазера:

$$r = 0,5 d.$$

В случае **гауссова пучка** лазерного излучения (в начальных данных указано Γ) приведём параметры пучка к уровню ограничения пространственной расходимости $1/e^2$.

Следует считать, что расходимость пучка θ на участке от выхода лазера до первого оптического элемента (или до рассеивающей среды) и диаметр d пучка на выходе лазера заданы со следующими уровнями ограничения:

- для нечётных вариантов заданий – уровень ограничения пространственной расходимости $m = 0,3$;

- для чётных вариантов заданий – уровень ограничения энергетической расходимости $n = 0,5$.

При помощи табл. 1.1. определим соответствующие коэффициенты приведения K . Тогда находим значения расходимости пучка θ_1 и радиуса пучка r_0 на выходе лазера по уровню $1/e^2$ следующим образом:

- для чётных вариантов заданий: $\theta_1 = 1,288 \theta$, $r_0 = 1,288 r$;

- для нечётных: $\theta_1 = 1,698 \theta$, $r_0 = 1,698 r$.

В случае **равномерного пучка** лазерного излучения (в начальных данных указано P) не нужно нормировать параметры пучка. В дальнейшем расчёте будем считать, что: $\theta_1 = \theta$, $r_0 = r$.

3. Далее будем определять максимальную энергетическую освещенность $E_{\max 1}$ пучка на участке от выхода лазера до первого оптического элемента (или до рассеивающей среды). На расстоянии l_1 от выхода лазера до оптической системы (или до рассеивающей среды) пучок будет расходиться с начальной расходимостью θ_1 . Следовательно, освещенность будет максимальной при наименьшем размере пучка – на выходе лазера.

В случае **гауссова пучка** энергетическая освещенность будет максимальной на оси пучка, причём такое распределение освещенности будет сохраняться на всём пути до оптической системы. Для гауссова пучка рассчитаем $E_{\max 1}$ на оси пучка на выходе лазера по формуле (1.3):

$$E_{\max 1} = \frac{2P_1}{\pi r_0^2}.$$

В случае **равномерного пучка** величина освещенности будет постоянна по всему сечению. Для равномерного пучка рассчитаем $E_{\max 1}$ на выходе лазера по формуле (1.7):

$$E_{\max 1} = \frac{P_1}{\pi r_0^2}.$$

4. Определим параметры пучка лазерного излучения на участке от выхода лазера до первого оптического элемента (или до рассеивающей среды).

Расстояние a_1 от центра лазера до первого элемента оптической системы (или до границы рассеивающей среды) вычислим таким образом:

$$a_1 = 0,5Z + l_1.$$

В случае **гауссова пучка** также рассчитаем конфокальный параметр $2d_{z1}$ по формуле (1.5):

$$2d_{z1} = \frac{8\lambda}{\pi \theta_1^2}.$$

5. Определим радиус пучка r_1 , когда он достигнет первого оптического элемента (или достигнет границы рассеивающей среды):

- в случае **гауссова пучка** – по формуле (1.4): $r_1 = 0,5 \theta_1 \sqrt{d_{z1}^2 + l_1^2}$.

- в случае **равномерного пучка** – по формуле (1.6): $r_1 = r_0 + 0,5 \theta_1 l_1$.

Расчёт параметров пучка лазерного излучения при последовательном преобразовании на элементах оптической системы

1. На оптических элементах всегда происходит потеря энергии излучения, которое падает на него. Оценим потери на первом оптическом элементе с отражающей способностью η_1 – определим мощность P_2 отражённого излучения по формуле (1.8):

$$P_2 = P_1 \eta_1.$$

2. Определим параметры пучка лазерного излучения, преобразованного на первом оптическом элементе.

Если первый оптический элемент это плоское зеркало, значит, преобразования пучка не происходит – конфокальный параметр и расходимость не изменяются.

Если первый оптический элемент это сферическое зеркало, значит, происходит преобразование пучка – меняется его конфокальный параметр и расходимость. В случае вогнутого зеркала расходимость уменьшается, возможна фокусировка пучка. В случае выпуклого зеркала расходимость увеличивается.

Для сферического зеркала сначала найдём фокусное расстояние f_1' первой зеркальной поверхности радиуса $r_{сф1}$:

- для вогнутой – по формуле (1.11): $f_1' = 0,5 r_{сф1}$;

- для выпуклой – по формуле (1.12): $f_1' = -0,5 r_{сф1}$.

Затем определим параметры пучка, преобразованного на сферическом зеркале: расстояние a_2 от первой зеркальной поверхности до перетяжки преобразованного пучка, конфокальный параметр $2d_{л2}$ преобразованного пучка, расходимость θ_2 после первой зеркальной поверхности.

Для **гауссова пучка** найдём расстояние a_2 по формуле (1.13):

$$a_2 = f_1' - \frac{(f_1')^2 (f_1' + a_1)}{(f_1' + a_1)^2 + d_{л1}^2},$$

вычислим $2d_{л2}$ по формуле (1.9):

$$2d_{л2} = \frac{2(f_1')^2 d_{л1}}{(f_1' + a_1)^2 + d_{л1}^2},$$

рассчитаем θ_2 по формуле (1.10):

$$\theta_2 = \theta_1 \sqrt{d_{л2}/d_{л1}}.$$

Для **равномерного пучка** определим θ_2 по формуле (1.18):

$$\theta_2 = 2 \arctg \left[\frac{2r_0 + \theta_1 l_1}{r_{сф1}} \right].$$

3. Далее будем определять максимальную энергетическую освещенность пучка $E_{\max 2}$ на участке между первым и вторым оптическим элементом. Освещенность будет максимальна при наименьшем размере пучка.

Если первый оптический элемент это плоское зеркало, значит, на рассматриваемом участке пучок продолжает распространяться с исходной расходимостью θ_1 . Если первый оптический элемент это выпуклое зеркало, значит, преобразованный пучок будет распространяться с увеличившейся расходимостью θ_2 . В обоих случаях пучок будет иметь наименьший радиус r_1 при отражении от зеркала. Тогда определим $E_{\max 2}$ так:

- для **гауссова пучка** – по формуле (1.3): $E_{\max 2} = \frac{2P_2}{\pi r_1^2}$;

- для **равномерного пучка** – по формуле (1.7): $E_{\max 2} = \frac{P_2}{\pi r_1^2}$.

Если первый оптический элемент это вогнутое зеркало, значит, на рассматриваемом участке преобразованный пучок будет распространяться с уменьшившейся расходимостью θ_1 , поэтому пучок будет иметь наименьший радиус $r_{\text{пер } 2}$ в плоскости фокусировки.

Для **гауссова пучка** определим $r_{\text{пер } 2}$, исходя из формулы (1.4):

$$r_{\text{пер } 2} = 0,5 \theta_2 d_{л 2} .$$

Найдём $E_{\max 2}$ в плоскости фокусировки по формуле (1.3):

$$E_{\max 2} = \frac{2P_2}{\pi (r_{\text{пер } 2})^2} .$$

Для **равномерного пучка** вычислим $r_{\text{пер } 2}$ согласно формуле (1.16):

$$r_{\text{пер } 2} = 0,25 \theta_1 r_{\text{сф } 1} .$$

Рассчитаем $E_{\max 2}$ в плоскости фокусировки по формуле (1.7):

$$E_{\max 2} = \frac{P_2}{\pi (r_{\text{пер } 2})^2} .$$

4. Затем будем определять радиус пучка r_2 , когда он достигнет второго оптического элемента.

Если первый оптический элемент это плоское зеркало, значит, преобразования пучка не происходит, поэтому в данном расчёте учитываем параметры исходного пучка. Тогда найдём r_2 следующим образом:

- для **гауссова пучка** согласно формуле (1.4):

$$r_2 = 0,5 \theta_1 \sqrt{d_{л 1}^2 + (a_1 + l_2)^2} ,$$

- для **равномерного пучка** по формуле (1.6):

$$r_2 = r_0 + 0,5 \theta_1 (l_1 + l_2) .$$

Если первый оптический элемент это вогнутое зеркало, значит, перетяжка пучка находится между первым и вторым элементами. Тогда рассчитаем r_2 следующим образом:

- для **гауссова пучка** согласно формуле (1.4):

$$r_2 = 0,5 \theta_2 \sqrt{d'_{л 2}^2 + (l_2 - a_2)^2} ;$$

- для **равномерного пучка** по формуле (1.15):

$$r_2 = (d_0 + \theta l_1)(l_2 - 0,5 r_{\text{сф}}) / r_{\text{сф}} .$$

Если первый оптический элемент это выпуклое зеркало, значит, мнимая перетяжка пучка находится как бы за зеркальной поверхностью. Тогда вычислим r_2 следующим образом:

- для **гауссова пучка** согласно формуле (1.4):

$$r_2 = 0,5\theta_2 \sqrt{d'_{л2}{}^2 + (-a_2 + l_2)^2};$$

- для **равномерного пучка** по формуле (1.17):

$$r_2 = (d_0 + \theta l_1)(l_2 + 0,5 r_{сф}) / r_{сф}.$$

5. Оценим потери на втором оптическом элементе с отражающей способностью η_2 – определим мощность P_3 отражённого излучения по формуле (1.8):

$$P_3 = P_2 \eta_2.$$

6. Определим параметры пучка лазерного излучения, преобразованного на втором оптическом элементе.

Если второй оптический элемент это плоское зеркало, значит, преобразования пучка не происходит.

Если второй оптический элемент это сферическое зеркало, значит, меняется конфокальный параметр и расходимость пучка.

Для сферического зеркала сначала найдём фокусное расстояние f_2' второй зеркальной поверхности радиуса $r_{сф2}$:

- для вогнутой – по формуле (1.11): $f_2' = 0,5 r_{сф2}$;

- для выпуклой – по формуле (1.12): $f_2' = -0,5 r_{сф2}$.

Теперь определим параметры пучка, преобразованного на сферическом зеркале: расстояние a_3 от второй зеркальной поверхности до перетяжки преобразованного пучка, конфокальный параметр $2d_{л3}$ преобразованного пучка, расходимость θ_3 после второй зеркальной поверхности.

Для **гауссова пучка** найдём расстояние a_2 по формуле (1.13):

$$a_3 = f_2' - \frac{(f_2')^2 (f_2' + a_2)}{(f_2' + a_2)^2 + d_{л2}{}^2},$$

вычислим $2d_{л3}$ по формуле (1.9):

$$2d_{л3} = \frac{2(f_2')^2 d_{л2}}{(f_2' + a_2)^2 + d_{л2}{}^2},$$

рассчитаем θ_3 по формуле (1.10):

$$\theta_3 = \theta_2 \sqrt{d_{л3} / d_{л2}}.$$

Для **равномерного пучка** определим θ_3 по формуле (1.18), при этом используем в расчёте расстояние от места, на котором пучок получил свои параметры (был преобразован), до второго элемента. Для этого следует учитывать тип первого оптического элемента. Если первый элемент это плоское зеркало, то используем в расчёте расстояние $l_1 + l_2$ от выходного зеркала лазера до второго элемента:

$$\theta_3 = 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{2r_0 + \theta_1 (l_1 + l_2)}{r_{сф2}} \right].$$

А если первый элемент это сферическое зеркало, то используем в расчёте расстояние l_1 от первого до второго элемента:

$$\theta_3 = 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{2r_{\text{пер}2} + \theta_2 l_2}{r_{\text{сф}2}} \right].$$

7. Далее будем определять максимальную энергетическую освещенность пучка $E_{\text{макс}3}$ на участке между вторым оптическим элементом и человеком. Освещенность будет максимальна при наименьшем размере пучка.

Если второй оптический элемент это плоское зеркало либо выпуклое зеркало, значит, пучок будет иметь наименьший радиус r_2 при отражении от зеркала. Тогда определим $E_{\text{макс}3}$ следующим образом:

- для **гауссова пучка** по формуле (1.3): $E_{\text{макс}3} = \frac{2P_3}{\pi r_2^2}$;

- для **равномерного пучка** по формуле (1.7): $E_{\text{макс}3} = \frac{P_3}{\pi r_2^2}$.

Если второй оптический элемент это вогнутое зеркало, значит, преобразованный пучок будет иметь наименьший радиус $r_{\text{пер}3}$ в плоскости фокусировки.

Для **гауссова пучка** определим $r_{\text{пер}3}$, исходя из формулы (1.4):

$$r_{\text{пер}3} = 0,5 \theta_3 d_{л3} .$$

Найдём $E_{\text{макс}3}$ в плоскости фокусировки по формуле (1.3):

$$E_{\text{макс}3} = \frac{2P_3}{\pi (r_{\text{пер}3})^2} .$$

Для **равномерного пучка** вычислим $r_{\text{пер}3}$ согласно формуле (1.16):

$$r_{\text{пер}3} = 0,25 \theta_2 r_{\text{сф}2} .$$

Рассчитаем $E_{\text{макс}3}$ в плоскости фокусировки по формуле (1.7):

$$E_{\text{макс}3} = \frac{P_3}{\pi (r_{\text{пер}3})^2} .$$

Если второй оптический элемент это диффузно отражающая поверхность, значит, излучение будет равномерно распространяться от поверхности во всех направлениях. Определим $E_{\text{макс}3}$ по ограничивающей апертуре диаметром d_a . Диаметр апертуры d_a выберем согласно указаниям раздела 1.3. (см. введение к разделу) с учётом диапазона длин волн и того, куда происходит воздействие (на кожу или на глаза). Найдём $E_{\text{макс}3}$ следующим образом:

- для **гауссова пучка** по формуле (1.3): $E_{\text{макс}3} = \frac{8P_3}{\pi d_a^2}$;

- для **равномерного пучка** по формуле (1.7): $E_{\text{макс}3} = \frac{4P_3}{\pi d_a^2}$.

8. Если второй оптический элемент это диффузно отражающая поверхность, значит, воздействие лазерного излучения происходит сразу на всю поверхность открытого тела человека. В этом случае нельзя говорить о том, что воздействует пучок излучения.

А для всех остальных случаев далее будем определять радиус пучка r_3 на расстоянии l_3 от второго зеркала, когда пучок достигнет человека. Рассчитанный параметр будет полезен для определения границ лазерно опасной зоны.

Если второй оптический элемент это плоское зеркало, значит, на нём преобразование пучка не происходит. Поэтому при дальнейшем расчёте учитываем параметры пучка, преобразованного после первого элемента, который представляет собой вогнутое зеркало. Тогда находим r_3 следующим образом:

- для **гауссова пучка** согласно формуле (1.4):

$$r_3 = 0,5 \theta_2 \sqrt{d_{л2}^2 + (l_2 - a_2 + l_3)^2} ;$$

- для **равномерного пучка** согласно формуле (1.6):

$$r_3 = r_{неп2} + 0,5 \theta_2 (l_2 - a_2 + l_3).$$

Если второй оптический элемент это сферическое зеркало, значит, происходит преобразование пучка. Для **гауссова пучка** учитывается положение перетяжки. Для вогнутого зеркала перетяжка пучка находится между самим зеркалом и человеком, тогда определим r_3 согласно формуле (1.4):

$$r_3 = 0,5 \theta_3 \sqrt{d_{л3}^2 + (l_3 - a_3)^2} .$$

Для выпуклого зеркала мнимая перетяжка пучка находится как бы за зеркальной поверхностью, тогда определим r_3 по той же формуле (1.4):

$$r_3 = 0,5 \theta_3 \sqrt{d_{л3}^2 + (-a_3 + l_3)^2} .$$

Для **равномерного пучка** учитывается тип первого оптического элемента. В случае, когда второй элемент это выпуклое зеркало, второй элемент представляет собой плоское зеркало. На плоском зеркале преобразование пучка не происходит, поэтому в данном расчёте учитываем параметры исходного пучка. Тогда находим r_3 согласно формуле (1.17):

$$r_3 = (2r_0 + \theta_1 l_1 + \theta_1 l_2)(l_3 + 0,5 r_{сф2}) / r_{сф2}.$$

Расчёт параметров лазерного излучения при рассеянии в среде

1. Сначала определим показатель аэрозольного рассеяния излучения μ_p , индикатрису рассеяния $\beta(\varphi)$, показатель рассеяния излучения $\mu_p(\varphi)$ для дальнейшего расчёта. Следует выбирать эти параметры как значения для ближайших заданных длины волны λ лазерного излучения и дальности видимости S_M .

В случае **рассеяния вперёд** в воздухе выберем:

- μ_p из табл. 1.3. с учётом λ и S_M ;
- $\beta(0)$ в направлении под углом 0° к оси пучка из табл. 1.2.

В случае **рассеяния назад в воздухе** выберем:

- μ_p из табл. 1.3. с учётом λ и S_M ;
- $\beta(\pi)$ в направлении под углом 180° к оси пучка из табл. 1.2.

В случае **рассеяния назад в воде** выберем:

- μ_p из табл. 1.4. с учётом λ ;
- $\mu_p(\pi)$ в направлении под углом 180° к оси пучка из табл. 1.6.

С учётом μ_p и $\mu_p(\pi)$ также вычислим $\beta(\pi)$ для углов, близких к 180° по формуле (1.21):

$$\beta(\pi) = \mu_p(\pi) / \mu_p.$$

2. Вычислим мощность P лазерного излучения, рассеянного в среде.

В случае **рассеяния вперёд** в воздухе с учётом μ_p определяем оптическую толщину среды δ по формуле (1.23):

$$\delta = \mu_p B.$$

Определяем мощность P лазерного излучения, прошедшего через слой атмосферы, по формуле (1.22):

$$P = P_1 \delta e^{-\delta} \beta(0) w / 2\pi.$$

Причём вычисляем P обязательно для нескольких значений телесного угла w распространяющегося пучка, а именно: 2° , 5° , 10° .

В случае **рассеяния назад** рассчитываем вспомогательные величины x_0 и x_1 по формулам (1.25):

$$x_0 = 2\mu_p b \text{ и } x_1 = 2\mu_p B.$$

Для аргументов x_0 и x_1 из табл. 1.6. выбираем значения интегральной показательной функции второго порядка $\Phi(x_0)$ и $\Phi(x_1)$.

Определяем мощность P лазерного излучения, рассеянного назад в слое воздушного образования либо в слое воды, по формуле (1.24):

$$P = 2P_1 Q \beta(\pi) \mu_p^2 [\Phi(x_0) - \Phi(x_1)].$$

Площадь облучаемого участка Q определим как:

$$Q = 0,25 \pi d_a.$$

Диаметр апертуры d_a выберем согласно указаниям раздела 1.3. (см. введение к разделу) с учётом диапазона длин волн и того, куда происходит воздействие (на кожу или на глаза).

Значения интегральных показательных функций $E_i(x)$ и $\Phi(x)$ можно найти при помощи справочника. Рассчитанные значения $E_i(x)$ и $\Phi(x)$ при некоторых значениях аргумента x даны в П р и л о ж е н и и 3.

Расчёт предельно допустимых уровней лазерного излучения

1. Оценим те характеристики воздействия лазерного излучения, с учётом которых определяются ПДУ нормируемых параметров.

а) действие лазерного излучения:

однократное (время воздействия $t < 3 \cdot 10^4$ с) либо хроническое ($t > 3 \cdot 10^4$ с).

б) режим работы лазера:

непрерывный (одиночный импульс длительностью более 10^{-6} с, в начальных данных указано Н) либо импульсный (серия импульсов, в данных – И).

в) диапазон, к которому относится длина волны λ лазерного излучения:

- $180 < \lambda \leq 380$ нм – диапазон I.
- $380 < \lambda \leq 1400$ нм – диапазон II.
- $1400 < \lambda \leq 10^5$ нм – диапазон III.

2. В соответствии с выявленными характеристиками воздействия будем определять ПДУ, следуя соответствующим указаниям:

- если диапазон I, то следуем указаниям раздела 1.3.1.
- если диапазон II, то следуем указаниям раздела 1.3.2.
- если диапазон III, то следуем указаниям раздела 1.3.3.

Если предусмотрено, то определим значения ПДУ одного или нескольких параметров: энергетической экспозиции $H_{ндy}$, энергетической освещенности $E_{ндy}$, энергии $W_{ндy}$ или мощности $P_{ндy}$. Если предусмотрено, то эти параметры определим и для глаз, и для кожи.

Расчёт границ лазерно опасной зоны

1. Для случаев рассеяния лазерного излучения в среде не оценивают лазерно опасную зону. А для пучка, прошедшего элементы оптической системы, будем определять границы лазерно опасной зоны с учётом найденного ПДУ.

Если второй оптический элемент – плоское либо сферическое зеркало, значит будем определять радиус и длину лазерно опасной зоны.

Для **гауссова пучка** определяем радиус лазерно опасной зоны $r_{лоз}$ на расстоянии l_3 от второго элемента по формуле (1.36):

$$r_{лоз} = \frac{r_3}{\sqrt{2}} \sqrt{\ln \frac{2P_3}{\pi(r_3)^2 E_{ндy}}}.$$

Чтобы определить длину лазерно опасной зоны $l_{лоз}$ приравниваем выражение (1.38) к выражению (1.4):

$$0,5 \theta_3 \sqrt{d_{л3}^2 + (l_{лоз} - f_2')^2} = \sqrt{\frac{2P_3}{\pi E_{ндy}}}.$$

Отсюда определяем $l_{лоз}$ согласно выведенному выражению:

$$l_{лоз} = \left(\frac{8P_3}{\pi E_{ндy} \theta_3^2} + d_{л3}^2 \right)^{1/2} + f_2'.$$

Для **равномерного пучка** определяем радиус лазерно опасной зоны $r_{лоз}$ по формуле (1.41), при этом учитываем тип второго оптического элемента:

- если плоское зеркало: $r_{лоз} = r_{пер 2} + \sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{ндy}}}$;
- если вогнутое зеркало: $r_{лоз} = r_{пер 3} + \sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{ндy}}}$;
- если выпуклое зеркало: $r_{лоз} = r_2 + \sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{ндy}}}$.

Определяем длину лазерно опасной зоны $l_{\text{лоз}}$ по формуле (1.40), при этом также учитываем тип второго оптического элемента:

$$\text{- если плоское зеркало: } l_{\text{лоз}} = \frac{2}{\theta_2} \left(\sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{\text{нды}}}} - r_{\text{неп}2} \right);$$

$$\text{- если вогнутое зеркало: } l_{\text{лоз}} = \frac{2}{\theta_3} \left(\sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{\text{нды}}}} - r_{\text{неп}3} \right);$$

$$\text{- если выпуклое зеркало: } l_{\text{лоз}} = \frac{2}{\theta_3} \left(\sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{\text{нды}}}} - r_2 \right).$$

Если второй оптический элемент это диффузно отражающая поверхность, то определяем только длину лазерно опасной зоны $l_{\text{лоз}}$ по формуле (1.43):

$$l_{\text{лоз}} = \sqrt{\frac{P_3}{\pi E_{\text{нды}}}} \cos \Omega,$$

Причём вычисляем $l_{\text{лоз}}$ обязательно для нескольких значений угла Ω , под которым можно наблюдать отражающую поверхность, а именно: 20° , 30° , 45° , 60° , 70° .

Оценка лазерной опасности и расчёт параметров защитных средств

1. Сравним энергетические параметры лазерного излучения, действующего на человека, с допустимым уровнем.

Для случаев передачи пучка лазерного излучения элементами оптической системы сравниваем значения энергетической освещённости на разных участках оптической системы $E_{\text{max}1}$, $E_{\text{max}2}$ и $E_{\text{max}3}$ со значением предельно допустимого уровня энергетической освещённости $E_{\text{нды}}$. Если на каком-либо участке $E_{\text{max}} > E_{\text{нды}}$, значит, пребывание человека на данном участке опасно.

Для случаев рассеяния лазерного излучения в среде сравниваем значения мощности P_1 на выходе лазера и мощности P рассеянного излучения со значением предельно допустимого уровня мощности $P_{\text{нды}}$. Если $P_1 > P_{\text{нды}}$, значит, подаваемый сигнал лазерного излучения опасен. Если $P > P_{\text{нды}}$, значит, рассеянный сигнал лазерного излучения также опасен.

Кстати, если нормировочные энергетические параметры выражены как $H_{\text{нды}}$ и $W_{\text{нды}}$, то следует привести их к $E_{\text{нды}}$ и $P_{\text{нды}}$ при помощи формул (1.20).

2. Для случаев рассеяния лазерного излучения в среде нельзя было определить лазерно опасную зону. А для случаев передачи пучка лазерного излучения элементами оптической системы будем сравнивать геометрические параметры лазерного излучения, действующего на человека, с границами лазерно опасной зоны.

Сравним расстояние l_3 , на котором пребывает человек, с длиной лазерно опасной зоны $l_{\text{лоз}}$. Если $l_3 < l_{\text{лоз}}$, значит, пребывание человека на данном расстоянии l_3 опасно.

Для ситуации, в которой $l_3 < l_{\text{лоз}}$, следует сравнить также значения радиуса пучка r_3 (достигнутого на расстоянии l_3) и радиуса лазерно опасной зоны $r_{\text{лоз}}$ (который определяется, когда второй оптический элемент это зеркало). Если $r_3 < r_{\text{лоз}}$, значит, приближение человека к пучку лазерного излучения будет опасно.

3. Если показано, что лазерное излучение во всех участках установки (или до и после рассеяния в среде) безопасно, значит, защитные средства применять не надо. Но если на каком-либо участке установки (или при любом случае воздействия установки на среду) будет опасность для человека, то следует определить параметры защитных средств.

В соответствии с диапазоном длин волн, с учётом найденного ПДУ определим величину минимально необходимой оптической плотности D_λ защитных светофильтров следующим образом:

- для диапазонов I и III по формуле (1.44): $D_\lambda \geq \lg \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{нды}}}$;

- для диапазона II по формуле (1.45): $D_\lambda \geq \lg \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{нды}}}$.

Здесь: E_{max} это наибольшее значение из $E_{\text{max}1}$, $E_{\text{max}2}$ и $E_{\text{max}3}$; P_{max} это наибольшее значение из P_1 и P .

4. Схематично зарисуем оптическую схему согласно варианту и отметим на ней качественные характеристики воздействия лазерного излучения.

Для случаев передачи пучка лазерного излучения элементами оптической системы изобразим на схеме характерные изменения пучка лазерного излучения, покажем лазерно опасную зону, отметим опасные и безопасные участки.

Для случаев рассеяния лазерного излучения в среде отметим на схеме: опасны ли подаваемый и рассеянный сигналы лазерного излучения.

Примеры оформления оптических схем показаны на рис. 1.5.

Необходимые для расчёта характеристики современных, серийно выпускаемых лазеров, параметры оптических схем и данные о воздействии лазерного излучения содержатся в П р и л о ж е н и и 1.

Варианты оптических схем передачи пучка лазерного излучения представлены в П р и л о ж е н и и 2, они соответствуют оптическим системам установок для различных ситуаций применения лазерных технологий.

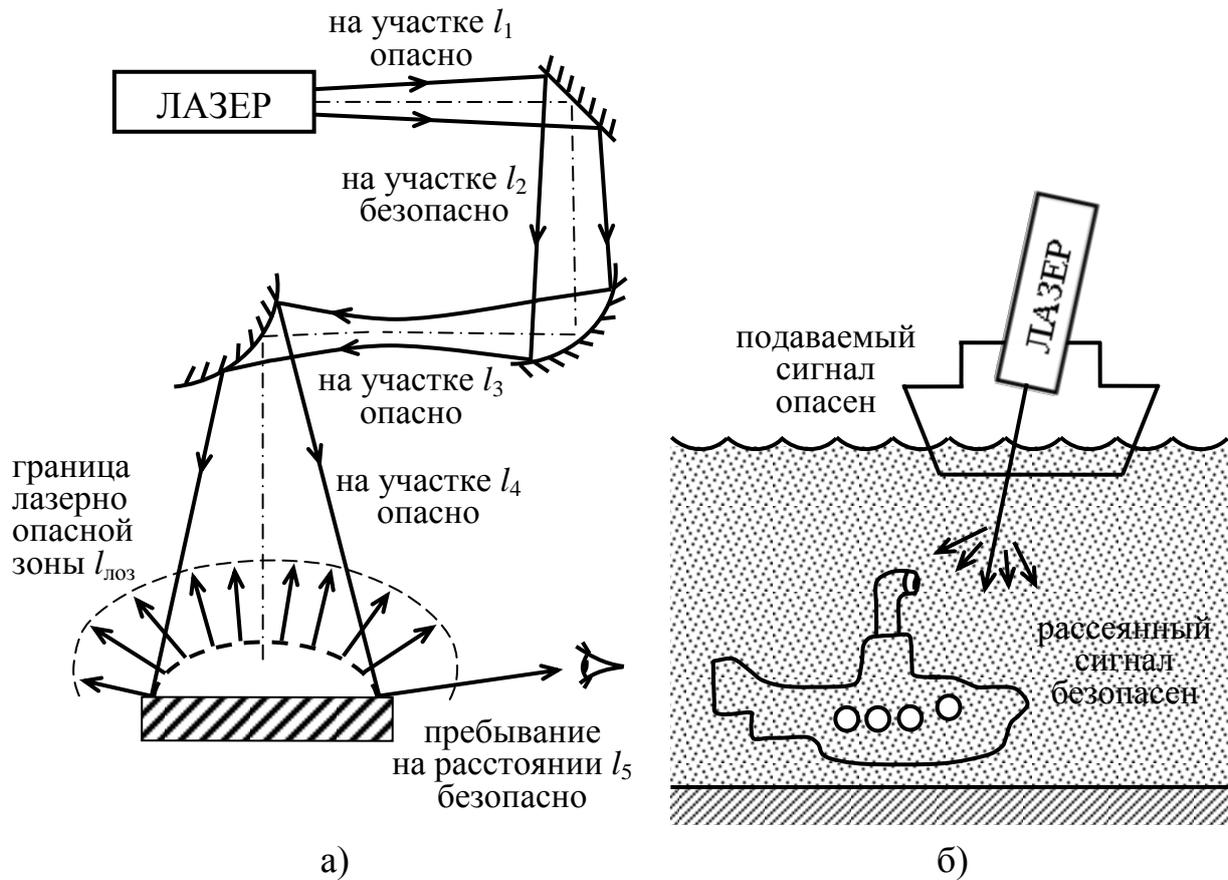


Рис. 1.5. Примеры оформления оптических схем передачи пучка лазерного излучения:

- а) взаимодействие пучка с элементами установки;
- б) рассеяние излучения в среде

Р а з д е л 2. ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Одной из основных задач охраны труда на предприятии является устройство рационального освещения производственных помещений и рабочих мест. Недостаточная освещенность рабочей зоны вызывает преждевременное утомление, снижает производительность и качество труда, может стать причиной несчастных случаев. Правильно спроектированное, рассчитанное и выполненное освещение обеспечивает благоприятные условия зрительной работы, снижает утомляемость, способствует длительному сохранению работоспособности, что приводит к росту производительности труда и его безопасности, к улучшению качества выпускаемой продукции.

2.1. Системы искусственного освещения помещений

Для освещения производственных помещений используют: *естественное освещение*, осуществляемое в первую очередь через световые проемы в наружных стенах; *искусственное освещение*, создаваемое осветительными установками и применяемое в темное время суток, а также в помещениях, где естественное освещение отсутствует; *совмещенное освещение*, при котором в светлое время суток недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным.

Одним из основных элементов осветительной установки искусственного освещения является светильник – совокупность электрического источника света (лампы накаливания или люминесцентной лампы) и осветительной арматуры. В производственных помещениях в зависимости от способа и места размещения светильников искусственное освещение может быть двух систем: *общее освещение* и *комбинированное освещение*.

Общее освещение предназначено для освещения как всего помещения в целом, так и расположенных в нем рабочих мест. При общем освещении светильники размещают в верхней зоне помещения рядами: равномерно – *общее равномерное освещение* (рис. 2.1, а, в, г) или локализовано с учетом расположения рабочих мест – *общее локализованное освещение* (рис. 2.1, б).

При комбинированном освещении в помещении предусматривается общее освещение, как правило, с равномерным размещением светильников и *местное освещение* светильниками, установленными на оборудовании или на рабочих местах. Систему комбинированного освещения рекомендуется применять в производственных помещениях, где выполняются точные зрительные работы, для освещения вертикальных и наклонных рабочих поверхностей, там, где оборудование создает глубокие резкие тени.

Применение одного местного освещения в помещении без общего запрещается ввиду того, что оно вызывает повышенное зрительное утомление из-за неравномерности освещения рабочей поверхности и окружающего пространства.

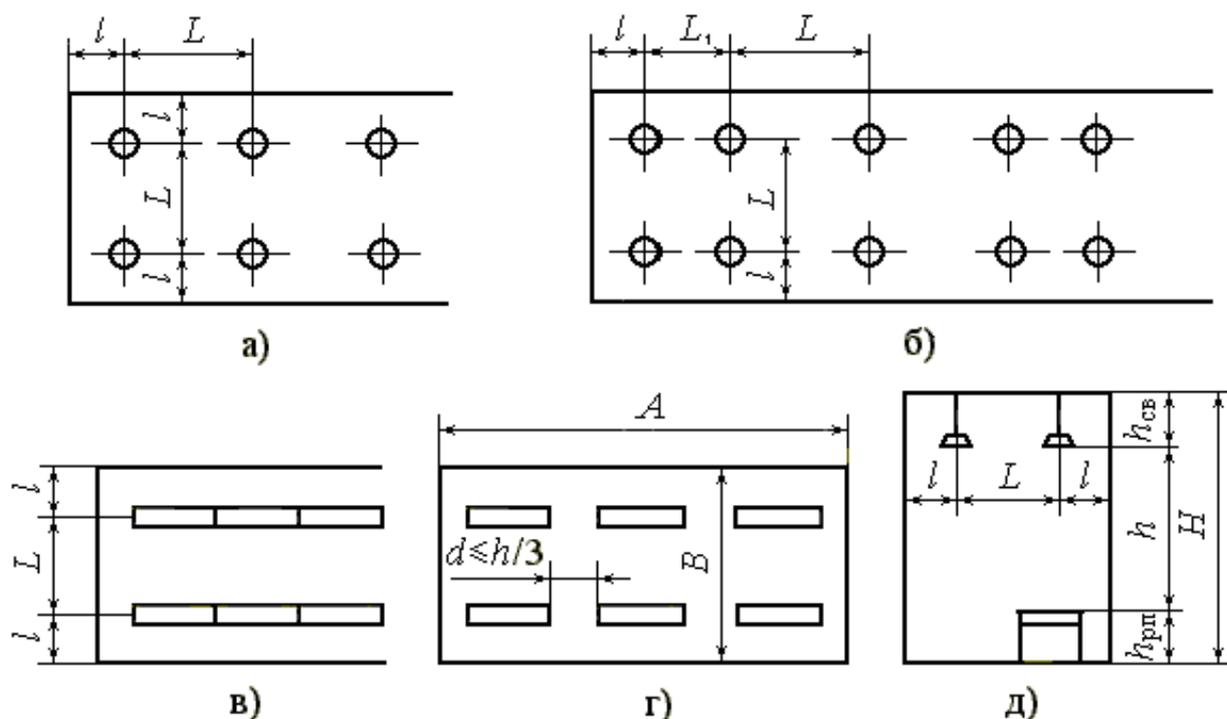


Рис. 2.1. Размещение светильников общего освещения в помещении:
 а, б – в плане – с лампами накаливания;
 в, г – в плане – с люминесцентными лампами;
 д – в разрезе (по высоте помещения)

2.2. Общие вопросы проектирования осветительных установок

При проектировании осветительной установки производственного помещения необходимо выбрать систему искусственного освещения, тип источников света, тип светильников, высоту их установки и размещение в помещении, определить число светильников и мощность ламп, обеспечивающих на рабочих местах требуемое значение освещенности, установленное строительными нормами и правилами СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».

В практике проектирования системы общего освещения производственных помещений руководствуются следующими рекомендациями.

При определении высоты установки светильников общего освещения над уровнем пола для предупреждения их раскачивания рекомендуется расстояние от светильника до места его крепления (потолка) $h_{св}$ выбирать с учетом высоты помещения H и оборудования (станков, верстаков, рабочих столов и т. п.), но не более двух метров ($h_{св} \leq 2$ м). В производственных помещениях в целях обеспечения безопасности эксплуатации осветительной установки светильники рекомендуется устанавливать на высоте не менее 2,5 м до пола.

Для обеспечения равномерного распределения освещенности по всему помещению светильники рекомендуется размещать так, чтобы отношение расстояния между соседними светильниками или рядами светильников L

(см. рис. 2.1, а, д) к высоте их подвеса над рабочей поверхностью h находилось в интервале пределов отношения L/h , указанном в справочных данных выбранного типа светильника.

Расстояние от крайних светильников или крайних рядов светильников до стен l (рис. 2.1, а, в) рекомендуется принимать примерно втрое меньше расстояния между рядами светильников L .

Светильники с люминесцентными лампами следует размещать в ряду без разрывов (рис. 2.1, в) или с небольшими разрывами (рис. 2.1, г) при условии, что расстояние между концами соседних светильников d не превысит одной трети высоты подвеса светильников над рабочей поверхностью h .

2.3. Расчёт искусственного освещения

Осветительные установки общего освещения производственных помещений отличаются большим числом возможных вариантов решений, что часто вызывает необходимость выполнять расчёт и проектирование искусственного освещения для различных типов и мощностей источников света, типов светильников и их размещения в помещении, способных обеспечить освещенность на рабочих местах не ниже нормируемой,

Существуют два метода расчёта искусственного освещения помещений: *метод коэффициента использования светового потока* и *точечный метод*.

При расчёте искусственного освещения по любому из указанных методов допускается отклонение освещенности рабочего места, полученной в результате расчёта, от нормы освещенности в пределах от +20 % до -10 %.

Если отклонение освещенности от нормируемой превышает данные пределы, необходимо, например, изменить высоту установки светильников, выбрать источник света другого типа или другой мощности и т.д.

2.3.1. Расчёт искусственного освещения по методу коэффициента использования светового потока

Метод коэффициента использования светового потока применяется для расчёта общего равномерного освещения горизонтальных рабочих поверхностей. При расчёте учитывается как прямой световой поток, излучаемый светильниками, так и отражённый в помещении от потолка, стен, рабочих поверхностей.

Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп одного светильника Φ (лм), необходимый для создания в помещении на рабочих поверхностях освещенности, не ниже нормируемой, рассчитывается по формуле:

$$\Phi = \frac{EK_3Sz}{N\eta}, \quad (2.1)$$

где E – нормируемая минимальная освещенность, лк; K_3 – коэффициент запаса, учитывающий снижение освещенности в процессе эксплуатации осветительной установки; S – площадь освещаемого помещения, м²; z – ко-

коэффициент неравномерности освещения (для ламп накаливания – 1,15, для люминесцентных – 1,1); N – число светильников общего освещения, шт.; η – коэффициент использования светового потока, в долях единицы или %.

Порядок выполнения светотехнических расчётов рассмотрим на примере.

Пример светотехнического расчёта по методу коэффициента использования светового потока.

Помещение аналитической лаборатории (см. рис. 2.1, г, д) имеет размеры: длину $A = 20$ м; ширину $B = 8$ м; высоту $H = 4,5$ м. Высота рабочей поверхности $h_{\text{рп}} = 0,8$ м. Требуется рассчитать общее равномерное освещение помещения при использовании светильников типа ЛСП 01 с двумя люминесцентными лампами и составить схему размещения светильников в помещении.

Решение. Определяем для помещения аналитической лаборатории согласно табл. 2.1 норму освещенности $E = 400$ лк.

Выбираем из табл. 2.2 с учетом состояния воздушной среды в помещении лаборатории коэффициент запаса $K_3 = 1,5$.

Принимаем расстояние от потолка до светильника $h_{\text{св}} = 0,5$ м, исходя из рекомендуемых значений $h_{\text{св}} \leq 2$ м.

Определяем высоту установки светильников над рабочей поверхностью h :
 $h = H - (h_{\text{св}} + h_{\text{рп}}) = 4,5 - (0,5 + 0,8) = 3,2$ м.

Из светотехнических данных светильника ЛСП 01 (см. табл. 2.3) выбираем наиболее выгодное отношение $\lambda_{\text{нв}} = L/h = 1,7$.

Определяем расстояние между соседними рядами светильников L :

$$L = \lambda_{\text{нв}} h = 1,7 \cdot 3,2 = 5,44 \text{ м.}$$

Тогда при ширине помещения $B = 8$ м число рядов светильников n_B будет

$$n_B = \frac{B}{L} = \frac{8}{5,44} = 1,47.$$

Принимаем число рядов светильников в помещении $n_B = 2$.

Для определения величины коэффициента использования светового потока η выбираем из табл. 2.4 коэффициенты отражения ρ поверхностей помещения лаборатории: потолка $\rho_{\text{п}} = 70$ %; стен $\rho_{\text{ст}} = 50$ %; рабочей поверхности $\rho_{\text{рп}} = 10$ % и рассчитываем индекс помещения i по формуле:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)} = \frac{20 \cdot 8}{3,2(20+8)} = 1,78.$$

Значение индекса помещения принимается равным ближайшему значению в табл. 2.5. В рассчитываемом примере принимаем $i = 1,75$.

Для найденных значений i , $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{ст}}$, $\rho_{\text{рп}}$ и светильника ЛСП 01 находим из табл. 2.5 коэффициент использования светового потока $\eta = 0,49$.

Определяем световой поток светильников одного ряда $\Phi_{\text{р}}$, подставив в формулу (2.1) вместо количества светильников N число их рядов n_B :

$$\Phi_{\text{р}} = \frac{EK_3 Sz}{n_B \eta} = \frac{400 \cdot 160 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{2 \cdot 0,49} = 107755 \text{ лм.}$$

Рассчитываем необходимое количество в ряду двухламповых светильников n_A для создания светового потока одного ряда Φ_p :

$$n_A = \frac{\Phi_p}{2 \cdot \Phi_{л}},$$

где $\Phi_{л}$ – световой поток стандартной лампы в светильнике, лм.

Так как согласно данным табл. 2.3 в светильнике ЛСП 01 применяются две люминесцентные лампы мощностью 65 Вт или две лампы мощностью 80 Вт, то для осветительной установки можно выбрать одну из следующих стандартных ламп с соответствующим световым потоком $\Phi_{л}$ (см. табл. 2.6):

- лампу ЛБ 65 с $\Phi_{л1} = 4800$ лм;
- лампу ЛТБ 65 с $\Phi_{л2} = 4850$ лм;
- лампу ЛХБ 65 с $\Phi_{л3} = 4400$ лм;
- лампу ЛД 65 с $\Phi_{л4} = 4000$ лм;
- лампу ЛДЦ 65 с $\Phi_{л5} = 3150$ лм;
- лампу ЛБ 80 с $\Phi_{л6} = 5400$ лм;
- лампу ЛТБ 80 с $\Phi_{л7} = 5200$ лм;
- лампу ЛХБ 80 с $\Phi_{л8} = 5040$ лм;
- лампу ЛД 80 с $\Phi_{л9} = 4300$ лм;
- лампу ЛДЦ с $\Phi_{л10} = 3800$ лм.

Если использовать в светильнике ЛСП 01 две лампы типа ЛБ 65, то необходимое количество светильников в ряду n_A будет

$$n_A = \frac{\Phi_p}{2 \cdot \Phi_{л1}} = \frac{107755}{2 \cdot 4800} = 11,22 = 11 \text{ шт.}$$

Необходимое количество светильников в ряду n_A при использовании других применяемых в светильнике ЛСП 01 типов ламп:

- лампы ЛТБ 65 – 11 светильников;
- лампы ЛХБ 65 – 12 светильников;
- лампы ЛД 65 – 13 светильников;
- лампы ЛДЦ 65 – 17 светильников;
- лампы ЛБ 80 – 10 светильников;
- лампы ЛТБ 80 – 10 светильников;
- лампы ЛХБ 80 – 11 светильников;
- лампы ЛД 80 – 12 светильников;
- лампы ЛДЦ 80 – 14 светильников.

Рассчитываем длину одного ряда светильников L_p :

$$L_p = L_{св} \cdot n_A,$$

где $L_{св}$ – длина заданного типа светильника, м; n_A – необходимое количество светильников в ряду, шт.

Согласно данным табл. 2.3 длина светильника ЛСП 01 $L_{св} = 1536$ мм.

При использовании в светильнике ламп ЛБ 65 длина одного ряда светильников L_p составит:

$$L_p = L_{св} \cdot n_A = 1,536 \cdot 11 = 16,89 \text{ м.}$$

Аналогично рассчитываем длину одного ряда светильников L_p при использовании других применяемых в светильнике ЛСП 01 типов ламп:

- лампы ЛТБ 65 – 16,89 м;
- лампы ЛХБ 65 – 18,43 м;
- лампы ЛД 65 – 19,96 м;
- лампы ЛДЦ 65 – 26,11 м;
- лампы ЛБ 80 и ЛТБ 80 – 15,36 м;
- лампы ЛХБ 80 – 16,89 м;
- лампы ЛД 80 – 18,43 м;
- лампы ЛДЦ 80 – 21,50 м.

Сопоставим рассчитанную длину одного ряда светильников L_p при использовании разных типов люминесцентных ламп с длиной помещения A .

Длина одного ряда светильников ЛСП 01 при использовании в них ламп типа ЛДЦ 65 и ЛДЦ 80 больше длины помещения. Следовательно, их применять в осветительной установке, в рассматриваемом примере, нельзя.

При использовании остальных типов ламп длина одного ряда меньше длины помещения. Целесообразней выбрать вариант с применением ламп ЛД 65, при котором светильники устанавливаются в ряду без разрывов, обеспечивая наиболее равномерное освещение помещения и рабочих мест.

Определяем расчётную освещённость рабочей поверхности E_p в помещении лаборатории при использовании в светильнике ЛСП 01 двух ламп типа ЛД 65 и относительную погрешность расчёта $\delta_{\text{отн}}$:

$$E_p = 2E \cdot \frac{\Phi_{\text{л4}} \cdot n_A}{\Phi_p} = \frac{2 \cdot 400 \cdot 4000 \cdot 13}{107755} = 386,06 \text{ лк};$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{E_p - E}{E} \cdot 100\% = \frac{386,06 - 400}{400} \cdot 100\% = -3,48\% .$$

Расчёт считаем законченным, так как отклонение расчётной освещённости E_p от нормируемой E не превышает допустимые пределы $+20 \div -10 \%$.

По результатам расчёта общего искусственного освещения помещения лаборатории построим схему размещения светильников осветительной установки (рис. 2.2).

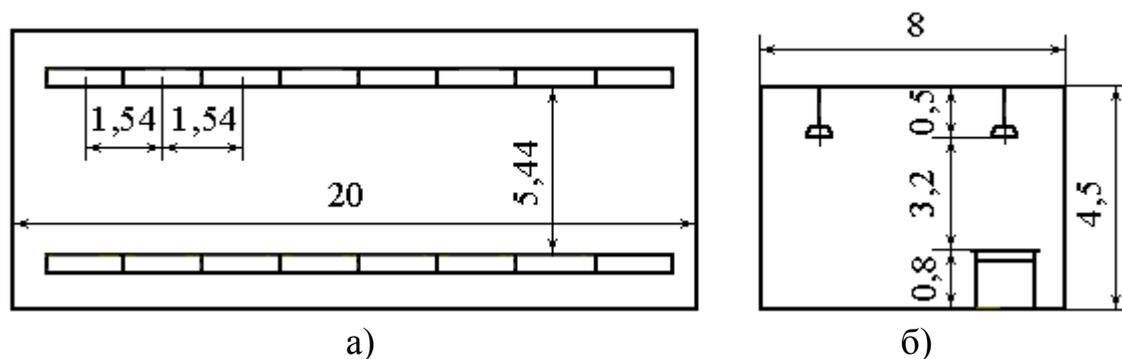


Рис. 2.2. Размещение светильников осветительной установки в помещении лаборатории: а – в плане; б – в разрезе

Т а б л и ц а 2.1. Нормы освещенности помещений в зданиях управления, проектных и конструкторских организаций, научно-исследовательских учреждений

Помещения	Освещенность рабочих поверхностей, лк
1. Кабинеты и рабочие комнаты	300
2. Конструкторские чертежные бюро	500
3. Машинописные и машиносчетные бюро	400
4. Помещения для электрофотографирования и микрофотографирования, ксерокопирования	200
5. Лаборатории органической и неорганической химии	300
6. Вычислительный центр: помещения подготовки и обработки информации, машинный зал; помещения для программистов	400 400 300
7. Аналитические лаборатории	400
8. Термостатные лаборатории: термические, физические, спектрографические, фотометрические, микроскопные	300

Т а б л и ц а 2.2. Значения коэффициента запаса K_3

Помещения и территории	Примеры помещений	Коэффициент запаса K_3	
		газоразрядных ламп	ламп накаливания
1. Производственные помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне: а) от 1 до 5 мг/м ³ пыли, дыма, копоти; б) менее 1 мг/м ³ пыли, дыма, копоти; в) значительные концентрации паров, кислот, щелочей, газов	Цехи кузнечные, литейные, мартеновские, сварочные	1,8	1,5
	Цехи сборочные, механические, механо-сборочные, КБ, ВЦ	1,5	1,3
	Цехи гальванических покрытий и гальванопластики	1,8	1,5
2. Производственные помещения с особым режимом по чистоте воздуха	Цехи герметизированные, сборки точных приборов	1,4	1,2
3. Помещения общественных и жилых зданий	Кабинеты и рабочие помещения общественных зданий, лаборатории	1,5	1,3

Т а б л и ц а 2.3. Характеристики светильников общего освещения с люминесцентными лампами

Тип светильника	Число ламп в светильнике, (шт) x мощность лампы (Вт)	Длина светильника $L_{св}$, мм	Вид установки	Условия эксплуатации	Класс светильников по светораспределению	$\lambda_{нв} = \frac{L}{h}$	Область применения
ЛСП 01	2x65; 2x80	1536	Подвесной	Для нормальных условий среды	Р	1,6 ÷ 1,8	Для производственных зданий
ЛСП 02	2x40	1240		Для нормальных условий среды	Н	1,4 ÷ 1,6	
	2x65	1536					
	2x80	1536					
ПВЛМ	1x40; 2x40	1330		Для тяжелых условий среды	Н	1,4 ÷ 1,6	
	1x80; 2x80	1630					
ЛД	2x40	1240	Для тяжелых условий среды	Н	1,4 ÷ 1,6		
	2x65	1536					
	2x80	1536					
ЛОУ 1П	2x40; 2x80	1240 1536	Для нормальных условий среды	Н	1,4 ÷ 1,6		
ЛПО 01	2x40; 4x40	1320	Потолочный	Для нормальных условий среды	Р	1,6 ÷ 1,8	Для общественных зданий
	2x65; 4x65	1536					
	1x20; 2x20	655					
	4x20; 1x40	1295					
ЛПО 02	2x65	1565					
Л 201Б	2x20	675					
	4x20						
УСП	2x40	1275					
	4x40	1275					
	6x40	1275					
	2x80	1575					

П р и м е ч а н и е. Классы светильников по светораспределению:

П – светильники прямого света;

Н – светильники преимущественно прямого света;

Р – светильники рассеянного света;

В – светильники преимущественно отражённого света;

0 – светильники отражённого света.

Т а б л и ц а 2.4. Значения коэффициентов отражения потолка $\rho_{п}$ и стен $\rho_{ст}$ помещений

Характер отражающей поверхности	Коэффициент отражения ρ , %
Побеленный потолок, побеленные стены с окнами, закрытыми белыми шторами	70
Побеленные стены при незакрытых шторами окнами; побеленный потолок в сырых помещениях; чистый бетонный и светлый деревянный потолок	50
Бетонный потолок в грязных помещениях; деревянный потолок; бетонные стены с окнами; стены оклеенные светлыми обоями	30
Стены и потолки в помещениях с большим количеством темной пыли; сплошное остекление без штор; красный кирпич неоштукатуренный; стены с темными обоями	10

П р и м е ч а н и е. Коэффициент отражения расчётной поверхности $\rho_{рп}$ (рабочей поверхности или поверхности пола) принимается, как правило, равным 10 % и только при применении покрытий с высоким коэффициентом отражения, например, белой бумаги, кафельной плитки и т.п., равным 30 %.

Т а б л и ц а 2.5. Коэффициент использования светового потока η

Коэффициент отражения	Тип светильника														
	ЛСП 01					ЛОУ 1П					ЛСП 02				
$\rho_{п}$, %	70	70	50	50	0	70	70	50	30	0	70	70	50	30	0
$\rho_{ст}$, %	50	50	50	30	0	50	50	30	10	0	50	50	30	10	0
$\rho_{рп}$, %	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0	30	10	10	10	0
Индекс помещения i	Коэффициент использования светового потока η , %														
0,5	28	26	25	22	19	28	26	19	17	14	28	27	21	18	16
0,6	32	30	30	26	23	31	29	23	20	18	33	32	25	22	20
0,7	36	34	33	30	26	36	34	28	24	22	38	36	30	26	24
0,8	39	36	36	32	29	39	37	30	26	24	42	39	33	29	28
0,9	42	39	38	35	31	43	40	34	29	27	46	42	37	32	31
1,0	44	41	40	37	33	46	42	36	32	30	49	45	40	35	34
1,1	46	42	42	39	35	48	44	38	34	31	52	48	42	38	36
1,25	48	44	43	41	37	51	47	41	36	34	55	50	45	40	39
1,5	51	47	46	44	40	55	50	45	40	37	60	54	49	45	44
1,75	54	49	48	46	42	58	53	48	42	40	63	57	52	48	47
2,0	55	50	49	47	44	60	55	49	44	41	65	59	55	51	49
2,5	58	53	52	50	46	65	58	52	48	46	70	63	58	55	54
3,0	60	54	53	51	48	67	60	54	50	46	73	65	61	58	56
4,0	62	56	54	53	50	70	62	57	53	49	77	68	64	61	59

Т а б л и ц а 2.6. Параметры люминесцентных ламп, применяемых для общего освещения

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм, после 100 ч горения	Длина лампы, мм
ЛДЦ 20 ЛД 20 ЛХБ 20 ЛТБ 20 ЛБ 20	20	820 870 890 925 1120	604,0
ЛДЦ 30 ЛД 30 ЛХБ 30 ЛТБ 30 ЛБ 30	30	1500 1800 1940 2020 2180	908,8
ЛДЦ 40 ЛД 40 ЛХБ 40 ЛТБ 40 ЛБ 40	40	2200 2500 3000 3100 3200	1213,5
ЛДЦ 65 ЛД 65 ЛХБ 65 ЛТБ 65 ЛБ 65	65	3150 4000 4400 4850 4800	1514,2
ЛДЦ 80 ЛД 80 ЛХБ 80 ЛТБ 80 ЛБ 80	80	3800 4300 5040 5200 5400	1514,2

2.3.2. Расчёт искусственного освещения точечным методом

Точечный метод применяют для расчёта общего как равномерного, так и локализованного рабочего освещения помещений, освещения наклонных и вертикальных рабочих поверхностей, аварийного и местного освещения.

При расчёте общего равномерного освещения точечным методом светильники с люминесцентными лампами рассматриваются как светящиеся линии. Одной из характеристик светящихся линий является линейная плотность светового потока ламп Φ' .

Расчётная формула метода имеет вид

$$\Phi' = \frac{1000 \cdot EK_3 h}{\mu \cdot \sum \varepsilon_i}, \quad (2.2)$$

где Φ' – линейная плотность светового потока, лм/м; E – нормируемая минимальная освещенность, лк; K_3 – коэффициент запаса; h – высота подвеса светильников над рабочей поверхностью, м; μ – коэффициент, учитывающий влияние удаленных светильников (как правило, $\mu = 1,1$); $\sum \varepsilon_i$ – совокупное действие ближайших рядов светильников, каждый из которых создает в расчётной точке условную освещенность ε_i , лк, определяемую по графикам линейных изолюкс используемого типа светильника.

Порядок выполнения светотехнических расчётов рассмотрим на примере.

Пример светотехнического расчёта точечным методом.

Помещение фотометрической лаборатории (см. рис. 2.1, г, д) имеет размеры: длину $A = 18$ м; ширину $B = 11$ м; высоту $H = 4,0$ м. Высота рабочей поверхности $h_{\text{рп}} = 0,8$ м. Требуется рассчитать общее равномерное освещение помещения при использовании светильников типа ЛОУ 1П с двумя люминесцентными лампами и составить схему размещения светильников в помещении.

Решение. Определяем для помещения фотометрической лаборатории норму освещенности $E = 300$ лк (см. табл. 2.1).

Из табл. 2.2 с учетом характера воздушной среды в лаборатории выбираем коэффициент запаса $K_3 = 1,5$.

Принимаем расстояние от потолка до светильника $h_{\text{св}} = 0,5$ м, исходя из рекомендуемых значений $h_{\text{св}} \leq 2$ м.

Определяем высоту подвеса светильника над рабочей поверхностью h :

$$h = H - (h_{\text{св}} + h_{\text{рп}}) = 4 - (0,5 + 0,8) = 2,7 \text{ м.}$$

Из светотехнических характеристик светильника ЛОУ 1П (см. табл. 2.3) выбираем наиболее выгодное отношение $\lambda_{\text{нв}} = L/h = 1,5$.

Определяем расстояние между соседними рядами светильников L :

$$L = \lambda_{\text{нв}} h = 1,5 \cdot 2,7 = 4,05 \text{ м.}$$

Тогда при ширине помещения фотометрической лаборатории $B = 11$ м число рядов светильников n_B будет

$$n_B = \frac{B}{L} = \frac{11}{4,05} = 2,7.$$

Принимаем число рядов светильников в помещении $n_B = 3$.

Изображаем в масштабе две проекции помещения фотометрической лаборатории (рис. 2.3) и выбираем контрольную точку М.

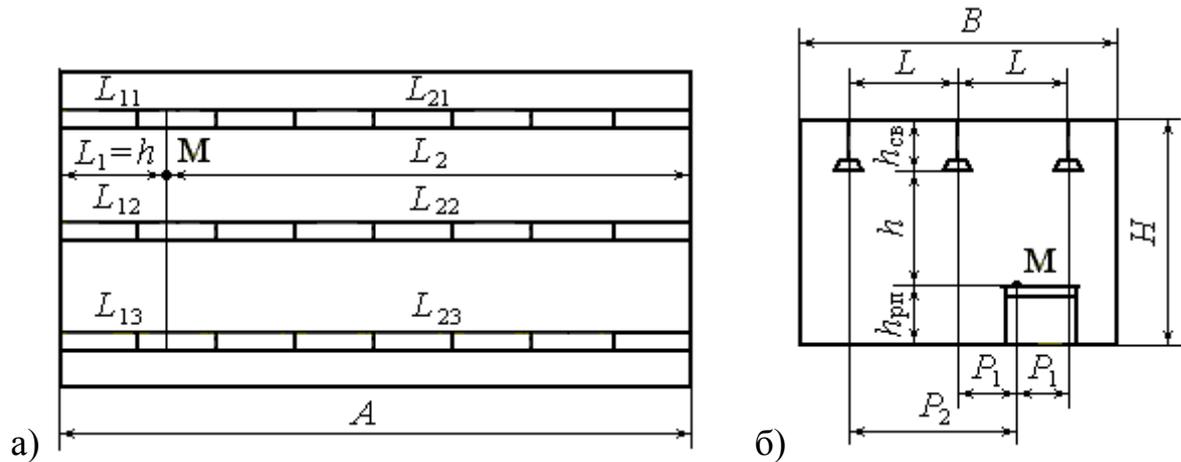


Рис. 2.3. Схема размещения светильников в помещении:
а – в плане; б – в разрезе

При общем равномерном освещении контрольная точка М выбирается на уровне рабочей поверхности, как правило, посередине между рядами светильников, на расстоянии $L_1 = h$ от торцевых стен. Точка М освещается отрезками рядов светильников длиной $L_{11} = L_{12} = L_{13} = L_1$ и $L_{21} = L_{22} = L_{23} = L_2$.

Пользуясь масштабом плана размещения светильников в помещении, определяем расстояния P_1, P_2 , длину отрезков ряда L_1, L_2 и рассчитываем отношения:

$$P_i' = \frac{P_i}{h} \text{ и } L_i' = \frac{L_i}{h}.$$

Из графика линейных изолукс светильника ЛОУ 1П (рис. 2.4, в) для точки М с координатами P_i' и L_i' определяем условную освещенность ε_i , создаваемую каждым отрезком ряда светильников. Суммированием значений ε_i от ближайших отрезков ряда светильников, освещающих контрольную точку М, находим $\sum \varepsilon_i$. Расчёт условной освещенности сводится в табл. 2.7.

Т а б л и ц а 2.7. Результаты расчёта условной освещенности

Обозначение отрезка ряда на плане	Расстояние $P_i, \text{ м}$	Длина отрезка ряда $L_i, \text{ м}$	$P_i' = \frac{P_i}{h}$	$L_i' = \frac{L_i}{h}$	Условная освещенность $\varepsilon_i, \text{ лк}$
$L_{11}, L_{12},$ $L_{13},$	2,02 6,07	2,7 2,7	0,75 2,25	1,0 1,0	55 x 2 3,0
$L_{21}, L_{22},$ L_{23}	2,02 6,07	15,3 15,3	0,75 2,25	5,66 5,66	85 x 2 6,0
					$\sum \varepsilon_i = 289$

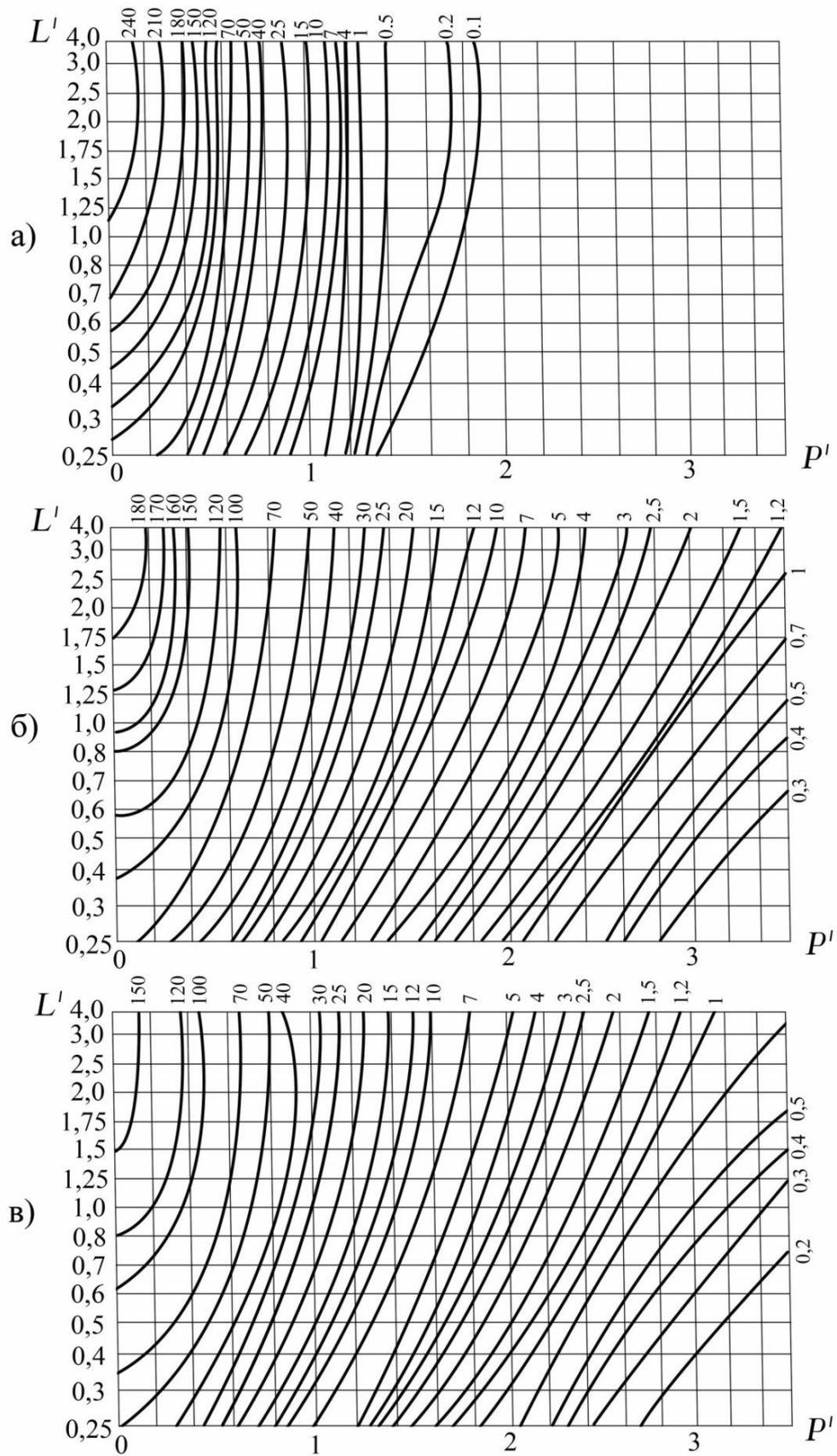


Рис. 2.4. Линейные изолюксы светильников:
а – ЛСП 01; б – ЛСП 02; в – ЛОУ 1П

Принимая $\mu = 1.1$, по формуле (2.2) рассчитываем необходимую линейную плотность светового потока Φ' :

$$\Phi' = \frac{1000 \cdot EK_3 h}{\mu \cdot \sum \varepsilon_i} = \frac{1000 \cdot 300 \cdot 1,5 \cdot 2,7}{1,1 \cdot 289} = 3822 \text{ лм/м.}$$

Определяем требуемый световой поток одного ряда светильников Φ_p в помещении лаборатории длиной $A = 18$ м:

$$\Phi_p = \Phi' \cdot A = 3822 \cdot 18 = 68796 \text{ лм.}$$

Рассчитываем необходимое количество в ряду двухламповых светильников n_A для создания светового потока Φ_p по формуле

$$n_A = \frac{\Phi_p}{2 \cdot \Phi_{л}}, \quad (2.3)$$

где $\Phi_{л}$ – световой поток стандартной лампы в светильнике, лм.

Так как в светильнике ЛОУ 1П применяются две люминесцентные лампы мощностью 40 Вт или две лампы мощностью 80 Вт (см. табл. 2.3), то для осветительной установки можно выбрать одну из следующих стандартных ламп со световым потоком $\Phi_{л}$ (см. табл. 2.6):

- лампу ЛБ 40 с $\Phi_{л1} = 3200$ лм;
- лампу ЛТБ 40 с $\Phi_{л2} = 3100$ лм;
- лампу ЛХБ 40 с $\Phi_{л3} = 3000$ лм;
- лампу ЛД 40 с $\Phi_{л4} = 2500$ лм;
- лампу ЛДЦ 40 с $\Phi_{л5} = 2200$ лм;
- лампу ЛБ 80 с $\Phi_{л6} = 5400$ лм;
- лампу ЛТБ 80 с $\Phi_{л7} = 5200$ лм;
- лампу ЛХБ 80 с $\Phi_{л8} = 5040$ лм;
- лампу ЛД 80 с $\Phi_{л9} = 4300$ лм;
- лампу ЛДЦ с $\Phi_{л10} = 3800$ лм.

Если использовать в светильнике ЛОУ 1П две лампы типа ЛБ 40, то в помещении для создания светового потока Φ_p необходимое количество светильников в одном ряду n_A будет

$$n_A = \frac{\Phi_p}{2 \cdot \Phi_{л1}} = \frac{68796}{2 \cdot 3200} = 10,75 = 11 \text{ шт.}$$

Необходимое количество в одном ряду светильников n_A , если использовать другие применяемые в светильнике ЛОУ 1П источники света:

- лампы ЛТБ 40 или ЛХБ 40 – 11 светильников;
- лампы ЛД 40 – 14 светильников;
- лампы ЛДЦ 40 – 16 светильников;
- лампы ЛБ 80 – 6 светильников;
- лампы ЛТБ 80 или ЛХБ 80 – 7 светильников;
- лампы ЛД 80 – 8 светильников;
- лампы ЛДЦ 80 – 9 светильников.

Рассчитываем длину одного ряда светильников L_p :

$$L_p = L_{св} \cdot n_A,$$

где $L_{св}$ — длина заданного типа светильника, м; n_A — необходимое количество светильников в одном ряду, шт.

Согласно характеристикам светильника ЛОУ 1П (см. табл. 2.3) его длина с лампами мощностью 40 Вт составляет $L_{св} = 1240$ мм, а с лампами мощностью 80 Вт — 1536 мм.

При использовании в светильнике ламп ЛБ 40 длина одного ряда светильников L_p составит

$$L_p = L_{св} \cdot n_A = 1,24 \cdot 11 = 13,64 \text{ м};$$

Аналогично рассчитываем длину одного ряда светильников L_p при использовании других применяемых в светильнике ЛСП 01 стандартных ламп:

ламп ЛТБ 40 или ЛХБ 40 — 13,64 м;

лампы ЛД 40 — 17,36 м;

лампы ЛДЦ 40 — 19,84 м;

лампы ЛБ 80 — 9,24 м;

ламп ЛТБ 80 или ЛХБ 80 — 10,75 м;

лампы ЛД 80 — 12,28 м;

лампы ЛДЦ 80 — 13,82 м.

Сопоставим рассчитанную длину одного ряда светильников L_p при использовании в светильнике различных типов ламп с длиной помещения A .

Длина одного ряда светильников ЛСП 01 при установке в них ламп типа ЛДЦ 40 больше длины помещения. Следовательно, в проектируемой осветительной установке применять лампы ЛДЦ 40 нельзя.

При использовании остальных типов ламп длина одного ряда светильников меньше длины помещения. Целесообразней выбрать вариант с применением ламп ЛД 40, при котором светильники устанавливаются в ряду без разрывов, обеспечивая наиболее равномерное освещение помещения и рабочих мест.

Определяем расчётную освещённость рабочей поверхности E_p в помещении лаборатории при использовании в светильнике двух ламп типа ЛД 40 и относительную погрешность расчёта $\delta_{отн}$:

$$E_p = 2E \cdot \frac{\Phi_{л4} \cdot n_A}{\Phi_p} = \frac{2 \cdot 300 \cdot 2500 \cdot 14}{68796} = 305,25 \text{ лк};$$

$$\delta_{отн} = \frac{E_p - E}{E} \cdot 100\% = \frac{305,25 - 300}{300} \cdot 100\% = 1,75\% .$$

Расчёт считаем законченным, так как отклонение расчётной освещённости E_p от нормируемой E не превышает допустимые пределы $+20 \div -10$ %.

Варианты задания «Расчёт искусственного освещения» приведены в Приложении 4.

Раздел 3. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

При эксплуатации электрооборудования напряжением до 1000 В одна из возможных причин поражения током – появление напряжения на металлических конструктивных частях электроустановок, вследствие повреждения изоляции и замыкания токоведущей части установки на корпус. Например, при замыкании фазного провода на корпус, если корпус установки изолирован от земли, то прикосновение к нему в этом случае будет так же опасно, как и к фазе сети. Человек попадает под напряжение прикосновения практически равное фазному напряжению $U_{пр} \approx 220$ В.

Одной из основных мер защиты человека от поражения током при случайном появлении напряжения на металлических нетоковедущих частях электроустановок является защитное заземление.

3.1. Назначение, принцип действия, область применения

Защитное заземление – это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Назначение защитного заземления – устранение опасности поражения током в случае прикосновения человека к корпусу и другим металлическим нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением, вследствие повреждения изоляции токоведущих частей.

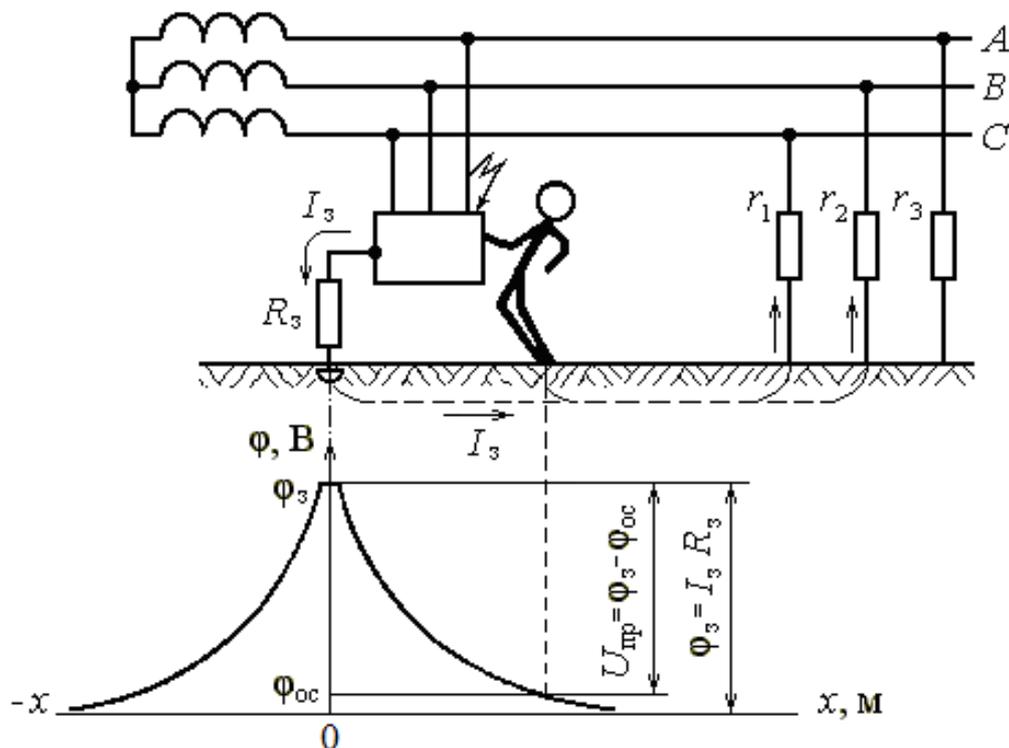


Рис. 3.1. Схема защитного заземления и распределение потенциала на поверхности земли вокруг полушарового заземлителя

Конструктивными элементами защитного заземления являются *заземлитель* – проводник или группа соединенных проводников, размещаемых в земле, и *заземляющие проводники*, соединяющие заземляемые части оборудования с заземлителем.

Область применения защитного заземления – трехфазные сети напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной или с глухозаземленной нейтралью.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) защитное заземление следует выполнять: при напряжении 380 В и выше переменного и 440 В и выше постоянного тока во всех случаях; в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, а также в наружных установках при напряжении 42 В и выше переменного и 110 В и выше постоянного тока.

Рассмотрим принцип действия защитного заземления. При замыкании токоведущей части на заземленный корпус электроустановки происходит стекание тока I_3 через заземлитель в землю (см. рис. 3.1), что приводит к резкому снижению потенциала заземлившейся токоведущей части и потенциала корпуса установки φ_3 (В) до значения

$$\varphi_3 = I_3 R_3, \quad (3.1)$$

где I_3 – ток, проходящий через заземлитель в землю, А; R_3 – сопротивление заземлителя расстеканию тока, Ом.

Кроме того, вследствие стекания тока в землю, на поверхности грунта вокруг заземлителя также появится потенциал φ (В), изменяющийся по кривой, зависящей от формы заземлителя. Например, вокруг полушарового заземлителя потенциал на поверхности земли изменяется по закону гиперболы (см. рис. 3.1):

$$\varphi = \frac{I_3 \rho}{2\pi \cdot x}, \quad (3.2)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; x – расстояние на поверхности земли от заземлителя, м.

Из сказанного следует, что при замыкании токоведущей части на заземленный корпус электроустановки в случае прикосновения человека к корпусу величина напряжения прикосновения $U_{пр}$ будет определяться разностью потенциалов корпуса и поверхности земли (см. рис. 3.1):

$$U_{пр} = \varphi_3 - \varphi_{ос},$$

где φ_3 – потенциал заземленного корпуса электроустановки, В; $\varphi_{ос}$ – потенциал основания (земли) в том месте, где стоит человек, В.

Принцип действия защитного заземления заключается в снижении до безопасных значений напряжения прикосновения в случае замыкания на корпус. Это достигается путем уменьшения потенциала корпуса заземленной установки (уменьшением сопротивления заземлителя), а также выравниванием потенциалов корпуса и основания за счет повышения

потенциала земли в месте, где стоит человек. В результате, при замыкании, например, фазного провода на заземленную электроустановку человек, прикасаясь к корпусу, окажется под напряжением прикосновения значительно меньшим фазного напряжения – не более 40 В.

Однако при заземлении электроустановок возникает и отрицательное явление: при стекании тока с одиночного заземлителя (рис. 3.2) на поверхности земли образуется опасная зона радиусом 20 м от заземлителя, в которой возможно поражение человека напряжением шага, так как удаленные на разные расстояния от заземлителя точки земли имеют разные потенциалы.

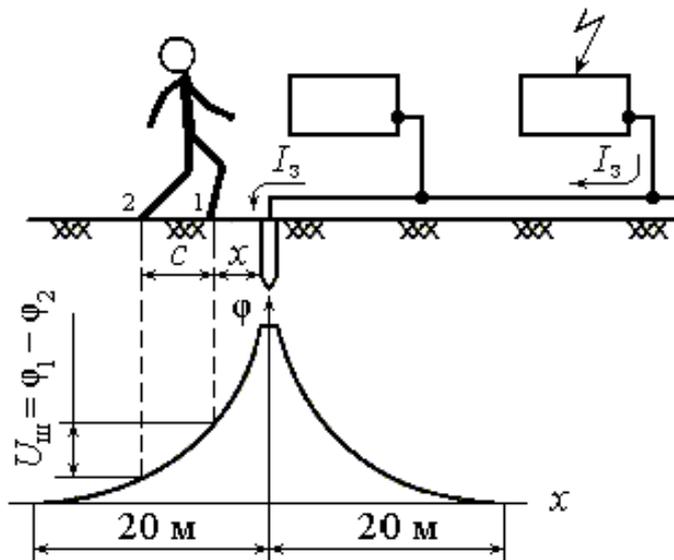


Рис. 3.2. Напряжение шага и потенциальная кривая одиночного заземлителя

При движении человека в зоне растекания тока в земле ступни его ног оказываются в точках с разными потенциалами φ_1 и φ_2 , следствием чего и является возникновение напряжения шага $U_{ш}$, В:

$$U_{ш} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{I_3 \rho}{2\pi \cdot x} - \frac{I_3 \rho}{2\pi(x+c)} = \frac{I_3 \rho c}{2\pi \cdot x(x+c)}, \quad (3.3)$$

где c – длина шага, принимаемая равной 0,8 м.

При напряжении шага порядка 100 В и выше наступают судороги ног, человек может упасть на землю, что приводит к увеличению разности потенциалов и более опасному прохождению тока вдоль тела.

В целях уменьшения опасности поражения напряжением шага на практике при устройстве защитного заземления применяют, как правило, не одиночный, а групповой заземлитель (рис. 3.7 и 3.8). При стекании тока с группового заземлителя, как видно из рис. 3.7, распределение потенциала на поверхности земли между соседними заземлителями происходит по суммарной потенциальной кривой 3, получаемой при сложении потенциальных кривых 1 и 2 одиночных заземлителей. В результате напряжение шага уменьшается от значения $U_{ш1}$ при одиночном заземлителе до $U_{ш2}$ при двух заземлителях и не будет превышать допустимых значений.

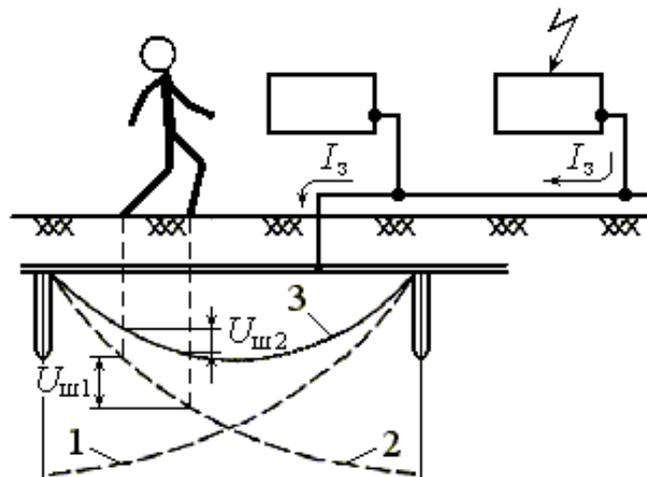


Рис. 3.7. Напряжение шага при одиночном и групповом заземлителе:
 1, 2 – потенциальные кривые при одиночном заземлителе;
 3 – потенциальная кривая при групповом заземлителе

3.2. Типы заземляющих устройств

Для заземления электроустановок используется *заземляющее устройство* (рис. 3.8), состоящее из заземлителя – одиночного или группы заземлителей 1, конструктивно объединенных соединительной полосой 2, размещаемых в земле, и заземляющего проводника 3, соединяющего заземляемую установку 4 через проложенную по стенам помещения магистраль заземления 5 с заземлителем.

Для присоединения заземляющего проводника на корпусе установки должен быть предусмотрен элемент для заземления – болт 6 (винт, шпилька), выполненный из металла, стойкого к коррозии. Возле болта должен быть нанесен нестираемый при эксплуатации знак заземления 7.

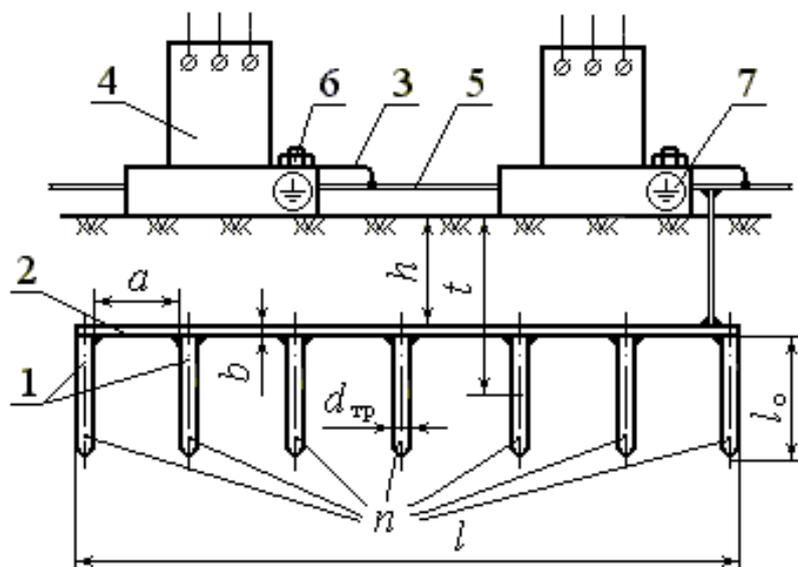


Рис. 3.8. Устройство защитного заземления

В качестве искусственных заземлителей, располагаемых в земле чаще всего вертикально, используются стальные трубы диаметром 5 – 6 см с толщиной стенки не менее 3,5 мм или уголки с толщиной полок не менее 4 мм и размерами от 40x40 мм до 60x60 мм длиной 2,5 – 3 м.

Различают два типа заземляющих устройств: *выносное* и *контурное*.

В выносном заземляющем устройстве заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое электрооборудование. Такой тип заземляющего устройства применяют только при малых значениях тока замыкания на землю.

В контурном заземляющем устройстве одиночные вертикальные заземлители располагают по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование (см. рис. 3.9), или заземлители распределяют по всей площадке по возможности равномерно.

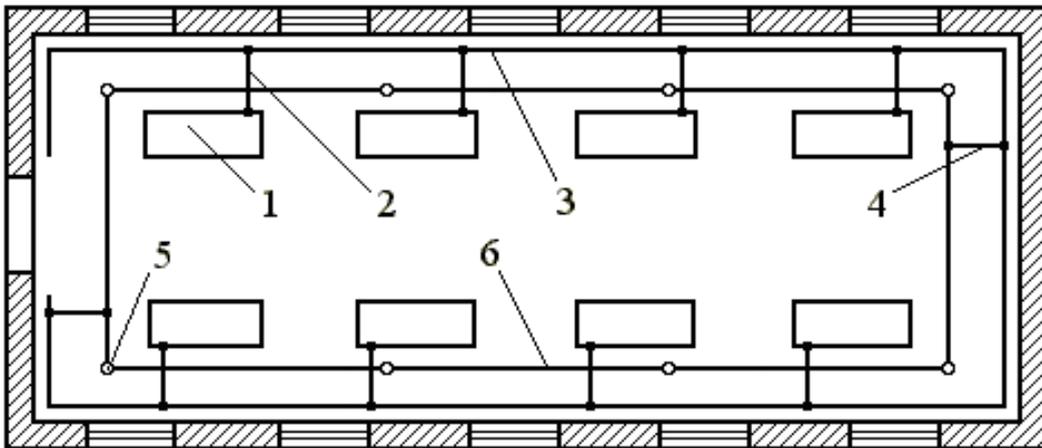


Рис. 3.9. Схема контурного заземляющего устройства (в плане):

- 1 – электроустановка; 2 – заземляющий проводник;
- 3 – магистраль заземления; 4 – перемычка;
- 5 – заземлитель; 6 – соединительная полоса

Безопасность при использовании контурного заземляющего устройства обеспечивается не только уменьшением потенциала заземленного оборудования, но и выравниванием и повышением потенциала на поверхности защищаемой территории путем размещения одиночных заземлителей на определенном расстоянии друг от друга (менее 40 м).

Расчёт контурного заземляющего устройства сводится к определению количества заземлителей, длины соединительной полосы и схемы размещения заземлителей в земле на защищаемой территории, при которых сопротивление заземляющего устройства и напряжение прикосновения не превысят допустимых значений.

3.3. Расчёт защитного заземления

Расчёт защитного заземления производится из условия, что согласно ПУЭ сопротивление заземляющего устройства электроустановок напряжением до 1000 В не должно превышать 4 Ом.

1. Определяется сопротивление растеканию тока в земле одного вертикального заземлителя R_0 в виде:

а) трубы, вбитой в землю до уровня ее поверхности:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l_0} \cdot \ln \frac{4l_0}{d_{\text{тр}}}, \quad (3.4)$$

где $\rho_p = \rho \cdot k_{\text{сез}}$ – расчётное удельное сопротивление грунта, Ом·м; ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; $k_{\text{сез}}$ – коэффициент, учитывающий промерзание грунта; (при размещении заземлителя на глубине $h > 1$ м и $k_{\text{сез}} = 1$); l_0 – длина заземлителя, м; $d_{\text{тр}}$ – диаметр трубы, м;

б) уголка (при том же условии):

$$R_{\text{уг}} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l_0} \cdot \ln \frac{4l_0}{0,95 \cdot b_{\text{пу}}}, \quad (3.5)$$

где $b_{\text{пу}}$ – ширина полки уголка, м.

Если заземлители забиваются в землю ниже уровня ее поверхности с некоторым заглублением h (причем $h \geq 0,5$ м), то сопротивление одного заземлителя растеканию тока определяется по следующим формулам:

а) для трубы:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l_0} \cdot \left(\ln \frac{2l_0}{d_{\text{тр}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_0}{4t - l_0} \right), \quad (3.6)$$

где $t = h + l_0 / 2$ – расчётный параметр, м,

б) для уголка:

$$R_{\text{уг}} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l_0} \cdot \left(\ln \frac{4l_0}{0,95 \cdot b_{\text{пу}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_0}{4t - l_0} \right). \quad (3.7)$$

2. Определяется сопротивление растеканию тока соединительной полосы $R_{\text{п}}$, в качестве которой применяют трубы или полосовую сталь.

Если соединительная полоса находится на поверхности земли ($h = 0$), то используются следующие формулы:

а) для трубы:

$$R_{\text{п}} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{d_{\text{тр}}}, \quad (3.8)$$

где l – длина соединительной полосы, м, которую определяют по формулам:

- при расположении заземлителей в ряд: $l = 1,05 a (n - 1)$;

- при расположении заземлителей по контуру: $l = 1,05 a n$,

где a – расстояние между соседними заземлителями, м; n – число вертикальных заземлителей, шт.

Требуемое число вертикальных заземлителей определяется по формуле:

$$n = \frac{R_0}{R_3 \eta_3},$$

где R_0 – сопротивление одиночного заземлителя ($R_{тр}$ или $R_{уг}$), Ом; R_3 – допустимое сопротивление заземляющего устройства согласно требованиям ПУЭ ($R_3 \leq 4$ Ом); η_3 – коэффициент взаимного экранирования заземлителей;

б) для стальной полосы шириной b :

$$R_{п} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{2l}{0,5 \cdot b}. \quad (3.9)$$

При размещении соединительной полосы на некотором заглублении h сопротивление растеканию тока с нее определяется по формулам:

а) для трубы:

$$R_{п} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{d_{тр} h}, \quad (3.10)$$

б) для полосы:

$$R_{п} = \frac{\rho_p}{2\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{l^2}{0,5 \cdot b h}. \quad (3.11)$$

4. После определения величины сопротивлений одиночного заземлителя R_0 ($R_{тр}$ или $R_{уг}$) и соединительной полосы $R_{п}$ рассчитывается полное сопротивление заземляющего устройства растеканию тока по формуле:

$$R_{з\gamma} = \frac{R_{тр} \cdot R_{п}}{R_{тр} \eta_{п} + n R_{п} \eta_3}, \quad (3.12)$$

где $\eta_{п}$ – коэффициент экранирования соединительной полосы.

Если полученное значение $R_{з\gamma}$ не удовлетворяет требованию ПУЭ, т. е. более 4 Ом, то изменяют число заземлителей и расчёт повторяют заново.

Пример расчёта заземления. Произвести расчёт параметров контурного заземляющего устройства для защитного заземления электроустановок по следующим исходным данным: заземлители – стальные трубы диаметром 50 мм, длиной 3 м забиваются в землю на глубину 0,6 м от ее поверхности; соединительная полоса – стальная полоса шириной 40 мм; грунт – глина, удельное сопротивление которой $\rho = 60$ Ом·м. Расстояние между двумя соседними заземлителями 4 м; значения коэффициентов: $k_{сез} = 1,4$; $\eta_3 = 0,7$; $\eta_{п} = 0,4$.

Решение.

1. Определяем сопротивление одного вертикального заземлителя растеканию тока в земле по формуле (3.6):

$$R_{тр} = \frac{60 \cdot 1,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,1 + 3}{4 \cdot 2,1 - 3} \right) = 23,007 \text{ Ом.}$$

$$t = 0,6 + \frac{3}{2} = 2,1 \text{ м.}$$

2. Определяем необходимое число вертикальных заземлителей n :

$$n = \frac{R_0}{R_3 \eta_3} = \frac{23,007}{4 \cdot 0,7} = 8,216 \text{ шт.}$$

Полученное значение следует округлять в меньшую сторону до целого числа. Принимаем число заземлителей $n = 8$ шт.;

3. Рассчитываем длину соединительной полосы l :

$$l = 1,05 \cdot an = 1,05 \cdot 4 \cdot 8 = 33,6 \text{ м.}$$

4. Определяем сопротивление соединительной полосы растеканию тока по формуле (3.11):

$$R_n = \frac{60 \cdot 1,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 33,6} \cdot \ln \frac{33,6^2}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,6} = 4,558 \text{ Ом.}$$

5. Рассчитываем полное сопротивление заземляющего устройства, используя формулу (3.12):

$$R_{3y} = \frac{23,007 \cdot 4,558}{23,007 \cdot 0,4 + 8 \cdot 4,558 \cdot 0,7} = 3,019 \text{ Ом.}$$

Расчёт считаем законченным, так как сопротивление проектируемого заземляющего устройства менее 4 Ом, что соответствует требованиям ПУЭ.

6. В отчете необходимо представить результаты расчёта параметров защитного устройства и две схемы: а) схему устройства защитного заземления (рис. 3.8); б) схему контурного заземляющего устройства (рис. 3.9).

Варианты задания «Расчёт защитного заземления» приведены в Приложении 5.

Варианты задания «Лазерная безопасность»: Характеристики

№ варианта	Марка лазера или лазерной установки, производитель, рабочее вещество	Длина волны лазерного излучения λ , мкм	Режим		Тип пучка	Мощность P (для Н) или средняя мощность (для И) P_{cp} , Вт	Расходимость θ , мрад	Диаметр пучка на выходе из лазера d , мм	Частота следования импульсов ν , Гц	Энергия в импульсе $W(\tau_u)$, мкДж	Длительность импульса τ_u , нс	Длина лазера Z , м
1	ТЛ-3, CO ₂ , «Технолазер»	10,6	Н	Р		$3 \cdot 10^3$	1,5	20				2
2	ИЛГН-802М, CO ₂ , ФГУП НПП «Исток»	10,6	Н	Г		150	4	8				1,3
3	LCD-15W, CO ₂ , ОАО «НИИ ГП «Плазма»	10,6	Н	Г		15	10	2				0,46
4	ЛГИ-512, CO ₂ , ОАО «НИИ ГП «Плазма»	10,6	И	Г		10	8	15	10^3	$8 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^4$	1
5	406-2, Nd:YAG, «U.S. Laser Corp.» (США)	1,064	Н	Г		10^3	25	5				0,7
6	LS-2136LP, Nd:YAG, СП«Лотис ТИИ»(РФ-Яп.)	1,064	И	Г		2	0,7	3	50	$4 \cdot 10^4$	24	0,8
7	ЭС-3, Nd:YAG, ООО «Электростекло»	1,57	И	Г		0,7	0,7	35	20	$35 \cdot 10^3$	8	0,3
8	LF2210, Nd:YAG (2-ая гарм.), «СОЛАР-ТИИ» (Белор.-Яп.)	0,532	Н	Г		12	3,5	4				0,9
9	YLR-150, Yb:YAG (волокон.), ООО НТО «ИРЭ-Полнос»	1,07	И	Р		150	2,5	0,2	$2 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^3$	10^4	10
10	ТЛМ-5, Tu:YAG (волокон.), ООО НТО «ИРЭ-Полнос»	1,95	Н	Р		5	2	1				10
11	Odyssey 30, Ho:YAG, «Convergent Laser Technologies» (США)	2,1	И	Р		30	8	0,2	20	$3 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^5$	0,8
12	Navigator 1064-5, Nd:YFL, «Spectra-Physics»(США)	1,064	И	Г		5	5,5	0,28	$3,5 \cdot 10^4$	140	8,5	0,17
13	DTL-329QT, Nd:YFL, «Лазер-компакт»	1,053	И	Г		0,2	0,4	3	10^3	200	$15 \cdot 10^3$	0,3
14	DTL-379QT, Nd:YFL (3-я гарм.), «Лазер-компакт»	0,351	И	Г		0,05	1	1,2	10^3	50	5	0,3

Примечание: Н – непрерывный; И – импульсный; Р – равномерное распре-

Приложение 1

серийно выпускаемых лазеров и исходные данные для расчёта

Вариант оптической схемы по рисунку 5	Расстояние от лазера до 1-го оптического элемента ℓ_1 , м	Расстояние от 1-го до 2-го оптического элемента ℓ_2 , м	Расстояние от 2-го оптического элемента до человека ℓ_3 , м	Радиус кривизны 1-го зеркала $r_{сф1}$, м	Радиус кривизны 2-го зеркала $r_{сф2}$, м	Коэффициент отражения на 1-ом оптическом элементе, η_1	Коэффициент отражения на 2-ом оптическом элементе, η_2	Время воздействия излучения t	Расстояние до рассеивающего слоя b , м	Длина рассеивающего слоя B , м	Дальность видимости S_m , км	Площадь приемной оптической системы Q , м ²
а	1	0,3	3	0,65	∞	0,98	0,6	6 ч				
в	0,3	0,4	5	∞	3	0,97	0,8	30 с				
е								30 мин	3	150	10	0,01
а	2	0,2	1,4	0,38	∞	0,95	0,55	4 ч				
а	0,5	0,3	2	0,6	∞	0,93	0,3	1 ч				
в	1,4	0,5	2	∞	0,85	0,97	0,64	1 мин				
е								10 мин	5	250	5	0,02
з								1,5 ч	1,5	30		0,01
а	0,2	0,4	1,5	0,9	∞	0,96	0,42	2 ч				
г	0,8	3	3	∞		0,85	0,46	3 ч				
д								20 с				
ж								0,01 с		$7 \cdot 10^3$	5	0,09
д	0,5	1	1,3					0,25 с				
ж								0,5 с		$2 \cdot 10^3$	5	0,08

деление интенсивности; Г – гауссово распределение интенсивности.

Варианты задания «Лазерная безопасность»: Характеристики

№ варианта	Марка лазера или лазерной установки, производитель, рабочее вещество	Длина волны лазерного излучения λ , мкм	Режим	Тип пучка	Мощность P (для Н) или средняя мощность (для И) $P_{ср}$, Вт	Расходимость θ , мрад	Диаметр пучка на выходе из лазера d , мм	Частота следования импульсов ν , Гц	Энергия в импульсе $W(\tau_u)$, мкДж	Длительность импульса τ_u , нс	Длина лазера Z , м
15	СТА-01-ФН, Nd:LSB (4-ая гарм.), «Standa Ltd» (Литва)	0,266	И	Г	0,01	1,2	0,1	10^4	1	0,5	0,12
16	Л12-ЭД, Ег:стекло, ОАО «ЛЮМО»	1,54	И	Р	0,12	4	4	10	$12 \cdot 10^3$	40	0,12
17	CrF-700SP, хром-форстерит, ООО «Авеста-Проект»	1,25	И	Г	0,7	2	1	$95 \cdot 10^6$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	1
18	Ti:S, Ti:Sa, ООО «Авеста-Проект»	0,8	Н	Г	1,5	2	0,1				0,4
19	ЛГИ-511, N ₂ , ОАО «НИИ ГП «Плазма»	0,337	И	Р	0,24	7	5	10^3	240	8	1
20	АИЛ-0.5, N ₂ , ОАО «НИИ ГП «Плазма»	0,337	И	Г	$5 \cdot 10^4$		1,5	5	2,5	200	0,2
21	ЛГН-220М, He-Ne, ОАО «НИИ ГП «Плазма»	0,63	Н	Р	0,1	1,5	2,5				1,9
22	ГНИК-3-4, He-Ne, ОАО «НИИ ГП «Плазма»	3,392	Н	Р	0,002	4,5	4,5				1,2
23	ГНИК-5, He-Ne, ОАО «НИИ ГП «Плазма»	5,4	Н	Р	0,002	5	1,5				0,68
24	ГККЛ-4УМ, He-Cd, ОАО «НИИ ГП «Плазма»	0,325	Н	Р	0,006	2,5	1,8				0,6
25	ГКЛ-50В, He-Cd, ОАО «НИИ ГП «Плазма»	0,442	Н	Г	0,06	0,9	1,6				1
26	ЛГН-402, Ar, «ЗЛЕТ» (Укр.)	0,48	Н	Р	4	1,5	3				1,1
27	GS-5KS, Kr, ЗАО «Лазер Варио Ракурс»	0,647	Н	Г	5	1	3				1,8
28	М-951К, Ar-Kr, ОАО «НИИ ГП «Плазма»	0,647	Н	Р	3,5	1,3	4				1,58
29	Kulon-10Cu, на парах Cu, ООО «НПП ВЭЛИТ»	0,511	И	Р	10	4	14	$16 \cdot 10^3$	625	20	1,26
30	Kulon-15Au, на парах Au, ООО «НПП ВЭЛИТ»	0,628	И	Р	1,5	4	14	$16 \cdot 10^3$	90	20	1,26

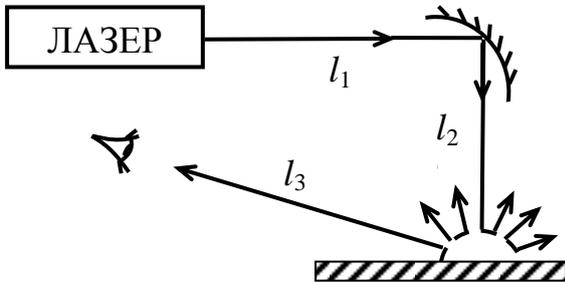
П р и л о ж е н и е 1 (продолжение)
серийно выпускаемых лазеров и исходные данные для расчёта

Вариант оптической схемы по рисунку 5	Расстояние от лазера до 1-го оптического элемента ℓ_1 , м	Расстояние от 1-го до 2-го оптического элемента ℓ_2 , м	Расстояние от 2-го оптического элемента до человека ℓ_3 , м	Радиус кривизны 1-го зеркала $r_{сф1}$, м	Радиус кривизны 2-го зеркала $r_{сф2}$, м	Коэффициент отражения на 1-ом оптическом элементе, η_1	Коэффициент отражения на 2-ом оптическом элементе, η_2	Время воздействия излучения t	Расстояние до рассеивающего слоя b , м	Длина рассеивающего слоя B , м	Дальность видимости S_m , км	Площадь приемной оптической системы Q , м ²
б	0,3	0,4	8	∞	∞	0,9	0,8	5 мин				
ж								0,1 с		$5 \cdot 10^3$	10	0,07
г	1,5	0,3	1,2	∞		0,7	0,27	10 с				
д	5	10	7					5 с				
в	2,5	1	1,5	∞	1,5	0,94	0,38	1 ч				
д	14	20	0,5					3 ч				
б	0,5	1,5	15	∞	∞	0,96	0,53	2 ч				
г	1,1	0,7	0,3	∞		0,5	0,6	3 мин				
д	4	0,8	0,6					8 мин				
б	1,2	0,4	3	∞	∞	0,88	0,7	45 с				
в	1,8	0,8	0,5	∞	5	0,98	0,82	30 мин				
г	0,4	2	1,7	∞		0,93	0,2	25 мин				
е								1,5 ч	4	500	10	0,03
ж								0,3 с		$4 \cdot 10^3$	5	0,1
з								2 мин	4	50		0,02
б	2	2,5	25	∞	∞	0,97	0,91	10 мин				

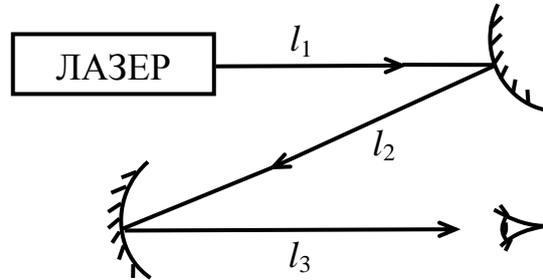
Приложение 2

Варианты оптических схем к заданию «Лазерная безопасность»

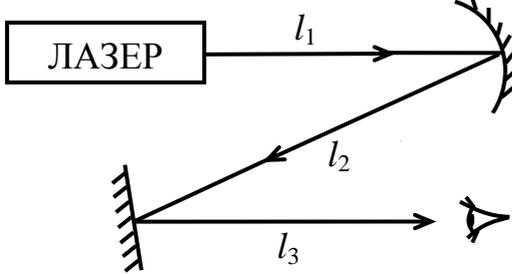
а) Обработка материала



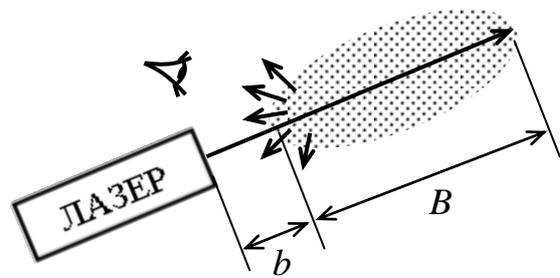
д) Передача сигнала в атмосфере



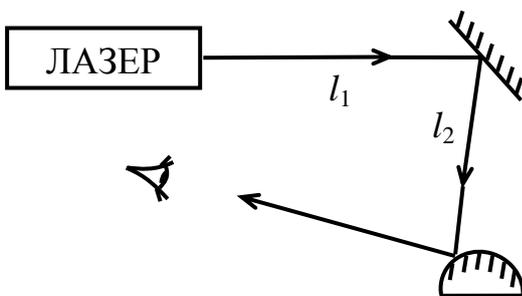
б) Измерительная установка



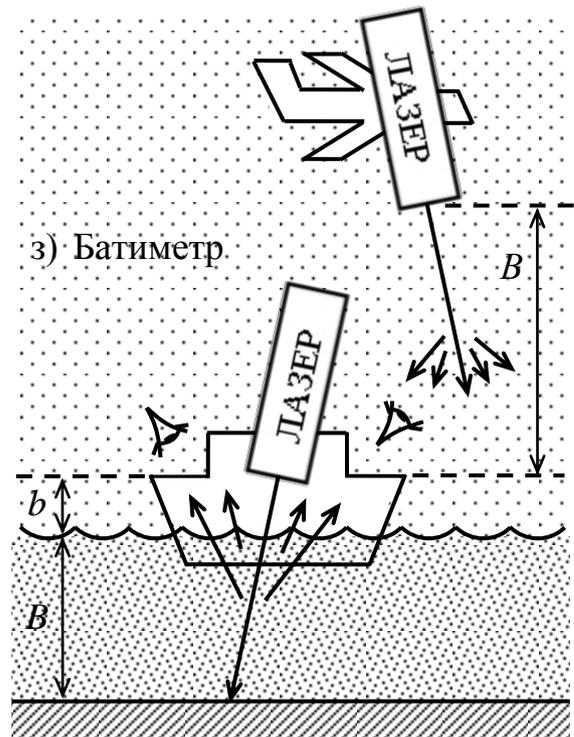
е) Локатор, маяк



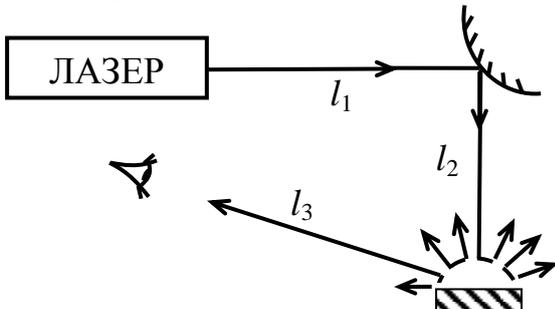
в) Изготовление деталей



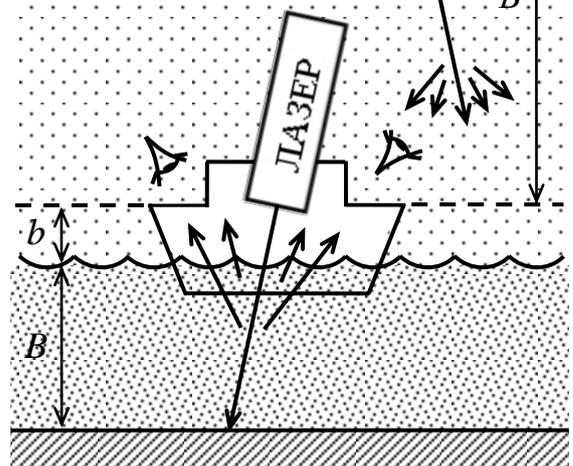
ж) Лидар, альтиметр



г) Научное исследование



з) Батиметр



Приложение 3

Значения интегральной показательной функции $E_i(x)$
и интегральной показательной функции второго порядка $\Phi(x)$
при некоторых значениях аргумента x

x	$E_i(x)$	$\Phi(x)$
0,054	-2,3	9,9
0,39	0,06	0,8
1,16	2,2	-1
2,56	6	-3
2,7	6,4	-3,2
3,5	9	-4,5
7,92	33,4	-16,7
14,5	127,5	-63,73
175	$17 \cdot 10^6$	$-8,54 \cdot 10^5$
320	$7,24 \cdot 10^7$	$-3,62 \cdot 10^7$

Приложение 4

Варианты задания «Расчёт искусственного освещения»

№ варианта	Метод расчёта	Тип светильника	Размеры помещения, м			Назначение помещения
			<i>A</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	
1	Метод коэффициента использования светового потока	ЛСП 01	15	8,0	4,0	Машиносчетное бюро
2			16	9,0	4,2	То же
3			11	7,0	3,5	Аналитическая лаборатория
4			14	6,5	4,0	То же
5			16	10,0	4,8	Лаборатория электронных устройств
6		ЛСП 02	18	8,0	4,5	Лаборатория электронных устройств
7			16	12,0	4,0	Конструкторское бюро
8			20	6,0	4,2	То же
9			24	11,0	5,0	Машинный зал ВЦ
10			20	9,0	4,0	То же
11		ЛОУ 1П	10	7,0	4,0	Помещение для программистов
12			12	8,0	4,0	То же
13			16	8,0	4,0	Фотометрическая лаборатория
14			14	7,5	3,8	То же
15			12	7,5	4,5	То же
16	Точечный метод	ЛСП 01	16	10,0	3,5	Машинный зал ВЦ
17			17	11,5	3,8	То же
18			16	12,5	4,0	То же
19			12	8,0	4,2	Помещение для программистов
20			17	9,0	4,8	То же
21		ЛСП 02	14	8,5	3,5	Конструкторское бюро
22			16	10,0	3,8	Аналитическая лаборатория
23			16	11,0	4,0	То же
24			13	11,5	4,2	То же
25			18	8,0	4,8	То же
26		ЛОУ 1П	11	8,5	3,5	Конструкторское бюро
27			14	11,0	4,0	То же
28			14	10,0	3,8	Фотометрическая лаборатория
29			15	8,0	4,6	То же
30			16	11,5	4,2	Машинный зал ВЦ

Приложение 5

Варианты задания «Расчёт защитного заземления»

№ варианта	Вид заземлителя	Вид соедин. полосы	h , м	l_0 , м	Заземлитель		Соединит. полоса		a , м	$K_{сез}$	η_z	$\eta_{п}$	ρ , Ом·м
					$d_{тр}$, мм	$b_{пу}$, мм	$d_{тр}$, мм	b , мм					
1	Труба	Полоса	0	2,5	50			30	3,5	1,5	0,70	0,3	40
2				2,7	55			35	4,0	1,4	0,7	0,35	60
3				2,9	40			40	4,5	1,3	0,65	0,3	70
4				2,5	50			30	5,0	1,4	0,7	0,3	50
5				2,6	45			35	5,5	1,5	0,75	0,4	90
6				2,8	55			35	5,0	1,5	0,65	0,35	80
7				3,0	60			30	4,5	1,4	0,6	0,3	50
8	Уголок	Труба	0,6	2,6		50	50		4,0	1,3	0,7	0,35	30
9				2,7	45	35		4,0	1,2	0,75	0,25	70	
10				2,9	40	40		5,0	1,4	0,75	0,25	40	
11				2,5	45	35		4,5	1,3	0,65	0,25	80	
12				2,6	50	50		4,0	1,2	0,6	0,3	60	
13				2,8	60	50		5,0	1,4	0,7	0,3	50	
14				3,0	55	45		5,5	1,3	0,65	0,35	90	
15	Труба	Полоса	0,8	2,9	55			35	5,0	1,3	0,75	0,35	60
16				2,8	60			40	4,5	1,2	0,65	0,3	40
17				2,7	50			35	4,0	1,1	0,6	0,3	70
18				2,5	40			35	5,5	1,2	0,8	0,4	30
19				2,6	50			30	5,0	1,3	0,7	0,4	80
20				2,8	40			40	4,5	1,2	0,6	0,25	50
21				3,0	55			35	4,0	1,1	0,6	0,4	120
22	Уголок	Труба	1,0	2,8		40	40		4,5	1,2	0,8	0,25	90
23				2,7	50	50		5,0	1,1	0,85	0,25	70	
24				2,9	45	35		5,5	1,1	0,85	0,3	40	
25				2,5	40	40		4,0	1,2	0,65	0,3	60	
26				2,6	50	50		4,5	1,1	0,7	0,3	50	
27				2,8	55	50		5,0	1,1	0,75	0,25	80	
28				3,0	60	55		5,5	1,0	0,7	0,3	30	

Список литературы

1. ГОСТ «Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий». – М.: 1996.
2. СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров». – М.: 1992.
3. Вейко В.П., Сербин А.И. Методические указания: Определение предельно допустимых уровней облучения и расчёт границ лазерноопасных зон. – Л.: ЛИТМО, 1986.
4. Маньковский В.И. Основы оптики океана. Методическое пособие. – НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 1996.
5. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985.
6. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). – М.: Советское радио, 1977.
7. Кириллов А.И., Морсков В.Ф., Устинов Н.Д. Дозиметрия лазерного излучения. – М.: Радио и связь, 1993.
8. Рахманов Б.Н., Чистов Е.Д. Безопасность при эксплуатации лазерных установок. – М.: Машиностроение, 1981.
9. Справочная книга для проектирования электрического освещения /под ред. Г.Н. Кнорринга/. – Л.: Энергия, 1983.
10. Ключев С.А. Освещение производственных помещений. – М.: Энергия, 1979.
11. СНиП 23-05-95. Нормы освещенности. Естественное и искусственное освещение. – М.: Стройиздат, 1996.
12. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1989.
13. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергия, 1985.
14. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
15. Правила эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
16. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2003.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в промышленность, строительство, транспорт, связь, медицину, биологию, экологию, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD-диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей, и т.д., а в ближайшей перспективе – для избавления человечества от очков и морщин (сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

История кафедры ЛТ и ЭП делится на 4 разных периода:

Период I – с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

Период II – период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ – 1982 – 1988 гг.

Период III – с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий – 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. – научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. – работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. – работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. – кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «Лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. – кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер–педагог» со специализацией «экология».

С 2000 г. – лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микротехнологий».

2001 – 2007 г. – этот статус ежегодно подтверждается.

2010 г – присуждение Премии Правительства Российской Федерации в области образования за «Создание системы подготовки специалистов высшей квалификации по лазерным технологиям»

- За период времени с 1988 по 2010 г. кафедра выпустила более 400 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;

Период IV с 2008 г. и по настоящее время характеризуется тем, что университет явился победителем конкурса Правительства РФ 2006-2008 г.г., проводимого в рамках приоритетного национального проекта «Образование» по отбору образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы.

При этом одним из направлений научно-образовательной деятельности Университета в рамках конкурса было выбрано направление «Лазерные

технологии и системы», которое соответствует приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в РФ и критическим технологиям РФ.

По результатам маркетинговых исследований ожидаемый рынок труда специалистов по данному направлению в Санкт-Петербурге составляет 300 чел. в год, по России – порядка 1500 человек.

Важнейшей составной частью проекта явилось создание новых научно-образовательных структур, центров и лабораторий, для оснащения которых были проведены закупки необходимого оборудования и приборов. Приведем информацию по данному разделу программы более подробно:

СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЛАБОРАТОРИЙ И ЦЕНТРОВ

1. Лаборатория лазерных нанотехнологий в составе 4-х научно-образовательных направлений, укомплектованных современным лазерным, измерительным и аналитическим оборудованием и финансируемых грантами РФФИ, РГНФ и Роснауки.

1) Лазерное формирование многофункциональных зондов для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.

Работа базируется на значительном заделе кафедры ЛТ и ЭП по лазерной вытяжке ближнепольных оптических зондов, нанокапилляров, многослойных зондов, кантилеверов и т.п.. Она проводится на базе 15 Вт квазинепрерывного ($f = 5$ кГц, $\tau = 1$ мкс CO_2 -лазера фирмы Sinrad, специальной оптической системы облучения с тороидальным зеркалом и специализированных механических систем вытяжки с обратной электромеханической связью. Для контроля за процессом используется скоростная видеокамера AOS-x-motion (разрешение 1280 x 1024, размер пиксела 12 мкм, максимальная скорость съемки 32000 кадр/сек), и быстродействующий микропиrometer частичного излучения ИФМО (спектральный диапазон 5,7 – 8,7 мкм, температурный диапазон 200 – 2000°C, диаметр объекта 0,5 – 5 мм, время отклика 0,1 с, точность ± 10 К), а для оценки результатов и разработки методик применения многофункциональных зондов – зондовый микроскоп «Nanoeducator», НТ МДТ.

Работа проводится совместно с кафедрой нанотехнологий и материаловедения ИТМО (заведующий кафедрой – А.О. Голубок), имеющей большой опыт создания и применения зондовых микроскопов.

2) Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А – аморфизованный, К – кристаллизованный слой) и способов управления их размерами, глубиной залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.

Работа направлена на закрепление пионерского научного задела и на продвижение локальности А–К–А переходов в область наноразмеров,

времен записи и переключения в область пико- и фемтосекунд, оптимизацию сред для объемной оптической записи и поиск эффективных систем считывания информации.

Для реализации заложенных научных идей созданы стенды с пикосекундным лазером типа EXPLA PL 2143 ($\lambda = 266$ нм, 355 нм, 532 нм, 1060 нм, $W_{\text{имп}} = 30$ мДж, $\tau = 30$ пс, $f = 10$ Гц) и фемтосекундным лазером типа AVESTA (TiF-100-F4 $\lambda = 710 - 950$ нм, $P_{\text{ср}} = 500$ мВт, $f = 90$ МГц, $\tau = 100$ фс), с 10) импульсными ($\lambda = 10,6$ мкм) ТЕА-типа ($P_{\text{имп}} = 10^6$ Вт, $f = 500$ Гц, $\tau = 200$ нс) и щелевым ($P_{\text{ср}} = 150$ Вт, $f = 50 - 5000$ Гц, $\tau = 30 - 500$ мкс) CO_2 -лазерами, позволяющими в максимальной степени реализовать потенциал работы.

Для контроля за процессом разработаны схемы, созданы и оснащены системы микрофотометрического контроля (микроскоп-спектрофотометр МСФУ-К от ОАО «ЛОМО», увеличение – до 1000X, спектральный диапазон регистрации спектров и оптической плотности 350 – 900 нм, минимальный размер фотометрируемого участка 1 мкм), микротепловизионного контроля (тепловизор FLIR-Titanium), спектральный диапазон 8 – 14 мкм, разрешение изображения 320 x 256, 14 бит, максимальная частота обновления полных кадров 380 Гц скоростной видеографии (видеокамера AOS-x-motion) и др.

Работа проводится совместно с кафедрой оптоинформационных технологий и материалов (заведующий кафедрой – Н.В.Никоноров), обладающей большим опытом создания и исследования оптических материалов и всем комплексом необходимого термофизического, оптического и испытательного оборудования и приборов.

3) Наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев.

Работа основана на обнаруженном в лаборатории кафедры ЛТ еще в 1967 – 70 гг. эффекте локального термохимического воздействия лазерного излучения и, в частности, на радикальном изменении растворимости Cr при его лазерном окислении. В последнее время этот эффект дополнен также «микроструктурным» воздействием лазерного излучения на структуру тонких слоев Cr, Si и, соответственно Cr_2O_3 и SiO_2 . Оба эффекта позволяют управлять топологией и другими параметрами структур.

Работа базируется на использовании коротких (N_2 -лазер, 0,337 мкм, 10 нс) и сверхкоротких импульсов (пикосекундный и фемтосекундный лазеры, упомянутые выше, эксимерный ArF лазер (CL-7020, $W_{\text{имп}} = 250$ мДж, $P_{\text{ср}} = 5$ Вт, $f = 20$ Гц, $\tau = 17$ нс) и коротких длин волн (193 нм, 226 нм, 337 нм, 355 нм) для повышения разрешающей способности метода и продвижения его в область нанометрических размеров вплоть до теоретического предела разрешающей способности (эквивалентно толщине защитной окисной пленки). При ее проведении используются также

указанные выше приборы и устройства – зондовый микроскоп, микротепловизор и целый ряд химических и термофизических методик.

Работа проводится в настоящее время совместно с группой д.ф.-м.н. А.Г. Полещука из института автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН.

4) Управление микрогеометрией, наношероховатостью и физико-химическими свойствами поверхности материалов

В основе работы лежит эффект снижения шероховатости поверхности за счет лазерной абляции выступов. Этот эффект дополняется процессами гидродинамического затекания впадин, а также микроструктурирования, основанными на возникновении поверхностных электромагнитных волн и периодического рельефа и использовании других оптико-физических явлений (интерференционных, ближнепольных и т.д.). Все изложенные методы и приемы позволяют создавать оптимальные параметры поверхностей (асферизация, полировка, структурирование) из стекла и пластмассы, металла и др. материалов.

В работе используются импульсные CO₂-лазеры (ТЕА CO₂ и щелевой), эксимерный, пико- и фемтосекундные лазеры, специальные оптические системы, системы активного контроля профиля поверхности с обратной связью, зондовый микроскоп, микротепловизор.

Отдельное направление работ этого цикла – микро- и наноструктурирование поверхности кремния за счет модификации структуры и лазерной абляции, а также управление свойствами окисла.

В настоящее время проводится также большой цикл работ по созданию рельефов для оптимизации антикоррозионных, антиобледенительных, биосовместимых и прочих подобных свойств поверхности различных материалов.

2. Лаборатория лазерной очистки и реставрации произведений культуры и искусства (ПКИН) организована совместно с фирмой ООО «Мобильные лазерные системы».

В лаборатории имеются 3 установки.

1) Лазерный комплекс очистки и реставрации ЛИК-1 на базе 200 Вт, 20 нс YAG:Nd импульсного лазера и 6-ти координатного робота (максимальный рабочий радиус, т.е. размах 1300 мм, точность при повторении позиции $\pm 0,08$ мм) с полной системой ориентации, управления позиционированием волоконно-оптической головки. Работает в режимах очистки металлических изделий сложной формы от загрязнений, оксидных пленок и т.п., подготовки под сварку, сварки и модификации поверхности с системой сбора продуктов очистки для производства работ в лабораториях и в условиях музейных интерьеров.

2) Мобильный лазерный комплекс МЛС2 на основе 50 Вт импульсного иттербиевого лазера с волоконным выводом и миниатюрной оптической головкой для очистки; может быть установлен на автономную передвижную платформу с дистанционным управлением, например, для очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений.

3) Переносной ранцевый лазерный комплекс ЛИК-2 на основе 20 Вт импульсного иттербиевого лазера с волоконным выводом и оптической системой, миниатюрной системой сканирования поверхности и встроенной системой отсоса продуктов очистки.

Все изложенные лазерные системы опробованы при исследованиях и разработке следующих процессов лазерной очистки:

- 1) лазерная очистка радиоактивно-загрязненных поверхностей,
- 2) лазерная очистка теплообменников и др. элементов энергетического оборудования,
- 3) лазерная очистка и подготовка поверхности под лазерную сварку и консервацию,
- 4) лазерная очистка краскопечатающих (флексографических) валов для полиграфии,
- 5) лазерная очистка металлических поверхностей предметов культурно-исторического наследия, городской скульптуры и декора.

В настоящее время разрабатываются физико-химические основы процессов лазерной очистки неметаллических поверхностей (мрамора и др. минералов), а также процессов реставрации стеклянных и стеклокерамических изделий (смальты, финифти, стеклянных и керамических мозаик и т.п.), фресок, стен и памятников от граффити и т.п.

3. Учебно-производственный центр лазерных технологий резки, сварки, наплавки и термообработки создан совместно с фирмой ООО «СП Лазертех».

Основой центра являются мощные иттербиевые волоконные лазеры ЛС-0,5 (кВт), ЛС-2 (кВт) или ЛС-5 (кВт) фирмы IPG-Photonics (Россия, г.Фрязино).

Лазерный комплекс для трехмерного раскроя деталей ЛУВР-1 на основе волоконного лазера с мощностью 5,0 кВт и выходным волоконным кабелем ($\lambda = 1,07$ мкм) включает универсальный 6-тикоординатный робот FA06E фирмы KAWASAKI с системой ориентации и позиционирования, и полный комплект остального оборудования (холодильная машина, система управления роботом – контроллер D40, система подготовки и подачи технологических газов фирмы Precitec), система дистанционного видеонаблюдения за техпроцессом, и т.д.

Там же установлен лазерный комплекс «Trotec Professional 1313» предназначенный для прецизионной резки и гравировки неметаллов. Комплекс включает CO₂-лазер мощностью 50 Вт, механизм сканирования

типа «летающая оптика». Максимальная скорость лазерной гравировки 1 м/с, максимальная площадь обрабатываемой поверхности 1300x1300 мм, программное разрешение 2 мкм, точность позиционирования ± 15 мкм.

Установка Trotec Professional TP 1313 применяется в следующих процессах: рекламном бизнесе, резке промышленных изделий из листовых неметаллических материалов, изготовлении вырубных штампов, трафаретов, лекал, текстильных изделий, изготовлении печатей и штампов.

Центр предназначен для подготовки специалистов современного уровня и разработки новых лазерных технологий в основном на базе волоконных технологических лазеров.

Для организации учебного процесса задействуется также современное производственное оборудование предприятий ООО «СП «Лазертех», ООО «Лазерный центр», ООО «Мобильные лазерные системы»:

- Лазерные технологические комплексы типа «Хебр» (СО₂-лазеры мощностью 1 кВт с порталными столами) для резки листовых металлических и неметаллических материалов, резки труб, сварки;

- Лазерные технологические комплексы типа «Trumatic» (СО₂-лазеры мощностью до 2,5 кВт с порталными столами) для резки листовых металлических материалов;

- Модернизированный лазерный технологический комплекс типа «Хебр» с иттербиевым волоконным лазером ЛС-2 для резки и сварки, в т.ч. сплавов цветных металлов;

- Минимаркер М 10 с иттербиевым импульсным волоконным лазером для прецизионной маркировки;

- Установка «Бетамарк 2000» (лазер YAG:Nd с ламповой накачкой и модуляцией добротности) для прецизионной маркировки;

- Установка ТЕГРА-500 (лазер YAG:Nd с ламповой накачкой) для резки цветных металлов и их сплавов;

- Специализированные лазерные комплексы со столами АП-400 (лазеры YAG:Nd с ламповой накачкой).

Таким образом, выполнение задач, поставленных инновационно-образовательной программой (ИОП) в рамках направления «Лазерные технологии и системы», позволило создать новый научно-учебный инновационный центр в НИУ ИТМО, оснащенный уникальным современным лазерным и измерительным оборудованием, способным реализовать подготовку высококвалифицированных научных кадров в области лазерных технологий и проводить исследования на самом высоком научном уровне.

Одним из недавних результатов выполнения ИОП является завоевание Университетом (в лице кафедры ЛТ и ЭП) совместно с указанными выше организациями нескольких наград на Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии, инновации, инвестиции»: Диплома I степени за

создание лазерного комплекса для трехмерной обработки материалов на базе волоконного лазера, Диплома II степени за создание учебно-производственного центра «Лазерные технологии», Диплома II степени за разработку переносной лазерной установки для очистки материалов от различных поверхностных загрязнений, Диплома II степени за разработку ранцевого устройства для лазерной очистки с вручением одной золотой и трёх серебряных медалей.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ

1. Лазерная обработка пленочных элементов, в том числе:
 - наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев,
 - лазерное локальное осаждение тонких пленок.
2. Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А – аморфизация, К – кристаллизация) и способов управления их размерами, глубиной их залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.
3. Создание новых оптических материалов и элементов микро- и нанофотоники на базе лазерных технологий.
4. Лазерное формирование многофункциональных зондов для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.
5. Лазерное управление микрогеометрией и физико-химическими свойствами поверхности.
6. Физико-химические основы лазерной очистки в промышленности и при реставрации произведений культурно-исторического наследия.
7. Исследование воздействия пико- и фемтосекундных импульсов лазерного излучения на вещество.
8. Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.
9. Физико-математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, Лауреат Премии Правительства РФ, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П. Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, Лауреат Премии Правительства РФ, д.т.н., профессор Е.Б. Яковлев, д.т.н., профессор Е.А. Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.-м.н., доцент Г.Д. Шандыбина, к.ф.-м.н., доцент Ю.И. Копилевич, к.ф.-м.н., доцент А.Н. Проценко, молодые преподаватели: к.т.н., доцент А.А. Петров, к.т.н., доцент Н.Н. Марковкина, к.т.н., ст. преп. Б.Ю. Новиков.

Работа кафедры проводится в тесном контакте с ведущими предприятиями Санкт-Петербурга по лазерным технологиям: ООО «СП «Лазертех» (ген. директор С.Н. Смирнов), ООО «Лазерный центр» (ген. директор С.Г. Горный), ООО «Мобильные лазерные системы» (ген. директор В.Н. Смирнов).

Кафедра также активно сотрудничает с университетами и институтами США (Princeton University, University of Areizona), Германии (BIAS, FHS Emden), Японии (RIKEN), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

Борис Юрьевич Новиков
Юрий Владимирович Колосов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМ И СРЕДСТВ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА

Учебное пособие

В авторской редакции

Дизайн

Б.Ю. Новиков, Ю.В. Колосов

Верстка

Б.Ю. Новиков

Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского национального исследовательского университета
информационных технологий, механики и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 200 экз.

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

