

Международное бюро труда Женева

ОХРАНА ТРУДА И ЗДОРОВЬЯ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ЛАЗЕРОВ
НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ**
Практическое руководство

Подготовлено Международным Комитетом
по неионизирующей радиации Международной Ассоциации
по радиационной защите в сотрудничестве
с Международной Организацией Труда



Copyright © Международная Организация Труда, 1993
Впервые опубликовано в 1993 г.

Публикации Международной Организации Труда обладают авторским правом в соответствии с Протоколом 2 Всемирной Конвенции по авторским правам. Тем не менее, небольшие выдержки могут быть воспроизведены без специального разрешения, при условии, что источник будет указан. Для получения прав на производство и перевод должно быть сделано письменное обращение в Отдел Публикаций (Права и разрешения) Международной Организации Труда, CH-1211 Женева 22, Швейцария. Международная Организация Труда приветствует подобные обращения.

MOT/Международная Ассоциация по радиационной защите
/Международный Комитет по неионизирующему излучению
Использование лазеров на рабочем месте: Практическое руководство
Женева, Международное бюро труда, 1993 г.
(Серия «Охрана труда и здоровья», № 68)
/Руководство/, /Излучение/, /Радиационная защита/, /Безопасность труда/,
/Гигиена труда/, /Риск/, /Лазеры/. 13.04.2
ISBN 92-2-108260-1
Каталог MOT по публикациям

Используемые в публикациях MOT названия, соответствующие практике ООН, а также представленные здесь материалы ни в коем случае не подразумевают выражение Международной Организацией Труда какого-либо мнения, касающегося правового статуса какого-либо государства, отдельного региона или территории, их властей или их установленных границ.

Ответственность за мнения, выраженные в статьях, исследованиях и других материалах полностью возлагается на их авторов, мнения, выраженные в этих публикациях, не являются официальным мнением Международной Организации Труда. Ссылки на названия фирм и торговых марок не подразумевают их официальной поддержки Международной Организацией Труда, так же как и в случае, когда фирмы, торговые марки или процесс не упоминаются, не означает неодобрения со стороны MOT.

Публикации MOT могут быть получены через основных распространителей книжной продукции или через местные официальные представительства MOT в различных странах, или непосредственно через Отдел публикаций MOT в Женеве, Швейцария (International Labour Office, CH-1211 Geneva 22, Switzerland). Каталог или перечень новых публикаций будет выслан бесплатно с указанного выше адреса.

ISBN 92-2-408260-2

Предисловие

Эта книга является одной из публикаций серии практических руководств по производственным опасностям, возникающим в результате воздействия неионизирующей радиации (НИР), подготовленным в сотрудничестве с Международным комитетом по неионизирующей радиации (МКНР) Международной ассоциации по радиационной защите (МАРЗ)¹ в качестве части Международной программы МОТ по улучшению производственных условий (МПУПУ).

Цель этой книги состоит в том, чтобы обеспечить базовое руководство по производственным условиям и процедурам, которые приведут к формированию более высоких требований по технике безопасности для всех, кто занимается производством, обслуживанием и эксплуатацией лазерных изделий. Книга предназначена, в частности, для компетентных органов, работодателей и рабочих, а также для лиц, которые несут ответственность за технику безопасности и гигиену труда. В ней рассматриваются следующие темы: характеристики лазерного излучения; биологическое действие и последствия для здоровья; воздействие лазерного излучения в производственных условиях и его последствия; оценка опасности; использование инструментов и методы измерений; максимально допустимые уровни воздействия и стандарты безопасности; контроль и защита от воздействия лазерного излучения; правила организации контроля и надзора. Особое внимание уделяется мерам защиты от лазерного излучения.

Публикация подготовлена рабочей группой МАРЗ/МКНР под руководством доктора Д.Х. Слиней (D.H. Sliney), в которую вошли доктора Б. Боснякович (B. Bosnjakovic), Л.А. Курт (L.A. Court), А.Ф. МакКинлей (A.F. McKinlay) и Л.Д. Сзабо (L.D. Szabo). После получения комментариев от членов МКНР, это руководство было подробно пересмотрено во время годового собрания МАРЗ/МКНР в Риме (Италия) в мае 1991 г. при сотрудничестве с доктором Г.Х. Коппе (G.H. Corpee), представляющим Международное бюро труда.

Эта книга является результатом совместной деятельности МОТ-МАРЗ/МКНР и публикуется МОТ от имени этих двух организаций. МОТ благодарит Международный комитет по неионизирующей радиации МАРЗ, и в частности, доктора Д.Х. Слиней и его рабочую группу за вклад и сотрудничество при подготовке практического руководства по использованию лазеров на рабочем месте.

¹ С мая 1992 г. МКНР МАРЗ стал независимым научным органом, называемым Международной комиссией по защите от неионизирующей радиации (МКЗНР), который несет ответственность за защиту от НИР таким же образом, как это осуществляет Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) в отношении ионизирующей радиации (Секретариат МКЗНР: c/o Dipl.-Ing.R. Matthes, Bundesamt für Strahlenschutz, Institut für Strahlenhygiene, Ingolstadter Landtrasse 1, D-85764 Oberschleissheim, Germany, тел.: +49 89 316032376 факс: +49 89 31603111.)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1. Характеристики лазерного излучения	9
1.1. Радиометрические величины. Единицы и терминология	9
1.2. Типы лазеров	9
2. Источники производственного воздействия лазерного излучения	11
2.1. Промышленное и научное применение лазеров	11
2.1.1. Промышленное использование лазеров	11
2.1.2. Научное приложение лазеров	11
2.1.3. Применение лазеров в медицине и хирургии	11
2.2. Лазерные оптико-волоконные коммуникации	12
2.3. Лазеры в дисплеях и для развлечений	12
3. Оценка опасностей и классификация лазерных изделий	14
3.1. Общие концепции определения опасности и оценка риска	14
3.2. Классификация лазерных изделий	15
3.3. Выходные параметры лазеров, необходимые для классификации приборов	16
3.4. Определение классов опасности лазерных изделий	17
3.5. Классификация лазеров, обладающих несколькими источниками и излучающих волны нескольких длин	20
3.6. Подробная оценка риска	20
3.7. Окружающая среда	20
3.7.1. Работа с лазерами в помещениях	21
3.7.2. Работа с лазерами на открытом воздухе	22
3.8. Персонал	23
4. Использование приборов и методы измерения	24
4.1. Параметры лазера, которые необходимо измерять	8
4.2. Типы радиометрических приборов	25
4.2.1. Тепловые детекторы	25
4.2.2. Полупроводниковые детекторы	26
4.2.3. Оценка опасности	26
4.3. Фотографические методы измерений	27
4.4. Калибровка и методы измерения	28
4.5. Выводы	29
5. Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности	30
5.1. Руководства МАРЗ/МКНР по пределам воздействия при лазерной радиации	30
5.1.1. Основные сведения	30
5.1.2. Пределы воздействия	30
5.1.3. Редакция 1988 года	37
5.1.4. Пределы инфракрасного лазерного воздействия	37
5.1.5. Продолжительность воздействия	37
5.1.6. Периодическое воздействие	39

5.2. Взгляд в будущее	40
6. Контроль и защита от воздействия лазерной радиации	41
6.1. Контрольные меры. Общая концепция.....	41
6.2. Надзор за лазерным излучением на рабочем месте	44
6.3. Контроль за производственным воздействием	45
6.3.1. Классификация лазеров.....	45
6.3.2. Изготовленные лазерные изделия.....	45
6.3.3. Лазеры, используемые для исследований и разработок	46
6.3.4. Лазерные системы Класса 3б и Класса 4, используемые внутри помещений .	46
6.3.5. Лазерные системы Класса 3б и Класса 4, используемые вне помещений	47
6.4. Техника безопасности	49
6.4.1. Меры предосторожности	49
6.4.2. Выбор средств защиты.....	49
6.4.3. Модифицированные лазерные изделия	49
6.4.4. Определенные условия	50
6.4.5. Демонстрация и выставки.....	50
6.4.6. Лабораторные и цеховые лазерные установки.....	50
6.4.7. Лазерные установки, используемые вне помещений и при строительстве	52
6.4.8. Использование встроенных технических средств защиты	55
6.4.9. Предупредительные знаки	55
6.4.10. Траектории луча	55
6.4.11. Зеркальные отражения	56
6.4.12. Защита глаз.....	56
6.4.13. Защитная одежда	58
6.5. Опасности, связанные с эксплуатацией лазеров	58
6.5.1. Атмосферное загрязнение.....	58
6.5.2. Побочные опасности, связанные с радиацией.....	59
6.5.3. Электрические опасности	59
6.5.4. Криогенные охладители	59
6.5.5. Другие опасности	59
6.6. Обучение	60
6.7. Надзор за здоровьем	60
7. Управление и организация	62
7.1. Роль компетентных органов	62
7.1.1. Установка определенных правил, положений, стандартов и кодексов	62
7.1.2. Лицензирование, уведомление и/или системы регистрации.....	63
7.1.3. Требования по контролю за качеством проектирования, планирования и конструирования установок и оборудования.....	63
7.1.4. Проверка и надзор	64
7.2. Ответственность работодателя.....	64
7.3. Обязанности должностного лица по технике безопасности при использовании лазеров	65

7.4. Обязанности других специалистов по технике безопасности и гигиене труда.....	66
7.5. Обязанности рабочего (пользователя).....	67
7.6. Ответственность производителей	67
7.7. Сотрудничество	68
ПРИЛОЖЕНИЯ	69
Приложение А	
Радиометрическая терминология и физические характеристики лазеров.....	69
Приложение Б	
Биологические последствия и последствия для здоровья, вызываемые лазерным излучением.....	75
Приложение В	
Глоссарий.....	83
Приложение Г	
Основные сведения по МКНР	89

Введение

Работники, использующие лазеры, могут быть определены как лица, занимающиеся разработкой, эксплуатацией, производством, обслуживанием и использованием лазерных изделий. Люди, подвергающиеся лечению с помощью лазера, также включаются в это определение, поэтому их тоже необходимо принимать во внимание при подготовке руководства по технике безопасности.

Скорость развития и рост числа новых областей применения лазеров за последние несколько десятилетий были феноменальными. Лазеры осуществили революцию в сфере оптических технологий и коммуникации. Есть все основания полагать, что быстрый рост лазерной технологии будет продолжаться и использование лазеров станет еще более распространенным.

Совершенно очевидно, что неправильное использование любой техники может привести к нежелательным последствиям. Лазеры в этом смысле не являются исключением. Хотя технические достижения часто предшествуют полному пониманию опасностей, нужно отметить, что с самого начала большое внимание уделялось последствиям воздействия лазерного излучения на биологические системы (Приложение В), разработке руководящих принципов по защите и установлению пределов воздействия (МАРЗ, 1985 и 1988).

1. Характеристики лазерного излучения

1.1. Радиометрические величины. Единицы и терминология

Физические (радиометрические) термины и единицы, используемые для характеристики явлений, наблюдаемых в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, стандартизированы Международной системой единиц (СИ). Международная комиссия по освещению (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) совместно с Международной электротехнической комиссией (МЭК) публикует стандартизированный словарь световой технологии, который включает определения радиометрических и фотометрических терминов, величин и единиц (CIE, 1989). Некоторые термины, величины и единицы измерений, широко используемые при определении уровней лазерного излучения и выборе необходимых средств защиты рабочих, приведены в Приложении А.

1.2. Типы лазеров

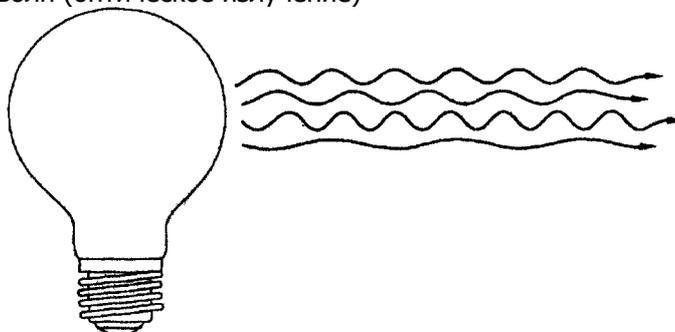
Существует ряд методов, используемых для группировки лазеров в зависимости от длины волны, режима генерации, активной среды или процесса возбуждения. Лазеры в зависимости от продолжительности активизации активной среды путем накачки могут генерировать непрерывное или импульсное излучение. Продолжительность импульса может колебаться от фемтосекунд (10^{-15} с) или пикосекунд (10^{-12} с) до более продолжительных долей секунды. Если лазер излучает импульсы

Источники производственного воздействия лазерного излучения

продолжительностью менее 1 наносекунды (10^{-9} с), то это будет лазер с синхронизированными модами. Если лазер излучает импульсы от нескольких наносекунд (нс) до 100 нс, то речь идет о лазере «с модуляцией добротности». Если за излучением лазера с оптической накачкой следует излучение лампы вспышки, то такой лазер называется лазером с «длительным» или «нормальным» импульсом. Для целей безопасности лазеры, которые характеризуются непрерывным излучением в течение периодов, превышающих 0,25 с, называются «непрерывными лазерами». Лазеры, излучающие группы или «серии» импульсов, называются «импульсно периодическими», а частота импульсов называется «частотой повторения импульсов» (ЧПИ). В отличие от источников обычного света, лазер является источником когерентного, коллимированного и монохромного излучения (см. рис. 1).

1. Некогерентный

Разные длины волн (оптическое излучение)



2. Когерентный и монохромный



Одинаковые длины волн (монохроматическое излучение)
Волны согласованы по фазам

Рис.1. Лазер в сравнении с источником обычного света

2. Источники производственного воздействия лазерного излучения

2.1. Промышленное и научное применение лазеров

2.1.1. Промышленное использование лазеров

В промышленности лазеры обычно используют для резки, сварки или других типов обработки материалов. Здесь применяются лазеры большой мощности, которые используются в контролируемой среде.

2.1.2. Научное приложение лазеров

Способы научного приложения лазеров сложнее всего разбить на категории, поскольку здесь могут использоваться практически все возможные длины волн и условий. Эти приложения сложнее всего контролировать. Большинство жалоб о «чрезмерных ограничениях»

Использование лазеров в промышленности

поступают от ученых. Однако именно они чаще всего получают травмы в результате несчастных случаев, связанных с использованием лазеров.

2.1.3. Применение лазеров в медицине и хирургии

Лазеры начали использоваться в медицине для фотокоагуляции сетчатки в офтальмологии, а затем нашли применение в общей хирургии. Они являются первоклассным инструментом в микрохирургии, включая нейрохирургию. Лазерные методы диагностики и терапии в настоящее время используются в большинстве медицинских сфер, например, для диагностического просвечивания тканей, гинекологической и гастроэнтерологической хирургии, дерматологии и косметической хирургии.

2.2. Лазерные оптико-волоконные коммуникации

В этой сфере применения лазерная энергия заключена в оптическое волокно. Однако процедуры, связанные с осмотром и обслуживанием коммуникаций, позволяют обеспечить доступ к лазерным уровням, которые могут быть опасны.

2.3. Лазеры в дисплеях и для развлечений

Эти лазеры обычно излучают многие ватты видимого света. Они потенциально опасны, когда выходят из строя средства, обеспечивающие их безопасное использование.

Некоторые широко распространенные лазеры и области их применения указаны в таблице 1.

Таблица 1

Широко распространенные типы лазеров и области их применения

Тип лазера	Длина волны	Область применения
Аргон (AR) (ион)	488-515 нм +350 нм	Приборостроение; голография; игры и развлечения; офтальмология (фотокоагуляция сетчатки)
Диоксид углерода (CO ₂) (газ)	10,6 мкм	Обработка материалов; оптическая радиолокация; приборостроение; хирургия
Краска	Переменные от 350 нм до 1 мкм	Приборостроение; дерматология
Эксимерные лазеры	193-351 нм	Лазерная хирургия; обработка материалов; лазерная накачка; спектроскопия
Арсенид галлия (GaAs) (полупроводниковый диод)	850-950 нм	Оптико-волоконные коммуникации; приборостроение; локация; устройства охранной сигнализации; игрушки
Гелиевый кадмий (HeCd) (газовый разряд)	325-442 нм	Настройка; сигнализация и системы наблюдения
Гелиевый неон (HeNe) (газовый разряд)	632,8 нм	Настройка; сигнализация и системы наблюдения; голография; локация

Использование лазеров в промышленности

Криптон (ион)	568-647 нм	Игры и развлечения; приборостроение
Неодимовое стекло (Nd-стекло) Неодимовый иттрий-алюминиевый гранат (Nd-YAG)	1,06 мкм	Обработка материалов; приборостроение; оптическая радиолокация; хирургия
Рубин	694,3 нм	Дерматология; голография; локация

3. Оценка опасностей и классификация лазерных изделий

3.1. Общие концепции определения опасности и оценка риска

При оценке возможных опасностей и риска травматизма необходимо принимать во внимание четыре аспекта применения лазеров:

(а) Мощность лазера или лазерной системы, которая определяет его «класс опасности». Здесь также учитывается возможность доступа человека к основным портам выхода или любым вспомогательным портам лазерного луча. Инструментальные средства контроля энергетических характеристик лазерного излучения встроены в коммерческие лазеры и лазерные системы (МЭК, 1984 и 1990). Концепция риска включена в схему классов «опасности».

(б) Условия использования лазера.

(в) Уровень обучения персонала, занимающегося эксплуатацией лазера.

(г) Предполагаемая область применения лазера.

Оценка опасности лазерного излучения используется, в первую очередь, для определения классификационных признаков лазерной системы. Класс опасности отражает потенциальную опасность лазера (лазерной системы) с учетом риска воздействия опасных уровней лазерного излучения. Соответствующие средства защиты приведены для каждого класса. Использование системы классификации в большинстве случаев устраняет необходимость в радиометрических измерениях и тщательной оценке риска пользователем.

В стандартизированной схеме лазерной классификации аспект (а) (потенциальная опасность лазера или лазерной системы) определен. Аспекты (б) и (в) изменяются в зависимости от условий использования и не могут быть легко включены в общую классификационную схему. При общей оценке опасности и риска необходимо учитывать все четыре аспекта, хотя в большинстве случаев для определения необходимых мер защиты достаточно использовать аспекты (а) и (г).

3.2. Классификация лазерных изделий

Схема классификации опасности и рисков, приведенная ниже, основана на выходных параметрах и оцениваемых уровнях излучения. Эта классификация в значительной степени принимает во внимание

Использование лазеров в промышленности

классификации МЭК (1984) и ведомства США по продуктам питания и лекарственным средствам (FDA, 1989), а также классификацию, используемую Американским национальным институтом по стандартизации (ANSI, 1986). Класс опасности лазерных изделий обычно указан на многих коммерческих лазерных изделиях, произведенных после одобрения этих стандартов. Эта классификация должна использоваться для лазеров, выходная мощность или энергия которых существенно не изменяется после модификации. Такими классами являются:

1. Лазерные системы, которые не являются опасными (без известных биологических опасностей).

2. Лазерные системы (только видимые), которые обычно не являются опасными благодаря наличию у человека естественного мигательного рефлекса (низкий риск).

3. Лазерные системы, воздействие прямого или зеркально отраженного луча которых может быть опасным (умеренный риск). Этот класс иногда делят на две категории *а* и *б*, при этом *Класс 3а* представляет собой класс с низким риском (аналогично *Классу 2*), который бывает опасным, только в том случае, если луч собирается или фокусируется при помощи внешнего оптического прибора.

4. Лазерные системы, в которых даже рассеянное или отраженное излучение может быть опасным, где луч создает опасность пожара или серьезную опасность для кожи.

Основой схемы классификации лазеров по степени опасности является возможность первичного лазерного луча или отраженного излучения наносить биологический вред глазу или коже.

Лазер *Класса 2* (система малой мощности) не создает непосредственной опасности при случайном прямом взгляде на луч, но на внешней поверхности лазера должна быть этикетка с предупреждением о том, что смотреть на луч нельзя. Аналогичная этикетка требуется для лазеров *Класса 3а*.

Категория умеренного риска *Класса 3б* (система средней мощности) требует защитных мероприятий для предотвращения воздействия прямого луча на глаза.

Системы *Класса 4* высокого риска (или большой мощности) должны использовать средства защиты, которые предотвращают воздействие на глаза и кожу как прямого, так и рассеянного излучения. Кроме возможности повреждения глаз, лазерное излучение от таких изделий представляет серьезную опасность и для кожи.

3.3. Выходные параметры лазеров, необходимые для классификации приборов

Допустимые пределы излучения (ДПИ) установлены для каждого класса лазеров ниже четвертого. Лазерное изделие относится к данному классу только в том случае, если мощность (энергия) генерируемого им излучения

Использование лазеров в промышленности

ниже ДПИ, установленного для его класса. Для *Класса 4* ДПИ (то есть верхние пределы излучения) не установлены. Для классификации разных типов лазеров необходимо знать следующие параметры:

1. Практически для всех лазеров: длина волны или диапазон длин волн.
2. Для лазеров, генерирующих непрерывное или импульсное излучение: средняя выходная мощность; в некоторых случаях также необходимо установить продолжительность воздействия (в зависимости от сферы применения).
3. Для импульсных лазеров: общая энергия на импульс (или пиковая мощность), продолжительность импульса, частота повторения импульсов, плотность энергии излучения в выходном луче.
4. Для лазерных изделий, генерирующих широкие пучки (например, диод в инжекционном лазере или лазеры, имеющие постоянный рассеиватель в выходной оптике): все вышеперечисленные параметры, энергетическая или интегральная яркость источника лазерного излучения и максимальный угловой размер источника излучения, α .

3.4. Определение классов опасности лазерных изделий

Класс 1 - лазерные устройства, выходное излучение которых не представляет опасности.

Лазерное устройство *Класса 1* определяется как лазер (или лазерная система, содержащая такой лазер), который не может генерировать излучение с уровнем превышающим ДПИ *Класса 1* (см. ниже) для классификационной длительности. *Классификационная длительность* — наиболее продолжительный период суточного воздействия. Контрольные приборы могут не использоваться только по отношению к опасностям, связанным с излучением, но не по отношению к иным потенциальным опасностям.

ДПИ *Класса 1* определяется при помощи анализа «наихудшего случая», для чего рассматривается опасность воздействия прямого или зеркально отраженного луча на глаза. В оценке риска «наихудшего случая» необходимо учитывать не только выходную мощность (энергию) излучения, но также и потенциальную опасность общей выходной мощности, которая может быть сконцентрирована в определенной апертуре. Например, луч непрерывного лазера на диоксиде углерода ($\lambda=10,6$ мкм) безопасен, если плотность потока энергии в нем не превышает $1 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$. Однако если выходная мощность лазера равна 10 Вт, и луч может быть сфокусирован при помощи зеркала в пятно диаметром 10 мм, то может возникнуть серьезная опасность. ДПИ *Класса 1* должны определяться двумя разными способами, зависящими от того, считается ли сам лазер «протяженным источником» (необычный случай) или точечным источником (обычный случай).

Для большинства лазеров ДПИ *Класса 1* определяется как произведение $a \cdot b$, где a - предел воздействия выходного луча (точечный источник) для

Использование лазеров в промышленности

глаза при продолжительности воздействия $T_{\text{макс}}$, b - площадь определенной апертуры.

Для протяженных источников лазерного излучения в спектральном диапазоне от 400 до 1400 нм (например, лазерных массивов, лазерных диодов или приборов, испускающих диффузное излучение) ДПИ *Класса 1* определяется посредством такой выходной мощности или энергии, при которой излучение источника не превышает допустимый предел воздействия, когда источник рассматривается с минимального расстояния, равного 10 см. Оптическая система для просмотра не увеличивает опасность протяженных источников. Поскольку необходимость в применении ДПИ возникает не часто, ДПИ точечного источника могут применяться для осуществления консервативного анализа.

Класс 2 - лазерные изделия низкого риска (низкой мощности), генерирующие излучение видимого диапазона спектра, которые не представляют опасности для мгновенного взгляда. Они определяются следующим образом:

(а) лазерные изделия, генерирующие излучение видимого диапазона спектра, мощность (энергия) излучения которых может превышать ДПИ *Класса 1* для классификационной продолжительности (0,4 мВт для $T_{\text{макс}}$ больше 0,25 с), но не превышает 1 мВт;

Примечание. Иногда в стандартах некоторые лазеры Класса 2 могут классифицироваться в подкатегорию Класс 2а (не опасны для просмотра в течение периода, превышающего 1с).

(б) сканирующие лазерные системы и импульсные лазерные устройства периодического действия, генерирующие излучение видимого диапазона спектра, мощность (энергия) излучения которых может превышать ДПИ *Класса 1* для классификационной продолжительности, но не превышает ДПИ *Класса 1* при длительности воздействия 0,25 с.

Любое лазерное изделие низкого риска, классифицируемое на основании воздействия, должно быть снабжено предупреждающими этикетками, сообщающими о возникновении высокого риска в случае удаления панели доступа («панели доступа сняты»). Эти этикетки могут быть закрыты специальной крышкой, которую необходимо снять, прежде чем станут доступны основные панели доступа.

Класс 3а - лазерные изделия низкого риска (средней мощности), генерирующие непрерывное лазерное излучение видимого диапазона спектра мощностью от 1 до 5 мВт с плотностью потока излучения $25 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ или меньше. В некоторых стандартах эта классификация распространяется на лазеры, генерирующие излучение невидимого диапазона спектра, мощность (энергия) которого превышает ДПИ *Класса 1* не более чем в пять раз и уровень излучения которых не превышает максимально допустимого значения для пучков большого диаметра.

Класс 3б - лазерные изделия среднего риска (средней мощности)

Использование лазеров в промышленности

определяется как:

(а) лазерные изделия ультрафиолетового излучения, инфракрасного *B* и *C* излучения, которые могут излучать мощность, превышающую ДПИ для более низких классов, но которые не могут:

- излучать среднюю мощность излучения, превышающую 0,5 Вт при $T_{\text{макс}}$ больше 0,25 с, или
- иметь плотность энергии $100 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$ при времени воздействия 0,25 с или меньше;

(б) лазерные изделия, генерирующие непрерывное излучение видимого или ближнего инфракрасного диапазона спектра или импульсно периодическое излучение мощность (энергия) которого превышает ДПИ для более низких классов, но не превышает 0,5 Вт для $T_{\text{макс}}$ больше 0,25 с;

(в) лазерные изделия, генерирующие непрерывное излучение видимого или ближнего инфракрасного диапазона спектра или импульсное излучение, мощность (энергия) которого превышает ДПИ для более низких классов, но плотность энергии в пучке не превышает $100 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, а уровень излучения, отраженного от совершенного диффузора, не превышает максимально допустимого значения.

Класс 4 - лазерные изделия высокого риска (большой мощности), которые характеризуются излучением, превышающим ДПИ для лазерных изделий *Класса 3б*.

3.5. Классификация лазеров, обладающих несколькими источниками и излучающих волны нескольких длин

Классификация лазерных изделий, которые могут излучать волны разных длин, должна базироваться на определении комбинации наиболее опасных длин волн. Обычно риск от одной длины волны значительно перевешивает риск, создаваемый комбинацией всех других длин волн. Несколько источников считаются независимыми, если угловое расстояние между ними превышает минимальный угловой размер для протяженного источника.

3.6. Подробная оценка риска

Классификация - это начальный шаг в анализе опасности и оценке риска. Однако недостаточно просто квалифицировать лазер с точки зрения его мощности или выходной энергии. Место и способ использования лазера, а также люди, которые могут его использовать или могут находиться в зоне его воздействия, также должны приниматься в расчет. Должны учитываться и меры безопасности, которые принимаются на основе определения факторов окружающей среды и требований, предъявляемых к персоналу, о чем будет сказано ниже.

3.7. Окружающая среда

После того, как лазерное изделие было классифицировано, необходимо подвергнуть анализу факторы окружающей среды, поскольку их важность

Использование лазеров в промышленности

при оценке опасности и риска зависит от класса лазера. Решение о необходимости использовать дополнительные технические средства защиты, которые изначально не требовались для лазерных изделий среднего и высокого риска, может в значительной степени зависеть от соображений, связанных с окружающей средой. Вероятность воздействия на персонал опасного лазерного излучения должна учитывать условия использования лазера – при использовании внутри помещения, например в механическом цехе, в классной комнате, в исследовательской лаборатории или на конвейере; или вне помещения: на высокой строительной площадке, в открытом море, в военных лазерных локаторах, в атмосфере выше населенных мест или в траншее трубопровода. Должны также учитываться другие экологические опасности.

Если существует возможность воздействия на незащищенный персонал первичного или зеркально отраженного луча, необходимо провести расчеты или измерения плотности потока энергии либо плотности энергии – для первичного или отраженного луча, энергетической яркости – для протяженного источника отраженного излучения. Важно учитывать, что поглощающие и отражающие свойства материалов могут значительно различаться в инфракрасных и ультрафиолетовых диапазонах по сравнению со свойствами, проявляемыми в видимом диапазоне оптического спектра. Например, пластиковые занавески, которые кажутся очень темными и непроницаемыми для видимого дневного света, могут быть очень прозрачными в инфракрасном свете; многие краски, которые обладают низким коэффициентом отражения в видимом свете, имеют значительно более высокий коэффициент отражения в ближней инфракрасной области. Кроме этого, непроницаемые металлические поверхности, которые видны при дневном свете, часто обладают высоким коэффициентом отражения (подобно зеркалам) для излучения инфракрасного диапазона спектра, в частности излучения CO₂ лазера ($\lambda = 10,6$ мкм).

3.7.1. Работа с лазерами в помещениях

При оценке работы лазера в помещении следует учитывать только лазерный источник как таковой, если луч закрыт или если работы проводятся в контролируемом пространстве. Если незащищенный персонал может подвергнуться воздействию лазерного излучения, то для оценки лазерных изделий среднего риска рекомендуется следующая пошаговая процедура.

Шаг 1. Определите применяемый ДПИ, учитывая максимальную продолжительность воздействия при выполнении предполагаемых работ.

Шаг 2. Определите опасные траектории луча.

Шаг 3. Определите степень опасности при отражении излучения, как это показано на рисунке 2. Опасность, связанная с отражением, зависит от степени фокусировки луча и характера отражающей поверхности.

Шаг 4. Определите степень опасности рассеянного (отраженного)

Использование лазеров в промышленности

излучения (номинальная зона опасности).

Шаг 5. Определите, существуют ли какие-либо опасности, не связанные с лазерами.

3.7.2. Работа с лазерами на открытом воздухе

При оценке опасности определенного лазерного изделия необходимо учитывать влияние некоторых потенциально опасных условий. Это можно сделать при помощи следующей пошаговой процедуры.

Шаг 1. Определите применяемый ДПИ, учитывая максимальную продолжительность воздействия при выполнении предполагаемых работ.

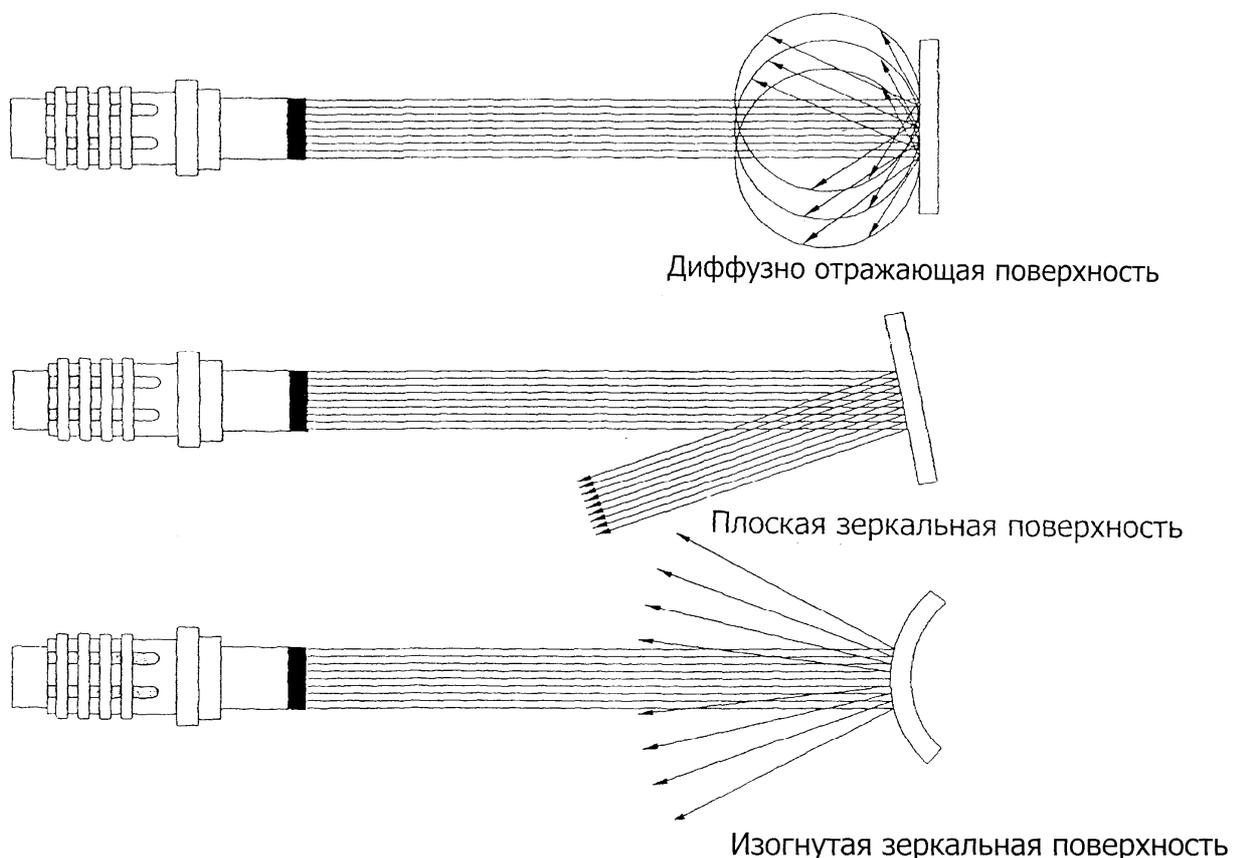
Шаг 2. Оцените номинальный диапазон опасности лазера.

Шаг 3. Оцените потенциальные опасности, связанные с отражением от поверхностей, таких как окна и зеркала машин, а также опасности, связанные с обратным отражением.

Шаг 4. Определите, существует ли опасность диффузно отраженного излучения (номинальная зона опасности), особенно если лазер работает в диапазоне 400-1400 нм.

Шаг 5. Оцените стабильность лазерной платформы, чтобы определить диапазон горизонтального и вертикального перемещения лазерного луча и соответствующего средства защиты.

Шаг 6. Определите вероятность присутствия людей в зоне лазерного луча.



Использование лазеров в промышленности

Рис. 2. Отражение лазерных лучей

3.8. Персонал

Нахождение людей поблизости от лазера и его излучений, может повлиять на принятие решения о необходимости применения дополнительных средств защиты, которые обычно не используются для приборов данного класса.

Если дети или другие люди, которые по каким-либо причинам не могут прочитать или понять предупреждающую информацию, подвергаются опасному воздействию лазера, это также может повлиять на оценку опасности прибора, и в этом случае средства защиты могут быть соответствующим образом изменены.

Квалификация сотрудников влияет на общую оценку риска, особенно в случае использования лазеров умеренного риска (умеренной мощности). Основным правилом обеспечения безопасности для оператора при эксплуатации лазеров или лазерных систем, например военных лазерных локаторов и некоторых лазеров среднего риска, используемых в строительной промышленности, является отведение лазерного луча от сотрудников или плоских зеркальных поверхностей.

Ниже приводится краткое описание факторов, которые должны приниматься во внимание в отношении персонала, находящегося в зоне потенциального воздействия лазеров:

(а) зрелость, общий уровень подготовленности и опыт пользователей лазеров (например, студенты, главные механики, солдаты и ученые имеют разный опыт и разную степень подготовки);

(б) зрелость наблюдателей, их осведомленность о возможном наличии опасного лазерного излучения, а также знания и умение применять соответствующие меры предосторожности;

(в) степень подготовленности в отношении лазерной безопасности всех лиц, участвующих в работе с лазером;

(г) уверенность отдельных лиц в эффективности использования средств защиты глаз;

(д) число и место расположения отдельных лиц относительно первичного или отраженного луча и вероятность случайного воздействия.

4. Использование приборов и методы измерения

При обсуждении методов измерения характеристик лазерного излучения с целью оценки их опасности для здоровья следует в первую очередь учитывать собственно необходимость такого измерения. По общему правилу, измерения выходной мощности прежде всего необходимы для определения класса лазерного изделия. Обычный мониторинг редко считается необходимым, поэтому измерения производятся разработчиком или производителем лазера. Однако, если воздействие является намеренным или осуществляется вне помещения, то часто возникает необходимость в измерении облученности или энергетической экспозиции.

4.1. Параметры лазера, которые необходимо измерять

Плотность потока энергии излучения (облученность или энергетическая экспозиция) может быть рассчитана на любом расстоянии от лазера. Чтобы это сделать, необходимо определить выходную мощность или энергию, первоначальный диаметр и расходимость луча.

Можно использовать калориметрические либо другие типы измерителей энергии или мощности для измерения этих характеристик. Измерение диаметра и расходимости выходного луча может быть более сложным. Измерение расходимости луча имеет исключительную важность для определения потенциально опасного расстояния, на котором можно смотреть на луч (номинальное окулярное опасное расстояние). Замеры мощности, проходящей через апертуру, могут использоваться для определения эффективного диаметра и расходимости луча.

Чтобы определить, существует ли опасность импульсного отраженного излучения, необходимо знать максимальную плотность энергии в выходном луче лазера. Простейший метод, используемый для этой цели, состоит в воздействии излучением на поверхности, отличающиеся тепловой или фотохимической чувствительностью. В тех случаях, когда плотности энергии луча недостаточно, чтобы вызвать изменение, например, на поверхности бумаги, необходимо использовать обычную фотобумагу или радиометрические приборы с достаточно малой входной апертурой.

4.2. Типы радиометрических приборов

Радиометрические приборы обычно состоят из детектора, создающего напряжение, ток, вызывающего изменение сопротивления или заряда, которые измеряются чувствительным электронным регистратором.

Детектор - это первичный определяющий фактор при выборе прибора. Каждый тип детектора имеет соответствующие характеристики, которые могут давать определенные преимущества или, напротив, создавать неудобства при измерении определенного уровня оптического излучения в некотором диапазоне длин волн. Ни один из типов детекторов не может использоваться для измерения всех типов лазерного излучения. Очень чувствительный детектор может быть разрушен лазерным лучом большой мощности.

4.2.1. Тепловые детекторы

Термоэлементы или дисковые калориметры характеризуются сравнительно слабой зависимостью от спектра излучения.

Время реагирования калориметров и термоэлементов может быть слишком большим при измерении коротких импульсов. Пироэлектрические детекторы, которые реагируют на скорость изменения температуры в материале кристаллической структуры, имеют быстрое действие порядка наносекунд.

Использование приборов и методы измерения

Тепловые детекторы нашли широкое применение в измерении лазерного излучения в инфракрасном диапазоне, на который не реагируют другие детекторы или где полупроводниковые детекторы требуют криогенного охлаждения. Для измерения мощности лазерного излучения в диапазоне между 10 мВт и 100 Вт независимо от длины волны можно с определенной надежностью использовать дисковые калориметры. Мощность излучения импульсного лазера может измеряться при помощи дискового калориметра, если плотность энергии в луче ниже порога разрушения поглощающего покрытия калориметра, что обычно составляет около $105 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}$. Для импульсных лазеров, характеризующихся более высокой энергией, могут быть полезны баллистические термоэлементы или дисковые калориметры с объемным поглотителем. Дисковый калориметр и баллистический термоэлемент более удобны для лаборатории, чем для полевых исследований, поскольку эти детекторы достаточно инерционны - может потребоваться несколько секунд или даже минут, чтобы охладить эти приборы между замерами импульсного излучения или чтобы стабилизировать их при измерении непрерывного излучения.

4.2.2. Полупроводниковые детекторы

Эти приборы являются значительно более чувствительными детекторами оптического излучения в спектральном диапазоне 200 нм–1100 нм. Спектральная чувствительность фотоприемников зависит от фотокатодного материала, используемого в вакуумных фотодиодах или фотомножительных трубках, либо от внутренних характеристик кремния или германия. Кремний используется в твердотельных фотодиодах, которые могут работать либо как фотопроводящие, либо как фотоэлектрические детекторы. Тип выбранного детектора, обычно зависит от того, какие длины волн нужно измерить и какие длины волн желательно исключить.

Для полупроводниковых детекторов характерен период реагирования около 1 нс. Для анализа опасностей всех типов лазеров, генерирующих излучение в ультрафиолетовом, видимом или ближнем инфракрасном диапазоне спектра, наиболее удобны приборы, использующие в качестве детектора вакуумный фотодиодный. При правильном подборе входной оптики и апертуры этими приборами можно измерить облученность, энергетическую экспозицию, энергию или мощность излучения. Недостаток такого типа приборов состоит в том, что они могут быть довольно дорогостоящими, если желательно измерять все эти характеристики с достаточной чувствительностью. Из-за сильной спектральной зависимости эти приборы обычно не дают непосредственных значений, и их показания должны умножаться на один или несколько коэффициентов, определяемых при калибровке.

4.2.3. Оценка опасности

В настоящее время нет радиометрических изделий, которые были бы

Использование приборов и методы измерения

спроектированы специально для анализа опасностей, создаваемых лазерами. Маловероятно, что такие приборы появятся в ближайшем будущем из-за большого разнообразия возникающих эффектов при разных длинах волн и разных периодах воздействия. Конечно, такие инструменты можно было бы сделать для каждой из определенных категорий лазеров, но в настоящее время набор таких инструментов был бы очень дорогим. К сожалению, большинство световых источников высокой интенсивности и современные лазеры имеют довольно устойчивую тенденцию роста выходных параметров. Из-за этой устойчивости и неопределенностей пределов воздействия редко возникает необходимость в периодическом мониторинге источника. Довольно часто оптический источник может быть определен как выходное излучение, значительно превышающее либо находящееся значительно ниже применимых пределов воздействия.

4.3. Фотографические методы измерений

В некоторых случаях фотографическая радиометрия может играть большую роль. Определение эффективного размера источника имеет исключительную важность при проведении оценки опасности высокоинтенсивного протяженного источника. При такой оценке основной интерес представляет излучение, и для его определения могут использоваться фотографические методы.

Одним из наиболее важных критериев оценки потенциальных опасностей, связанных с импульсными лазерными системами, является плотность энергии в выходном пучке. Если выходное излучение создает уровни диффузно отраженного излучения, превышающие безопасные, то должны быть установлены значительно более строгие контролирующие приборы (*Класс 4*). Для определения того, превышает ли выходное излучение пороговые уровни, можно использовать соответствующие термочувствительные типы бумаги или эмульсии. Если луч вызывает тепловую реакцию на такой бумаге, то существует возможность появления опасных диффузных отражений. Если луч не вызывает тепловую реакцию на специально выбранной тепловой бумаге, то можно предположить, что луч не создает опасных диффузных отражений. Такая бумага может также показывать профили выходного луча для лазеров большой энергии.

4.4. Калибровка и методы измерения

Практически все радиометрические системы требуют калибровки. Предпочтительный метод калибровки для уровней излучения, представляющих интерес (таблица 2), состоит в использовании опорного дискового калориметра или пирозлектрического радиометра. Затем используется стабильный оптический источник, например стандартная лампа или лазер, генерирующий непрерывное излучение, для освещения альтернативным способом некалиброванного и опорного детекторов.

Калибровка приборов для измерения энергетической экспозиции является более сложным делом, если только показания прибора не изменяются линейно в зависимости от изменений длительности

Использование приборов и методы измерения

воздействия. Если прибор ведет себя подобным образом, стандарт облученности и калибровочный затвор могут быть адекватны для калибровки энергии. Разработаны различные методы измерения выходной энергии импульсного лазера. Методы, используемые в радиометрии, зачастую являются слишком сложными для подробного описания в данном руководстве. Существуют и были описаны определенные заблуждения на этот счет (Sloney и Wolbarsht, 1980).

Таблица 2

Приблизительный радиометрический диапазон, представляющий интерес для анализа опасности

Спектральный диапазон (определение диапазона СИЕ)	Облученность ($Вт \cdot м^{-2}$)	Энергетическая экспозиция ($Дж \cdot м^{-2}$)	Энергетическая яркость ($Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$)	Интегральная энергетическая яркость ($Дж \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$)
УФ-В и УФ-С 180 нм - 315 нм	$10^{-3} - 10^2$	$1 - 10^3$	Не используется	Не используется
УФ-А 315 нм - 380 нм	$1 - 10^4$	$10 - 10^5$	Не используется	Не используется
Видимый 380 нм - 760 нм	$10^{-3} - 10^2$	$10^{-3} - 10^2$	$10^3 - 10^7$	$10 - 10^5$
Метавидимый или близкий инфракрасный, ИК-А 760 нм - 1400 нм	$10^{-2} - 10^3$	$10^{-2} - 10^2$	$10^3 - 10^7$	$10 - 10^6$
ИК-Б и ИК-В 1400 нм - 1 мм	$10^2 - 10^4$	$10 - 10^5$	Не используется	Не используется

4.5. Выводы

Существуют радиометрические методы и инструменты для анализа воздействия на кожу и глаза со стороны лазеров и других оптических источников излучения высокой интенсивности. Однако стоимость такого оборудования остается довольно высокой по сравнению с оборудованием для наблюдения и оценки многих других экологических опасностей. Радиометрические формы и спецификации производителя, если они тщательно применяются, часто могут быть адекватной заменой измерениям. Если необходима подробная информация, то следует провести замеры, по крайней мере по некоторым параметрам. Однако замеры, снятые необученным персоналом, могут привести к неправильным выводам. Более подробную информацию можно найти у Sloney и Wolbarsht (1980) и Sloney (1989).

5. Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

5.1. Руководства МАРЗ/МКНР по пределам воздействия при лазерной радиации

5.1.1. Основные сведения

Международный комитет по неионизирующей радиации (МКНР) Международной ассоциации по радиационной защите (МАРЗ) впервые опубликовал руководство по пределам воздействия для лазерной радиации в 1985 г. С тех пор в результате расширения базы данных руководство пересматривалось в 1988 г.¹ Прежде чем представить руководство по лазерному воздействию, стоит описать процесс, посредством которого МАРЗ/МКНР разрабатывают руководства по неионизирующей радиации (НИР).

5.1.2. Пределы воздействия

Пределы воздействия в стандартах выражены в единицах энергетической экспозиции [$\text{Дж}/\text{м}^2$ или $\text{Дж}/\text{см}^2$] или облученности [$\text{Вт}/\text{м}^2$ или $\text{Вт}/\text{см}^2$] для непосредственного воздействия либо соответственно в единицах интегральной энергетической яркости [$\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ или $\text{Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$] и энергетической яркости [$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ или $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$] для протяженных источников излучения.

Разработка пределов воздействия требует обоснованной оценки возможных биологических последствий и соотношения *воздействие - реакция*, а также соответствующей информации по разным используемым источникам, результирующим уровням воздействия и людям, которые подвергаются риску. Также требуется философия безопасности, которая связывает вышеперечисленные данные с общими целями гигиены труда. Как отмечено выше, основным документом, используемым для разработки пределов лазерного воздействия, является документ, содержащий критерии санитарного состояния окружающей среды (ВОЗ, 1982). База данных лазерных биологических последствий для глаз и кожи человека, рассматриваемая в этом документе, аналогична той, которая использовалась другими национальными и международными организациями для выведения пределов воздействия.

Поэтому неудивительно, что пределы воздействия МКНР в общем согласуются с критериями Международной электротехнической комиссии (МЭК, 1984, 1990), Американской конференции правительственных промышленных гигиенистов (АКППГ, 1991), Американского института по национальным стандартам (АНСИ, 1986), Британского Института по стандартам (БИС, 1984), Совета Нидерландов по здравоохранению (СНЗ, 1979), Немецкого института по стандартам (НИС, 1984) и других.

¹ А.С. Duchene et al. (eds.) Руководство МАРЗ по защите против неионизирующего излучения. (New York, Pergamon Press, 1991), Гл. 4.

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

Краткий обзор пределов воздействия МКНР приведены в таблицах 3(а), 3(б) и 3(в). Таблица 3(а) иллюстрирует пределы воздействия прямого лазерного луча на глаза (при взгляде, направленном на внутренний луч). Таблица 3(б) содержит пределы воздействия для диффузно отраженного излучения или при взгляде на протяженный источник излучения, таблица 3(в) — пределы воздействия для кожи. *Корректирующий фактор C_A* , упомянутый в таблице 3(а), изображен на рисунке 3 в качестве функции от длины волны излучения. Для получения более подробной информации по пределам воздействия МАРЗ можно обратиться к полному руководству, опубликованному в «Физике здоровья» (МАРЗ, 1985, 1988). В таблице 3(г) приведены пределы воздействия для наиболее распространенных лазеров. Необходимо помнить, что из-за способа, при помощи которого организовано большинство стандартов по технике безопасности для лазеров, классификацией лазерных опасностей (которые первоначально базировались на пределах воздействия) можно воспользоваться для проведения оценки опасностей, а не для проведения измерений лучевого воздействия для сравнения с пределами воздействия (МАРЗ, 1988). Пределы воздействия обычно используются только в специальных случаях, когда предполагается рассчитать уровень воздействия на человека. В таких случаях облученность или энергетическая экспозиция могут измеряться или рассчитываться для определения того, было ли превышено допустимое воздействие.

Таблица 3(а)

Пределы воздействия прямого лазерного луча на глаза
(взгляд направлен на внутренний луч)

Длина волны λ , (нм)	Продолжительность воздействия t, с	Предел ПВ (Дж/м ² или Вт/м ²)	Ограничения
Ультрафиолетовый диапазон			
180 – 302	1 нс - 30 кс	$3,0 \times 10^1$ Дж/м ²	Все ПВ для λ меньше 315 нм должны быть < $5,6 \times 10^3 t^{3/4}$ Дж/м ²
303	1 нс - 30 кс	$4,0 \times 10^1$ Дж/м ²	
304	1 нс - 30 кс	$6,0 \times 10^1$ Дж/м ²	
305	1 нс - 30 кс	$1,0 \times 10^2$ Дж/м ²	
306	1 нс - 30 кс	$1,6 \times 10^2$ Дж/м ²	
307	1 нс - 30 кс	$2,5 \times 10^2$ Дж/м ²	
308	1 нс - 30 кс	$4,0 \times 10^2$ Дж/м ²	
309	1 нс - 30 кс	$6,3 \times 10^2$ Дж/м ²	
310	1 нс - 30 кс	$1,0 \times 10^3$ Дж/м ²	
311	1 нс - 30 кс	$1,6 \times 10^3$ Дж/м ²	
312	1 нс - 30 кс	$2,5 \times 10^3$ Дж/м ²	
313	1 нс - 30 кс	$4,0 \times 10^3$ Дж/м ²	
314	1 нс - 30 кс	$6,3 \times 10^3$ Дж/м ²	
315 – 400	1 нс - 10 кс	$5,6 \times 10^3 t^{3/4}$ Дж/м ²	
315 – 400	10 с - 30 кс	$1,0 \times 10^4$ Дж/м ²	
Видимый и ближний инфракрасный диапазоны			
400 – 700	1 нс – 18 мкс	$0,005$ Дж/м ²	7-миллиметровая ограничивающая апертура
400 – 700	18 мкс – 10 с	$18 t^{3/4}$ Дж/м ²	
400 – 550	10 с – 10 кс	100 Дж/м ² $18 t^{3/4}$ Дж/м ²	

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

550 – 700	10 с – T ₁ с	100 C _B Дж/м ²	
550 – 700	T ₁ с – 10 кс	0,01 C _B Вт/м ²	
400 – 700	10 кс – 30 кс	0,005 C _A Дж/м ²	
700 – 1050	1 нс – 18 мкс	18 C _A t ^{3/4} Дж/м ²	
700 – 1050	18 мкс – 1 кс	0,05 C _C Дж/м ²	
1051 – 1400	1 нс – 50 мкс	90 C _C t ^{3/4} Дж/м ²	
1051 – 1400	50 мкс – 1 кс	3,2 C _A C _C Вт/м ²	
700 – 1400	1 кс – 30 кс		
Дальняя инфракрасная область			
1400 – 1500	1 нс – 1,0 мс	1000 Дж/м ²	3,5-миллиметровая ограничивающая апертура
1400 – 1500	1,0 мс – 10 с	5600 t ^{3/4} Дж/м ²	
1500 – 1800	1 нс – 10 с	10 ⁴ Дж/м ²	
1801 – 2600	1 нс – 1,0 мс	1000 Дж/м ²	
1801 – 2600	1,0 мс – 10 с	5600 t ^{3/4} Дж/м ²	
2601 – 10 ⁶	1 нс – 100 нс	100 Дж/м ²	
2601 – 10 ⁸	100 нс – 10 с	5600 t ^{3/4} Дж/м ²	
1400 нм – 1 мм	10 с – 30 кс	1000 Вт/м ²	

Примечания: Ограничивающая апертура для всех ПВ для ультрафиолетового диапазона и для длин волн от 1400 нм до 0,1 мм равна 1 мм в течение менее 0,25 с и 3,5 мм для более длительных периодов; 11 мм – для длин волн больше 0,1 мм, и 7 мм – для всех окулярных ПВ излучения с длиной волны от 400 до 1400 нм.

1 кс = 1000 с и 30 кс = 8 часов.

C_A = 1 для λ = 400 - 700 нм; C_A = 10^[0,02(λ-700)], если λ = 700 - 1050 нм

C_B = 1 для λ < 500 нм; C_B = 10^[0,015(λ-550)], если λ = 550 - 700 нм

T₁ = 10 x 10^[0,02(λ-550)] для λ = 550 - 700 нм. C_C = 1 для λ < 1150 нм

C_C = 10^[0,0181(λ-1150)] для 1150 < λ < 1200; C_C = 8 для 1200 < λ < 1400

Источник: МКНР

Таблица 3(б)

Пределы воздействия для диффузно отраженного излучения или при взгляде на протяженный источник излучения

ПВ для протяженного источника определяются умножением ПВ воздействия прямого лазерного луча на глаза на корректирующий фактор C_E. Следующий корректирующий фактор C_E должен применяться для перечисленных пределов воздействия при угловых размерах источника излучения, превышающих α_{мин}, где α_{мин} :

$$\alpha_{\text{мин}} = 1,5 \text{ мрад для } t < 0,7 \text{ с}$$

$$\alpha_{\text{мин}} = 10 \times t^{3/4} \text{ мрад для } 0,7 \text{ с} < t < 10 \text{ с, и}$$

$$\alpha_{\text{мин}} = 11 \text{ мрад для } t < 10 \text{ с}$$

$$C_E = \alpha / \alpha_{\text{мин}} \text{ для } \alpha_{\text{мин}} < \alpha < 100 \text{ мрад}$$

$$C_E = 10 \times \alpha^2 / \alpha_{\text{мин}} \text{ для } \alpha > 100 \text{ мрад}$$

Источник: МКНР

Таблица 3(в)

Пределы воздействия для кожи

Длина волны λ, (нм)	Продолжительность воздействия, t (с)	Предел ПВ (Дж/см ² или Вт/см ²)	Ограничения
------------------------	---	---	-------------

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

Ультрафиолетовый диапазон			
200 – 400	1 нс – 30 кс	То же, что и для глаз	
Видимый и ближний инфракрасный диапазоны			
400 – 1400	1 нс – 100 нс	$0,2 C_A$ кДж/м ²	1- или 3,5-миллиметровая ограничивающая апертура
400 – 1400	100 нс – 10 с	$11 C_A t^{3/4}$ кДж/м ²	
400 – 1400	10 с – 30 кс	$2,0 C_A$ кВт/м ²	
Дальняя инфракрасная область			
$1400 - 10^6$	1 нс – 30 кс	Те же, что и для глаз при длине волны от 2601 нм до 1 мм	1- или 3,5-миллиметровая ограничивающая апертура

Примечания: ограничивающая апертура для импульсного воздействия ($t < 0,25$ с) равна 1 мм, для продолжительных периодов воздействия – 3,5 мм.

1 кс = 1000 с и 30 кс = 8 часов.

$C_A = 1$ для $\lambda = 400 - 700$ нм, $C_A = 10^{[0,02(\lambda - 700)]}$, если $\lambda = 700 - 1050$ нм

Источник: МКНР

Таблица 3(г)

Пределы производственного воздействия (ПВ) для некоторых широко распространенных лазеров

Лазер	Длина волны	Пределы воздействия
Лазер с использованием аргона и фторида	193 нм	$3,0$ мДж/см ² в течение 8 часов
Лазер с использованием ксенона и хлорида	308 нм	40 мДж/см ² в течение 8 часов
Ионный лазер с использованием аргона	488-514,5 нм	$3,2$ мВт/см ² в течение более 0,1 с $2,5$ мВт/см ² в течение более 0,25 с
Лазер с использованием гелия и неона	632,8 нм	$1,8$ мВт/см ² в течение более 1,0 с
Ионный лазер с использованием криптона	568-647 нм	$1,0$ мВт/см ² в течение более 10 с
Лазер с использованием гелия и неона	632,8 нм	17 мкВт/см ² в течение 8 ч
Лазер с использованием неодимиума и YAG	1064 нм 1334 нм	$5,0$ мкДж/см ² в течение 1 нс – 100 мкс Нет ПВ для $t < 1$ нс 5 мВт/см ² в течение 10 с
Лазер с использованием стекла эрбия:	1540 нм	$1,0$ Дж/см ² в течение 1 – 1000 нс
Эрбий: YAG	2940 нм	10 мДж/см ² в течение 1 - 100 нс
Лазер с использованием водорода и фторида	2,7 – 3,1 мкм	10 мДж/см ² в течение 1 – 100 нс
Лазер с использованием диоксида углерода	10,6 мкм	100 мВт/см ² в течение 10 с – 8 ч, ограниченная площадь 10 мВт/см ² в течение >10 с для площадей ≥ 1000 см ²

Примечание: для конвертации ПВ из мВт/см² в мДж/см², умножьте имеющееся значение на время воздействия t в секундах.

Источник: МКНР/МАРЗ Руководства (МАРЗ, 1985, 1988).

Корректирующий фактор А

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

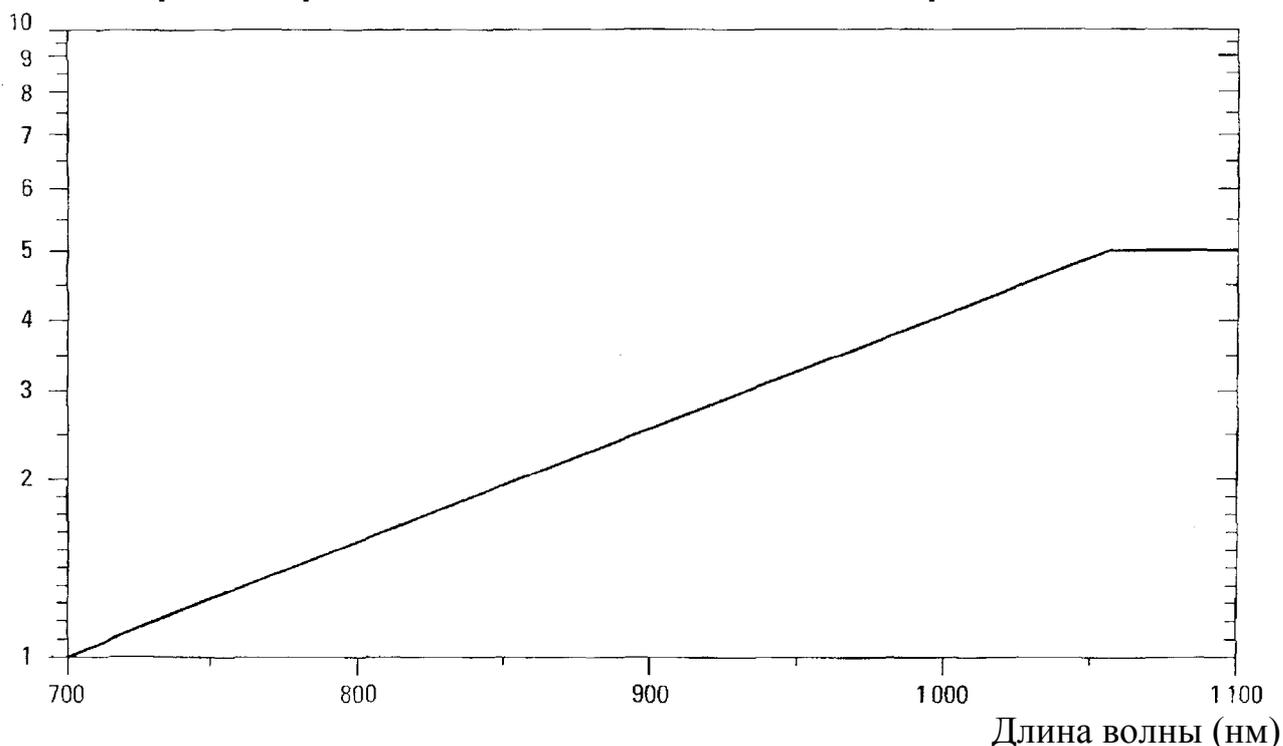


Рис.3. Корректирующий фактор C_A , используемый для определения значений пределов воздействия в ближней инфракрасной области

5.1.3. Редакция 1988 года

Новую редакцию руководства 1985 года МАРЗ опубликовала в 1988 г. (МАРЗ, 1985, 1988). В этой редакции не были затронуты базовые пределы, описанные в таблице 3(а). Наиболее важные изменения касались метода определения применяемой продолжительности воздействия для непрерывного лазерного излучения и воздействия импульсно периодического излучения. Ранее используемый метод был упрощен и разъяснен. Некоторые ранее использовавшиеся правила определения пульсаций для удобства формулировок были сокращены. Все таблицы пределов воздействия остались неизменными.

5.1.4. Пределы инфракрасного лазерного воздействия

Может показаться удивительным, что при разнообразии свойств спектрального поглощения воды в диапазонах ИК-В и ИК-С (длины волн от 1400 нм до 1 мм) пределы воздействия всегда постоянны для одной и той же длины волны, за исключением короткоимпульсных, субмикросекундных воздействий лазерного излучения 1,54 мкм. Однако имеющихся данных недостаточно, чтобы определить дополнительные волновые корректировки (относящиеся к расширенной базе данных при 10,6 мкм) для всего инфракрасного диапазона (1,4 мкм – 1 мм). При 1,54 мкм, пределы инфракрасного воздействия увеличиваются в 100 раз для продолжительностей воздействия, меньших 1 мкс. На основе имеющейся в настоящее время информации нельзя достоверно провести никакой иной экстраполяции для других длин волн.

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

Изменения в пределы воздействия для кожи были внесены МКНР в 1988 г. Для площадей поперечных сечений луча между 100 см^2 и 1000 см^2 , предел воздействия для продолжительностей воздействия, превышающих 10 с, составляет $10000/A_s \text{ мВт/см}^2$, где A_s - площадь кожи, подвергшейся воздействию, в см^2 . Для площадей кожи, подвергшейся воздействию, превышающих 1000 см^2 , предел воздействия составляет 10 мВт/см^2 (МАРЗ, 1988).

5.1.5. Продолжительность воздействия

Значительное разъяснение, сделанное в редакции 1988 г., было связано с принципами выбора соответствующей продолжительности воздействия для непрерывного лазерного излучения. Установление применимых пределов воздействия для непрерывного или импульсного лазерного воздействия периодического действия требует определения продолжительности воздействия. Для одиночного импульсного воздействия эта продолжительность очевидна. Однако, если речь идет о периодических воздействиях или более продолжительных воздействиях, то необходимо использовать следующие критерии.

Для любого одиночного импульсного лазерного воздействия продолжительность воздействия равна продолжительности импульса (t), определенного в его точках полумощности. Для всех пределов воздействия на кожу и для воздействия на глаза излучения невидимого диапазона спектра (длина волны менее 400 нм или более 700 нм), продолжительность воздействия непрерывного излучения равна максимальному времени (T) предполагаемого прямого воздействия. Для воздействия на глаза непрерывного излучения, продолжительность воздействия равна максимальной продолжительности прямого взгляда. Однако, если целенаправленный взгляд не ожидается, то необходимо использовать время мигательной реакции (0,25 с). При воздействии на глаза излучения ближней инфракрасной области (700 - 1400 нм), максимальная продолжительность воздействия в 10 с обеспечивает адекватный критерий опасности как для непреднамеренного, так и для целенаправленного взгляда. В этом случае движения глаз будут обеспечивать естественный предел воздействия и, тем самым, исключать необходимость учета периодов воздействия, превышающих 10 с, за исключением необычных условий. В специальных приложениях, например воздействие от медицинских диагностических инструментов, может применяться еще более продолжительное воздействие.

Пределы воздействия для импульсов, меньших 1 нс, не были предоставлены МКНР/МАРЗ из-за недостатка биологических данных. Однако консервативный промежуточный принцип состоит в том, чтобы ограничить пиковое излучение пределами воздействия, применяемыми для импульсов продолжительностью в наносекунду.

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности

5.1.6. Периодическое воздействие

Периодическое воздействие в течение одного дня со стороны лазерного излучения может произойти в результате множественного периодического воздействия непрерывного излучения или в результате воздействий импульсных лазеров периодического действия и некоторых сканирующих лазеров. Сканирующие лучи создают периодическое воздействие для глаз в диапазоне, опасном для сетчатки (400 - 1400 нм). Длительность отдельного импульса, как и длительность общего воздействия нескольких импульсов, определяется тем же способом, который использовался для непрерывного лазерного излучения, то есть установлением времени (T), истекшего от начала воздействия (первый импульс) до его конца (последний импульс). Методы определения пределов воздействия для периодических лазерных воздействий приведены в следующих параграфах.

Ультрафиолетовое лазерное излучение

Для периодических воздействий, доза воздействия аддитивна в течение 24-часового периода, независимо от коэффициента повторяемости. Это правило согласуется со всем опытом, накопленным по биологическим воздействиям ультрафиолетового излучения. Предел воздействия для любого 24-часового периода должен быть уменьшен в 2,5 раза для одиночного импульсного воздействия, если ожидается воздействие в последующие дни (Zuclich, 1980).

Видимое и инфракрасное лазерное излучение

Как сканирующие лазеры, генерирующие непрерывное излучение, так и импульсные лазеры периодического действия могут создавать серию (ряд) лазерных импульсов, воздействующих на глаза. Предел воздействия на импульс при взгляде на пульсирующий луч периодического действия составляет $N^{-1/4}$ раз предела воздействия для одиночного импульса той же продолжительности (t), где N - число импульсов, рассчитанное как произведение частоты повторения импульсов (ЧПИ) и общей продолжительности воздействия. Продолжительность T определяется тем же способом, что и для непрерывного излучения той же длины волны (см. выше). Этот предел воздействия применяется по отношению ко всем длинам волн, превышающим 700 нм, где преобладают тепловые травмы. Для длин волн меньших 700 нм, где могут также включаться механизмы фотохимического ущерба, предел воздействия, рассчитанный на основе $N^{1/4}$, также не должен превышать предела воздействия, рассчитанного для Nt секунд, где t - продолжительность одиночного импульса серии, и Nt превышает 10 с. Для частот повторения импульсов, превышающих 15 кГц, среднее значение облученности или энергетическая экспозиция серии импульсов не будет превышать пределы воздействия для непрерывного излучения при взгляде продолжительностью T . Среднее значение облученности равно общей энергетической экспозиции в течение времени T , поделенной на T . Эмпирическое выражение $N^{-1/4}$ основано на нескольких исследованиях (Sloney и Marshall, 1991). Основой для

Пределы производственного воздействия и стандарты безопасности критериев при взгляде продолжительностью 0,25 с и 10 с послужили исследования движений глаз (Sloney и Worlbarsht, 1980).

Периодическое воздействие на кожу

Для периодического импульсного воздействия на кожу предел воздействия, основанный на одиночном импульсном воздействии, не должен превышать, а среднее значение облученности не должно превышать предел воздействия, используемый для общей продолжительности серии импульсов T.

5.2. Взгляд в будущее

Единственный раздел руководства по пределам воздействия, в который были внесены изменения, относится к пределам воздействия от протяженных источников. Эти изменения обычно не влияют на большинство приложений, поскольку на практике обычно используются более консервативные пределы воздействия первичного луча («точечный источник»).

6. Контроль и защита от воздействия лазерной радиации

Этот раздел рекомендует меры эффективного контроля воздействия со стороны лазерного излучения и защиты от производственного воздействия со стороны оптического излучения лазерных изделий. Указанные меры относятся к лазерным изделиям, которые могут состоять из одного лазера с отдельным источником энергии или без него, или могут включать один или более лазеров в оптической, электрической или механической системе. Такие системы были описаны в разделе 3.

6.1. Контрольные меры. Общая концепция

Подходы к лазерной безопасности зависят от отдельных лиц или групп лиц, участвующих в решении этой проблемы. Большинство программ, которые должны применяться в промышленности, а также правительствами и учебными заведениями, находятся в стадии разработки. Некоторые организации разработали положения, описывающие ответственность администрации и органов технического надзора, критерии состояния окружающей среды, требования, предъявляемые к персоналу, меры техники безопасности и медицинского контроля. Все подобные положения должны в первую очередь подчеркивать необходимость использования технических средств контроля. Соответствующее обучение и подготовка должны проводиться как для отдельного оператора по лазерам, так и для работников, отвечающих за технику безопасности при работе с лазерами. Технические средства защиты должны включать блокировки, соответствующую планировку помещений, защитные экраны и предупреждающие знаки. Критерии выбора средств защиты глаз включают многие взаимосвязанные факторы. Необходимо отметить, что имеющиеся коммерческие средства защиты глаз предназначены для защиты от излучения одной длины волны или группы волн фиксированной

Использование лазеров в промышленности

длины. Средства защиты глаз, предназначенные для защиты от волн определенной длины, должны использоваться только тогда, когда технических или профилактических средств защиты недостаточны. Для случаев, когда продолжительное воздействие на глаза со стороны видимых лазеров (только) не предполагается, используемые пределы воздействия могут базироваться на продолжительности 0,25 с.

Международная электротехническая комиссия (МЭК, 1984), Американская конференция промышленных гигиенистов (АКПГ, 1990) и Лазерный институт Америки (ЛИА, 1990) подготовили руководства для установки лазеров, а Американский институт по стандартам (АИС, 1986) и другие национальные органы разработали подробный стандарт воздействия на персонал, использующий лазеры. Эти документы предусматривают средства защиты от опасностей, связанных с лазерным излучением, которые изменяются в зависимости от типа используемых лазеров, а также условий их использования. Эксплуатация лазеров должна поручаться квалифицированным операторам и проходить под контролем персонала, который осведомлен об имеющихся опасностях. По возможности следует использовать закрытые установки.

В вышеупомянутых руководствах и стандартах только две меры предосторожности применяются для всех типов лазерных установок:

(а) люди не должны смотреть на первичный луч или на зеркальные отражения луча, если в этом нет необходимости, даже если предел воздействия не превышен;

(б) оператор лазера должен быть осведомлен о типе используемого прибора; должны быть разработаны соответствующие положения, касающиеся критериев образования и квалификации для лиц, использующих лазерные устройства.

Особого внимания требуют эксплуатация лазерных устройств на контролируемой территории в соответствии с лазерной классификацией, а также контроль за траекторией лазерного луча. Только уполномоченный персонал должен осуществлять эксплуатацию таких лазерных систем. Посторонним должно быть запрещено входить на контролируемую территорию, если только ими не было получено специальное разрешение и не были приняты соответствующие меры предосторожности.

Лазерные оптические системы (зеркала, линзы, дефлекторы луча и пр.) должны быть настроены таким образом, чтобы первичный луч или зеркальное отражение первичного луча не могли привести к воздействию на глаза излучения с уровнями выше пределов воздействия для прямого излучения.

Оптические системы, например телескопы и микроскопы, могут увеличивать опасность для глаз при взгляде на лазерный луч, поэтому при их использовании должны приниматься специальные меры предосторожности. Микроскопы и телескопы могут использоваться в качестве оптических инструментов, но они должны быть обеспечены блокировкой или фильтром (если это необходимо), чтобы предотвратить

Использование лазеров в промышленности

воздействие на глаза лазерного излучения с уровнями, выше соответствующего предела воздействия.

В случае невидимых лучей лазеров необходимо использовать дополнительные меры предосторожности. Следует обеспечить позиционирование траектории луча таким образом, чтобы опасные зеркальные отражения не возникали.

Лазерные медицинские инструменты для хирургии или для диагностических целей должны иметь встроенные приборы безопасности, включая специальные механизмы и предупреждающие знаки относительно необходимости защиты глаз и защиты пациентов, включая использование невоспламеняемой газовой анестезии. Должны быть предусмотрены нормальные меры техники безопасности для любого электрического оборудования. Лазерные хирургические приборы для целей обучения должны иметь дуальные средства защиты. Должна быть разработана приемлемая программа обучения потенциальных пользователей и персонала операционного помещения. Меры защиты никоим образом не должны ограничивать использование лазерного излучения какого-либо типа, которое может быть специально предписано для диагностических, терапевтических или исследовательских целей, или определено по решению квалифицированных специалистов, занимающихся лечением. Должны приниматься меры предосторожности, гарантирующие от нежелательного воздействия на органы и ткани.

По мере роста сферы применения лазерных систем большой мощности в медицине и промышленности увеличивается вероятность случайного воздействия на кожу при уровнях лазерного излучения, превышающих допустимые пределы воздействия на кожу. Рекомендуется, чтобы для персонала, работающего с лазерными системами большой мощности (*Класса 4*), принимались специальные меры предосторожности для защиты кожи.

После рассмотрения и одобрения должностным лицом, отвечающим за технику безопасности, средства технической защиты, рекомендуемые для лазеров или лазерных систем *Классов 3б* и *4*, могут быть заменены процедурными, административными или альтернативными техническими средствами защиты, которые обеспечивают эквивалентный уровень безопасности. Эта ситуация может наблюдаться, например, в медицинских или исследовательских учреждениях.

6.2. Надзор за лазерным излучением на рабочем месте

Цель надзора за лазерным излучением и оценкой лазерных опасностей состоит в том, чтобы на основании технической документации определить, соответствует ли оборудование рекомендованным стандартам работы и воздействия на персонал (то есть наблюдается или нет избыточное воздействие), чтобы очертить приграничные области, требующие защиты, и идентифицировать контролируемые и неконтролируемые площади рабочего места (до того, как источник начнет действовать).

Использование лазеров в промышленности

При осуществлении надзора за лазерным излучением и проведении оценки лазерных опасностей, рекомендуется соблюдение следующей процедуры.

(а) Надзор за лазерным излучением или оценка лазерных опасностей должны выполняться только компетентным, предпочтительнее, должностным лицом, отвечающим за технику безопасности при работе с лазерами.

(б) Оценка и надзор должны осуществляться в следующих ситуациях:

1) перед вводом в действие новых установок, которые могут создавать лазерное излучение, превышающее рекомендуемые пределы воздействия;

2) после ремонта или внесения изменений в рабочие условия; после установки защитных барьеров, которые могут повлиять на уровни воздействия, с целью гарантировать, что уровни воздействия не превышают рекомендуемые пределы воздействия;

3) в случае, когда есть подозрение о какой-либо неполадке, которая может повлиять на уровни лазерного излучения;

4) через регулярные промежутки времени на установках, которые могут вызывать воздействие, превышающее рекомендуемые пределы.

Должны вестись записи обо всех собранных в ходе проверки уровней лазерного излучения данных, о количестве и типах устройств на контролируемой площади. Такие записи должны также содержать результаты расследования всех известных инцидентов, связанных с лазерным излучением, и их причины.

6.3. Контроль за производственным воздействием

6.3.1. Классификация лазеров

Классификационная схема относится исключительно к случайной эмиссии лазерных систем и потенциальной опасности, основанной на физических характеристиках. Лазерные изделия должны классифицироваться производителем и снабжаться этикетками, указывающими класс опасности прибора в соответствии с принятыми национальными правилами и руководством МЭК 825 (МЭК, 1984, 1990).

6.3.2. Изготовленные лазерные изделия

Это руководство содержит меры по технике безопасности и меры защиты, которые должны применяться пользователем лазерной системы в соответствии с классификацией опасностей. В нем не идет речь об обязанностях и обязательствах производителей. Обычно предполагается, что пользователи должны руководствоваться сведениями о классе изделия, указанном производителем, для оценки опасностей лазерного изделия во время работы, тем самым избегая всех или почти всех радиометрических измерений. Производители должны обращаться к публикации Стандарта 825 Международной электротехнической комиссии (МЭК, 1984, 1990), которая устанавливает порядок классификации и требования техники безопасности при работе.

Использование лазеров в промышленности

6.3.3. Лазеры, используемые для исследований и разработок

Поскольку большинство травм, связанных с лазерным излучением, происходит в исследовательских лабораториях, особую важность представляет контроль именно в таких условиях. Лазеры, используемые для исследований, часто являются лишь несовершенными доморощенными прототипами, сконструированными без специальных средств техники безопасности, которыми обычно снабжаются изделия промышленного производства. Поэтому важно классифицировать такие лазеры и попытаться оградить траекторию луча настолько, насколько это возможно, а также установить стационарные средства безопасности (если это практично) для минимизации потенциального опасного воздействия.

Методы защиты для экспериментальных изделий *Класса 3б* и *Класса 4* аналогичны тем, которые используются для промышленных лазерных изделий. Эти средства контроля представлены в следующих разделах.

6.3.4. Лазерные системы Класса 3б и Класса 4, используемые внутри помещений

Необходимость использования средств индивидуальной защиты от опасных последствий, связанных с эксплуатацией лазеров, должна быть сведена к минимуму посредством использования технических средств защиты, ограждения луча и организационных мероприятий.

Если может возникнуть опасное лазерное воздействие (*Класса 3б* или *Класса 4*), то должны быть обеспечены адекватные средства для защиты глаз (см. пункт 6.4.12.).

6.3.5. Лазерные системы Класса 3б и Класса 4, используемые вне помещений

Опасности, создаваемые лазерами *Класса 3б* и *Класса 4*, могут проявляться на значительном расстоянии. Расстояние от лазера, на котором уровень излучения снижается до соответствующего предела воздействия, называется *номинальным окулярным опасным расстоянием* (НООР). Пространство, внутри которого уровень излучения превышает предел воздействия, называется *номинальной окулярной опасной площадью* (НООП) или, иногда, *номинальной опасной зоной* (НОЗ). Эта площадь ограничена пределами пересечения и повышения точности лазерной системы и простирается либо до предела номинального окулярного опасного расстояния, либо до положения цели или заслонки. Точная номинальная окулярная опасная площадь будет также зависеть от характера материала на траектории луча, т.е. зеркальных рефлекторов.

Номинальное окулярное опасное расстояние зависит от выходных характеристик лазера, соответствующего предела воздействия, типа используемой оптической системы и атмосферной реакции на проникновение луча.

Почти всегда необходима заслонка для луча. Контроль основного луча является наиболее важным фактором, который следует учитывать при разработке мер защиты. При взгляде, обращенном непосредственно на лазерный луч, он покажется очень ярким, даже если уровни воздействия не

Использование лазеров в промышленности

превышены. Поэтому люди, полагая, что они подверглись слишком большому воздействию, могут отвлечься и подвергнуться дополнительному риску.

Риск от прямого луча увеличивается, если существует возможность, что люди будут смотреть на него через увеличивающие оптические приборы. Опасность для глаз на любом расстоянии увеличивается пропорционально квадрату увеличительной мощности оптического прибора. Опасное расстояние увеличивается на увеличительную мощность оптики по сравнению со случаем, когда не используются никакие дополнительные средства для просмотра. Поэтому лазер, опасное расстояние для которого в случае невооруженного зрения равно 100 м, будет опасен и на расстоянии в 700 м для человека, использующего бинокль. Вероятность наличия лиц, использующих оптические приборы, делает еще более насущной необходимость создания заслонки для луча. Вне помещения почти любой рассеивающий материал может служить в качестве такой заслонки. В отличие от лабораторных исследований, операции, связанные с большой энергией, которые могут повредить заслонку для луча, не проводятся вне помещений.

Зеркальные отражения играют особую роль при работе лазера вне помещений. Целевые материалы могут иметь зеркальные поверхности, которые будут перенаправлять луч лазера туда, где могут находиться незащищенные люди, не участвующие в лазерных тестах. Целевые материалы должны тщательно выбираться, чтобы избежать возможности образования опасных зеркальных отражений. Рассеянное излучение от лазеров, обычно используемых вне помещений, не опасно.

При направлении луча лазера в небо, необходимо учитывать опасность, создаваемую для летальных аппаратов. Даже если уровни воздействия не превышены, яркий свет может отвлечь пилотов, особенно ночью, что может привести к потере контроля над летательным аппаратом. Инфракрасные лазеры должны использоваться только в ситуациях, когда летательный аппарат не подвергается воздействию, превышающему установленные нормы. Обычно не предполагается, что пилоты используют увеличительные оптические приборы.

Защита глаз обычно рассматривается как крайнее средство для операций, осуществляемых вне помещений. Если опасность настолько велика, что операторы и персонал в целевом районе вынуждены использовать средства защиты глаз, оптическая плотность и длина волны должны правильно выбираться. Вместе с тем, следует принять дополнительные меры для информирования о потенциальных опасностях лиц, не связанных с проводимыми работами.

Меры предупреждения для лиц, находящихся на территории, могут включать предупреждающие знаки и специальные инструкции для защиты персонала, а также предупредительные огни. Для ситуаций, связанных с интенсивным движением, может возникнуть необходимость в огораживании территории для предупреждения лиц, входящих на такую

Использование лазеров в промышленности

территорию, о возможной опасности. Во время проведения работ должен использоваться любой тип предупреждений, поскольку если люди не обратят внимания на отдельный предупреждающий сигнал, они могут подвергнуться риску травмирования. Нельзя считать, что предупреждения, оставленные на участке тестирования, окажутся эффективными в реальных условиях.

6.4. Техника безопасности

6.4.1. Меры предосторожности

Цель мер предосторожности и контроля состоит в том, чтобы снизить возможность воздействия со стороны опасных уровней лазерного излучения и других связанных с ними опасностей. Защитные меры могут быть сгруппированы в следующие три категории: (а) технические средства защиты, (б) специальная одежда и индивидуальные средства защиты, (в) организационные средства защиты. Технические средства защиты считаются более надежными, и поэтому они более предпочтительны. Если применение технических средств защиты не эффективно, следует использовать индивидуальные средства защиты (обычно для защиты глаз). Организационные мероприятия являются дополнительными мерами, которые не могут использоваться в качестве замены технических средств защиты.

6.4.2. Выбор средств защиты

Нет необходимости в использовании всех средств защиты одновременно в данное время для данной лазерной операции. Если применение одного или нескольких средств защиты снижает возможное воздействие до уровня, ниже приемлемого предела воздействия, тогда использование дополнительных мер защиты может стать необязательным для данной лазерной операции.

6.4.3. Модифицированные лазерные изделия

Если модификация пользователем лазерного изделия, которое ранее прошло классификацию, влияет на предполагаемую функцию, выходную энергию или мощность лазерного луча, лицо или организация, осуществляющие модификацию, несут ответственность за проведение повторной классификации и повторного использования лазерных изделий.

6.4.4. Определенные условия

Следующие руководящие принципы относятся к безопасной эксплуатации лазерных изделий:

(а) на открытом воздухе или в условиях строительства организационные методы защиты часто являются единственным разумным подходом к обеспечению безопасности;

(б) в лабораторных условиях или в условиях цеха более значительную роль могут играть технические средства защиты;

Использование лазеров в промышленности

(в) в демонстрационных условиях предварительное планирование и контроль за доступом часто также являются единственным разумным подходом к обеспечению безопасности.

6.4.5. Демонстрация и выставки

Только лазерные продукты *Класса 1*, *Класса 2* или *Класса 3а* должны использоваться для демонстрации и выставок на неконтролируемой территории. Использование лазеров более высокого класса для таких целей может быть допустимо, только если оно находится под контролем опытного, хорошо подготовленного оператора и если зрители защищены от воздействия со стороны уровней излучения, превышающих допустимые уровни воздействия. Если это необходимо, лицензирование таких выставок должно базироваться на оценке общей лазерной безопасности, связанной с потенциальным использованием лазера.

Каждая демонстрируемая лазерная система, используемая для образовательных целей (в школах и пр.), должна эксплуатироваться таким образом, чтобы исключить воздействие лазерного излучения с уровнями, превышающими допустимые пределы воздействия.

6.4.6. Лабораторные и цеховые лазерные установки

Лазерные изделия *Класса 2* и *Класса 3а*

Необходимо принимать требуемые меры предосторожности для защиты глаз от воздействия лазерного излучения; случайное воздействие (0,25 с), которое может возникнуть при попадании луча в глаза, не считается опасным. Однако лазерный луч не должен быть специально направлен на людей. Использование оптических средств (например, бинокля) одновременно с лазерными изделиями *Класса 3а* может быть потенциально опасным.

Лазерные изделия *Класса 3б*

Лазеры *Класса 3б* потенциально опасны, если прямой луч или зеркальное отражение попадает на незащищенный глаз (попадание на глаз прямого луча)². Должны приниматься следующие меры предосторожности, чтобы избежать воздействия на глаза прямого или зеркально отраженного излучения:

(а) лазер должен эксплуатироваться только на контролируемой территории;

(б) необходимо принимать меры предосторожности, чтобы избежать непреднамеренного зеркального отражения;

² Условия для безопасного просмотра рассеянного излучения видимого диапазона спектра лазера *Класса 3б*: минимальное расстояние просмотра 13 см между экраном и роговицей, максимальная продолжительность просмотра – 10 с. Другие условия просмотра, например фиксированный взгляд на рассеянное отражение, считаются нереальными.

Использование лазеров в промышленности

(в) лазерный луч должен быть остановлен, где это возможно, в конце его полезной траектории материалом, рассеивающим свет такого цвета и отражаемости, который позволит осуществить позиционирование луча, минимизируя одновременно опасности, связанные с отражением;

(г) необходима защита для глаз, если существует вероятность попадания прямого или отраженного луча на невооруженные глаза либо рассеянного света при использовании увеличительных систем;

(д) на входах в зоны, где используются лазеры, должны находиться стандартные предупреждающие знаки.

Лазерные изделия *Класса 4*

Лазерные изделия *Класса 4* представляют потенциальную опасность со стороны как прямого и зеркально отраженного, так и рассеянного излучений. Они также могут вызывать пожар. В дополнение к средствам, перечисленным в предыдущем разделе, для минимизации рисков от лазерных изделий *Класса 4* необходимо принимать следующие меры защиты:

(а) Если это целесообразно, траектории лучей должны быть закрыты. Доступ к месту использования лазеров во время их эксплуатации должен быть ограничен кругом лиц, использующих соответствующие средства защиты глаз (а в некоторых случаях и защитную одежду).

(б) Если это целесообразно, лазеры *Класса 4* должны закрываться во время эксплуатации. Это позволит снизить необходимость физического присутствия персонала в помещениях, где используется лазер.

(в) Важно обеспечить хорошее освещение комнаты, особенно в тех местах, где используются средства для защиты глаз; добиться этого условия помогают поверхности стен светлых тонов, которые отражают свет.

(г) В качестве заслонки для луча должен использоваться достаточный толщины огнеупорный кирпич или другой отражающий свет материал, поскольку пожар - это основной вид опасности, связанный с использованием лазеров высокой мощности. Должным образом охлажденные неплоские металлические предметы, например конусы и абсорберы, являются более предпочтительными. Лазерная резка и сварка обычно не создают опасных отражений, за исключением случаев, когда мощность луча снижается и прекращается абляция.

(д) Специальные меры предосторожности должны приниматься для того, чтобы снизить нежелательное отражение излучения дальней инфракрасной области спектра, при этом и луч и обрабатываемый материал (целевая мишень) должны быть окружены материалом, например полиметилметакрилом, непрозрачным для волн лазера данной длины (даже темные металлические поверхности могут превратиться в поверхности, обладающие высокой способностью к отражению при длине волны 10,6 мкм).

Использование лазеров в промышленности

6.4.7. Лазерные установки, используемые вне помещений и при строительстве

Лазерные изделия Класса 2

По возможности луч должен быть ограничен в конце его полезной траектории. Лазер не должен быть нацелен на глаза людей, и не должен использоваться на высоте человеческого роста.

Лазеры для обзора, настройки и нивелирования

По возможности лазеры *Класса 1* и *Класса 2* должны использоваться для обзора, выравнивания и нивелирования. Вместе с тем, бывают ситуации, когда требуется использование лазеров более высокой мощности. Если используются лазеры *Класса 3а*, необходимо следовать требованиям нижеследующего раздела. В тех исключительных случаях, когда есть необходимость в использовании лазеров *Класса 3б*, следует соблюдать условия раздела, относящегося к лазерам соответствующего класса. Кроме этого, людям должен быть запрещен доступ в те места, где используется лазерное излучение длиной волны от 400 нм до 700 нм с мощностью излучения, превышающей 5 мВт при любой продолжительности воздействия, большей 0,38 нс. Люди не должны допускаться и в те места, где лазерное излучение превышает допустимый предел излучения (ДПИ) *Класса 1* при любой комбинации продолжительности воздействия и диапазона длин волн.

Лазерные изделия Класса 3а, используемые для геодезических операций, настройки и нивелирования

Следующие руководящие принципы используются при проведении геодезических операций с помощью лазерных изделий *Класса 3а* для настройки и нивелирования:

(а) Только квалифицированные и подготовленные работники, допуск которых согласован с должностным лицом по технике безопасности при использовании лазеров, могут получать поручения по установке, регулированию и эксплуатации лазерного оборудования.

(б) Площади, на которых используются лазеры, должны быть снабжены соответствующими предупреждающими знаками (рис. 4).

Специальное предупреждающее заявление и информация соответствуют характеру применения лазера

Символ и граница: черные

Фон: желтый

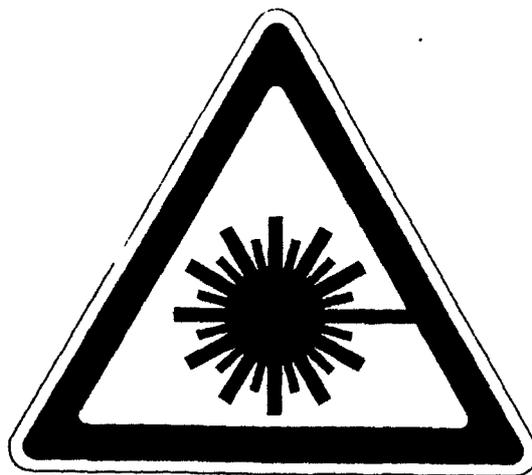


Рис. 4. Стандартный предупреждающий знак (МЭК)

(в) Если это целесообразно, механические или электрооптические средства должны использоваться для того, чтобы содействовать настройке лазера.

(г) Должны приниматься меры предосторожности, исключающие попадание лучей в глаза людей (продолжительный период воздействия луча на глаза может быть опасным). Прямое попадание луча (свыше 2 мВт), собранного через оптические инструменты (теодолиты и пр.), может быть опасным и не должно допускаться, если только оно не было специально одобрено должностным лицом по технике безопасности при использовании лазеров.

(д) Лазерный луч должен быть остановлен в конце его полезной траектории. Он должен останавливаться во всех случаях, если опасная траектория луча (до номинального окулярного опасного расстояния) выходит за пределы контролируемой зоны.

(ж) Траектория лазерного луча должна проходить (в зависимости от случая) выше или ниже уровня глаз.

(з) Необходимо принимать меры предосторожности, гарантирующие, что луч лазера не направлен на зеркальные поверхности (и, что более важно, на плоские зеркальные поверхности).

(и) Если лазер не используется, он должен храниться в месте, к которому не может иметь доступ персонал, не имеющий специального разрешения.

Лазерные изделия *Класса 3б* и *Класса 4*

Лазеры *Класса 3б* и *Класса 4*, используемые вне помещений и в аналогичных условиях, должны эксплуатироваться только персоналом, прошедшим соответствующее обучение и получившим одобрение со стороны должностного лица по технике безопасности при работе с лазерами. Чтобы минимизировать возможные опасности, в дополнение к уже указанным мерам, необходимо принимать следующие меры предосторожности:

(а) Люди не должны даже случайно попадать в зону прохождения траектории луча, где плотность потока энергии превышает пределы

Использование лазеров в промышленности

воздействия. Исключение может быть сделано для персонала, использующего специальные средства защиты глаз. Технические средства защиты, например ограждение и барьеры, блокировка при пересечении и поднятии луча, должны использоваться, если это целесообразно и если таким образом можно усилить эффективность организационных мероприятий.

(б) В пределах номинального окулярного опасного расстояния должно быть запрещено преднамеренное слежение за транспортными средствами или летательными аппаратами, не являющимися объектами наблюдения.

(в) По возможности следует исключать столкновение луча с какими-либо поверхностями, провоцирующими случайные отражения, поскольку это может быть потенциально опасным. Если это невозможно, пропорциональным образом должна быть увеличена площадь номинальной опасной зоны.

6.4.8. Использование встроенных технических средств защиты

Дистанционный блокирующий соединитель

Дистанционный блокирующий соединитель, установленный в лазере *Класса 4*, должен быть подсоединен к главной блокировке, срабатывающей при чрезвычайных ситуациях или к блокировкам комнат, дверей или приспособлений. Дверные блокировки должны использоваться тогда, когда в дверном проеме существует опасный уровень лазерного излучения.

Ключевой контрольный прибор

Если лазерное изделие *Класса 3б* или *Класса 4* не используется, оно должно быть защищено от несанкционированного использования путем изъятия ключа ключевого контрольного прибора.

Ограничитель луча, или аттенюатор

Помимо выключателя лазера, лазерные изделия *Класса 3б* и *Класса 4* должны оснащаться постоянным прилагаемым ограничителем луча, или аттенюатором, который может предотвратить выходную эмиссию соответствующего уровня, когда лазер находится в запасном положении.

6.4.9. Предупредительные знаки

Входы в зоны или за защитные ограждения, содержащие лазерные изделия *Класса 3а*, *Класса 3б* и *Класса 4*, должны быть снабжены соответствующими предупредительными знаками (см. рис. 4).

6.4.10. Траектории луча

Луч, испускаемый каждым лазерным изделием *Класса 3б* или *Класса 4*, должен быть остановлен в конце его полезной траектории с помощью ловушки, изготовленной из материала, обладающего соответствующими отражающими и теплопоглощающими свойствами или абсорбером.

По возможности траектории открытых лазерных лучей должны проходить выше или ниже уровня глаз (для стоящих или сидящих людей).

Использование лазеров в промышленности

Также по возможности лазерные лучи должны проходить в специальных защитных камерах (например, в трубке).

6.4.11. Зеркальные отражения

Для предотвращения непреднамеренного зеркального отражения лазерных лучей, испускаемых лазерными изделиями *Класса 3б* и *4*, необходимо принимать специальные меры предосторожности. В частности, должны монтироваться подлежащие контролю оптические элементы, например зеркала, линзы и ответвители.

6.4.12. Защита глаз

Спецификации средств для защиты глаз

При определении приемлемых средств для защиты глаз необходимо учитывать следующие моменты:

- (а) длина волны при эксплуатации;
- (б) максимальная ожидаемая энергетическая экспозиция или облученность;
- (в) используемый предел воздействия;
- (г) требуемая оптическая плотность средств защиты глаз при заданной длине волны излучения, которая обычно является логарифмической функцией соотношения (б)/(а);
- (д) требования по пропусканию видимого света;
- (е) энергетическая экспозиция или облученность, при которой могут быть повреждены средства защиты глаз;
- (ж) необходимость использования специальных очков;
- (з) комфорт и вентиляция;
- (и) деградация или модификация абсорбирующей среды, даже если она является временной или кратковременной;
- (к) прочность материалов (сопротивляемость удару);
- (л) требования к периферийному зрению;
- (м) любые соответствующие национальные правила.

Средства защиты глаз, которые предназначены для обеспечения адекватной защиты от определенного лазерного излучения, должны использоваться во всех опасных зонах, где применяются лазеры *Класса 3б* или *Класса 4*. Исключениями из этого правила могут быть следующие:

- (а) технические или организационные средства защиты таковы, что они исключают потенциальное воздействие, превышающее используемые пределы воздействия;
- (б) из-за необычных эксплуатационных требований использование средств защиты глаз нецелесообразно. Такие эксплуатационные процедуры должны использоваться только с разрешения должностного лица, отвечающего за технику безопасности при работе с лазерами.

Идентификация и использование этикеток средств защиты глаз при работе с лазерами

Все применяемые при использовании лазеров средства защиты глаз

Использование лазеров в промышленности

должны снабжаться маркировками, содержащими информацию, достаточную для того, чтобы гарантировать правильный выбор средств защиты глаз для определенных лазеров.

Требуемая оптическая плотность

Оптическая плотность (ОП) средств защиты глаз при использовании лазера обычно в значительной степени зависит от длины волны. Применяемые средства защиты глаз должны быть эффективными для определенного диапазона излучения; на них должна быть указана минимальная величина оптической плотности D внутри диапазона. Величина D , используемая при выборе средств защиты глаз, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$D = \text{Log}_{10}(H_0/EL),$$

где H_0 - ожидаемый уровень воздействия на незащищенные глаза, выраженный в тех же радиометрических величинах, что и предел воздействия.

Выбор средств защиты глаз

Защитные средства для глаз должны быть комфортны в использовании. Они должны обеспечивать широкий обзор, достаточную плотность прилегания (если требуемая D больше 1,5), необходимую вентиляцию во избежание проблем запотевания и обеспечения нужной прозрачности. Необходимо по возможности избегать использования средств защиты глаз, в которых применяются плоские отражающие поверхности, которые могут вызвать опасные зеркальные отражения. Каркас и боковые элементы также должны защищать глаза от вредного воздействия (до 0,03 от уровня воздействия, допускаемого линзами).

6.4.13. Защитная одежда

Если персонал может подвергнуться воздействию лазерного излучения, превышающего пределы воздействия для кожи, должна использоваться защитная одежда. Особое значение это имеет для защиты от ультрафиолетового лазерного излучения. Лазеры *Класса 4* обычно потенциально опасны, поэтому используемая для защиты от их излучения одежда должна изготавливаться из огнестойких и теплоустойчивых материалов, хотя в первую очередь следует все же иметь в виду технические средства защиты от излучения.

6.5. Опасности, связанные с эксплуатацией лазеров

В зависимости от типа используемого лазера при его эксплуатации могут возникать опасности, перечисленные в следующих пунктах.

6.5.1. Атмосферное загрязнение

Необходимо использовать соответствующие средства местной вытяжной вентиляции, если в ходе использования лазера наблюдается выделение опасных уровней переносимых по воздуху загрязняющих веществ, например:

- (а) испарение целевых материалов и реагентов при лазерной резке,

Использование лазеров в промышленности

бурении, сварке, лазерных хирургических операциях. Эти материалы могут также включать асбест, монооксид углерода, диоксид углерода, озон, свинец, ртуть, другие металлы и биологические материалы;

(б) газы из лазерных систем, использующих текучий газ, или из побочных продуктов лазерных реакций (фтор, бром, хлор, цианид водорода);

(в) газы или пары из криогенных охладителей.

6.5.2. Побочные опасности, связанные с радиацией

Побочным излучением является любая иная излучаемая лазером энергия, которая необходима для работы: полихроматический белый свет ламп накачки, используемых для возбуждения кристаллических лазеров, ультрафиолетовое излучение из газоразрядного лазера, и др.

Ультрафиолетовая побочная радиация

Ультрафиолетовое излучение, связанное с лампами вспышки и разрядными трубками непрерывного лазера, может быть особенно опасным, если используются ультрафиолетовые генераторные трубки или зеркала (например, из кварца). Обычно защитный кожух лазерных изделий предотвращает такие опасности.

Видимая и инфракрасная побочная радиация

Излучение видимого диапазона и ближней инфракрасной области, испускаемое из разрядных трубок или источников накачки, и излучение от обрабатываемого материала могут обладать достаточной энергетической яркостью, чтобы создавать потенциальную опасность для сетчатки глаза. Для того, чтобы наблюдать оптическую плазму, создаваемую при лазерной резке или сварке, должны использоваться фильтры для защиты глаз, приемлемые для обычной дуговой резки и сварки.

6.5.3. Электрические опасности

Многие лазеры используют высокое напряжение (превышающее 1 кВ), а импульсные лазеры особенно опасны из-за энергии, хранящейся в батареях конденсаторов. Если они не закрыты должным образом, компоненты цепи, например электронные трубки, работающие при напряжении на аноде, превышающем 5 кВ, могут излучать рентгеновское излучение.

Производственные требования электрической безопасности подробно описаны в стандарте МЭК 824 (МЭК, 1984).

6.5.4. Криогенные охладители

Охлаждающие жидкости могут вызывать обморожения и требуют специальных мер предосторожности при работе с ними.

6.5.5. Другие опасности

Во время эксплуатации некоторых лазерных систем высокой мощности существует опасность взрыва в батареях конденсатора или системах оптической накачки. Есть вероятность образования аэрозольных частиц при лазерной резке, бурении или сварке. Также возможны взрывоопасные

Использование лазеров в промышленности

реакции химических реагентов лазеров или других газов, используемых в лаборатории.

6.6. Обучение

Все рабочие, потенциально подвергающиеся воздействию лазерного излучения, должны информироваться о любых существующих опасностях и соответствующих средствах защиты. Обучение должно проводиться в приемлемой, доступной для понимания форме. В ходе обучения должны указываться последствия неприменения мер предосторожности и защиты.

Эксплуатация лазерных систем *Класса 3б* и *Класса 4* может представлять опасность не только для пользователя, но и для других людей, находящихся на достаточно близком расстоянии. Такие лазерные системы должны контролироваться персоналом, прошедшим обучение и соответствующую подготовку. Обучение, которое может быть проведено производителем или поставщиком системы, должностным лицом по технике безопасности по программе, одобренной организацией, должно включать следующие элементы (но не ограничиваться ими):

- (а) процедуры эксплуатации систем;
- (б) биологические последствия лазерного излучения, оказываемые на глаза и кожу;
- (в) технические средства защиты, предупреждающие знаки и пр.;
- (г) средства индивидуальной защиты (если они необходимы);
- (д) последствия неприменения средств защиты;
- (е) порядок отчетности о несчастных случаях, а также случаи, когда необходимо медицинское вмешательство.

6.7. Надзор за здоровьем

При отсутствии общих национальных положений должны приниматься во внимание следующие рекомендации:

(а) Медицинский осмотр квалифицированным специалистом должен осуществляться немедленно после подозреваемого или очевидного травмирующего воздействия на глаза. Такой осмотр должен быть дополнен полным исследованием обстоятельств, при которых произошел несчастный случай.

(б) Рекомендуются предварительное и последующие офтальмологические исследования рабочих, использующих лазеры *Класса 3б* и *4*. Проверка визуальной функции обязательна для каждого случая.

7. Управление и организация

Эта глава подробно рассматривает административные аспекты техники безопасности при использовании лазеров.

Ответственность за защиту рабочих и других лиц от потенциально негативных последствий воздействия лазеров должна возлагаться на

департамент, агентство, комитет или отдельное лицо, как это указано в следующих разделах этой главы.

7.1. Роль компетентных органов

Компетентные или регулирующие органы, чьи задачи и цели связаны с защитой от вредных последствий лазерного излучения, должны сотрудничать друг с другом. Это сотрудничество необходимо для того, чтобы каждый орган или департамент такого органа были осведомлены об ответственности других органов, что позволяет избежать дублирования некоторых функций.

7.1.1. Установка определенных правил, положений, стандартов и кодексов

Компетентные органы после консультаций с представительными органами заинтересованных работодателей и рабочих должны формулировать необходимые положения для защиты от лазерного излучения. Кроме этого, власти должны обеспечить наличие подробного руководства по проектированию и производству лазерных систем, учитывающего технику безопасности, использование источников лазерного излучения, включая надзор по гигиене труда (если это целесообразно).

7.1.2. Лицензирование, уведомление и/или системы регистрации

Компетентные органы должны придерживаться того принципа, что воздействие со стороны лазерного излучения на людей должно быть минимизировано, а пределы воздействия не должны превышать. Классификация лазеров и последующие требования об уведомлении, регистрации или лицензировании должны базироваться на оценке дизайна, обеспечивающего безопасность, и предполагаемых целях использования. Если необходим строгий контроль, соответствующие органы должны указать, что лазерное изделие должно получить лицензию, и оговорить условия ее получения.

Лицензия должна содержать критерии, обеспечивающие необходимое соответствие при конструировании установки и ее вводе в эксплуатацию, включая будущие модификации дизайна и рабочих процедур. Предоставление лицензии не должно ограничивать внесение изменений в лазерную установку в течение периода действия лицензии. Просьба о таких изменениях может быть инициирована лицензиатом. Необходимость или желательность изменений может возникнуть исходя из накопленного опыта либо в результате технологической инновации, исследований или разработок в сфере техники безопасности.

Процесс лицензирования должен определять разные виды ответственности, связанные с планированием, проектированием, конструированием, вводом в эксплуатацию и эксплуатацией установок. Лицензиат со своей стороны должен представить компетентным органам всю необходимую информацию. Если произошли существенные

изменения в эксплуатации или использовании источника лазерного воздействия и если эти изменения связаны с процессом лицензирования, лицензиат также должен предоставить соответствующим органам всю необходимую информацию.

7.1.3. Требования по контролю за качеством проектирования, планирования и конструирования установок и оборудования

Программы по контролю качества для каждой сферы деятельности, связанной с проектированием, планированием и конструированием установок и оборудования, включающих в себя лазеры, зависят от потенциальных опасностей. Они могут быть очень пространными, многофазовыми или многоступенчатыми планами или очень простыми операционными процедурами. Основная ответственность за достижение качества при реализации определенной задачи (например, при проектировании, производстве, вводе в эксплуатацию или эксплуатации) лежит на тех лицах, кому она поручается, а не на тех, кто хочет проверить правильность ее выполнения. Контролирующие органы должны побуждать производителей к проведению исследований, в целях усовершенствования дизайна, конструирования и создания оборудования, включающего лазеры и материалы или средства, применяемые для минимизации производственных опасностей.

7.1.4. Проверка и надзор

Компетентные органы должны разработать систему проверки, чтобы контролировать выполнение мер техники безопасности, гарантирующих соблюдение стандартов и требований, указанных в лицензии. Они также должны иметь право вмешиваться в случае нарушения стандартов. О любой ситуации, которая возникает в результате превышающего соответствующие пределы воздействия, необходимо сообщать в установленном порядке.

7.2. Ответственность работодателя

Владелец устройства или установки, испускающей лазерное излучение, несет ответственность нескольких видов. К ним относятся:

- (а) техника безопасности работников, связанная с излучением;
- (б) покупка и обеспечение лазерного оборудования, соответствующего необходимым стандартам, пока оно новое и пока не превышен срок его эксплуатации;
- (в) гарантия того, что лазерное оборудование удовлетворяет стандартам и требованиям техники безопасности, указанным в данном документе;
- (г) меры, направленные на снижение воздействия на рабочих со стороны лазерного излучения, и предотвращение рисков, связанных с воздействием;
- (д) разработка и публикация (предпочтительнее в письменной форме) политики организации, направленной на предотвращение опасностей и принятие решений и практических шагов, необходимых для внедрения

национальных положений, а также реализация превентивных мер.

Ответственность может делегироваться владельцем в зависимости от размера организации и количества используемых лазерных установок. Помимо того, что каждый работодатель несет ответственность за здоровье и безопасность своих рабочих, рабочие также могут участвовать в обсуждении вопросов техники безопасности и гигиены труда; один или несколько человек могут быть назначены на роль ответственного пользователя и должностного лица по технике безопасности при использовании лазеров.

7.3. Обязанности должностного лица по технике безопасности при использовании лазеров

Если используются лазеры *Класса 3а* и *Класса 4*, владелец или работодатель должен назначить работника, ответственного за технику безопасности при работе с лазерами. Если организация достаточно большая, может быть организован комитет по технике безопасности при работе с лазерами. Вместе с тем, лицо, ответственное за технику безопасности при работе с лазерами, должно быть основным исполнительным агентом по контролю за опасностями. Если комитет по технике безопасности при работе с лазерами не создан, лицо, ответственное за технику безопасности, должно выполнять следующие обязанности:

(а) гарантировать разработку и реализацию эффективной программы по технике безопасности, если есть определенные опасности, связанные с лазерным излучением;

(б) гарантировать проведение кратких инструктажей для рабочих, а также обеспечить сотрудничество между работодателем и рабочими в целях снижения или предотвращения лазерного воздействия;

(в) разрабатывать процедуры по технике безопасности для лазерного оборудования и гарантировать, что все сотрудники о них осведомлены;

(г) гарантировать, что соответствующее лазерное оборудование обслуживается и корректно используется компетентным персоналом;

(д) знать об уровнях воздействия вблизи оборудования, используемого в нормальных условиях;

(е) определить сферы, где воздействие превышает рекомендуемые пределы, и вывесить предупреждающие знаки;

(ж) гарантировать своевременное проведение соответствующего надзора за лазерным излучением и оценкой рисков, когда это требуется, ведение записей о подобном надзоре и оценках;

(з) расследовать и составлять отчеты о лазерном воздействии, которое может превышать рекомендуемые пределы;

(и) назначать сотрудников, работающих с лазерами; обеспечивать проведение медицинских осмотров и лечение рабочих, которые подверглись чрезмерному воздействию в результате несчастного случая;

(к) записывать уровни и продолжительность воздействия для лиц,

которые подверглись воздействию, превышающему рекомендованные пределы;

(л) пересматривать используемые меры предосторожности, указывая соответствующие меры контроля, и обеспечивать обучение и информирование сотрудников о наличии средств контроля за потенциальными опасностями.

7.4. Обязанности других специалистов по технике безопасности и гигиене труда

Должностное лицо по технике безопасности при работе с лазерами может назначать инженера по технике безопасности, промышленного гигиениста, медицинского работника, отвечающего за гигиену труда, врача или других специалистов по технике безопасности. В небольших организациях пользователь, должностное лицо по технике безопасности и врач могут быть одним и тем же лицом. Такой сотрудник должен иметь прямой доступ к работодателю. Степень и характер его ответственности будет зависеть от размера организации и количества применяемых устройств. Вообще, специалист по гигиене труда обеспечивает техническую поддержку при планировании установки и эксплуатации лазерных изделий. Если это необходимо, специалисты по гигиене труда должны контролировать и принимать участие в реализации мер предосторожности.

7.5. Обязанности рабочего (пользователя)

Пользователи лазеров, которые несут ответственность за ежедневную эксплуатацию и обслуживание изделий, испускающих лазерное излучение, должны:

(а) быть осведомлены об опасностях, связанных с эксплуатацией определенных лазерных устройств, которые им поручено эксплуатировать, в частности, о важности наличия блокирующих систем, видах опасности, возникающих в результате выхода из строя таких систем, и соблюдения всех производственных ограничений;

(б) иметь возможность выявить в изделиях, за которые им поручено отвечать, неполадки, которые могут привести к высоким уровням воздействия;

(в) быть осведомлены о методах безопасной эксплуатации и процедурах, которые должны соблюдаться в случае возникновения неполадки в изделии или в чрезвычайных ситуациях, возникающих в результате превышения лазерного излучения;

(г) использовать предоставленное защитное оборудование, если это необходимо;

(д) быть заинтересованы в прохождении предписываемых медицинских осмотров.

7.6. Ответственность производителей

Производители лазерного оборудования отвечают за соответствие оборудования действующим стандартам, за обеспечение информацией об опасностях, возникающих при эксплуатации и обслуживании лазерного оборудования, достаточной для того, чтобы владелец или работодатель были осведомлены о величине риска и необходимых мерах техники безопасности, которые должны быть приняты. Такая информация должна включать класс лазерного изделия.

7.7. Сотрудничество

Сотрудничество между работодателями, рабочими, комитетами по технике безопасности, производителями и другими органами должно основываться на следующих принципах:

(а) работодатель должен обеспечить сотрудничество с рабочими в целях защиты их здоровья и сокращения лазерного воздействия. Он должен разработать и принять на основе взаимного согласия инструкции и рекомендации для предотвращения такого воздействия;

(б) работодатели и рабочие должны сотрудничать при разработке и реализации программ предотвращения и контроля за воздействием лазерного излучения, в частности через комитеты по технике безопасности, осуществляющие мониторинг рабочих условий;

(в) сотрудничество должно реализовываться между производителями и покупателями оборудования для минимизации лазерного излучения от такого оборудования;

(г) поощряется сотрудничество при разработке стандартов, связанных с лазерным оборудованием.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Радиометрическая терминология
и физические характеристики лазеров

1. Радиометрические величины и единицы

1.1. Облученность, энергетическая экспозиция и излучение

Термин *облученность* используется для того, чтобы описать понятие плотности потока в единицах *ватт на квадратный метр* ($Вт \cdot м^{-2}$), падающего на поверхность, например кожу, роговицу или сетчатку. Фотобиологический термин дозы воздействия – *энергетическая экспозиция* – означает воздействие на поверхность в единицах *джоуль на квадратный метр* ($Дж \cdot м^{-2}$). Здесь площадь поверхности, которая подвергается облучению, является определяющей площадью, и она отличается от площади поперечного сечения пучка, на которое падает излучение, на косинус угла падения. Понятие объемной дозы обычно не используется в отношении оптического спектра, поскольку воздействие излучения обычно бывает только поверхностным, а если и проникает, как в случае света, то может быть поглощено поверхностью, например, сетчаткой в случае видимого света, проникающего в глазную среду. *Излучение* – это физическое понятие энергетической яркости: поток излучения, излучаемый объектом с единицы площади в единицу пространственного угла. Единичная площадь здесь берется перпендикулярно к оси распространения излучения. Это понятие широко используется для определения пределов воздействия от протяженных источников (большие площади). Единица излучения – *ватт на квадратный метр на стерадиан* ($Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$), где стерадиан – единица измерения пространственного угла. Стандартные символы системы СИ для *облученности, энергетической экспозиции и излучения*: E_e , H_e , L_e соответственно. Эти и другие величины и единицы представлены в таблице А.1.

1.2. Фотометрические величины и единицы

Если вышеперечисленные радиометрические величины взвесить математически с учетом функции спектральной чувствительности, например $V(\lambda)$, функции чувствительности глаза к дневному свету, получаются новые, а именно фотометрические, величины. Обычно фотометрические величины, например яркость L_v , освещенность E_v , и световая экспозиция H_v , не используются при рассмотрении последствий для здоровья со стороны оптического излучения, за исключением специального случая оценки возможности наступления слепоты от вспышки, или образования

преобразованных изображений в результате воздействия лазерного света.

1.3. Спектральные определения

Оптическое излучение находится в электромагнитном спектре между самыми мягкими видами ионизирующего излучения, с одной стороны, и микроволнового излучения, с другой стороны. В соответствии с этим определением, граница коротких длин волн не является очень точной, но обычно принимается между 10 и 100 нм. Величина 100 нм соответствует энергии фотона, равной приблизительно 12 эВ, и может приниматься в качестве предела образования однофотонной ионизации в биологической системе.

Таблица А.1

Полезные радиометрические величины СИ^{1,2}

Термин	Символ	Определяемое уравнение	Единица СИ и сокращение
Энергия излучения	Q_e	$Q_e = \int \Phi_e dt$	Джоуль (Дж)
Объемная плотность энергии излучения	W_e	$W_e = \frac{dQ_e}{dV}$	Джоуль на кубический метр (Дж·м ⁻³)
Поток излучения (мощность излучения)	Φ_e, P	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	Ватт (Вт)
Энергетическая светимость	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} = \int L_e \cos \theta \cdot d\Omega$	Ватт на квадратный метр (Вт·м ⁻²)
Облученность или плотность потока излучения (норма дозирования в фотобиологии)	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	Ватт на квадратный метр (Вт·м ⁻²)
Энергетическая сила света	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	Ватт настерадиан (Вт·ср ⁻¹)
Энергетическая яркость ³	L_e	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos \theta}$	Ватт настерадиан на квадратный метр (Вт·ср ⁻¹ ·м ⁻²)
Энергетическая экспозиция (доза в фотобиологии)	H_e	$H_e = \frac{dQ_e}{dA} = \int E_e dt$	Джоуль на квадратный метр (Дж·м ⁻²)
Эффективность излучения ⁴ (источника)	n_e	$n_e = \frac{P}{P_j}$	Нет единиц измерения
Оптическая плотность ⁵	D_e	$D_e = -\text{Log}_{10}(\tau_e)$	Нет единиц измерения

¹Единицы могут быть изменены для более узких спектральных диапазонов, при этом перед ними будет стоять слово «спектральный», за которым должна следовать нужная единица на интервал длины волны, при этом символ должен быть снабжен индексом λ . Например, спектральное излучение E_λ имеет единицы:

$$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{м}^{-1} \text{ или чаще } \text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}.$$

²Хотя метр является предпочтительной единицей измерения длины, сантиметр все еще широко используется в качестве единицы длины для многих

вышеперечисленных терминов, а *нм* или *мкм* чаще всего используются для выражения длины волны.

$$^3 \text{На источнике: } L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta} \text{ и на рецепторе: } L = \frac{dE}{d\Omega \cdot \cos \theta}.$$

⁴ P_j - электрическая входная мощность в ваттах.

⁵ τ - коэффициент ослабления.

Оптический спектр поделен на спектральные диапазоны на основе разных физических и биологических последствий. Разные диапазоны будут различаться в зависимости от используемого критерия. Например, диапазон ниже 180 нм, является диапазоном вакуумного ультрафиолетового излучения, которое поглощается воздухом до такой степени, что никаких биологических последствий не возникает. Оставшаяся часть ультрафиолетового спектра часто делится оптическими инженерами на ультрафиолетовую область дальнюю, находящуюся между 180 нм и 300 нм, и ультрафиолетовую область ближнюю, находящуюся между 300 нм и 380 нм. Другая схема, используемая Международной комиссией по освещению (СIE), принимает во внимание некоторые биологические последствия, и делит ультрафиолетовый спектр на три диапазона: УФ-А, УФ-В, УФ-С (СIE, 1987). Это деление СIE используется в данном обзоре.

СIE определяет диапазон УФ-А от 315 до 380 или 400 нм. Этот диапазон (диапазон «черного света») чаще всего используется в промышленности для индуцирования флуоресценции. УФ-В (280 нм - 315 нм) – область «эритемы» – наиболее биологически активное и потенциально вредное излучение солнца, достигающее Земли в этом спектральном диапазоне. УФ-С простирается от 100 нм до 280 нм. Фотобиологические спектральные диапазоны включают видимый диапазон (свет) (от 380 или 400 до 760 или 780 нм) и продолжают в инфракрасном диапазоне, ИК-А, ИК-В, ИК-С. Диапазон ИК-А включает наиболее сильно проникающее оптическое излучение от 760/780 до 1400 нм. Излучение ИК-Б (1,4 – 3,0 мкм) проникает только слегка в биологические ткани, потому что оно в значительной степени поглощается водой. Излучение ИК-С поглощается на поверхности и не проникает в роговицу глаза или кожу. Этот диапазон простирается от 3,0 мкм до 1 мм. Длина волны 1 мм соответствует частоте 300 ГГц.

2. Физические свойства лазерного излучения

Лазерное излучение отличается от других форм оптического излучения из-за своей высокой когерентности. Тем не менее, те же радиометрические величины и единицы применяются и по отношению к лазерному излучению. Некоторые спектральные характеристики лазерного излучения требуют специального

внимания при оценке рисков для здоровья.

2.1. Стимулированное излучение

Лазер - это прибор, излучающий и усиливающий оптическое излучение. Термин «ЛАЗЕР» – аббревиатура английской фразы "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", что означает «усиление света в результате вынужденного излучения». Действие лазеров основано на использовании этого принципа, реализация которого требует наличия по крайней мере трех основных элементов: активной среды, в которой происходит возбуждение атомов или молекул и которая испускает лазерное излучение, резонатора, который обычно формируется при помощи двух зеркал, одно из которых является частично пропускающим, и источника энергии (накачки) для возбуждения атомов или молекул.

2.2. Излучение

Лазерное излучение характеризуется очень высокой спектральной плотностью (спектральной яркостью). Солнце излучает приблизительно $7 \cdot 10^7 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$ со своей поверхности. В настоящее время лазеры могут излучать более $10^{16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$. Источник света, который превышает излучение солнца, может быть безусловно опасным для здоровья. Небольшой лазер с использованием гелия и неона (He-Ne), применяемый для настройки, превышает солнечное излучение в 10 раз.

2.3. Расходимость (дивергенция)

Пучок лазерного излучения характеризуется малой угловой расходимостью. Расходимость лазерного луча измеряется в *миллирадианах* (2π радиан равно 360° или 1 миллирадиан = 3 минуты дуги). Лазер He-Ne имеет расходимость от 0,5 до 1,5 миллирадиан. Расходимость может определяться длиной дуги, замыкаемой лучом на большом расстоянии, например, луч диаметром 1 м от точечного источника на расстоянии 1 км обладает расходимостью 1 миллирадиан.

2.4. Монохроматичность

Оптическое излучение, генерируемое большинством лазеров, имеет очень узкую спектральную ширину диапазона и очень близко подходит к монохромной области, то есть одному цвету или одной длине волны. В действительности, лишь немногие лазеры излучают волны только одной длины. Типичный лазер He-Ne излучает красный свет 632,8 нм и ИК-А с $\lambda = 1,15 \text{ мкм}$ и ИК-В с $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$, а при специальном дизайне он может излучать волны другой длины. Как и большинство лазеров, лазер He-Ne в определенном

дизайне обычно предназначен для излучения только одной из нескольких возможных длин волн.

2.5. Когерентность

Когерентность - это термин, используемый для описания определенных взаимоотношений между двумя волновыми формами. Две волны одной и той же частоты, фазы, амплитуды и направления называются «пространственно когерентными» (ВОЗ, 1982). Временная когерентность показывает степень когерентности фазы двух волн, а также продолжительность (время когерентности) сохранения взаимоотношения фаз. Лазерный свет является эффективно когерентным. Обычно считается, что когерентность сама по себе не влияет на биологический риск воздействия со стороны лазерного излучения.

Приложение Б

Биологические последствия и последствия для здоровья, вызываемые лазерным излучением

1. Оптические свойства тканей

Лазерное излучение может поглощаться, рассеиваться или отражаться от биологических тканей. В большинстве случаев наблюдается комбинация всех этих видов воздействия. Вместе с тем, биологические последствия возникают только при поглощении излучения. При длине волн 280 нм – 3,0 мкм в инфракрасном диапазоне, отражение может превышать 10 процентов, при этом происходит значительное проникновение излучения внутрь ткани, так что рассеивание может играть важную роль при определении окончательного воздействия на биологические ткани.

1.1. Ультрафиолетовое излучение

Общепринято, что в органических молекулах наблюдается поглощение ультрафиолетового излучения. Неорганические компоненты тканей не поглощают волны длиной более 200 нм. Поглощенная энергия может стимулировать протекание фотохимических реакций.

Молекулы протеина и урокановой кислоты сильно поглощают УФ-С и доминируют в поглощении волн длиной приблизительно до 300 нм. Для длин волн больше 300 нм гранулы пигмента меланина играют важную роль в рассеивании и поглощении ультрафиолетового излучения кожей. Гранулы концентрируются как щит вокруг клеточного ядра и защищают его путем поглощения ультрафиолетового излучения и частично путем рассеивания излучения. Рассеивание, вероятно, имеет важное значение для волн

большой длины. Кроме этого, меланин, по-видимому, может играть другую защитную роль в качестве связывателя свободных радикалов.

Глубина проникновения ультрафиолетового излучения в человеческое тело очень ограничена. Больше проникают более длинные волны. Определенное проникновение может иметь место в дермисе при длинах волн, превышающих 300 нм. Толщина крайнего, мертвого, ороговевшего слоя кожи увеличивается в результате ультрафиолетового воздействия, тем самым ослабляя последующие ультрафиолетовые воздействия (Совет по здравоохранению Нидерландов, 1979).

Те же общие соображения относятся к воздействию на глаза. Если длина волны меньше 290 нм, роговица будет иметь возможность полностью поглощать падающие ультрафиолетовые лучи. Однако хрусталик и ткани внешней части глаза могут подвергаться воздействию ультрафиолета, если длины волн будут больше 290 нм. Сетчатка обычно защищена от воздействия ультрафиолета роговицей и хрусталиком, но у людей, у которых хрусталик глаза удален в результате хирургической операции по устранению катаракты, и у маленьких детей значительное количество ультрафиолетовых лучей, длина волны которых превышает 290 нм, может достигать сетчатки. Из-за биологической эффективности ультрафиолетового излучения даже небольшие количества ультрафиолета, достигающие сетчатки, могут представлять опасность при длительном воздействии в течение жизни.

1.2. Видимое и инфракрасное излучение

Видимое и инфракрасное излучение с длиной волны менее 1400 нм проникает в кожу и глазные ткани, поскольку вода относительно прозрачна для этих длин волн. Меланин является основным поглотителем волн длиной менее 1 мкм. Поглощение меланином и последующее повышение температуры тела может приводить к тепловой травме радужной оболочки и сетчатки глаза и эпидермиса кожи. Поскольку по мере увеличения длины волны, превышающей 1400 нм (ИК-В и ИК-С), поглощающая способность воды увеличивается, глубина проникновения инфракрасного излучения уменьшается и воздействие излучения становится поверхностным (ВОЗ, 1982).

2. Механизмы повреждения

Физическое разрушение биологической ткани, вызываемое лазерным излучением, может быть связано с тепловыми, термоакустическими и фотохимическими явлениями. При ультракоротких, короче 1 нс, импульсах, есть доказательства

включения нелинейных механизмов, которые еще до конца не изучены (Sloney и Wolbarsht, 1980). Импульсы видимого лазерного излучения повреждают ткани в результате нагревания, в то время как глазные или кожные ткани могут быть повреждены в результате продолжительного воздействия ультрафиолета и голубого лазерного света из-за фотохимических явлений. Пороговые значения биологического повреждения кажутся наименьшими при воздействии со стороны голубого видимого излучения и ультрафиолетового излучения. Механизмы повреждения были тщательно изучены только для случаев сильного воздействия; последствия долгосрочного хронического воздействия лазерного излучения могут быть предсказаны только из опытов воздействия на человека со стороны солнца и источников обычного света (Sloney и Wolbarsht, 1980; Ham et al., 1980).

3. Последствия для глаз

Последствия могут быть разными в зависимости от спектральной области (как это показано на рис. В.1). Характер последствий также зависит от характера источника. Последствия будут разными при воздействии коллимированного излучения (взгляд направлен на внутренний луч), при воздействии рассеянного или диффузно отраженного излучения и при взгляде на протяженный источник.

Для диапазона длин волн 400 - 1400 нм проникновение энергии ограничено областью зрачка (предполагаемый диаметр составляет 7 мм). Для видимого диапазона естественная реакция к яркому свету ограничивает период воздействия 0,25 с.

Глаз является наиболее уязвимым органом для лазерного излучения видимой и ближней инфракрасной области. Это происходит из-за преломления луча в роговице и хрусталике глаза, что увеличивает облученность сетчатки в 2×10^5 раз (Sloney and Wolbarsht, 1980). Таким образом, при воздействии на глаза излучения видимой и ИК-А областей спектра, облученность сетчатки всегда значительно выше, чем облученность роговицы или кожи. Роговица, хрусталик и другая глазная среда являются в значительной степени прозрачными в видимой области. Большая часть видимого излучения поглощается гранулами меланина эпителия и пигмента сетчатки (ЭПС) и сосудистой оболочкой, которая лежит под палочками и колбочками (Sloney и Wolbarsht, 1980; Ham et al., 1980).

Большинство биологических исследований свидетельствует о существовании нескольких типов механизмов повреждения. Воздействия на фоторецепторы излучения с уровнями, которые лишь слегка выше обычно воздействующих на глаз в нормальных условиях окружающей среды, может быть достаточно, чтобы

Управление и организация

вызвать стресс для визуальной клеточной деятельности до ее полного нарушения. Это особенно характерно для случая, когда излучение на сетчатку длится в течение продолжительного периода времени или когда относительно менее продолжительное, но более интенсивное воздействие повторяется ежедневно. При определении порогов травматизма глаз остается проблема, связанная с недостатком сведений, касающихся последствий такого хронического воздействия. Пределы настоящего воздействия для хронического случая основаны на человеческом опыте, связанном с воздействием со стороны солнечного света и коммерческих источников искусственного света.

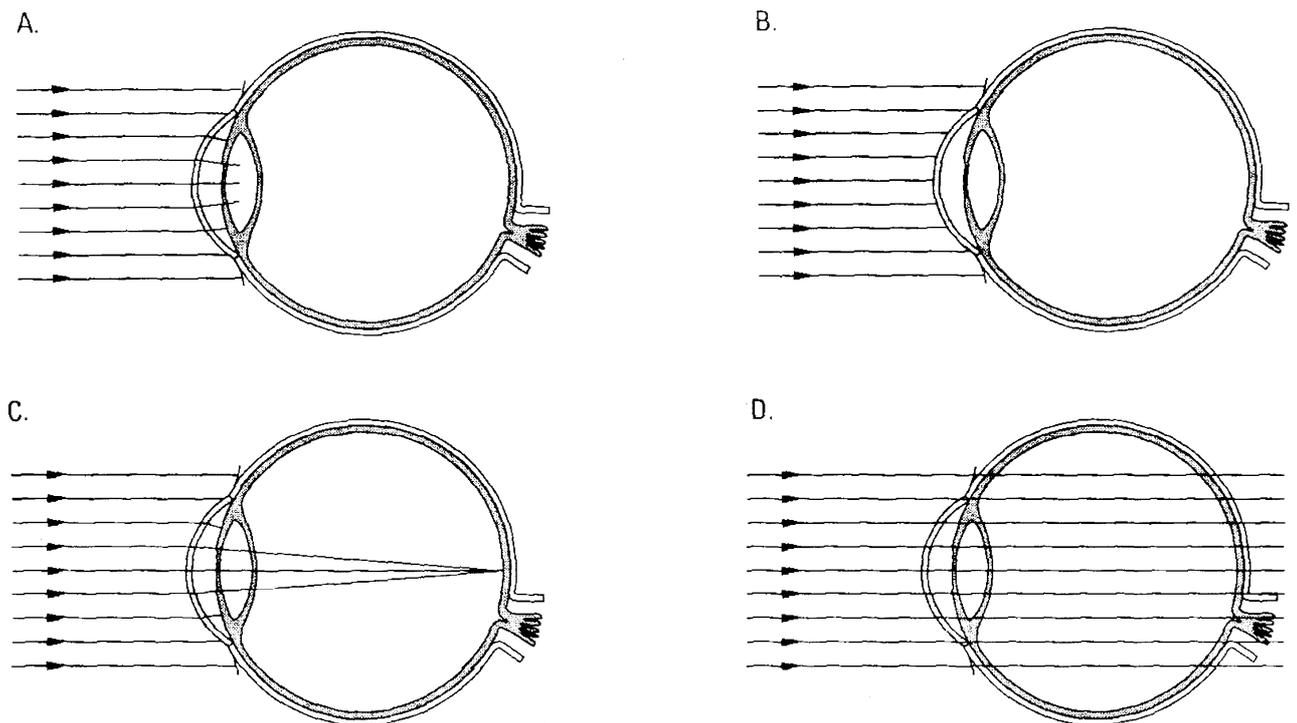


Рис. В.1. Свойства абсорбции глаза зависят от длины волны

Примечание. Биологические последствия определяются тем, достигает ли энергия критических тканей, а также механизмом взаимодействия. А - энергия излучения ближней инфракрасной области; В - энергия излучения дальней инфракрасной области (ИК-В, ИК-С) и дальней ультрафиолетовой области (менее 300 нм); С - энергия излучения видимого диапазона и ИК-А диапазона; D - гамма-излучение и излучение высокой частоты.

Рекомендуемые уровни хронического воздействия приблизительно эквивалентны уровням воздействия внешнего света. Нет достаточных сведений, касающихся последствий влияния частот периодических импульсов во время повторяющихся периодов воздействия.

Тепловые последствия, вызванные лазерным излучением, обычно связаны с денатурацией протеинов. Тепловая травма обычно считается скоростным процессом. Поэтому не существует одной

Управление и организация

критической температуры, при которой травма может иметь место в зависимости от времени воздействия. Кроме этого, поскольку молекулы гранул меланина эпителия пигмента сетчатки относительно велики по размеру, ожидается поглощение широкого спектра. Поэтому не предполагается, что монохромный характер лазерного излучения вызывает биологические последствия, существенно отличающиеся от последствий, возникающих в результате воздействия излучения от более традиционных источников света. Когерентность лазерного луча не считается существенным фактором, вызывающим травмы сетчатки и сосудистой оболочки или другие биологические травмы.

Последние исследования подтверждают, что коротковолновое излучение (при длине волны лазерного излучения с использованием гелия и кадмия, равной 441,6 нм) наносит ожоги сетчатке посредством фотохимических, а не тепловых механизмов (Nam et al., 1980). Например, обнаружено, что пороговое значение для ожогов сетчатки значительно ниже для лазерного излучения 441,6 нм, чем для излучения 1064 нм. Облученность сетчатки, равная $2,4 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, приводит к повышению температуры на 23 градуса Цельсия и повреждению при воздействии в течение 10^3 с излучения с длиной волны 1064 нм (лазер с использованием неодима и иттрий-алюминиевого граната). Однако при длине волны 441,6 нм (лазер с использованием гелия и кадмия) потребовались только $300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и небольшой подъем температуры для нанесения повреждений через срок воздействия 10^3 с . Голубой свет (441,6 нм) вызывал светложелтое повреждение нижней внутренней части глаза, в то время как травма порождаемая излучением с длиной волны 1064 нм, характеризуется тепловым ожогом центрального ядра (Nam et al., 1980). Воздействие голубого и фиолетового света может быть более опасным для всех структур. Исследования последствий воздействия ультракоротких лазерных импульсов на глаза макак-резусов, показали, что гранулы меланина эпителия пигмента сетчатки были повреждены значительно сильнее видимым излучением, а не лазерным излучением 1064 нм, но пороговое значение для травм было выше для видимой волны.

Функциональные и гистологические изменения в тканях глаза имеют большое значение. Исследования по этому вопросу, проводившиеся на макаках-резусах, показали, что по большей части повреждения зрения возникают при уровнях излучения в пределах величины, которая должна создавать постоянные негативные функциональные изменения зрения (Beatrice et al., 1977; ВОЗ, 1982; Zwick et al., 1988; Zwick, 1989).

Травма сетчатки, которая происходит в желтом пятне, наиболее чувствительной части сетчатки, серьезна и будет очевидна

Управление и организация

пострадавшему. Травма пара-пятна, или периферийной области сетчатки, может оказать на зрение лишь минимальное воздействие, и во многих случаях проходит незамеченной для пострадавшего (Sloney и Wolbarsht, 1980). Особенно это справедливо для ИК-А излучения, которое вызывает травму сетчатки. В некоторых случаях может наблюдаться ограниченное восстановление зрения после травмы пятна сетчатки, но такое восстановление может не наступить и через много месяцев после воздействия.

Инфракрасное излучение с длиной волны больше 1,4 мкм, может вызывать тепловую травму роговицы и конъюнктивы. Здесь на пороговое повреждение оказывает большое влияние глубина проникновения (Lund, 1989; Sloney и Wolbarsht, 1980).

Хотя существует сравнительно небольшое количество лазеров, работающих в ультрафиолетовом диапазоне, воздействие со стороны таких изделий может представлять опасность. В последнее время, растущее использование эксимерных лазеров повысило вероятность воздействия на человека со стороны ультрафиолетового лазерного излучения. Биологическая реакция на ультрафиолетовое лазерное излучение аналогична той, которая создается некогерентными источниками ультрафиолета. Фотофобия, слезотечение, выделения конъюнктивы, поверхностная эксфолиация и помутнение стромы, представляют собой ожидаемые последствия воздействия со стороны лазеров. Повреждение эпителия роговицы, вероятно, приводит к фотохимической денатурации протеинов. В областях УФ-С (100 нм - 280 нм) и УФ-В (280 нм - 315 нм), может возникать фотокератит. Фотокератит обычно имеет скрытый период от 80 минут до 20 часов, обратно завися от серьезности воздействия. Ощущение «песка в глазах», сопровождаемое фотофобией разной степени, слезотечением и блефароспазмами - это его обычные проявления. В области УФ-А (315 нм - 400 нм) фотокератит может проявляться только при хроническом воздействии высокого уровня. Важно то, что ультрафиолетовое излучение порождает развитие катаракты.

Аддитивность ультрафиолетового излучения в течение 24 часов хорошо понятна, поскольку она возникает на основе фотохимической природы механизма повреждения. Однако аддитивный характер тепловой травмы, вызванной периодическими импульсами, менее понятен, хотя отмечены некоторые эмпирические отношения (Sloney и Wolbarsht, 1980).

4. Последствия для кожи

Биологические последствия облучения кожи лазерным излучением считаются менее значительными, чем последствия для глаз, поскольку повреждение кожи часто может быть поправимо.

Вместе с тем, воздействие на кожу со стороны высоких уровней оптического излучения может вызвать депигментацию, серьезные ожоги и возможное повреждение внутренних органов (ВОЗ, 1982). Апертура, предполагаемая для измерений воздействия на кожу, составляет 1 мм с целью ограничения области воздействия.

Последствия ультрафиолетового лазерного излучения на кожу такие же, как и от ультрафиолетового излучения от обычных источников: эритема от сильного воздействия и ускоренное старение и рак кожи от хронического воздействия. Наши знания о соотношении дозы ультрафиолета и последствий для человека недостаточны, поэтому необходимы дальнейшие исследования, особенно в области эпидемиологических исследований ультрафиолетового канцерогенеза.

Приложение В

Глоссарий

Активная среда. Атомная или молекулярная среда, которая может обеспечить генерацию лазерного излучения. Также известна как лазерная среда, рабочее вещество.

Газовый лазер. Тип лазера, в котором активной средой является газ. Газовые лазеры в зависимости от активной среды делятся на: атомные (например, гелий-неон), молекулярные (диоксид углерода, цианид водорода и водный пар), ионные (аргон, криптон, ксенон, металлические пары, такие как гелий-кадмий и гелий-селен) и эксимерные типы лазеров. «Ион» в таком контексте может означать аргон или криптон.

Герц (Гц). Единица частоты периодического процесса – определяет число циклов в единицу времени. Число импульсов в секунду, генерируемых лазером, может выражаться в герцах.

Голограмма. Запись интерференции когерентного света, отраженного от объекта, и прямого света из того же объекта или отраженного от зеркала. Освещение голограммы создает трехмерный образ объекта.

Детектор. Любой прибор, который обычно создает электрический сигнал, пропорциональный интенсивности падающего света.

Диаметр пучка. Диаметр поперечного сечения пучка лазерного излучения, внутри которого проходит заданная доля энергии или мощности (обычно $1/e$ или $1/e^2$).

Дивергенция. См. Расходимость пучка.

Диодный лазер. См. Полупроводниковый лазер.

Импульсный лазер. Лазер, который излучает свет импульсами, а не постоянно. За исключением случаев переключаемого лазера или

лазера с модуляцией добротности, продолжительность импульса лазера определяется источником энергии и механизмом накачки.

Инфракрасный. Электромагнитное излучение с длиной волны между 0,76 микрон и 1 миллиметром.

Ионный лазер. Тип лазера, в котором активным элементом является ионизированный газ, обычно аргон или криптон.

Калориметр. Тип детектора, основанный на измерении тепла, выделяющегося при поглощении оптического излучения.

Когерентность. Соотношение между фазами электромагнитной волны в фиксированных точках пространства (пространственная когерентность) или во времени (временная когерентность).

Кристаллический лазер. Тип лазера, в котором активная среда представляет собой кристаллы, например, рубин, иттрий-алюминиевый гранат или алюминат иттрия.

Лазер. Термин «ЛАЗЕР» составлен из начальных букв английского словосочетания "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", в переводе на русский язык означает «усиление света в результате вынужденного излучения». Лазер является прибором, который генерирует или усиливает электромагнитные колебания с длинами волн в диапазоне между дальней инфракрасной областью (субмиллиметр) и ультрафиолетом. Как прибор, термин «лазер» означает активную среду и оборудование, необходимое для генерации лазерного излучения.

Лазер на органических красителях. Тип лазера, в котором активной средой является раствор органических красителей. Разработаны экспериментальные лазеры на твердых и газообразных органических соединениях. Также называется лазер на органических красках, перестраиваемый или жидкостной лазер.

Лазерный диод. См. Полупроводниковый лазер.

Лазер с оптической накачкой. Лазер, в котором для создания инверсной населенности активная среда возбуждается другим световым источником. Для твердотельных лазеров и некоторых лазеров на органических соединениях обычно используют источник некогерентного типа, например, лампу-вспышку или дуговую лампу. Для газовых лазеров и других типов лазеров на органических соединениях, такую лазерную накачку обычно обеспечивают когерентные лазерные источники.

Лазер ТЕА. Газовый лазер с поперечной накачкой. Газовый лазер, в котором возбуждение активной среды идет поперек потока среды. Из-за более короткого периода распада, этот тип лазера действует в диапазоне давления, которое выше чем для газовых лазеров с продольным возбуждением (но не обязательно атмосферных), и предлагает потенциально более высокий выход энергии на единицу объема из-за более высокой плотности генерируемых молекул.

Механизм накачки. Источник энергии (например, лампа-вспышка, электронный пучок или электрический разряд), который осуществляет возбуждение атомов или молекул в активной среде лазера, создавая инверсную населенность.

Мультидиод. Излучение одновременно на нескольких, обычно близко расположенных, частотах, при этом каждая частота представляет собой отдельный вид лазерных колебаний в резонаторе.

Нелинейные эффекты. Изменения в среде, передающей электромагнитные волны, пропорциональные второй, третьей или более высоким степеням внешнего электрического поля. Нелинейные оптические эффекты включают гармоническую генерацию и электрооптический эффект.

Непрерывный режим работы лазера (CW). Работа лазера, при которой происходит генерация непрерывного излучения.

Облученность (E). Плотность потока излучения, падающего на данную поверхность, выражается в ваттах на квадратный метр.

Ослабление. Снижение интенсивности, которое происходит когда оптическое излучение проходит через поглощающую или рассеивающую среду. В оптическом волокне ослабление (в децибелах) равно $10 \log (P_o / P_{in})$, где P_o - мощность на выходном конце волокна, P_{in} - мощность, вводимая в волокно.

Отражательная способность. Соотношение между энергией волны, отраженной от поверхности, и энергией волны, упавшей на поверхность.

Q-переключатель. По сути «задвижка», которая предотвращает лазерную эмиссию до тех пор, пока она не открыта. Q обозначает «фактор качества» лазерного резонатора. «Активное» переключение Q достигается за счет вращающегося зеркала или призмы, ячейки Керра и Погкельса или акустико-оптического устройства; «пассивное» переключение Q достигается при помощи насыщаемого поглотителя, например, газа или краски. В импульсном лазере Q-переключатель увеличивает импульсную мощность за короткий промежуток импульса, не снижая значительно энергию. В непрерывных лазерах устройство обеспечивает более короткие и интенсивные импульсы при частоте повторений значительно больше той, которая имеет место в импульсном лазере.

Пирозлектрический детектор. Тип детектора, на выходе которого появляется ЭДС при изменении температуры; эти детекторы используются для регистрации инфракрасного излучения.

Полупроводниковый лазер. Тип лазера, в котором активным материалом является полупроводник. Коммерческие типы лазеров обычно основаны на диодах, в которых происходит процесс генерации при соприкосновении полупроводников *n*-типа и *p*-типа,

обычно галлий-арсенид или галлий-алюминий-арсенид. Гомогенные типы обычно сделаны из полупроводникового материала и накачиваются электронным пучком.

Поляризатор. Оптическая компонента, передающая только такие световые волны, которые колеблются в заданной плоскости.

Поток излучения. Отношение энергии излучения, проходящей в данном направлении, к промежутку времени, в течение которого энергия проходила (мощность излучения или поток энергии), измеряется в ваттах.

Продолжительность пульсации. Продолжительность вспышки энергии, излучаемой импульсным лазером или лазером с Q-переключателем. Выражена в секундах и обычно измеряется при половине мощности (половина всей величины энергии или мощности импульса). Также называется шириной импульса или длиной импульса.

Радиометр. Прибор для измерения падающего излучения в радиометрических единицах (ваттах). Радиометрические измерения могут производиться при любой длине волны, но рабочий диапазон определенного прибора может быть ограничен узким диапазоном.

Радиометрические единицы. Единицы, определенные для измерения энергетических характеристик электромагнитного излучения; основная единица СИ – ватт.

Расходимость пучка. Увеличение диаметра луча с ростом расстояния от апертуры лазера. Измеряется в миллирадианах в специальных точках, обычно, где плотность потока излучения или энергетическая экспозиция равны $1/e$ или $1/e^2$ максимальной величины.

Средняя мощность. В импульсном лазере периодического действия энергия на импульс связана с частотой повторений. Если энергия импульса выражается в джоулях, а частота повторения в герцах, то средняя мощность выражается в ваттах.

Твердотельный лазер. Тип лазера, активная среда которого – атомы стекла или кристаллического вещества. Атомная среда может быть добавлена к стеклу или кристаллам, как, например, неодим добавляется к стеклу. Она может быть внутренней, например, хром в рубине. Этот термин обычно не применяется к полупроводниковым лазерам.

Ультрафиолет. Электромагнитное излучение с волнами, длина которых находится между приблизительно 40 и 400 нанометрами. Излучение между 40 и 200 нм называется «вакуумным ультрафиолетом», так как оно поглощается воздухом и проходит лишь через вакуум.

«Ближний» ультрафиолет имеет длины волн, близкие к тем, которые характерны для видимого света; «дальний» ультрафиолет

имеет более короткие длины волн.

Фильтр нейтральный. Фильтр, который снижает интенсивность света, не влияя на его спектральный состав.

Фотон. «Частица» электромагнитного излучения, не имеющая массы, с энергией, равной hc/λ , где h - постоянная Планка ($6,6 \times 10^{-34}$ джоулей в секунду), c/λ , - частота излучения (скорость света, деленная на длину волны).

Эксимерный лазер. Лазер, в котором активной средой является эксимер, – молекула, которая химически стабильна только в своем возбужденном состоянии. Термин часто используется по отношению к лазерам, в которых активная среда - это эксимер редкого газа галида (или моногалида), например, KrF^* или XeF^* .

Энергетическая яркость (L). Поток излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла и на единицу площади проекции поверхности источника на направление, перпендикулярное направлению распространения излучения (ISO 31/6 - 1980). Выражается в ваттах настерадиан на квадратный сантиметр.

YAG. (ИАГ). Иттрий–алюминиевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$). Кристаллический материал, позволяющий создавать активную среду путем введения в кристаллическую решетку ионов-активаторов, обычно ионов неодима.

YALO. Алюминат иттрия ($YAlO_3$). Кристаллический материал, содержащий в кристаллической решетке ионы-активаторы, обычно ионы неодима.

YLF. Фторид лития и иттрия ($LiYF_4$). Кристаллический материал, позволяющий создавать активную среду путем введения в кристаллическую решетку ионов-активаторов, обычно ионов гольмия.

Приложение Г

Основные сведения по МКНР

МКНР начал свою деятельность, связанную с НИР, в 1973 г. на сессии, посвященной этой теме, на Третьем международном конгрессе в Вашингтоне (округ Колумбия). Международный комитет по неионизирующей радиации (МКНР) Международной ассоциации по радиационной защите (МАРЗ) учрежден в 1977 г. Основными целями МКНР были представление основных принципов неионизирующей радиационной защиты, определение наиболее важных пределов воздействия для каждого вида неионизирующего излучения (НИР) и совместные с другими международными организациями исследования дальнейших путей защиты в этой сфере.

Отделение по санитарному состоянию окружающей среды

Управление и организация

Всемирной организации здравоохранения и МАРЗ/МКНР сотрудничали в подготовке критериальных документов, касающихся НИР, при финансовой поддержке Программы ООН по охране окружающей среды (ЮНЕП). Эти критерии стали научной базой данных для разработки пределов воздействия, норм и правил. На основе критериальных документов МКНР разработал руководства по пределам воздействия для разных НИР, включая лазерное излучение (МКНР, 1991). Каждое из этих руководств по пределам воздействия опубликовано в серии «Физика здоровья».

Конечно, каждый такой документ должен подлежать периодическому пересмотру, который следует проводить по мере появления новых знаний о соответствующих биологических последствиях излучений. Цель публикаций состоит в том, чтоб предложить руководящие принципы для международных и национальных органов или отдельных экспертов, которые не несут ответственности за составление проектов положений, рекомендаций или техническое консультирование для защиты рабочих и общественности от потенциально негативных последствий неионизирующей радиации.

Документ, содержащий критерии по лазерам (ВОЗ, 1982), как и все подобные документы, опубликован при финансовой поддержке со стороны ЮНЕП, ВОЗ и МКНР, и включает описание физических характеристик соответствующего излучения, обзор источников, видов применения и уровней воздействия, методы измерения и приборы, обзор данных по биологическим последствиям, собранных в ходе экспериментов и наблюдений на людях, оценку риска для здоровья в результате воздействия на человека и обзор существующих стандартов защиты.

МАРЗ/МКНР сотрудничал с Международной организацией труда при составлении проектов практических руководств, касающихся защиты рабочих от производственных опасностей от неионизирующего излучения. Была предоставлена информация по видам опасности, а также по методам информирования рабочих об опасностях и соответствующих мерах предосторожности, которые должны приниматься для минимизации воздействия НИР.

С мая 1992 г. МАРЗ/МКНР стала независимым научным органом, называемым Международная комиссия по неионизирующей радиации, которая несет ответственность за защиту от НИР в том же порядке, в каком Международная комиссия по радиологической защите отвечает за ионизирующую защиту.

Управление и организация

В серии "Безопасность и гигиена труда" опубликованы:

Руководство по использованию международной классификации МОТ снимков пневмокониоза. Исправленное издание 1980 г. (№ 22), 7,50 швейцарских франков. Этот буклет включен в: **Международную классификацию снимков пневмокониоза, набор из 22 снимков,** 650 швейцарских франков.

Проблемы молодых рабочих в области гигиены труда (№ 26). 10 швейцарских франков.

Техника безопасности и гигиена труда в кораблестроении и ремонте кораблей (№ 27). 12,50 швейцарских франков.

Безопасное строительство и установка эскалаторов (№ 28). 6 швейцарских франков.

Организация семейного планирования в службах по гигиене труда (№ 31). 9 швейцарских франков.

Радиационная защита при осуществлении горнорудных работ и измельчении урана и тория (№ 32). 35 швейцарских франков.

Рабочие-мигранты: техника безопасности и гигиена труда (№ 34). 12,50 швейцарских франков.

Уровни производственного воздействия для переносимых по воздуху токсичных веществ. Третье (исправленное) издание (№ 37). 47,50 швейцарских франков.

Безопасное использование пестицидов (№ 38). 12,50 швейцарских франков.

Производственный рак: предотвращение и контроль. Второе (исправленное) издание (№ 39). 17,50 швейцарских франков.

5-ый Международный отчет по предотвращению и подавлению пыли при проведении горнорудных работ, прокладке туннелей и рытье шахт (№ 40). 15 швейцарских франков.

Техника безопасности и гигиена труда рабочих-мигрантов. **Международный симпозиум** (№ 41). 30 швейцарских франков.

Гражданское строительство. Сборник методов по гигиене труда (№ 45). 20 швейцарских франков.

Предотвращение раковых заболеваний, обусловленных производством. **Международный симпозиум** (№ 46). 47,50 швейцарских франков.

Методы образования и обучения по вопросам техники безопасности, гигиены труда и эргономики. **Международный симпозиум** (№ 47). 35 швейцарских франков.

6-ой Международный отчет по предотвращению и подавлению пыли при проведении горнорудных работ, прокладке туннелей и рытье шахт (№ 48). 17,5 швейцарских франков.

Дерматиты и профессии (№ 49). 15 швейцарских франков (на французском языке).

Стрессы в промышленности - причины, последствия и предотвращение (№ 51). 12,50 швейцарских франков.

Успех по программам по технике безопасности (№ 52). 17,50 швейцарских франков.

Производственные опасности, связанные с неионизирующим электромагнитным излучением (№ 53). 17,50 швейцарских франков.

Стоимость производственных несчастных случаев и профессиональных заболеваний (№ 54). 17,50 швейцарских франков.

Положения по базовым стандартам по технике безопасности для радиационной защиты, связанной с защитой рабочих от ионизирующей радиации (№ 55). 6 швейцарских франков.

Физиологические факторы в работе: признание и контроль (№ 56). 15 швейцарских франков.

Защита рабочих от микроволновой радиации и излучения на уровне радиочастот: технический обзор (№ 57). 17,50 швейцарских франков.

Эргономика в развивающихся странах. Международный симпозиум (№ 58). 60 швейцарских франков.

Максимальный вес при подъеме и переноске груза (№ 59). 10 швейцарских франков.

Техника безопасности при использовании промышленных роботов (№ 60). 12,50 швейцарских франков.

Работа с визуальными средствами отображения (№ 61). 12,50 швейцарских франков.

Руководство по защите от излучения рабочих в промышленности (ионизирующая радиация) (№ 62). 10 швейцарских франков.

Организация первой помощи на рабочем месте (№ 63). 15 швейцарских франков.

Безопасность при использовании минерального и синтетического волокна (№ 64). 15 швейцарских франков.

Международные данные по антропометрии (№ 65). 17,50 швейцарских франков.

Международный справочник организаций по технике безопасности и гигиене труда (№ 66). 35 швейцарских франков.

Профессиональные заболевания легких: предотвращение и контроль (№ 67). 17,50 швейцарских франков.

Защита рабочих от мощных частотных электрических и магнитных полей: практическое пособие (№ 69). 20 швейцарских франков.

Международная Программа по улучшению условий труда и окружающей среды (ПУ) была начата Международной Организацией Труда в 1976 по предложению Съезда Международной Организации Труда и после широкого обсуждения со странами-членами Организации.

Цель ПУ — содействовать или поддерживать усилия стран-членов Организации в определении и достижении целей, направленных на то, чтобы «сделать труд более гуманным». Таким образом, задача Программы — улучшение качества трудовой жизни во всех её аспектах: например, профилактика профессионального травматизма и профзаболеваний, более широкое применение принципов эргономики, соглашение по продолжительности рабочего времени, улучшение содержания и организации труда и условий труда в целом, большая озабоченность человеческим фактором. Для достижения этих целей ПУ использует и координирует традиционные виды деятельности МОТ, включая:

- подготовку и пересмотр международных трудовых стандартов;
- оперативную деятельность, включая отправку команд для помощи государствам-членам Организации по их просьбе;
- трёхсторонние встречи между представителями правительств, работодателей и рабочих, включая промышленные комитеты, с целью изучения важнейших проблем, стоящих перед основными отраслями промышленности; региональные встречи и встречи экспертов;
- направленную на принятие активных мер исследовательскую работу и научный анализ;
- деятельность расчетной палаты, особенно через Международный Информационный Центр Безопасности и гигиены труда и Расчетную палату по распространению информации об условиях труда.

Эта публикация является результатом проекта ПУ.