ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 54840— 2011/IEC/TR 60825-14:2004

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ АППАРАТУРЫ

Часть 14

Руководство пользователя

IEC/TR 60825-14:2004
Safety of laser products — Part 14: A user's guide
(IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2014

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Автономной некоммерческой организацией «Научно-технический центр сертификации электрооборудования «ИСЭП» (АНО «НТЦСЭ «ИСЭП») на основе собственного аутентичного перевода на русский язык международного документа, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 452 «Безопасность аудио-, видео-, электронной аппаратуры, оборудования информационных технологий и телекоммуникационного оборудования»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1248-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному документу МЭК/ТО 60825-14:2004 «Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 14. Руководство пользователя» (IEC/TR 60825-14:2004 «Safety of laser products — Part 14: A user's guide»)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (gost.ru)

© Стандартинформ, 2014

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения и назначение . . . 1
2 Термины и определения . . . 2
3 Административные правила . . . 7
3.1 Ответственность за обеспечение безопасности . . . 7
3.2 Компетентные лица . . . 8
3.3 Начальник службы радиационной безопасности . . . 8
3.4 Информация и обучение . . . 9
4 Опасности лазерного излучения . . . 10
4.1 Лазерная аппаратура . . . 10
4.2 Облучение лазерным излучением . . . 13
4.3 Определение уровня лазерного излучения . . . 14
5 Определение максимальной возможной экспозиции (МВЭ) . . . 17
5.1 Общие замечания . . . 17
5.2 Импульсно-периодические или модулируемые лазеры . . . 18
5.3 Кратные длины волн . . . 19
5.4 МВЭ протяженного источника . . . 19
5.5 Опасные расстояния и зоны . . . 20
6 Сопутствующие факторы опасности . . . 21
6.1 Дополнительные опасности для здоровья . . . 21
6.2 Сопутствующие факторы опасности при работе с лазерами . . . 21
6.3 Опасности, возникающие от окружающей среды . . . 22
6.4 Контроль сопутствующих факторов опасностей . . . 23
7 Оценка рисков . . . 23
7.1 Опасности и риски . . . 24
7.2 Оценка риска: этап 1 — определение потенциально опасных ситуаций . . . 24
7.3 Оценка риска: этап 2 — оценка риска для потенциально опасных ситуаций . . . 24
7.4 Оценка риска: этап 3 — выбор мер контроля . . . 26
8 Меры контроля . . . 26
8.1 Общие положения . . . 26
8.2 Снижение опасности . . . 27
8.3 Ограждения для защиты от опасности . . . 27
8.4 Снижение опасности . . . 28
8.5 Обслуживание оборудования . . . 32
9 Поддержание безопасной работы . . . 33
10 Рапорт о происшествии и исследование несчастного случая . . . 34
11 Медицинское наблюдение . . . 34
Приложение А (справочное) Образцы систем блокировки для зон использования лазеров . . . 40
Приложение В (справочное) Примеры расчетов . . . 44
Приложение С (справочное) Учет биофизических факторов . . . 60
Библиография . . . 67

Предисловие

Международная электротехническая комиссия (МЭК) является всемирной организацией по стандартизации, включающей все национальные комитеты (Национальные комитеты МЭК). Целью МЭК является развитие международного сотрудничества по всем вопросам стандартизации в области электрической и электронной аппаратуры. По указанному и другим видам деятельности МЭК публикует международные стандарты. Их подготовка возлагается на технические комитеты. Любой национальный комитет МЭК, заинтересованный данным вопросом, может участвовать в этой подготовительной работе. Международные, правительственные и неправительственные организации, сотрудничающие с МЭК, также участвуют в подготовительной работе. МЭК тесно сотрудничает с Международной организацией по стандартизации (ИСО) в соответствии с условиями, определенными в соответствующем соглашении между двумя организациями.

Официальные решения или соглашения МЭК по техническим вопросам выражают, насколько это возможно, международное согласованное мнение по относящимся к делу вопросам, так как каждый технический комитет имеет представителей от всех заинтересованных национальных комитетов.

Выпускаемые документы имеют форму рекомендаций для международного использования, публикуются в виде стандартов, технических отчетов или руководств и принимаются национальными комитетами именно в таком понимании.

В целях содействия международной унификации (единой системе) национальные комитеты МЭК обязуются при разработке национальных и региональных стандартов брать за основу международные стандарты МЭК, насколько это позволяют условия данной страны. Любое расхождение между стандартами МЭК и соответствующими национальными или региональными стандартами должно быть ясно обозначено в последних.

МЭК не предусматривает процедуры маркировки и не несет ответственности за любое оборудование, заявленное на соответствие одному из стандартов МЭК.

Необходимо обратить внимание на то, что некоторые элементы настоящего международного документа могут являться предметом патентного права. МЭК не несет ответственность за установление любого такого патентного права.

Главной задачей технических комитетов МЭК является разработка международных стандартов. Тем не менее технический комитет может предложить публикацию стандарта, когда он собрал данные различного вида из того, что обычно публикуются в качестве международного стандарта, например отражающие современный технический уровень.

Международный документ МЭК/ТО 60825-14 подготовлен техническим комитетом 76 «Безопасность оптического излучения и лазерная аппаратура».

Первая редакция	Протокол голосования
76/271/DTR	76/282/RVC

Текст международного документа основан на следующих документах:

Полную информацию по голосованию для одобрения настоящего международного документа можно найти в протоколе голосования, указанном в приведенной выше таблице.

Публикация настоящего международного документа является плановой в соответствии с Директивами ИСО/МЭК, часть 2.

Перечень всех частей стандартов серии МЭК 60825, имеющих общее наименование «Безопасность лазерной аппаратуры», можно найти на веб-сайте МЭК.

Комитет принял решение о том, что содержание настоящего международного документа будет оставаться без изменения до 2007 г., после чего международный документ может быть.

- утвержден;
- отменен;
- заменен на пересмотренное издание;
- дополнен.

Введение

Для помощи пользователям далее приведены основные положения настоящего стандарта. Основные положения представлены в порядке, в котором они обычно рассматриваются как часть программы по лазерной безопасности:

- обязанности по безопасности при работе с лазерами и необходимое в связи с этим обучение — раздел 3;
- понятие о классах лазерных изделий и оценка облучения лазером — раздел 4;
- определение максимальной возможной экспозиции (МВЭ) и понятие об опасном расстоянии и опасной зоне, в пределах которой может быть превышена МВЭ, – раздел 5;
- связанные с лазером опасности (т. е. опасности облучения глаз или кожи лазерным пучком) — раздел 6;
- трехэтапный процесс оценки риска (как результат опасности лазерного облучения, описанных в разделах 4 и 5, а также связанных с лазером опасностей, описанных в разделе 6) — раздел 7:

1) идентификация всех потенциально вредных ситуаций,

2) оценка риска, являющегося результатом этих ситуаций,

3) определение необходимых защитных мер;

- применение контрольных измерений с целью уменьшить риск до приемлемого уровня — раздел 8;
- требования, обеспечивающие безопасную эксплуатацию лазерной аппаратуры в течение длительного времени, — раздел 9;
- отчеты об инцидентах, связанных с лазерной опасностью, и исследования несчастных случаев — раздел 10;
- роль медицинского наблюдения (проверка глаз) — раздел 11;
- дополнительная информация относительно использования защитной блокировки — приложение А;
- примеры вычислений, связанных с лазерной безопасностью, — приложение В;
- объяснение биофизических эффектов лазерного облучения глаз и кожи — приложение С.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ АППАРАТУРЫ

Часть 14

Руководство пользователя

Safety of laser products. Part 14. A user's guide

Дата введения — 2013—09—01

1 Область применения и назначение

Настоящий стандарт представляет практическое руководство по безопасному использованию лазерных изделий в соответствии с МЭК 60825-1. Термины «лазерная аппаратура», «лазерное изделие» и «лазерное оборудование», примененные в настоящем стандарте, также относятся к любым устройствам, узлам или системам, способным испускать оптическое излучение в процессе стимулируемой эмиссии. Однако в отличие от МЭК 60825-1 в настоящий стандарт не включены светоизлучающие диоды (СИД).

Лазерные изделия класса 1 обычно безопасны, а лазерные изделия класса 2 представляют минимальную опасность. Для безопасной эксплуатации этих изделий обычно достаточно предупреждающих знаков и инструкций изготовителя. Другие защитные меры, в соответствии с требованиями настоящего стандарта, не являются необходимыми.

В настоящем стандарте придается особое значение опасности от лазеров высоких мощностей; пользователи лазеров с более низкой мощностью также могут воспользоваться содержащейся в нем информацией (см. таблицу 1).

Требования настоящего стандарта применяют к любому изделию, включающему в себя лазер, проданному или предложенному для продажи. Поэтому настоящий стандарт применим к специальным лазерным изделиям (включая экспериментальные и опытные образцы).

Настоящий стандарт предназначен для пользователей лазерными изделиями и работодателей и устанавливает общие принципы управления безопасностью (см. раздел 3) с целью идентифицировать опасности, которые могут быть выявлены (см. разделы 4—6), с тем чтобы оценить возможный вред (см. раздел 7), создавать и поддерживать соответствующие меры контроля (см. разделы 8—11).

Лазерные измерения как меру контроля применяют широко. Эти меры контроля зависят от типа эксплуатируемого лазерного оборудования, задач или выполняемых процессов, окружающей среды, в которой оборудование эксплуатируется, и персонала, который может подвергнуться вредным воздействиям лазера. Специальные требования для конкретных лазерных изделий приведены в других частях серии стандартов МЭК 60825 (см. раздел «предисловие» или библиографию этих стандартов).

Термин «обоснованно ожидаемое» использован в настоящем стандарте по отношению к определенным специфическим событиям, ситуациям или условиям. Ответственность за определение того, что относится к обоснованно ожидаемому событию, и способность предпринять на основе оценки критериев риска любые необходимые действия несет конкретное лицо, использующее настоящий стандарт.

Настоящий стандарт предназначен для пользователей. Подразумевается, что в число пользователей включены лица, которые вместе с операторами, эксплуатирующими лазерное оборудование, несут ответственность за безопасность.

Издание официальное

2 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

2.1 **административный контроль** (administrative control): Меры по обеспечению безопасности нетехнического типа, такие как доступ с «ключом», обучение персонала мерам безопасности, предупредительные надписи, расчетные операции и контроль диапазона безопасности.

2.2 **альфа минимум** α_{min} (alpha min α_{min}): Стягиваемый источником угол (см. 2.4).

2.3 **угол приема** γ, рад (angle of acceptance γ): Плоский угол, в пределах которого приемник будет реагировать на оптическое излучение; обычно измеряется в радианах. Угол приема может контролироваться апертурными диафрагмами или оптическими элементами перед приемником.

Примечания

1 Угол приема иногда называют «полем обзора».

2 Для оценки фотохимической опасности определен предельный угол приема γ_p. Угол γ_p связан с биологией движения глаз и не зависит от стягиваемого источником угла. Если стягиваемый источником телесный угол меньше предельного угла приема γ_p, то измеряемый угол приема не ограничивают. Если стягиваемый источником телесный угол больше предельного угла приема, то угол приема должен быть ограничен, а источник рассматривают как опасный. Если телесный угол приема не ограничен до определенного уровня, опасность может быть завышена.

2.4 **стягиваемый источником угол** α (angular subtense α): Телесный угол, в который стягивается лазерный источник, видимый глазом наблюдателя как точка в пространстве.

Примечания

1 В настоящем стандарте стягиваемый источником угол при классификации определяют на расстоянии не менее 100 мм от видимого источника (или выходного окна, или линзы изделия, если видимый источник расположен на расстоянии более 100 мм от окна или линзы). Для анализа уровней максимальной возможной экспозиции (МВЭ) стягиваемый источником угол определяют на расстоянии наблюдения от видимого источника, но не менее 100 мм.

2 Стягиваемый источником угол в настоящем стандарте применяют только в диапазоне длин волн от 400 до 1400 нм в области ретинальной опасности.

3 Стягиваемый источником угол не следует путать с расхождением пучка.

2.5 **апертура** (aperture): Любое отверстие в корпусе или защитном устройстве лазерного изделия, через которое проходит лазерное излучение, и, следовательно, возникает возможность доступа человека к этому излучению.

2.5.1 **апертурная диафрагма** (aperture stop): Отверстие, предназначенное для определения площади, в которой измеряют излучение.

2.6 **видимый источник** (apparent source): Реальный или виртуальный источник оптического излучения, который формирует наименьшее возможное изображение на сетчатке.

Примечание — Такое определение используют для установления места видимого изображения лазерного излучения в диапазоне длин волн от 400 до 1400 нм с допущением расположения видимого источника в пределах аккомодации глаз (обычно ≥ 100 мм). При очень малом расхождении, т. е. в случае хорошо коллимированного пучка, расположение видимого размера источника дается для бесконечности.

Понятие видимого источника используют в расширенном диапазоне длин волн 302,5—4000 нм, пока в нем возможна фокусировка обычными линзами.

2.7 **пучок** (beam): Лазерное излучение, которое характеризуется направлением, расходимостью, диаметром или условиями развертки.

Примечание — Отклонение излучения от направления незеркального отражения не определяется как пучок.

2.8 **ослабитель пучка** (beam attenuator): Устройство, которое уменьшает лазерное излучение до определенного уровня.

2.9 **диаметр пучка** d_u, (ширина пучка): Диаметр наименьшего круга, который содержит u % полной мощности (или энергии) лазера. В настоящем стандарте используют d_{63}.

Примечание — В случае Гауссового пучка d_{63} относится к точке, где энергетическая освещенность (экспозиция излучения) снижается до $1/e$ от ее центрального пикового значения.

2.10 **расходимость пучка** (beam divergence): Конусный угол расходимости поля в дальней зоне, определяемый диаметром пучка.

Примечания

1 Если диаметры пучка в двух точках, разделенных расстоянием r, равны d_{63} и d'_{63}, то расходимость φ вычисляют по формуле

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{d'_{63} - d_{63}}{2r} \right).$$

2 Единица СИ: радиан.

2.11 **прерыватель пучка** (beam stop): Устройство, которое прерывает ход пучка лазера.

2.12 **лазерная аппаратура класса 1** (Class 1 laser product): Любая лазерная аппаратура, в процессе работы которой не разрешается доступ человека к лазерному излучению, превышающему предел излучения для класса 1 при соответствующих длинах волн и длительностях облучения.

2.13 **лазерная аппаратура класса 1М** (Class 1M laser product): Любая лазерная аппаратура с диапазоном длин волн от 302,5 до 4000 нм, в процессе работы которой не разрешается доступ человека к лазерному излучению, превышающему допустимый предел излучения для класса 1 для соответствующих длин волн и длительностей облучения; при расчетах можно оценить уровень излучения с меньшей измерительной апертурой или при большем расстоянии от видимого источника, чем используемые для лазерной аппаратуры класса 1.

Примечание — Выходное устройство лазерной аппаратуры класса 1М потенциально опасно при наблюдении с использованием оптических средств.

2.14 **лазерная аппаратура класса 2** (Class 2 laser product): Любая лазерная аппаратура, в процессе работы которой не разрешается доступ человека к лазерному излучению, превышающему допустимый предел излучения для класса 2 при соответствующих длинах волн и длительностях облучения.

2.15 **лазерная аппаратура класса 2М** (Class 2M laser product): Любая лазерная аппаратура в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, в процессе работы которой не разрешается доступ человека к лазерному излучению, превышающему допустимый предел излучения для класса 2 при соответствующих длинах волн и длительностях облучения; при расчетах можно оценить уровень излучения с меньшей измерительной апертурой или большем расстоянии от видимого источника, чем используемые для лазерной аппаратуры класса 2.

Примечание — Выходное устройство лазерной аппаратуры класса 2М потенциально опасно при наблюдении с использованием оптических средств.

2.16 **лазерная аппаратура классов 3R и 3В** (Class 3R and Class 3B laser products): Любая лазерная аппаратура, в процессе работы которой разрешается доступ человека к лазерному излучению, установленному для классов 1 и 2, но не разрешается доступ человека к лазерному излучению, превышающему допустимый предел излучения для классов 3R и 3В соответственно, для любых длительностей излучения и длин волн.

2.17 **лазерная аппаратура класса 4** (Class 4 laser product): Любая лазерная аппаратура, в процессе работы которой разрешается доступ человека к лазерному излучению, превышающему допустимый предел излучения для класса 3В.

2.18 **сопутствующее излучение** (collateral radiation): Любое электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от 180 нм до 1 мм, кроме лазерного излучения, генерируемого лазерным изделием в результате работы лазера или физически необходимого для работы лазера.

2.19 **коллимированный пучок** (collimated beam): Пучок излучения с очень маленьким углом сходимости или расходимости.

2.20 **непрерывная волна; НВ** (continuous wave CW): Выходное излучение лазера, работающего в непрерывном, а не в импульсном режиме. В настоящем стандарте лазер, работающий при непрерывном выходном излучении с периодом более 0,25 с, рассматривается как лазер непрерывного режима работы.

2.21 **заданная траектория пучка** (defined beam path): Определенное направление лазерного пучка в пределах лазерного изделия.

2.22 **диффузное отражение** (diffuse reflection): Изменение пространственного распределения пучка излучения поверхностью или средой во многих направлениях.

Примечания

1 Идеальный диффузор разрушает любую корреляцию между направлениями падающего и отраженного излучения.

2 Это определение отличается от определения, приведенного в МЭК 60050, термин 845-04-47.

2.23 **встроенное лазерное изделие** (embedded laser product): В настоящем стандарте это лазерное изделие, которое из-за технических характеристик, ограничивающих доступное излучение, отнесено к более низкому классу, чем класс, присущий встроенному лазеру.

Примечание — Лазер, который является частью встроенного лазера, называют «встроенный лазер».

2.24 **длительность излучения** (emission duration): Длительность во времени импульса, последовательности или серии импульсов или непрерывной работы лазера, когда возможен доступ человека к лазерному излучению при работе, ремонте или обслуживании лазерного изделия.

Для последовательности импульсов — это длительность между половиной пиковой мощности на переднем возрастающем фронте первого импульса и половиной пиковой мощности на спаде последнего импульса.

2.25 **длительность экспозиции** (exposure duration): Время экспозиции (см. 2.26).

2.26 **время экспозиции** (exposure time): Длительность импульса, серии или последовательности импульсов или непрерывной работы лазера при попадании лазерного излучения на тело человека. Для последовательности импульсов — это длительность между половиной пиковой мощности на переднем возрастающем фронте первого импульса и половиной пиковой мощности на спаде последнего импульса.

2.27 **наблюдение протяженного источника** (extended source viewing): Условия наблюдения видимого источника на расстоянии не менее 100 мм, угол видения которого больше минимального угла видения α_{min}.

Примечание — В настоящем стандарте рассматривается термическая опасность поражения сетчатки глаз в случае двух протяженных источников: промежуточного и большого источников. Их используют, чтобы различать по стягиваемому углу видимый источник α в промежутке от α_{min} до α_{max} (промежуточные источники) и более чем α_{max} (большие источники).

Примерами служат наблюдения диффузных лазерных источников, диффузных отражений и матриц лазерных диодов.

2.28 **безопасность при неисправности** (fail safe): Специальная конструкция, при которой неисправность узла не увеличивает опасность. В режиме неисправности система становится неработающей или безопасной.

2.29 **доступ человека к лазерному излучению** (human access):

a) возможность облучения части тела человека опасным лазерным излучением, проходящим через апертуру, или возможность непосредственного пересечения при зондировании детектором диаметром 12 и длиной до 80 мм и облучения лазерным излучением классов 2, 2M или 3R, или

b) для уровней излучения, превышающих допустимые пределы внутри защитного кожуха, указанные в перечислении a); возможность любой частью тела человека пересечь опасное лазерное излучение, непосредственно отраженное элементом поверхности внутренней конструкции аппаратуры через любое открытое отверстие в защитном кожухе.

2.30 **интегрированная яркость** (integrated radiance): Интеграл яркости при данном времени экспозиции, выраженный как энергия излучения на единицу площади поверхности излучения и на единицу телесного угла излучения (обычно Дж·м$^{-2}$·ср$^{-1}$).

2.31 **непосредственное наблюдение лазерного пучка** (intrabeam viewing): Все условия наблюдения, когда глаз облучается прямым или зеркально отраженным лазерным излучением, например наблюдение диффузных отражений.

2.32 **облученность** E (irradiance E): В точке на поверхности отношение потока излучения $d\Phi$, падающего на элемент поверхности, содержащей данную точку, к площади этого элемента dA:

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

Примечание — Единица СИ: ватт на квадратный метр (Вт·м$^{-2}$).

2.33 **лазер** (laser): Любой прибор, который может создавать или усиливать электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от 180 нм до 1 мм, главным образом благодаря процессу контролируемой вынужденной эмиссии.

Примечание — Данное определение отличается от МЭК 60050, термин 845-04-39.

2.34 **контролируемая зона лазера** (laser controlled area): Зона, занятость и деятельность в которой являются предметом контроля и наблюдения с целью защиты от опасности поражения лазерным излучением.

2.35 **источник энергии лазера** (laser energy source): Любой прибор, используемый совместно с лазером для сообщения энергии возбуждения электронам, ионам или молекулам.

Примечание — Общие источники питания, например источники электропитания или батареи, не могут рассматриваться как источники энергии лазера.

2.36 **лазерная аппаратура** (laser equipment): Любое изделие или компоненты в сборе, которые представляют собой лазер или содержат его.

2.37 **лазерный продукт** (laser product): Любое изделие или компоненты в сборе, которые составляют, создают или приводят к созданию лазера или лазерной системы и которые не проданы другому изготовителю для использования в качестве компонента (или замены такого компонента) электронного изделия.

2.38 **лазерное излучение** (laser radiation): Все электромагнитное излучение, испускаемое лазерным изделием в диапазоне длин волн от 180 нм до 1 мм, в результате управляемого индуцированного излучения.

2.39 **начальник службы радиационной безопасности** (laser safety officer): Лицо, компетентное в вопросах оценки и контроля опасности поражения лазерным излучением и отвечающее за организацию радиационной защиты.

2.40 **лазерная система** (laser system): Лазер в комплекте с соответствующим лазерным источником энергии с дополнительно подсоединенными узлами или без них.

2.41 **ограничивающая апертура** (limiting aperture): Круглая площадка, по которой проводят усреднение облученности и энергетической экспозиции.

2.42 **текущий ремонт** (maintenance): Выполнение регулировок и методик, оговоренных в информации для потребителя, которые предоставляются потребителю производителем вместе с лазерным изделием и которые должны выполняться потребителем для обеспечения заданных характеристик изделия. В это понятие не включаются эксплуатация и обслуживание.

2.43 **максимальный стягиваемый угол** α_{max} (maximum angular subtense α_{max}): Значение угла, стягиваемого видимым источником, свыше которого МВЭ и ДПИ не зависят от размера источника.

2.44 **максимально возможная экспозиция (МВЭ)** [maximum permissible exposure (MPE)]: Уровень лазерного излучения, до которого при нормальных условиях может облучиться персонал без вредных последствий. МВЭ представляет собой максимальный уровень излучения, которому можно подвергать глаза или кожу без возникающих сразу или через длительный промежуток времени повреждений и который связан с длиной волны излучения, длительностью импульса или временем экспозиции, особенностями подвергаемой опасности ткани, а также для видимого или близко расположенного к инфракрасному спектру излучения в диапазоне длин волн от 400 до 1400 нм с размером изображения на сетчатке.

Примечания

1 Значения МВЭ, используемые в настоящем стандарте, являются рекомендуемыми Международной комиссией по защите от неионизированного излучения и основаны на текущем состоянии знания пороговых уровней лазерной опасности.

2 Примеры вычисления уровня МВЭ приведены в приложении В.

2.45 **минимальный стягиваемый угол** α_{min} (minimum angular subtense α_{min}): Значение угла, стягиваемого видимым источником, свыше которого источник считают протяженным.

Примечание — МВЭ не зависит от размера источника для стягиваемых углов менее α_{min}.

2.46 **номинальная опасная для глаз зона** (НОГЗ) [nominal ocular hazard area (NOHA)]: Область, в пределах которой облученность пучком или энергетическая экспозиция превышают соответствующую МВЭ, учитывая возможность случайного изменения направления лазерного пучка.

Примечание — Если НОГЗ предусматривает возможность наблюдения через оптические приборы, то она называется «расширенная НОГЗ».

2.47 **номинальное опасное для глаз расстояние** (НОГР) [nominal ocular hazard distance (NOHD)]: Расстояние, на котором облученность пучком или энергетическая экспозиция равна соответствующему значению МВЭ.

Примечание — Если НОГР предусматривает возможность наблюдения через оптические приборы, то оно называется «расширенным НОГР (РНОГР)».

2.48 **работа** (operation): Работа лазерного изделия во всем диапазоне заданных функций. В это понятие не включается «текущий ремонт» или «обслуживание».

2.49 **оптическая плотность *D*** (optical density *D*): Десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания τ

$$D = -\lg \tau.$$

[МЭК 60050, термин 845-04-66]

2.50 **предел фотохимической опасности** (photochemical hazard limit): МВЭ, которая может быть получена, при этом персонал предохраняется от вредных фотохимических воздействий.

Примечание — Примером таких вредных воздействий является фоторетинит — фотохимическая опасность, относящаяся к сетчатке глаза, при облучении в диапазоне длин волн от 400 до 600 нм.

2.51 **защитный корпус** (protective enclosure): Физические средства для предотвращения облучения человека лазерным излучением во всех случаях, кроме тех, когда такой доступ необходим для монтажа оборудования.

2.52 **защитный кожух** (protective housing): Те части лазерного изделия (включая изделия, содержащие встроенные лазеры), которые предназначены для предотвращения доступа человека к лазерному излучению при превышении предусмотренного классификацией лазерного изделия предела (обычно устанавливается изготовителем).

2.53 **длительность импульса** (pulse duration): Приращение времени, измеренное между точками, соответствующими половине пиковой мощности в начале и в конце импульса.

2.54 **импульсный лазер** (pulsed laser): Лазер, генерирующий энергию в виде одного импульса или последовательности импульсов. В настоящем стандарте принята длительность импульса менее 0,25 с.

2.55 **энергетическая яркость *L*** (radiance *L*): Величина, вычисляемая по формуле

$$L = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega},$$

где $d\Phi$ — поток излучения, переносимый элементарным пучком лучей, проходящим через данную точку и распространяющимся в телесном угле $d\Omega$, содержащем данное направление;

dA — площадь элемента пучка, содержащего данную точку;

θ — угол между нормалью к элементу и направлением пучка.

Примечания

1 Единица: $Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$.

2 Модифицировано в сравнении с определением, приведенным в МЭК 60050, термин 845-01-34, достаточно для целей настоящего стандарта.

2.56 **энергия излучения *Q*** (radiant energy *Q*): Интеграл по времени от потока излучения Ф за данную длительность Δt:

$$Q = \int_{\Delta t} \Phi dt.$$

Примечание — Единица СИ: джоуль (Дж) (МЭК 60050, термин 845-01-27).

2.57 **энергетическая экспозиция *H*** (radiant exposure *H*): В точке на поверхности энергия излучения, падающая на элемент поверхности, деленная на площадь этого элемента.

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int E dt.$$

Примечание — Единица СИ: джоуль на квадратный метр ($Дж \cdot м^{-2}$).

2.58 **мощность излучения, поток излучения** (Ф, *P*) [radiant power, radiant flux (Ф, *P*)]: Мощность, испускаемая, передаваемая или принимаемая в виде излучения

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}.$$

[МЭК 60050, термин 845-01-24]

Примечание — Единица СИ: ватт (Вт).

2.59 **коэффициент отражения** ρ [reflectance (ρ)]: Отношение отраженного потока излучения к падающему потоку при данных условиях.

Примечание — Единица СИ: 1.

2.60 **соединитель дистанционной блокировки** (remote interlock connector): Соединитель, который позволяет подсоединять внешние устройства управления, расположенные вдали от других узлов лазерного изделия.

2.61 **защитная блокировка** (safety interlock): Автоматическое устройство, связанное с защитным кожухом лазерного изделия и служащее для предотвращения доступа человека к лазерному излучению изделий классов 3 или 4, если часть кожуха снята.

2.62 **обслуживание** (service): Выполнение описанных в эксплуатационных инструкциях изготовителя методик и регулировок, которые могут влиять на какой-либо аспект работы изделия. В понятие этого определения не входит «текущий ремонт» или «работа».

2.63 **условие одиночного отказа** (single fault condition): Любой одиночный отказ, который может повлиять на изделие, и прямое последствие этого отказа.

2.64 **малый источник** (small source): Источник, который стягивает угол, не превышающий минимальный угол α_{min}.

2.65 **зеркальное отражение** (specular reflection): Отражение от поверхности, при котором сохраняется корреляция между падающим и отраженным пучком излучения, включая отражения от зеркальной поверхности.

2.66 **предел тепловой опасности** (thermal hazard limit): МВЭ, которая может быть получена, при этом персонал предохраняется от вредных тепловых воздействий и в равной степени от фотохимических повреждений.

2.67 **временна́я база** (time base): Длительность эмиссии, которую используют для классификации лазерной аппаратуры.

2.68 **инструмент** (tool): Отвертка, монета или другой предмет, который можно использовать при работе с винтами или другими подобными средствами крепления.

2.69 **коэффициент пропускания** τ (transmittance τ): Отношение полной мощности прошедшего излучения к полной мощности падающего излучения в данных условиях.

Примечание — Единица СИ: 1.

2.70 **видимое излучение** (свет) [visible radiation (light)]: Оптическое излучение, которое может непосредственно вызвать зрительное ощущение.

[МЭК 60050, термин 845-01–03]

Примечание — В настоящем стандарте электромагнитное излучение, для которого длина волны монохроматических компонентов находится между 400 и 700 нм.

3 Административные правила

3.1 Ответственность за обеспечение безопасности

Меры ответственности за обеспечение безопасности могут регулироваться законодательством или инструкциями на местах с определением соответствующих обязанностей. В отсутствие законодательства или инструкций должны быть определены общее руководство и обязанности по безопасной эксплуатации лазеров.

Работодатели и служащие, все пользователи лазерной аппаратурой (включая студентов) и те, кто контролирует или наблюдает за ними, должны знать правила безопасности на рабочем месте и не допускать действий, влекущих недопустимые уровни риска для себя или других.

На любом рабочем месте, где используются лазеры, работодатель должен оценить все риски для здоровья, связанные с возможным неправильным использованием лазерного оборудования. Работодатель должен предпринять все необходимые шаги, чтобы гарантировать устранение этих рисков или их снижение до приемлемого низкого уровня.

Везде, где потенциально существует опасности, связанные с использованием лазерного оборудования, работодатель (или другой человек, несущий полную ответственность) должен предпринять меры для

безопасной работы, при этом возможно делегирование определенных задач другим лицам. Следует предусмотреть и идентифицировать все разумно обозримые опасности, связанные с использованием лазерного оборудования, и обеспечить контроль над ними. Результаты такой оценки должны быть задокументированы, и, где необходимо, предприняты соответствующие защитные меры, позволяющие снизить риски здоровью и безопасности. Эффективность таких защитных мер должна регулярно рассматриваться. Требования, предполагающие принятие определенных мер безопасности для лазерной аппаратуры, не обязательны при эксплуатации лазеров классов 1 или 2 и не всегда необходимы при эксплуатации лазеров классов 1М или 2М, однако в таблице 1 указаны защитные меры контроля. Относительно встроенных лазеров см. 4.1.3, а для временных визуальных эффектов см. 4.2.2.

3.2 Компетентные лица

Если работодатель или пользователь не в состоянии должным образом определить необходимые меры безопасности и защитные меры для устранения или снижения рисков для здоровья, связанных с эксплуатацией лазерного оборудования, следует привлечь сотрудника, ответственного за безопасность при работе с лазером. У такого сотрудника должен быть достаточные навыки, знания и опыт работы, он должен обеспечить соответствующую помощь работодателю (или его представителю, или пользователю) в определении опасности, оценке риска при значимых изменениях условий или рабочего режима оборудования.

Сотрудник, ответственный за безопасность при работе с лазером, не должен быть служащим заинтересованной организации, но может быть внештатным советником. Помощь такого сотрудника часто необходима временно: например, при начальном установлении соответствующих защитных мер контроля или оценке риска до существенных изменений условий или рабочего режима оборудования.

3.3 Начальник службы радиационной безопасности

Начальника службы радиационной безопасности назначают в организациях, эксплуатирующих лазерные изделия классов 3В или 4. Назначение начальника службы радиационной безопасности также рекомендуется при эксплуатации лазерных изделий классов 1М и 2М, излучающих коллимированные пучки, которые могут быть опасными при наблюдении через бинокль или телескоп на значительном расстоянии от лазера. [Это относится также к установке и обслуживанию встроенных лазеров, в случае если возможен доступ к более высоким уровням излучения (см. 4.1.3), или когда использование лазеров классом ниже чем 3В или 4 может внести существенный риск, если работает персонал, не прошедший соответствующую подготовку, или из-за существования связанных опасностей (см. раздел 6)].

Начальник службы радиационной безопасности должен взять на себя ответственность от имени работодателя при администрировании ежедневных вопросов лазерной безопасности. Ответственность работодателя — назначение человека компетентного и способного удовлетворительно выполнять свои обязанности. В случае необходимости организуют соответствующее обучение.

Обязанности начальника службы радиационной безопасности должны быть согласованы с работодателем (или его представителем) и оформлены документально. Для безопасной эксплуатации лазеров требуется как минимум:

a) знание и, если необходимо, наличие в письменном виде полного перечня потенциально опасных лазерных изделий (включая идентификацию, спецификацию, класс и особенности применения лазерного изделия, его расположение, любые специальные требования или ограничения, касающиеся его эксплуатации);

b) ответственность за соответствие техническим условиям с соблюдением организационных процедур с целью обеспечить безопасную эксплуатацию; составление соответствующих письменных отчетов, возможность предпринять немедленные необходимые действия при любом несоблюдении или очевидном несоответствии таких процедур.

Возможность начальника службы радиационной безопасности приказать или рекомендовать человеку, имеющему допуск, прервать опасную работу и скорректировать свои действия, должна быть согласована и определена в соответствующих документах.

Обычно начальник службы радиационной безопасности не занят постоянно. На его место может быть назначено компетентное лицо (см. 3.2) — сотрудник данной организации (часто такой сотрудник необходим в организациях, широко или разнообразно использующих лазерное оборудование).

В больших организациях, широко использующих лазерное оборудование, такие сотрудники могут сначала действовать в ограниченных зонах или помогать начальнику службы радиационной безопасности и обеспечивать от имени работодателя безопасное использование лазерного оборудования в организации. (Допускается совмещение должностей начальника службы радиационной безопасности и главного начальника службы радиационной безопасности.) При таких обстоятельствах должна сохраняться регулярная связь между этими людьми, с тем чтобы гарантировать непротиворечивое и эффективное полное управление лазерной программой безопасности.

3.4 Информация и обучение

К работе допускаются только служащие, прошедшие соответствующее специальное обучение и ознакомленные с процедурами, обеспечивающими защиту, т. к. во время работы лазерного оборудования они подвергаются воздействию окружающей среды (включая сопутствующие факторы опасности, см. раздел 6). Должны использоваться соответствующие знаки предупреждения об опасности. Эти знаки должны включать в себя символ лазерной опасности, показанный на рисунке 1, и соответствующую надпись. Служащие должны пройти инструктаж или обучение и обладать необходимыми знаниями, позволяющими не подвергать себя и окружающих недопустимому риску. Специальное обучение особенно важно для тех, кто работает с лазерным оборудованием классов 3B или 4.

Инструктаж и обучение должны соразмеряться с типом опасности и соответствовать конкретной категории служащих. Инструктаж и обучение должны включать в себя (перечень не является исчерпывающим):

a) курс организации по безопасному использованию лазерного оборудования;

b) риски вреда, который может возникнуть при неправильном использовании или обоснованно ожидаемом неправильном применении лазерного оборудования;

c) назначение указывающих предупреждающих знаков;

d) правильное использование и эксплуатация лазерного оборудования, связанного с ним оборудования, включая средства индивидуальной защиты (применение — см. 8.4.5);

e) рабочие методики и правила местного действия;

f) порядок действий, которому необходимо следовать при наступлении несчастного случая или другого связанного с безопасностью происшествия.

Инструктаж и обучение проводят до начала работы или обслуживания лазерного оборудования и повторяют по мере необходимости, чтобы обеспечить постоянное соблюдение мер безопасности. Необходимо также вести соответствующий журнал.

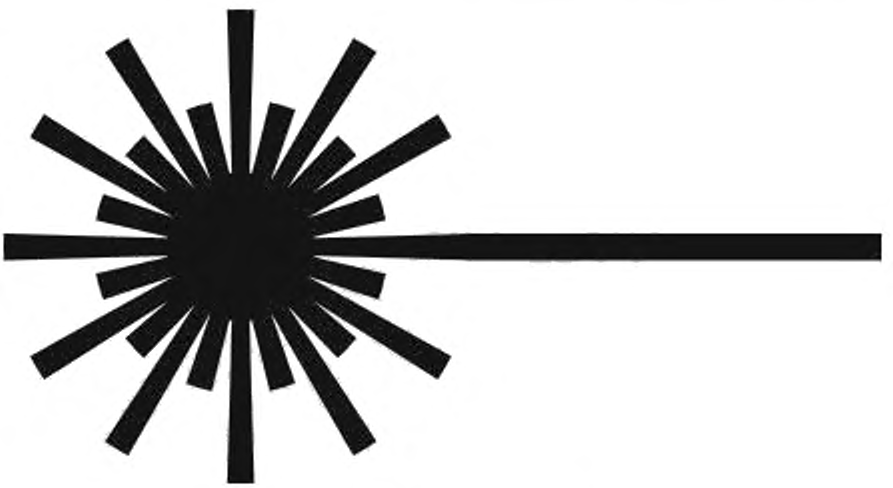


Рисунок 1 — Символ лазерной опасности

4 Опасности лазерного излучения

4.1 Лазерная аппаратура

4.1.1 Классификация лазерной аппаратуры

Класс лазерной аппаратуры определяет для пользователя уровень опасности доступного лазерного излучения, которое может причинить вред здоровью. Любая произведенная лазерная аппаратура должна быть классифицирована в соответствии с МЭК 60825-1 и отмаркирована с целью дать пользователю всю необходимую информацию. Классификация лазерной аппаратуры обычно проводится изготовителем, но в некоторых случаях, например для производителей лазерных компонентов, экспериментальных образцов или макетов, пользователю необходимы гарантии того, что класс лазера определен, основываясь на уровне достижимой эмиссии в соответствии с требованиями МЭК 60825-1.

Если пользователь включает лазер в другое оборудование, то конечный продукт должен соответственно классифицироваться (см. 4.1.3). Кроме того, должны быть определены все особенности, касающиеся безопасности конечного продукта, включая маркировку, с тем чтобы соответствовать требованиям МЭК 60825-1. В случае необходимости при выявленных особенностях работы конечного продукта гарантии безопасной эксплуатации должны быть подтверждены, либо в них необходимо внести соответствующие изменения.

4.1.2 Классы лазеров

Классификация лазеров дает сведения об их потенциальной опасности. Классификация лазеров основана на максимальном уровне лазерного излучения, который возможен в условиях нормальной эксплуатации. Сопутствующие факторы опасности (см. раздел 6), которые могут присутствовать при использовании лазеров, к классификации лазеров не относятся.

Ниже приведены классы лазеров вместе с кратким описанием соответствующих требований по защитным мерам, которые должны быть выполнены для каждого класса. За исключением классов 2 и 2М, лазерное излучение может быть видимым или невидимым (более полно о классификации см. МЭК 60825-1):

a) класс 1

Лазеры, которые обычно безопасны при обоснованно ожидаемых условиях использования или по конструкции, которая при нормальной эксплуатации исключает доступ людей к узлам с более высоким уровнем лазерного излучения.

Требования по защите для класса 1 обеспечиваются условиями эксплуатации лазеров класса 1 на должном уровне (см. 4.1.3). Если вероятен доступ к уровням лазерного излучения сверх пределов для класса 1, например во время обслуживания встроенного лазерного изделия или в случае расширения пучка при использовании внешней оптики, то для того, чтобы уменьшить размер или расхождение пучка, применяют требования защиты, соответствующие более высокому классу лазера;

b) класс 1М

Лазеры, которые превышают разрешенные пределы эмиссии для класса 1, но из-за геометрических свойств распространения испускаемого излучения не могут превысить вредный уровень облучения невооруженного глаза. Однако безопасный предел облучения глаз может быть превышен и причинен вред, если используются увеличительные оптические инструменты. Такими инструментами являются бинокли и телескопы в случае использования коллимированных пучков большого диаметра или увеличительные линзы и микроскопы в случае расходящихся пучков. Опасное облучение может случиться, если размер лазерного пучка (его диаметр или расхождение) уменьшен при помощи оптических инструментов по траектории распространения пучка.

Требования по защите для класса 1М: следует избегать использования увеличительных оптических инструментов, таких как бинокли, телескопы, микроскопы и увеличительные линзы (к ним не относятся очки или контактные линзы). Нельзя помещать оптические инструменты в излучаемый пучок, что может вызвать концентрацию пучка в зоне, где могут присутствовать люди, или есть вероятность использования в этих зонах телескопы или бинокли с целью непосредственного наблюдения пучка;

c) класс 2

Лазеры, излучающие в видимом диапазоне длин волн (400—700 нм), при этом излучение безопасно для кожи, но по своей природе может быть опасным для глаз, однако для защиты зрения обычно достаточно естественной реакции глаз на яркий свет. Поэтому случайное облучение глаз обычно безопасно, хотя возможно преднамеренное наблюдение пучка под влиянием алкоголя или наркотиков.

Требования по защите для класса 2: следует избегать непосредственного наблюдения пучка, т. е. сознательного наблюдения лазерного источника или отражения пучка от других людей;

d) класс 2М

Лазеры, излучение которых в видимом диапазоне длин волн превышает предел для класса 2, но из-за траектории распространения для защиты обычно достаточно естественной реакции глаз на яркий свет. Однако естественная реакция глаз не всегда обеспечивает достаточную защиту, и возможно их повреждение в случае применения оптических инструментов. К таким инструментам относятся бинокли и телескопы (в случае большого диаметра коллимированного пучка), а также увеличительные линзы и микроскопы в случае расходящихся пучков. Опасное облучение возможно также, если размеры лазерного пучка (его диаметр или расхождение) уменьшены использованием оптических компонентов по траектории пучка.

Требования защиты для класса 2М: следует избегать использования увеличительных оптических инструментов, таких как бинокли, телескопы, микроскопы и увеличительные линзы (к ним не относятся очки или контактные линзы). Нельзя помещать оптические инструменты в излучаемый пучок, что может привести к концентрации пучка. Следует избегать непосредственного наблюдения пучка, т. е. сознательного наблюдения лазерного источника или отражения пучка от других людей;

e) класс 3R

Лазеры, уровень эмиссии которых превышает пределы для класса 1 в пять и более раз (для невидимого излучения) или для класса 2 (для видимого излучения). МВЭ может быть превышена, но риск повреждения небольшой.

Требования защиты для класса 3R: следует избегать непосредственного наблюдения пучка, т. е. сознательного наблюдения лазерного источника или отражения пучка от других людей;

f) класс 3В

Лазеры, уровень эмиссии которых может быть вреден для глаз независимо от применения оптических инструментов. Лазеры класса 3В могут быть вредны для кожи при уровнях излучения, приближающихся к верхнему пределу этого класса.

Требования защиты для класса 3В: следует избегать облучения пучком глаз (и, соответственно, кожи). Следует принять меры для исключения случайных отражений пучка;

g) класс 4

Лазеры, уровень эмиссии которых может быть вреден для глаз и кожи. Диффузные отражения лазерного излучения также могут быть опасными.

Уровень эмиссии может представлять потенциальную опасность пожара, вызывать вредные последствия от облучения или опасность задымления материалов.

Требования защиты для класса 4: следует предотвратить возможность облучения глаз и кожи от прямого воздействия пучка или зеркальных и диффузных отражений. Необходимы защитные меры от таких опасностей взаимодействия пучка с такими материалами, как огонь и дым.

Лазерная аппаратура классов 2, 2М, 3R, 3В и 4, поставляемая конечному пользователю в соответствии с требованиями МЭК 60825-1, должна быть снабжена предупреждающими знаками, указывающими класс и основные меры предосторожности, которым необходимо следовать. Лазерная аппаратура классов 1 и 1М на усмотрение изготовителя может быть снабжена предупреждающими знаками, однако вместо этого разрешается включать в инструкцию для пользователя необходимые предупреждения.

Рекомендуется, чтобы немаркированная лазерная аппаратура (включая лазерные компоненты или измененные пользователем системы), которая эксплуатируется постоянно, была маркирована в соответствии с требованиями МЭК 60825-1.

Во многих случаях, когда используется лазерная аппаратура не выше класса 3R (классы 1, 1М, 2, 2М или 3R), пользователь может осуществлять меры контроля для самого высокого класса лазерной аппаратуры без необходимости детальной оценки риска или оценки возможных уровней облучения человеческого организма. Эти меры контроля для конкретного класса лазерной аппаратуры обобщены в таблице 1.

При необходимости детального анализа с целью определения адекватных защитных мер рассматривают:

- все возможные способы использования лазерной аппаратуры класса 3В или 4;
- использование защитных очков;
- надежность защиты на минимальном безопасном расстоянии от лазера;
- другие ситуации, когда средства контроля, определенные в таблице 1, могут быть несоответствующими, недостаточными или необоснованно ограничивающими фактическую степень риска.

Примечание — Лазерная аппаратура должна быть классифицирована согласно предложенной схеме классов 1, 2, 3А, 3В и 4. Для определения класса, которому изделие соответствовало бы по текущей системе классификации, можно применять МЭК 60825-1. Для большинства лазерных изделий классов 1, 2, и 4 никаких изменений не будет.

Таблица 1 — Установленные защитные меры контроля для лазерной аппаратуры

Класс	Защитные меры контроля. Реализуются независимо от оценки риска, оправдывающей принятие вариантов защитных мер контроля
1	В условиях нормальной работы защитные меры контроля не нужны (это не относится к условиям монтажа или обслуживания). В случае встроенных лазерных изделий, содержащих лазер более высокой мощности, следуют инструкциям, поставляемым изготовителем, и предупреждающим знакам. Специальные меры предосторожности могут быть необходимы при локальном обслуживании встроенных лазерных изделий (см. 8.5)
1M	Не допускают непосредственного наблюдения лазерного источника через увеличительные оптические инструменты, например, бинокли, телескопы, микроскопы и увеличительные линзы, если не предприняты адекватные меры предосторожности[а)]. Предотвращают использование любой внешней оптики, которая может уменьшить расхождение пучка или его диаметр
2	Не смотрят в пучок. Не направляют пучок на других людей или в зоны, в которых могут быть другие люди, не связанные с эксплуатацией лазера
2M	Не смотрят в пучок. Не направляют пучок на других людей или в зоны, в которых могут быть другие люди, не связанные с эксплуатацией лазера. Гарантируют, чтобы пучок всегда падал на не отражающую (например, не зеркальную) поверхность. Предотвращают непосредственное наблюдение лазерного источника через увеличительные оптические инструменты, например, бинокли, телескопы, микроскопы и увеличительные линзы, если не предприняты адекватные меры предосторожности[а)]. Предотвращают использование любой внешней оптики, которая может уменьшить расхождение пучка или его диаметр
3R	Предотвращают прямое облучение глаз пучком. Не направляют пучок на других людей или в зоны, в которых могут быть другие люди, не связанные с эксплуатацией лазера
3B и 4	Лазеры классов 3B и 4 не используют без выполнения первичной оценки риска, позволяющей определить защитные меры контроля, необходимые, чтобы гарантировать безопасную работу. Там, где это обосновано на практике, используют технические средства в соответствии с МЭК 60825-1 с целью понизить класс лазера ниже 3B (это обычно достигается помещением лазера в корпус, с тем чтобы сформировать лазер класса 1)

[а)] Тип инструмента для наблюдения, который может быть опасным, обозначают на предупреждающих знаках или в инструкциях, поставляемых изготовителем.

4.1.3 Встроенные лазеры

Лазерная аппаратура классифицируется по уровню лазерного излучения, возможного во время нормальной эксплуатации, однако лазерная аппаратура одного класса может содержать встроенный лазер более высокого класса. Нередко лазерная аппаратура, аттестованная на класс 1, включает в себя полностью закрытый лазер, который соответствует требованиям МЭК 60825-1. Открытие, удаление или смещение любой части встроенного лазерного изделия, которое конструктивно не предполагает быть открытым, удаленным или перемещаемым во время эксплуатации, может открыть доступ к вредным уровням лазерного излучения. Процедуры по обслуживанию встроенных лазеров см. 8.5.

Примерами лазерной аппаратуры класса 1, включающей в себя встроенные лазеры, но исключающей открытое лазерное излучение во время нормальной эксплуатации, являются проигрыватели компакт-дисков, лазерные принтеры, встроенные индустриальные лазеры. Примером встроенных излучающих лазеров являются сканирующие лазеры (например, устройства считывания штрихового кода), класс лазера которых из-за быстрого перемещения пучка уменьшается в сравнении с постоянным излучением, а также лазеры, используемые в различных оптических системах, в которых пучок расширяется, становятся менее опасными.

В МЭК 60825-1 требуется, чтобы уровень доступной эмиссии во время работы лазера был ниже максимального, определенного для отказа при обоснованно ожидаемом событии. Лазерная аппаратура в пределах любого класса, кроме класса 4, может включать в себя лазер, эмиссия которого, ограниченная в пределах данного класса, находилась в соответствии с проектом запуска электронной схемы двигателя или другими средствами, даже если лазер способен излучать на уровне более высокого класса. Пользователи такой лазерной аппаратуры должны знать, что при определенных условиях или при использовании лазера не в соответствии с назначением, определенным изготовителем, может быть доступным более высокий уровень излучения лазера. Для того чтобы избежать потенциально опасного облучения, пользователь должен придерживаться инструкций по эксплуатации.

4.1.4 Оптические волокна

Оптические волокна, проводящие лазерное излучение, обычно обеспечивают полную защиту (ограждение) от его излучения и предотвращают доступ к нему. Однако если волокно разъединено или произошел его разрыв, возможны опасные уровни лазерного излучения.

Требования безопасности, применимые к оптическим системам связи, изложены в МЭК 60825-2. Эти требования включают в себя необходимость оценки потенциально возможного уровня лазерного излучения от оптического волокна на основе уровней опасности (например, 1, 1М, 2, 2М, 3R, 3В или 4), эквивалентных классу лазерной аппаратуры. Уровень опасности применяют только к конкретному расположению, в случае если разрыв волокна возможен при обоснованно ожидаемом событии, а не к системе или установке в целом. Поэтому в различных местах в пределах одной системы, в которых возможна эмиссия волокна, могут быть назначены различные уровни опасности. Это не требуется для лазера, класс которого основан на самом высоком уровне излучения полного комплекта лазерного изделия.

4.1.5 Проведение зрелищных мероприятий с применением лазеров

Для проведения зрелищных мероприятий с применением лазеров или в целях развлечения в неконтролируемых областях должны использоваться только лазеры классов 1, 2, или 3R с видимым пучком.

Использование других классов лазеров в таких целях разрешается только:

1) после оценки риска и определения необходимых защитных мер контроля;

2) если лазер эксплуатируется под контролем опытного, хорошо обученного оператора и/или когда исключено облучение зрителей до уровней, превышающих МВЭ.

В МЭК 60825-3 изложены основные положения для демонстраций и показов с применением лазеров, хотя во многих странах действуют собственные руководства.

4.2 Облучение лазерным излучением

4.2.1 Максимальная возможная экспозиция (МВЭ)

Одна из основных целей лазерной программы безопасности состоит в гарантировании того, чтобы любое облучение от лазера, которое может произойти, было в безопасных пределах. Поэтому необходимо оценить максимальное облучение при всех обоснованно ожидаемых событиях (см. 4.3) и на этой основе определить МВЭ, о которой подробнее см. в разделе 5.

Примечание — Потребность гарантировать, что уровни облучения не превышают МВЭ, не относится к намеренному облучению пациента во время лечения.

Для любого лазера, излучение которого потенциально опасно (обычно это лазеры любого класса, кроме класса 1 или 2), защитные меры могут быть необходимыми, чтобы гарантировать, что ожидаемые уровни воздействия на человеческий организм лазерного излучения не превысят МВЭ. Везде, где это обосновано, предусматривают прохождение пучка в защитном корпусе и полное устранение опасности от источника. Там, где это невыполнимо, необходимые защитные меры должны быть определены на основании оценки риска (см. раздел 7). Однако прежде всего необходимо оценить уровни облучения, которые могут возникнуть, и условия, при которых могут случиться опасные уровни облучения.

Значения МВЭ при облучении глаз и кожи как функции длины волны лазера и длительности облучения приведены в таблицах 5—7. Более подробно см. раздел 5. ICNIRP (Международная комиссия по защите от неионизированного излучения) отслеживает эти значения, которые установлены ниже порогов повреждения и основаны на известных материалах. МВЭ следует использовать как руководство при контроле экспозиций и не рассматривать как строго определенное разделение между безопасными и опасными уровнями. Поскольку облучение ниже МВЭ при определенных обстоятельствах может быть дискомфортным и может вызвать вторичные опасности (см. ниже), оно в любом случае должно быть минимально возможным.

4.2.2 Вре́менные визуальные эффекты

Видимое излучение лазеров может вызвать тревожащие и потенциально опасные эффекты ослепления при уровнях облучения значительно ниже МВЭ (см. 4.2.1), не наносящих прямых физиологических повреждений. Прежде всего это относится к лазерам классов 2, 2М и 3R (включая лазерные указатели и маломощные юстировочные лазеры). Поэтому их преднамеренно или неумышленно нельзя направлять в глаза человека. Это может вызвать испуг, отвлечь человека, заставить потерять концентрацию, особенно если он выполняет критическую по отношению к безопасности задачу, например, вождение транспортного средства или управление оборудованием. Возможно также появление тревожащих остаточных изображений, чувства страха, таких реакций, как слезы и головные боли, особенно если человек полагает, что они являются следствием облучения. Продолжительное протирание глаз (руками) может также привести к болезненному раздражению роговицы.

4.3 Определение уровня лазерного излучения

4.3.1 Эффективная экспозиция

Оценка лазерного излучения может быть необходима для определения границы зоны лазерной опасности или необходимого уровня защиты (например, использование защитных очков или защитных смотровых окон).

Уровень облучения человека, являющийся результатом воздействия лазера, определяют с учетом возможных обоснованно ожидаемых событий, когда человек может находиться в зоне с самыми высокими уровнями облучения. Оценивают также все условия воздействия прямого и отраженного пучка.

Ожидаемый уровень МВЭ необязательно немедленно возникнет рядом с апертурой лазера, хотя это возможно для людей, находящихся в непосредственной близости от лазера, излучающего коллимированный пучок.

Для лазеров непрерывного излучения экспозицию выражают в единицах облученности падающего излучения, Вт·м$^{-2}$. Для импульсных лазеров средняя энергетическая освещенность, Вт·м$^{-2}$, и энергетическая экспозиция одиночного импульса, Дж·м$^{-2}$, должны быть известны. При оценке уровня экспозиции особое внимание уделяют ограничивающей апертуре (см. 4.3.2) и протяженным лазерным источникам (см. 4.3.3 и 5.4). Возможно, что значение применяемой экспозиции (называемой эффективной экспозицией), которую используют для сравнения с МВЭ, может отличаться от фактической экспозиции.

Главные параметры оценки экспозиции могут быть следующими:

- длина волны;
- размеры пучка на выходе лазера;
- расхождение пучка и положение суженной части пучка,
- профиль пучка (распределение мощности или энергии в поперечнике пучка);
- обоснованно ожидаемая максимальная длительность экспозиции;
- минимальная обоснованно ожидаемая дистанция облучения;
- стягиваемый видимым источником угол [обычно необходимо для матричных лазеров и оценки диффузных (незеркальных) отражений пучка при определении соответствующих параметров облучения и вычисления значения поправочного коэффициента C_6. В случае лазерных источников с одиночными импульсами коэффициент C_6 обычно равен 1];
- для сканирования пучков — характеристики сканирования и геометрию сканирования.

Кроме того, для лазеров непрерывного излучения необходимы:

- мощность пучка;
- для импульсного излучения:
  - энергия импульса,
  - длительность импульса,
  - частота повторения импульсов,
  - форма импульса и распределение импульса во времени (в совокупности).

Уровни излучения могут быть определены физическими измерениями или вычислением по параметрам эмиссии лазера, как определено изготовителем.

Профили большинства лазерных пучков неоднородны, поэтому облученность или энергетическая экспозиция как результат экспозиции пучка будет меняться в поперечном сечении (в большинстве случаев максимальное значение будет в центре пучка). МВЭ связана со значением экспозиции (энергетической освещенностью или энергетической экспозицией), при ее усреднении по круговой области, заданной соответствующей ограничивающей апертурой (см. 4.3.2). При сравнении с МВЭ экспозицию считают эквивалентной мощности (в случае энергетической освещенности) или энергии (в случае энергетической экспозиции) в пределах указанной ограничивающей апертуры, деленной на площадь этой апертуры.

Если экспозиция покрывает площадь, которая намного больше ограничивающей апертуры, то используют максимальное (обычно по оси) значение энергетической освещенности или энергетической экспозиции.

Примечание — Для круглых пучков, имеющих приблизительно Гауссов профиль, значение по оси равно полной мощности или энергии пучка, деленной на площадь пучка, определяемой по ее диаметру с множителем 1/e. Эта площадь содержит 63 % полной мощности или энергии пучка. Диаметр с множителем 1/e — это апертура, в который облученность, энергетическая экспозиция или интенсивность излучения уменьшается в 1/e раз, или до значения, равного 0,37 пикового по оси. Однако часто диаметр пучка определяется изготовителем с множителем $1/e^2$, т. е. диаметр, равный 1/e, умножают на 1,4.

В некоторых случаях может быть необходима более осторожная оценка полной мощности или энергии, содержащейся в пределах ограничивающей апертуры. Для пучков, которые меньше ограничивающей апертуры, эффективная экспозиция (в целях сравнения с МВЭ) равна полной мощности или энергии пучка, деленной на площадь ограничивающей апертуры, а не на фактическую площадь пучка.

4.3.2 Ограничивающие апертуры

При всех измерениях и вычислениях значений экспозиции необходимо использовать соответствующие усредняющие апертуры. Ограничивающие апертуры – это апертуры, определяемые диаметром круга, в котором осуществляется усреднение энергетической освещенности или энергетической экспозиции.

Значения для ограничивающих апертур представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Диаметр ограничивающей апертуры, применяемой при измерениях облученности или энергетической экспозиции

Спектральный диапазон, нм	Диаметр ограничивающей апертуры, мм, для	
	глаз	кожи
Св. 180 до 400	1	3,5
От 400 до 1400	7	3,5
От 1400 до 10^5	1 для $t \le 0{,}35$с; $1{,}5t^{3/8}$ для 0,35с < t < 10 с; 3,5 для $t \ge 10$ с	3,5
От 10^5 до 10^6	11	11

Для лазеров с повторяющимися импульсами экспозиции в пределах спектрального диапазона от 1400 до 10^5 нм для оценки опасности от одиночного импульса длительностью не более 0,35 с используют апертуру 1 мм; апертуры 3,5 мм применяют для оценки МВЭ при экспозиции более 10 с.

Примечание — Значения облучения глаз измеряют в диапазоне длин волн 400—1400 нм апертурой диаметром более 7 мм (зрачок). Значения МВЭ устанавливают без учета меньших диаметров зрачка.

4.3.3 Угол приема при оценке экспозиции протяженных источников

Большинство лазеров относятся к малым источникам со стягиваемым углом менее α_{min} (1,5 мрад). Эмиссия таких источников, находящаяся в области опасности для сетчатки глаза (т. е. между 400 и 1400 нм), делает возможными фокусировку пучка и формирование эффективного изображения на сетчатке. Это невозможно с протяженными источниками, поэтому они для данного уровня излучения менее опасны для глаз. Условия излучения протяженных источников при наблюдении на достаточно близком расстоянии приемлемы при диффузных отражениях для матричных лазеров или лазерных изделий с диффузорами.

При определении уровня эффективной экспозиции протяженного лазерного источника (т. е. любого источника с $\alpha > 1{,}5$ мрад в положении, при котором экспозицию возможно оценить) следует использовать углы приема, упомянутые ниже. Любой вклад в экспозицию, полученный вне такого угла, из оценки эффективной экспозиции должен быть исключен.

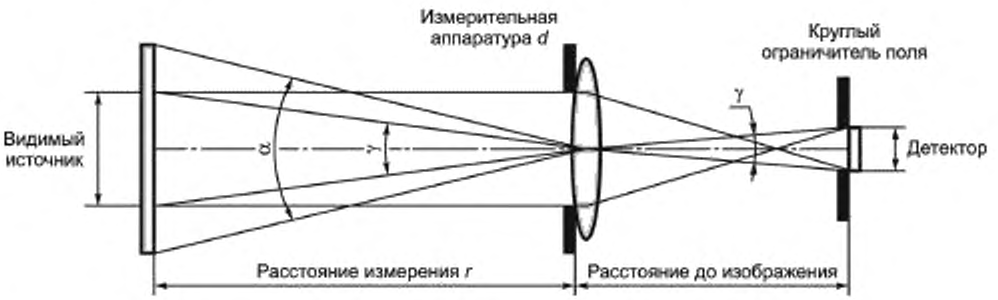
Стягиваемый видимым источником угол измеряют на таком расстоянии, чтобы экспозицию можно было оценить, но не менее 100 мм. Угловой размер α источника не должен быть искажен из-за расхождения. Если взять в качестве примера солнце, то его угловой размер при наблюдении с земли равен 0,5°, но расхождение его излучения составляет 360°:

а) для измерений источников при оценке предела фотохимической опасности в таблице 6 (от 400 до 600 нм) предельный угол приема γ_p равен:

- для 10 с < t ≤ 100 с: γ_p = 11 мрад;
- для 100 с < t ≤ 10^4 с: $\gamma_p = 1{,}1 \cdot t^{0{,}5}$ мрад;
- для 104 с < t ≤ $3 \cdot 10^4$ с: γ_p = 110 мрад.

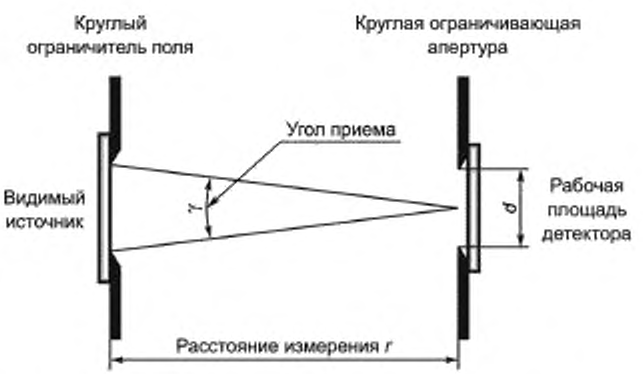
Если стягиваемый источником угол α больше, чем определенный предельный угол приема γ_p, то угол приема не должен превышать значение γ_p. Если стягиваемый источником угол меньше, чем определенный предельный угол приема γ_p, то угол приема полностью охватывает рассматриваемый источник, и его необязательно определять точно (например, угол приема можно не ограничивать относительно γ_p).

Примечание — Для измерений одиночных малых источников, когда $\alpha < \gamma_p$, нет необходимости в точных измерениях приемного угла. Получить конкретный приемный угол можно, пользуясь ограничителями поля на полевой диафрагме или перекрытием источника (см. рисунок 2).



Примечание — Пример измерительной установки, обеспечивающей четкий угол приема с использованием линзы для отражения видимого источника на детектор. Это расположение используют, когда видимый источник непосредственно недоступен.

2a) Измерительное устройство с использованием линзы



Примечание — Измерительная установка с использованием апертуры, расположенной возле видимого источника, для определения приемного угла детектора.

2b) Устройство прямого измерения

Рисунок 2 — Измерительные устройства

b) при измерении уровня излучения для оценки значений всех МВЭ, приведенных в таблице 6, учитывают не только фотохимические, но и другие ограничения, а приемный угол должен полностью охватывать источник (т. е. приемный угол должен быть по крайней мере равен стягиваемому источником углу α). Однако если $\alpha > \alpha_{max}$, то в диапазоне длин волн 302,5—4000 нм предельный приемный угол не должен превышать α_{max} (0,1 рад) для предела термической опасности. В пределах диапазона длин волн 400—1400 нм при оценке термической опасности видимого источника, состоящего из множества точек, приемный угол должен быть в диапазоне $\alpha_{min} \le \gamma \le \alpha_{max}$.

При измерении МВЭ некруглых источников приемный угол прямоугольного или линейного источника определяют как среднеарифметическое значение двух угловых размеров источника. Любой размер угла более α_{max} или менее α_{min} должен быть до начала вычислений ограничен значениями α_{max} или α_{min} соответственно. МВЭ фотохимической опасности, относящаяся к сетчатке глаза, не зависит от стягиваемого источником угла, и экспозицию определяют, используя приемный угол, определенный в 4.3.3, перечисление а).

4.3.4 Использование биноклей

При наблюдении источника лазерного излучения через бинокль увеличение эффективной экспозиции поверхности глаза будет меньше M^2 или $(D/d)^2$, где M — угловое увеличение бинокля, D — наружный диаметр линз объектива и d — диаметр соответствующей ограничивающей апертуры (бинокли обычно определяют в форме $M \times D$, например 7 × 50). Допущения могут быть сделаны из-за потерь при передаче через бинокль лазерного излучения на конкретной длине волны. Типичные процентные соотношения пропускания для бинокля:

длина волны, мкм:	% пропускания:
0,18—0,302	< 2
0,302—0,4	70
0,4—0,7	90
0,7—2,8	70
2,8—103	< 2

Стягиваемый угол протяженного источника, наблюдаемого через бинокль, следует увеличить на коэффициент M.

5 Определение максимальной возможной экспозиции (МВЭ)

5.1 Общие замечания

Уровни МВЭ основаны на значениях, определенных ICNIRP, приведены в таблицах 5—7 как функции длины волны излучения и его длительности. Таблицы 5—7 следует использовать совместно с корректирующими коэффициентами, приведенными в таблице 8.

В таблице 5 определено значение МВЭ для глаз в условиях прямого облучения лазерным пучком (и во всех других случаях, когда стягиваемый угол видимого лазерного источника не превышает 1,5 мрад, см. 4.3.3). Для прямого облучения глаз на длинах волн 400—1400 нм (опасность, относящаяся к сетчатке глаза) бóльшим видимым источником, т. е. не при непосредственном наблюдении лазерного пучка (для нескольких или протяженных источников, которые стягивают в глаз угол более 1,5 мрад), возможно уменьшение (увеличение) МВЭ. Это происходит, потому что глаз не может сфокусировать такие источники в маленькое пятно на сетчатке, т. е. максимальная безопасная мощность или энергия, попадающая в глаз, больше. Соответствующие значения МВЭ приведены в таблице 6.

В таблице 7 приведены значения МВЭ для кожи.

Длительность облучения, используемая при определении МВЭ в таблицах 5—7, должна быть основана на максимальной длительности случайного облучения, которое при обоснованно ожидаемом событии может произойти, с учетом длины волны лазерного излучения и условий, при которых мог бы использоваться лазер. При самых неблагоприятных условиях случайного облучения используют длительность случайного облучения 100 с как максимальную при длинах волн более 400 нм и 30 000 с для длин волн менее 400 нм, когда могут начаться длительные фотохимические эффекты. Такую более длинную временную базу применяют при обстоятельствах повторного или длительного облучения в ультрафиолетовом спектре без непосредственного очевидного эффекта, но при исключении прямого случайного облучения мощным ультрафиолетовым лазером, когда возможно непосредственное и очевидное повреждение. Для случайного облучения лазерным пучком в видимом диапазоне (400—700 нм), когда непосредственное наблюдение не предполагается, допускается использовать время реакции глаза 0,25 с.

Другие соображения о длительности облучения включены в оценки риска, приведенные в 7.3.

5.2 Импульсно-периодические или модулируемые лазеры

Поскольку данные по критериям облучения от последовательности импульсов очень ограничены, особое внимание уделяется оценке облучения повторяющимися импульсами. При оценке МВЭ для облучения повторяющимися импульсами следует применять приведенные ниже методы.

МВЭ при облучении глаз для длин волн в диапазоне 400—10^6 нм определяют при использовании самого жесткого из требований по перечислениям a), b) или c).Требование по перечислению c) применяют только к тепловому пределу, но не к фотохимическим пределам.

МВЭ при облучении глаз для длин волн менее 400 нм и МВЭ при облучении кожи определена при использовании самых жестких из требований по перечислениям a) и b):

a) облучение от любого одиночного импульса в последовательности импульсов не должно превышать МВЭ для одиночного импульса;

b) средняя облученность для последовательности импульсов длительностью T не должна превышать МВЭ, приведенных в таблицах 5—7 для одиночного импульса длительностью T (T — длительность, используемая при оценке облученности в 4.1);

c) средняя облученность от импульса для последовательности импульсов не должна превышать МВЭ для одиночного импульса, умноженной на поправочный коэффициент C_5.

Примечание — Облученность для последовательности импульсов усредняют для той же длительности эмиссии, которую используют при определении N. Каждое усредненное значение экспозиции импульсов сравнивают для уменьшения $МВЭ_{последов}$, как определено ниже:

$МВЭ_{последов} = МВЭ_{одиночн} \times C_5$,

где $МВЭ_{последов}$ — МВЭ для любого одиночного импульса в последовательности импульсов;

$МВЭ_{одиночн}$ — МВЭ для одиночного импульса;

$C_5 = N^{-1/4}$;

N – число импульсов в последовательности импульсов, ограниченное длительностью эмиссии.

(C_5 применяют только к импульсу длительностью менее 0,25 с).

В некоторых случаях это значение может стать ниже значения МВЭ, которое применялось для непрерывного облучения при той же пиковой мощности с тем же временем облучения. В таких условиях допускается использовать МВЭ для непрерывного облучения.

Если используются импульсы переменной амплитуды, следует оценивать импульсы каждой амплитуды отдельно, используя и требование по перечислению a), и для последовательности импульсов в целом.

Максимальная длительность облучения, для которой следует применить требование перечисления c), равна T_2 в диапазоне длин волн 400—1400 нм (см. таблицу 8) и 10 с — для бóльших длин волн. Если в пределах периода T_i проходят несколько импульсов (см. таблицу 3), то их рассматривают как одиночный импульс при определении N, а энергетическая экспозиция одиночного импульса добавляется при сравнении с МВЭ за период T_i с учетом того, что длительность одиночного импульса превышает 10^{-9} с.

Примечания

1 C_5 применяют исключительно к длительности импульсов короче 0,25 с.

2 Энергия любой группы импульсов (или подгруппы импульсов в последовательности импульсов), полученная за любое определенное время, не должна превышать МВЭ за это время.

3 Для импульсов различной ширины и разных интервалов между импульсами вместо требования по перечислению c) используют метод «общего числа импульсов за промежуток времени». МВЭ определяется длительностью по методу общего числа импульсов за промежуток времени, т. е. как сумма длительностей всех импульсов в интервале длительности излучения или длительности, которая меньше T_2. Импульсы с длительностью менее T_i определяют как импульсы с длительностью T_i. Если в длительности T_i оказывается два или более импульсов, то длительность такой группы импульсов принимается равной T_i. Для сравнения с МВЭ соответствующей длительности все отдельные импульсы энергетической экспозиции суммируют.

Этот метод эквивалентен требованию по перечислению c), когда среднюю энергетическую экспозицию импульсов сравнивают с МВЭ одиночного импульса, умноженного на C_5.

Таблица 3 — Длительность T_i, ниже которой группы импульсов суммируются

Длина волны, нм	Длительность T_i, с
$400 \le \lambda < 1\,050$	18×10^{-6}
$1050 \le \lambda < 1\,400$	50×10^{-6}
$1400 \le \lambda < 1\,500$	10^{-3}
$1500 \le \lambda < 1\,800$	10
$1800 \le \lambda < 2\,600$	10^{-3}
$2600 \le \lambda \le 10^{6}$	10^{-7}

5.3 Кратные длины волн

Если лазер излучает на нескольких сильно различающихся длинах волн или если на непрерывный режим накладываются импульсы, то определение степени опасности может быть сложным.

Необходимо учитывать, что облучения на различных длинах волн оказывают дополнительное воздействие пропорционально спектральной эффективности в соответствии с МВЭ, приведенной в таблицах 5—7, если.

a) длительность импульса или время экспозиции имеют один порядок и

b) спектральные диапазоны показаны как аддитивные с помощью обозначений O для облучения глаз и S для облучения кожи в таблице 4.

Таблица 4 — Аддитивные эффекты воздействия излучения на глаза O и кожу S в различных спектральных диапазонах

Спектральный диапазон[a)]	УФ—С и УФ—В 180—315 нм	УФ—А 315—400 нм	Видимый и ИК—А 400—1400 нм	ИК—В и ИК—С 1400—106 нм
УФ—С и УФ—В 180—315 нм	O S	—	—	—
УФ—А 315—400 нм	—	O S	S	O S
Видимый и ИК–А 400—1400 нм	—	S	O[b)] S	S
ИК—В и ИК—С 1400—10^6 нм	—	O S	S	O S

[a)] Для определения спектрального диапазона см. таблицу С.1.

[b)] МВЭ для глаз рассчитана для базового времени или длительности экспозиции не менее 1 с, тогда аддитивные фотохимические эффекты (400—600 нм) и аддитивные тепловые эффекты должны быть ограничены наиболее жестким используемым значением.

Если длины излучаемых волн не показаны как аддитивные, то опасности для глаз и кожи оценивают отдельно. При длинах волн, показанных как аддитивные, но имеющих длительности импульсов или время экспозиции одного порядка, необходима особая осторожность (например, при одновременном облучении импульсным и непрерывным излучением).

5.4 МВЭ протяженного источника

При облучении глаз от протяженных источников лазерного излучения в диапазоне опасности для глаз (например, для длин волн 400—1400 нм, см. 4.3.3) используют МВЭ, приведенные в таблице 6. Следует отметить, что обычно угол, стягиваемый источником α, уменьшается при увеличении расстояния от источника и соответствующее значение МВЭ может увеличиться. (Стягиваемый угол следует определять в том же положении, в котором определяют экспозицию.) Это особенно важно при определении расстояния опасности (например, НОГР) протяженного источника, так как значение МВЭ может не быть постоянным, а может увеличиться с расстоянием до $\alpha = \alpha_{min}$ (α_{min} = 1,5 мрад).

Значения МВЭ тепловой опасности для глаз, приведенные в таблице 6, являются функцией поправочного коэффициента C_6. Для источника со стягиваемым углом, большим чем α_{max}, где α_{max} = 100 мрад, значение C_6 постоянно и равно 66,7 (т. е. $\alpha_{max}/\alpha_{min}$). Для источника со стягиваемым углом, меньшим чем α_{min}, C_6 равен 1, и применяют значения МВЭ, приведенные в таблице 5.

Поправочный коэффициент C_6 определяют следующим образом:

$C_6 = 1$ . . . . . для $\alpha \le \alpha_{min}$;

$C_6 = \alpha / \alpha_{min}$ . . . . . для $\alpha_{min} < \alpha \le \alpha_{max}$;

$C_6 = \alpha_{max} / \alpha_{min}$ . . . . для $\alpha > \alpha_{max}$.

5.5 Опасные расстояния и зоны

5.5.1 Номинальное опасное для глаз расстояние

Для некоторых условий применения лазеров, особенно связанных с расходящимися или сканирующими пучками, длинной траекторией пучка или диффузными отражениями пучка, полезно знать расстояние, которое является опасным.

НОГР равно расстоянию, с которого значение излучения усредняется в пределах измеряемой апертуры и становится ниже значения МВЭ для оптически невооруженного глаза. При бóльших расстояниях опасности для невооруженных глаз нет, но возможна опасность в случае применения увеличительных оптических средств.

Следует учитывать возможное использование увеличительных оптических средств как обоснованно ожидаемое событие, тогда используют расширенное номинальное опасное для глаз расстояние (РНОГР). Это расстояние определяют на основе увеличения облученности (на поверхности глаза, в пределах соответствующей ограничивающей апертуры), которая может возникнуть при использовании увеличительных оптических средств. За пределами РНОГР возможно использование увеличительных оптических средств (см. 4.3.4).

Знание расстояния, опасного для глаз, полезно при использовании лазеров с расходящимся пучком, когда оно может быть относительно коротким, и опасность определяется непосредственной близостью лазерной апертуры. Это может также быть важно для коллимированных пучков лазеров, которые используются на больших расстояниях вне помещений. Особое внимание следует уделить используемым вне помещений лазерам классов 1М и 2М с коллимированным пучком (т. е. когда при большом диаметре пучка излучение превышает уровень класса 1 по условию 1 из процедуры классификации, определенной в МЭК 60825-1). Хотя эти лазеры не представляют опасности для невооруженного глаза, расстояние, на котором при использовании увеличительных оптических средств возникает опасность для глаз, может быть очень большим. Если возможно облучение в общественных местах, необходимо учитывать возможность использования увеличительных оптических средств, таких как бинокль.

НОГР и РНОГР зависят от геометрии пучка так же сильно, как и от значения выходного сигнала лазера. Например, возможно перефокусировать или коллимировать пучок посредством оптического компонента, помещенного на некотором расстоянии от источника, и таким образом увеличить и НОГР, и РНОГР.

В некоторых случаях полезно определить расстояние опасности для кожи аналогично НОГР.

5.5.2 Номинальная опасная для глаз зона

При известных НОГР и РНОГР и местах безопасного размещения лазера, обстоятельств его использования определяют зону или трехмерное пространство вокруг лазерной апертуры, в пределах которых возможно повышение опасности облучения. Это пространство, зону опасности называют «номинально опасной для глаз зоной» (НОГЗ), если критерии аналогичны для НОГР, или расширенной номинально опасной для глаз зоной (РНОГЗ), если критерии аналогичны для РНОГР.

Из-за возможного использования увеличительных оптических средств людьми, не связанными с эксплуатацией лазера, особенно если лазеры используются вне помещения, важно выяснить опасность облучения по всей РНОГЗ, а не только в НОГЗ. При работе вне помещения, если распространение пучка ограничено грунтом, деревьями или иными особенностями ландшафта, НОГР не может превышать расстояния прямой видимости до них.

Если доступ в РНОГЗ может быть ограничен и надежно контролируется, то ограждение зоны опасности необязательно.

6 Сопутствующие факторы опасности

6.1 Дополнительные опасности для здоровья

Использование лазеров может повлечь за собой сопутствующие опасности в дополнение к прямому облучению глаз или кожи лазерным излучением. Эти опасности не затрагиваются при классификации лазеров, т. к. могут сопутствовать даже лазерным изделиям класса 1. Некоторые из них, например, удар током, могут быть опасными для жизни.

Контроль сопутствующих опасностей относится прежде всего к изготовителям проектировщикам оборудования, предполагает наличие письменных инструкций по безопасности, которые изготовитель предоставляет пользователю. Однако такие опасности не могут быть полностью устранены при разработке проекта (например, задымление), но, если лазер используется в иных целях или неподобающим образом, отличным от прямого назначения, полную ответственность несет пользователь.

Перечень некоторых сопутствующих опасностей приведен ниже. Пользователи должны провести необходимые мероприятия с целью обеспечить адекватную защиту от всех опасностей, которые могут произойти при эксплуатации лазерного оборудования. Ввиду разнообразия опасностей, связанных с эксплуатацией лазерного оборудования, в настоящем разделе изложен минимум требований, а пользователи должны учитывать любые национальные или региональные требования или регламенты. При организации мер по предотвращению опасностей, отличных от лазерных, целесообразно привлекать компетентных лиц, имеющих соответствующий опыт.

6.2 Сопутствующие факторы опасности при работе с лазерами

6.2.1 Электричество

В большинстве лазеров используется высокое напряжение, особенно опасны импульсные лазеры из-за энергии, накопленной в батареях конденсаторов. (Накопленная энергия может остаться даже после того как оборудование было отключено от электрической сети.) Номинальное значение мощности электропитания лазера обычно намного выше, чем значение излучаемой лазером энергии. При нормальной эксплуатации лазерное оборудование должно быть полностью защищено от возможности поражения человека электрическим током. Однако во время обслуживания, когда защитная блокировка может быть отключена, а защитный кожух сдвинут, может существовать серьезная опасность. Следует предпринять все меры предосторожности, включая удаление накопленной энергии до начала работ по обслуживанию.

6.2.2 Сопутствующее излучение

Потенциально опасные уровни излучения, кроме излучения лазера, возможны от лазерного оборудования, плазмы, которая может генерироваться косвенно при взаимодействии лазерного пучка и материала мишени. Такие излучения могут включать в себя рентгеновские лучи, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное, микроволновое и радиочастотное излучение. Потенциальные источники этих излучений указаны ниже.

Рентгеновские лучи могут появиться через взаимодействие мощных лазерных пучков с мишенями из тяжелых металлов и высоковольтными электронными лампами с термокатодом, используемыми для электропитания лазера.

Ультрафиолетовое излучение, видимое, инфракрасное излучение могут появиться от разрядных трубок непрерывных лазеров, ламп вспышек и источников накачки и лазерно-индуцированной плазмы.

Микроволновое излучение и радиочастотное излучение могут появиться в лазерах с высокочастотной накачкой и излучаться оборудованием при отсутствии должного ограждения.

6.2.3 Другое лазерное излучение

Лазерное излучение возможно при длинах волн, отличных от основной длины волны излучения лазера, для отдельных типов лазеров, особенно при использовании оптических преобразователей частоты (например, удвоение частоты) и оптической накачки.

6.2.4 Опасные вещества

Испаряющиеся материалы мишени и продукты реакции многих лазеров (особенно краски и газы, используемые в эксимерных лазерах) могут быть ядовитыми и канцерогенными. У растворителей красок, используемых во многих лазерах, есть способность проникновения через кожу в тело. Они могут содержать летучие вещества и не должны вдыхаться. Жидкости, используемые в некоторых оптически активных компонентах (например, при модуляции добротности лазера и удвоения частоты), так же как моющие растворы и другие материалы, используемые в работе с лазерами, например линзы из селенида цинка, также могут быть опасными. Следует обеспечить их надлежащее хранение и обработку.

6.2.5 Дым

Лазерные изделия класса 4, особенно используемые при индустриальной обработке материалов и в лазерной хирургии, могут выбрасывать опасные частицы и побочные газообразные продукты в атмосферу при взаимодействии лазерного пучка с обрабатываемым материалом. Дым может быть ядовитым, вредным, опасным даже при краткосрочном воздействии.

Воздействие от дыма зависит прежде всего от обрабатываемого материала, длительности и концентрации.

6.2.6 Шум

Разряд конденсаторной батареи, служащей источником электропитания лазера, может сильно повысить уровень шума и вызвать повреждение уха. Сверхзвуковые излучения, периодически повторяющийся шум от импульсных лазеров также могут быть вредными. Некоторые лазеры с воздушным охлаждением существенно повышают уровень шума. При невозможности устранить шум следует защищать уши.

6.2.7 Механические опасности

Механические опасности могут исходить непосредственно от лазерного оборудования, включая вспомогательное оборудование, например газовые баллоны, особенно если оборудование должным образом не защищено или перемещается вручную. Перемещение кабелей и шлангов насосно-компрессорных труб циркуляции воды может представлять опасность для нормальной работы. Порезы возможны от острых объектов, например оптоволокна. Средства переноса пучка и робототехнические системы, изменяющие положение при дистанционном управлении, могут нанести серьезное повреждение. Большие заготовки (такие как листовой металл) при ручном транспортировании могут привести к порезам, размозжению тканей.

6.2.8 Воспламенение, взрыв и термические повреждения

Излучение мощного (класс 4) лазера может вызвать возгорание материалов мишени. Эффект может возрасти в богатой кислородом среде, используемой в некоторых случаях лазерной обработки материалов.

Излучение даже от лазеров низшего класса, особенно в малых пространствах, может вызвать взрывы горючих газов или пыли, летающей в воздухе.

Уровень мощности свыше 35 мВт, выходящей от одномодового оптического волокна, может быть достаточным, чтобы вызвать возгорание в окружающей среде.

Лампы высокого давления, используемые в оптических системах накачки, другие компоненты, такие как конденсаторные батареи, могут взорваться. Внешние зеркала с управляемым положением диаграммы направленности, которые могут рассеивать значительные количества энергии от падающих мощных лазерных пучков, могут разрушиться.

Лазерное оборудование может быть пожароопасным из-за огнеопасных компонентов, пластмассовых частей и т. д., которые могут перегреться или загореться в случае его неправильной эксплуатации.

6.2.9 Высокая температура и холод

Внутренние части некоторых лазеров могут быть горячими, а использование зеркал с управляемым положением диаграммы направленности в мощных промышленных лазерах может привести к высоким температурам. Опасно также криогенное охлаждение лазерного оборудования.

6.3 Опасности, возникающие от окружающей среды

6.3.1 Температура и влажность

Чрезмерно высокие или низкие температуры окружающей среды или высокие уровни влажности могут повлиять на работу лазерного оборудования, включая характеристики встроенных защитных устройств, и создать угрозу безопасной эксплуатации. Конденсация на оптических компонентах может повлиять на передачу пучка через систему.

6.3.2 Механическое сотрясение и вибрация

Механическое сотрясение и вибрация могут повлиять на работу лазерной системы и вызвать отклонение пучка от заданной оси, которое может быть опасным.

6.3.3 Атмосферные эффекты

Пучок мощного лазера может зажечь содержащиеся в окружающей среде пары растворителя, пыль, воспламеняющиеся газы. Такое воспламенение может также вызвать взрывы.

6.3.4 Электромагнитная и радиочастотная интерференция

Облучение излучаемыми электромагнитными, магнитными или электрическими полями, высокие импульсы напряжения в кабелях питания или передачи данных могут мешать работе действующего лазерного оборудования, включая характеристики встроенных защитных устройств, и поставить под угрозу безопасную работу.

6.3.5 Прерывание энергоснабжения или отклонение его от заданного режима

Прерывание энергоснабжения или отклонение его от заданного режима может повлиять на работу системы безопасности лазера.

6.3.6 Проблемы, связанные с программным обеспечением

Ошибки при программировании, когда работа лазера и его защитных систем полностью или частично определяется программным обеспечением, могут привести к серьезным и непредсказуемым последствиям.

6.3.7 Оценка эргономического и человеческого факторов

Неправильное расположение лазера и связанного с ним оборудования, недостаток места, осложняющие рабочий процесс, могут увеличить вероятность возникновения несчастных случаев. Кроме того, человеческий фактор как результат деятельности человека в производственных условиях может повлиять на поведение человека, связанное с безопасностью. Эти факторы включают в себя:

- личные качества, которые включают интеллектуальные, умственные и физические особенности человека и определяют его работоспособность, восприятие рисков на рабочем месте, отношение к безопасности;

- рабочие качества, определяемые отношением к задачам или функциям, которые необходимо выполнять, влияние используемого оборудования;

- организационные аспекты, определяющие культуру безопасности в организации, в пределах которых человек должен работать, различные влияния и воздействия (реальные или предполагаемые), перед которыми человек может оказаться.

Человеческий фактор проявляется в большинстве связанных с работой несчастных случаев и требует целевого контроля физических опасностей, которые могут выявиться при использовании лазерного оборудования.

6.4 Контроль сопутствующих факторов опасностей

Любая обоснованно ожидаемая опасность, которая может возникнуть во время установки, эксплуатации, обслуживания лазерного оборудования или из-за его расположения, должна быть идентифицирована и соответственно оценена. Необходимые защитные меры должны быть определены и применяться на основе оценки риска (см. раздел 7) с учетом всех соответствующих национальных или региональных требований.

7 Оценка рисков

7.1 Опасности и риски

Контроль опасностей, которые могут возникнуть во время установки, эксплуатации, обслуживания лазерного оборудования или из-за его расположения, должен быть основан на оценке риска. Опасность — любое физическое состояние, химический или биологический фактор, который способен нанести вред. Вред в обычном понимании означает телесное повреждение, но может также включать в себя финансовые потери, например повреждение оборудования или собственности или потери из-за простоя. Есть опасности, включающие все аспекты. В контексте лазерного оборудования лазерное излучение — опасность, но есть дополнительные опасности, которые могут быть связаны с использованием лазерного оборудования (например, электрические явления, дым, газы с высоким давлением), некоторые из которых описаны в разделе 6.

Риск — сочетание вероятности появления и серьезности вреда, который может быть причинен. Когда есть возможность появления опасности, есть также риск нанесения травмы, но не всегда необходимо или возможно полностью исключить риск. Необходимо уменьшить риск во время работы лазерного оборудования (а также обоснованно ожидаемую вероятность отказа и неправильного применения) до приемлемого уровня. Приемлемый уровень варьируется широко в зависимости от требований и обстоятельств использования лазерного оборудования и является вопросом для обсуждения. В некоторых случаях возможно сопоставление риска с подобными рисками в других видах деятельности.

Классификация (см. 4.1.2) основана на максимальном возможном уровне воздействия излучения на человека во время нормальных условий эксплуатации лазерного оборудования. Класс лазерного оборудования определяется общими признаками опасности излучения и предполагает определенные защитные меры контроля, приведенные в таблице 1. Более общие проблемы, включая неправильное применение и отказ, также влияют на уровень риска. Более детальное рассмотрение вероятности и серьезности поврежде-

ний в соответствии с оценкой риска дает пользователю больше возможностей в выборе соответствующих мер контроля. Это особенно полезно при определенных формах применения, когда меры контроля, приведенные в таблице 1, являются несоответствующими, недостаточными или необоснованно ограничительными.

Когда это возможно, оценка риска, связанного со специфическим процессом применения лазерного оборудования, должна быть предпринята перед его покупкой. Тогда предполагаемый пользователь будет полностью извещен обо всех аспектах безопасности, связанных с расположением и использованием лазерного оборудования. Соответственно все необходимые приготовления могут быть сделаны до его поставки.

Сокращение риска до приемлемого уровня — итерационный процесс. При оценке риска возможны различные подходы, самые существенные шаги описаны ниже.

7.2 Оценка риска: этап 1 — определение потенциально опасных ситуаций

Самой важной частью оценки риска является рассмотрение каждой обоснованно ожидаемой опасной ситуации, которая может возникнуть при использовании лазерного оборудования, включая установку, нормальную эксплуатацию, обслуживание, ремонт и обоснованно ожидаемые неправильное применение или отказ. Учитывают специфику обслуживания, регулирования и другие работы, рекомендуемые изготовителем. Перечень нештатных ситуаций может быть составлен при системном рассмотрении всех действий или бессистемно методом мозгового штурма.

Три основных вопроса, на которых должен сосредоточиться пользователь при рассмотрении потенциально опасных ситуаций, см. 7.2.1, 7.2.2 и 7.2.3.

7.2.1 Сопутствующие факторы опасности

Важно рассмотреть в целом все возможные опасности и обстоятельства, при которых эти опасности могут возникнуть, принимая во внимание тип лазерного оборудования (его класс, условия, при которых опасное облучение может произойти, вид возможного вреда), выполняемые задания или процесс. Хотя облучение от лазера является очевидной опасностью, но она, как правило, не является единственной. В разделе 5 указаны многие сопутствующие опасности, которые могут выявиться при эксплуатации лазерного оборудования. Меры контроля, принятые на месте при оценке риска, способны эффективно предотвратить некоторые из этих опасностей (за исключением работ по техническому обслуживанию). Составление начального списка учета средств контроля (они включаются в лазерное изделие изготовителем или осуществляются при его установке) относится к компетенции пользователя.

7.2.2 Внешние условия при работе лазера

Воздействие лазера на окружающую среду включает в себя:

- местоположение лазерного оборудования, например, в здании в пределах выделенной для лазера рабочей области; внутри, в пределах доступного или открытого рабочего пространства; снаружи;
- состояние рабочей области с точки зрения размещения оборудования, например, влияние на оборудование температуры, влажности, вибрации, пыли и т. д. и возможность помех, повреждения при столкновении с людьми или движущимся оборудованием;
- состояние рабочей области с точки зрения персонала, например, свободная или загроможденная, убранная или загрязненная, хорошо освещенная или темная, простота использования и отсутствие дискомфорта при операциях с лазерным и связанным с ним оборудованием, простота или сложность выполняемой задачи;
- уровень доступа, например: локализованная ограниченная область в пределах помещения, не имеющего открытого доступа; неограниченная область в пределах помещения, не имеющего открытого доступа; в области открытого доступа.

7.2.3 Опасности для людей

Проблемы, касающиеся опасностей для людей, включают в себя число опасностей, уровень их понимания, защиту и обучение персонала. Среди людей, подверженных опасностям, могут быть квалифицированные и обучаемые рабочие, обслуживающий персонал, служащие, которые могут не осознавать их наличия, посетители, дети, которые не полностью понимают предупредительные знаки или не правильно оценивают имеющиеся опасности.

7.3 Оценка риска: этап 2 — оценка риска для потенциально опасных ситуаций

Рассматривают два фактора риска: вероятность поражения и серьезность поражения, которые могут быть рассмотрены отдельно для каждого элемента в списке потенциально опасных ситуаций.

Иногда сложно определить число влияющих факторов, но это не всегда необходимо. Некоторые становятся очевидными после этапа 1 оценки риска, когда выявляется, что недопустимый риск существует и необходимо устранить или уменьшить его.

Основное внимание в примерах уделяется лазерному пучку. Пользователи должны также изучить сопутствующие опасности и риски, возникающие от этих опасностей.

Вероятность и серьезность поражения являются составляющими риска, их изучение полезно и важно из-за неопределенности степени вреда, который может быть нанесен, независимо от фактических последствий, если уделять внимание только вероятности облучения свыше МВЭ. Такая оценка риска, известная как «детерминированная», является основной при определении риска в лазерной безопасности. Акцент делается на оценке обстоятельств, условий и событий, при которых опасные уровни облучения могли произойти, а меры контроля (см. 6.4) связывают с необходимостью гарантии того, что специфические обстоятельства, условия или события, которые могли привести к травме (независимо от ее серьезности), более не повторятся.

Более подробный способ оценки риска, который в некоторых случаях используют, описан в 7.3.1—7.3.3.

7.3.1 Частота

Следует отнести вероятность поражения, которое могло стать результатом любой из опасностей, принимая во внимание частоту облучения, продолжительность облучения и вероятность того, что опасности нельзя избежать, к одной из трех категорий:

- вероятно — поражение будет происходить часто;

- возможно — поражение может происходить иногда/изредка;

- маловероятно — вероятность поражения очень низкая.

7.3.2 Тяжесть поражения

Следует отнести тяжесть поражения к одной из трех категорий (четвертая категория может быть добавлена при повреждении производственного оборудования или причинения вреда окружающей среде):

- незначительная — небольшое неудобство; может потребоваться скорая помощь, но полное восстановление происходит быстро;

- умеренная — более серьезный эффект; более длительное время восстановления, вероятно, что потребуется курс лечения;

- большая — серьезная рана, требующая срочного медицинского вмешательства; возможна потеря трудоспособности (включая потерю зрения) или смерть.

7.3.3 Общий риск

Оценивают общий риск и определяют его приемлемость.

Некоторые оценки описаны в 7.3.3.1—7.3.3.3.

7.3.3.1 Глаза или кожа

a) Последствия поражения глаз обычно бывают более серьезными, чем аналогичные поражения кожи.

b) На любом конкретном уровне облучения ожоги большой области кожи будут более серьезными, чем ожоги небольшой области.

c) Лазеры очень высокой мощности могут вызвать чрезвычайно серьезные телесные повреждения, в том числе приводящие к смерти.

7.3.3.2 Длина волны лазера

a) Возможен «накопленный» риск поражения организма, в том числе приводящего к раку, от повторного или длительного облучения кожи ультрафиолетовым излучением.

b) Глаза могут быть повреждены лазерным излучением достаточной мощности на любой длине волны (диапазона волн, безопасного для глаз, не существует).

c) Даже локализованные, относящиеся к сетчатке глаза, повреждения могут привести к серьезной потере зрения.

d) Раны при поверхностном повреждении роговой оболочки могут зажить; в случае проникновения их глубже в роговую оболочку — нет.

e) Внезапное и неожиданное облучение глаз видимым лазерным излучением даже на уровнях значительно ниже МВЭ может отвлечь и ослепить.

7.3.3.3 Продолжительность воздействия лазерного излучения

Продолжительность воздействия лазерного излучения может быть ограничена скоростью перемещения при реакции на боль, сильным световым воздействием или чувствительностью к тепловому воздействию. Фотохимические повреждения обычно не возникают из-за непосредственных зрительных ощущений.

7.4 Оценка риска: этап 3 – выбор мер контроля

Если уровень риска недопустимо высок, вводят меры контроля, которые снижают его до приемлемого уровня. Меры контроля представлены в разделе 8. При выборе соответствующих мер контроля технический контроль применяют в пределах установленной политики в части техники безопасности, рассматривают как основополагающее средство для уменьшения риска поражения лазером. Личные защитные средства используют в качестве последней меры, когда совокупность технических и административных средств не может обеспечить достаточный уровень защиты.

После того как меры контроля, связанные со снижением рисков, определены, процедура оценки рисков, описанная выше, должна быть повторена, и в случае необходимости все работы повторяют снова, пока риски от всех потенциально вредных ситуаций не уменьшатся до приемлемого уровня. Эти действия следует повторять, пока предложенные меры не будут реализованы при нормальном функционировании лазерного оборудования с целью подтвердить, что остаточный риск является приемлемым.

8 Меры контроля

8.1 Общие положения

Если при оценке риска (см. раздел 7) выяснилось, что его уровень высок, то применяют защитные меры контроля. Это требование относится к использованию любых лазеров, классифицированных изготовителем или проданных без классификации для встраивания в конечный продукт, или специально сконструированных для конкретного использования, проведения экспериментов или получения оценочных результатов (оценка риска для лазерного оборудования классов 1 и 2 обычно не требуется, но при этом всегда рассматривают необычные или специфические обстоятельства, которые могут потребовать специальных мер контроля).

В первую очередь всегда рассматривают техническую возможность использования лазера низшего класса. Необходимость применения опасного лазера должна быть оправдана до его покупки и использования.

Если лазерное изделие используют в целях (или способом), не предусмотренных(ом) изготовителем, могут возникнуть опасности, которые потребуют дополнительных защитных мер контроля, отличающихся от определенных изготовителем.

Меры контроля должны быть сконцентрированы по трем направлениям: технические средства контроля, административные средства контроля и личные защитные средства. Там, где возможно, опасности полностью устраняют непосредственно в источнике излучения при помощи разработки технических средств контроля (например, заключением пучка в кожух).

Технические средства контроля включают в себя конструктивные особенности лазерного оборудования, связанные с прохождением лазерного пучка, учтенные изготовителем или пользователем, установку защитных барьеров и охраны с целью предотвратить доступ людей к лазерному излучению.

Административные средства контроля охватывают все общие вопросы, процедурные вопросы (правила, связанные с конкретным местом работы лазерного оборудования), использование предупреждающих знаков опасности, запреты, обучение, инструктаж, распределение обязанностей.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) — это защитные средства, которые использует персонал. В контексте лазерной безопасности они относятся прежде всего к использованию лазерных защитных очков, но могут также включать в себя части специальной одежды (например, перчатки и маски на лицо) для защиты кожи, респираторы для защиты от пыли и дыма, наушники для защиты от чрезмерного шума.

После утверждения всех мер, связанных с использованием лазерного оборудования, основное внимание уделяют средствам технического контроля с целью уменьшить риски, связанные с поражением лазером.

Рассматривают административные средства контроля, охватывающие общие вопросы и безопасные системы работы. Использование средств индивидуальной защиты рассматривается как крайний случай, когда совокупность технических и административных средств контроля не обеспечивает достаточного уровня защиты. При использовании СИЗ требуется адекватный уровень административного контроля, позволяющий полностью контролировать их использование.

Снижение риска до приемлемого уровня — итерационный процесс, связанный с идентификацией опасностей при эксплуатации лазерного оборудования или обоснованно ожидаемым неправильным его использованием (с тем, чтобы учесть обоснованно ожидаемые возможности отказа), оценка риска вреда как результата облучения и установление мер контроля, которые могут снизить риск.

Если эксплуатацией занимаются несколько организаций, то техническими требованиями и установкой лазерного оборудования должна заниматься отдельная компания (возможно привлечение изготовителя), уполномоченная поставлять и устанавливать оборудование, а также сотрудники покупателя. Важно, чтобы их обязанности были ясно определены. Вопросы ответственности за каждый определенный аспект безопасности и систему в целом лучше согласовать заранее в письменной форме.

8.2 Снижение опасности

Анализ предполагаемого использования лазера в зависимости от уровня рисков дает возможность достигнуть минимального уровня опасности (и, соответственно, снижения уровня риска). Снижение уровня риска достигается, например, уменьшением эмиссии лазера, увеличением диаметра пучка или использованием различных длин волн. Пользователь всегда должен быть уверен в достижении минимальной степени опасности, соразмерной с намеченным применением лазера.

8.3 Ограждения для защиты от опасности

8.3.1 Заключение пучка в защитный корпус

Использование защитного корпуса следует рассматривать как средство предотвращения доступа персонала к опасным уровням лазерного излучения. Защитный корпус позволяет предотвратить эмиссию лазерного излучения от оборудования и доступ персонала в зоны возможного лазерного излучения.

Все защитные корпусы лазеров изготавливают из соответствующих материалов, которые безопасны и пригодны для целей предполагаемого использования с учетом условий окружающей среды.

Универсальным материалом для изготовления защитных корпусов является металл, а в некоторых диапазонах длин волн — стекло или пластмассы. Необходимые свойства материалов для защитных корпусов — устойчивость к внешним воздействиям (в частности, индифферентность к механическому воздействию, высокой температуре и свету) и достаточная оптическая плотность на длине волны лазерного излучения. Стены помещения можно расценивать как защитный корпус, если есть необходимость избавить персонал от физического присутствия в зоне работы лазера.

Мощные лазеры класса 4, используемые для резки, сварки и других форм обработки материалов, представляют дополнительную опасность из-за возможности лазерного пучка проникнуть через непрозрачный материал посредством расплавления, прожигания, испарения или разрушения. В качестве руководства при оценке пригодности материалов для мощного лазерного излучения см. МЭК 60825-4. В целом защитный корпус должен обеспечивать защиту от лазерного излучения, которое может попадать на его внутреннюю поверхность.

Для защитного корпуса предусматривают возможность предотвращения непреднамеренного или несанкционированного перемещения его или какой-либо его части, когда открывается доступ к лазерному излучению (см. 8.3.3).

8.3.2 Смотровые окна

Для наблюдения (осмотра) можно использовать окна, позволяющие видеть части лазерного корпуса во время работы лазера, однако предпочтительнее установить системы дальнего наблюдения (телевидение). Смотровые окна должны быть изготовлены из надлежащих материалов, чтобы наблюдение внутренних частей корпуса не ставило под угрозу его защитные свойства.

Метод вычисления необходимой оптической плотности материала окна на длине(ах) волны(волн) лазерного излучения — тот же, что и при вычислении для защитных очков (см. 8.4.5.2), но оценка обоснованно ожидаемого максимального облучения будет различной. В частности, через смотровое окно случайное облучение может иметь намного большую продолжительность, чем при использовании защитных очков (см. МЭК 60825-4).

8.3.3 Защитная блокировка

8.3.3.1 Назначение защитной блокировки

Доступ к установленному пользователем защитному корпусу должен контролироваться соразмерно уровню риска (см. таблицу 9). Если существует обоснованно ожидаемый риск нанесения серьезного вреда здоровью из-за небрежного, случайного или даже злонамеренного открытия или удаления части корпуса, следует контролировать лазерную опасность техническими средствами (например, при помощи защитной блокировки), позволяющими предотвратить доступ к лазеру или отключить лазерную эмиссию (см. также 8.4.2 и приложение А).

Инструкции для устанавливаемых пользователем блокировок приведены ниже и предлагаются в качестве рекомендаций, но не рассматриваются как производственные требования (производственные требования для лазерных изделий определены в МЭК 60825-1).

8.3.3.2 Конструирование защитных систем блокировки

Для блокировок, предназначенных для выполнения функций по безопасности в критических ситуациях, рекомендуются:

a) механические выключатели, конструктивно обеспечивающие принудительный разрыв цепи (см. А.2.2, приложение А). Пружина распрямляется при срабатывании выключателя блокировки, предотвращая образование дуги или риск неустойчивой работы;

b) бесконтактные переключатели; полезны на раздвижных дверях. Такие переключатели кодируют (т. е. обе части конструктивно работают как единое устройство), чтобы избежать случайного раскрытия;

c) системы блокировки; конструкция систем должна обеспечивать, чтобы одиночная ошибка в любой части цепи не вела к потере защитной функции. Одиночная ошибка должна быть обнаружена прежде, чем система будет возвращена в исходное положение (пример обоснованно ожидаемого события — замыкание контакта реле);

d) прерывание лазерной эмиссии; возможно при выключении электропитания лазера, а для импульсных лазеров должно сопровождаться сбросом любой остаточной энергии, которая может стать источником следующего импульса, что обычно обеспечивается изготовителем при проектировании изделия.

8.3.3.3 Блокировки с возвратом в исходное положение

Хорошо зарекомендовали себя на практике блокирующие системы, сконструированные так, чтобы после срабатывания система могла быть легко перезагружена (например, кнопкой сброса).

Сброс блокирующей системы не должен быть возможен, пока не устранены ошибки всех защитных функций и защитных устройств.

При возврате блокирующей системы в исходное положение должна быть исключена возможность самостоятельного перезапуска лазера до готовности системы принять команду запуска.

8.3.3.4 Блокировки с переходом на ручное управление

Блокирующие системы с возможностью перехода на ручное управление, разрешающее доступ для обслуживания или регулирования, должны соответствовать следующим требованиям:

предполагается, что нормальная работа при отключении блокировки не будет восстановлена, когда панель доступа к лазерному излучению возвратится в свое обычное положение. Это требование обеспечивается, например, ограничением продолжительности ручного управления или проектированием изделия с механизмом перехода на ручное управление.

Намеренное отключение блокировки должно сопровождаться четким визуальным или звуковым сигналом тревоги.

Если блокировкой можно управлять из внешней области работающего лазера, то это должно быть возможно только посредством закодированного или управляемого ключом выключателя для предотвращения такой возможности для неуполномоченного персонала.

8.4 Снижение опасности

8.4.1 Предотвращение доступа

Доступ людей при обоснованно ожидаемой опасности лазерного излучения должен быть предотвращен техническими средствами. Если необходимый уровень защиты не достигнут, то доступ людей к опасным уровням лазерного излучения или к другим опасностям, связанным с работой лазера, должен быть предотвращен, насколько это практически выполнимо, с использованием барьеров, канала для вывода пучка, локализацией в корпусе, обеспечением доступа только уполномоченному персоналу, когда это необходимо.

8.4.2 Зоны, где используется лазер

Зону, где используется лазер, определяют везде, где обоснованно ожидается риск вреда как результат использования лазерного оборудования. В обычном понимании зона, где используется лазер, — это место, в пределах которого существует опасность лазерного излучения и, соответственно, необходим эффективный контроль. Такие зоны должны быть ясно обозначены, доступ к ним разрешен только уполномоченному обученному персоналу и людям под их контролем.

Границы зоны, где используется лазер, должны быть огорожены везде, где обоснованно ожидается риск причинения вреда (включая обоснованно ожидаемые неисправности лазерного или связанного оборудования и неисправности при правильном проведении процедур).

Предупредительные знаки наносят с внешней стороны зоны, где используется лазер. Они должны быть четкими, хорошо видимыми и читаемыми. Знаки должны содержать символ лазерной опасности, показанный на рисунке 1, указание(я) типа(ов) опасности(ей), на ограничение доступа и меры предосторожности, которые следует предпринять на входе. Может быть полезно включить в указания имя человека, ответственного за безопасность в зоне, от которого может быть получена необходимая информация.

Полное физическое ограждение зоны, где используется лазер, обычно желательно, но не всегда необходимо при условии, что:

a) доступ в зону контролируется и

b) люди вне зоны не подвергаются неблагоразумному риску.

Блокировку двери или других путей входа в зону, в которой используется лазер, следует рассматривать с точки зрения наличия существенных опасностей и невозможности контроля доступа административными средствами и, особенно, при необходимости использования СИЗ в зоне использования лазера. Если блокирующие устройства установлены на путях входа в зону, они могут быть подключены соединителем дистанционной блокировки к лазерам классов 3В и 4 с целью прерывания эмиссии в случае, если блокирующее устройство активизировано при возможности входа в зону. Допускается использование других возможностей функционирования блокировки с целью прерывания эмиссии (например, соединение с устройством подачи электрического питания лазера или прерывателем пучка). Примеры зон использования лазера с учетом класса лазера приведены в таблице 9.

Если по эксплуатационным причинам необходим вход или выход в контролируемую и защищенную блокировками зону использования лазера, допускается использование блокировок с переходом на ручное управление (см. 8.3.3.4). Такая система является открытой, поэтому возможна эксплуатация с нарушением правил, однако необходимо найти компромисс между эффективностью эксплуатации зоны использования лазера и возможностью хотя бы временного прекращения работы системы защитной блокировки. Аппаратуру блокировки с переходом на ручное управление не следует применять без тщательного исследования ее использования, включая неправильное. Если прерывание лазерной эмиссии неприемлемо, а блокировка с переходом на ручное управление не обеспечивает удовлетворительное решение (например, при использовании в медицинских целях), то можно использовать, например, закодированные или управляемые ключом предохранительные электромагнитные дверные замки, имеющие кнопки, позволяющие открыть дверные замки в случае необходимости и выпустить людей в чрезвычайной ситуации (т. е. доступные внутри и снаружи зоны использования лазера).

Освещенные предупреждающие знаки могут использоваться за пределами зоны использования лазера для указания на то, что эксплуатируется лазер и дверь (если установлена) заблокирована. Эти знаки должны ясно указывать на то, когда вход в зону безопасен, а когда опасность существует (см. 2.5).

При установке кнопок аварийного останова (обычно кнопка красного цвета) во внутренней части зоны для прекращения опасной лазерной эмиссии в случае чрезвычайной ситуации следует рассмотреть также возможность возникновения других рисков. Специальные требования относительно безопасности на рабочем месте для разных стран также должны соблюдаться.

8.4.3 Местные правила и процедуры

Административный контроль должен проводиться в форме утвержденных документов и процедур, которые могут быть составлены для конкретной организации, по месту расположения оборудования и соответствовать стандартным образцам. Документы и процедуры должны включать в себя:

a) описание и назначение оборудования или процесса;

b) имя и рабочее место начальника службы лазерной безопасности и сотрудника, ответственного за лазерное оборудование;

c) имена работников, имеющих разрешение на работу, ремонт или обслуживание лазерного оборудования;

d) процедуры, которые будут приняты для эксплуатации, ремонта или обслуживания лазерного оборудования (где это существенно); они должны включать в себя необходимые меры предосторожности, в том числе использование средств индивидуальной защиты, использование и безопасное хранение управляющих ключей;

e) действия, которые необходимо предпринять в случае отказа оборудования или наступления других чрезвычайных ситуаций;

f) процедуру составления рапорта о происшествии и действиях, предпринятых при несчастном случае;

g) подробные требования, регламентирующие разрешение проведения опасных операций, например процедуры утверждения на текущее обслуживание (разрешение на работу).

Местные правила должны пересматриваться регулярно, с тем чтобы гарантировать соответствие их текущим требованиям.

8.4.4 Локальное уменьшение риска

8.4.4.1 Общие меры предосторожности

В пределах зон использования лазера должны быть предприняты меры, позволяющие уменьшить риск поражения людей, допущенных к работе. Эти меры должны включать в себя:

a) соответствующий уровень обучения персонала;

b) достаточное освещение помещения;

c) нормальные условия окружающей среды, хорошую организацию рабочего места;

d) обеспечение контроля над управляющими ключами;

e) безопасную установку лазера и всех компонентов относительно направления распространения пучка;

f) безопасный метод выравнивания пучка;

g) прерывание пучка в конце заданной траектории (если необходимо);

h) использование аттенюатора пучка или прерывателя, установленного на лазерных изделиях классов 3B и 4, для прерывания лазерной эмиссии на короткий период времени в случае необходимости. Если лазерная эмиссия не требуется в течение более длинных промежутков времени, лазер должен быть выключен;

i) заключение мощного пучка в корпус (если это практически выполнимо);

j) удержание пучка выше или ниже уровня глаз (если это практически выполнимо);

k) заключение пучка в пределах определенных областей, которые являются настолько малыми, насколько это разумно и практически выполнимо (например, удержание пучка в пределах границ оптической таблицы; размещение барьеров, предотвращающих доступ людей, если открытый пучок пересекает пол);

l) использование экранов, жалюзи или занавесок для ограничения лазерного излучения (в качестве руководства в выборе подходящих материалов см. МЭК 60825-4);

m) использование технологических карт.

8.4.4.2 Зеркальное отражение

Следует обращать особое внимание на предотвращение случайных зеркальных отражений лазерного излучения. Зеркала, линзы и делители пучка должны быть жестко закреплены, и их контролируемые перемещения должны проводиться только во время работы лазера.

Зеркальное отражение излучения лазерных изделий классов 1M и 2M от поверхностей, которые могут сфокусировать пучок, может представлять собой опасность для незащищенных глаз (прямое облучение излучением от лазерных изделий классов 1M и 2M для незащищенного глаза обычно неопасно).

Отражающие поверхности, кажущиеся диффузными, могут отразить значительную часть пучка зеркально, особенно в инфракрасном спектральном диапазоне, что может представлять потенциальную опасность на бóльших расстояниях, чем ожидается от обычных диффузных отражений (Ламбертиан).

Потенциально опасные зеркальные отражения происходят от всех поверхностей передающих оптические компоненты, таких как линзы, призмы, окна и делители пучка. Особое внимание следует уделить выбору оптических компонентов для лазеров классов 3B и 4 и поддержанию чистоты их поверхностей.

Потенциально опасное излучение может также быть передано через некоторые отражающие оптические компоненты, такие, например, как зеркала (например, инфракрасное излучение, проходящее через отражатель видимого излучения). Многие поверхности становятся зеркально отражающими при скользящем падении пучка.

8.4.5 Индивидуальная защита

8.4.5.1 Использование средств индивидуальной защиты

СИЗ (такие, например, как лазерные защитные очки) используются при необходимости персоналом при работе в рабочей зоне лазера с целью защиты от опасностей. Такая защита должна использоваться при наличии обоснованно ожидаемой опасности, при этом следует обеспечить адекватную защиту другими средствами, предпочтительно заключением лазерного пучка в оболочку, но в необходимых случаях СИЗ должны обеспечивать достаточную защиту.

Когда СИЗ обеспечивают уменьшение риска, их использование должно быть обязательным, а не основываться на индивидуальном решении. СИЗ должны подбираться индивидуально и по гигиеническим требованиям быть должным образом очищены перед использованием другим человеком. В разных странах могут существовать дополнительные требования к СИЗ.

Специальные требования, учитывающие специфику, маркировку и проверку защиты глаз от лазерного излучения в комплексе, а не только оптическую плотность, применяют в Европе (см. EH 207 и EH 208).

8.4.5.2 Защита глаз

Для защиты глаз используют специальные очки или с оправой для ушей, или закрепляемые вокруг головы. Такие защитные очки имеют оптические фильтры для уменьшения передачи лазерного излучения к глазам в пределах зоны, где используется лазер. Заключение пучка в корпус, что является главной гарантией безопасности персонала, объединяют, когда необходимо, с дистанционным наблюдением (например, телевидением).

8.4.5.2.1 Защиту глаз используют при следующих обстоятельствах:

a) если существует незначительный риск повреждения, являющийся результатом случайного облучения глаз лазерным излучением свыше МВЭ,

b) если нет серьезного риска повреждения кожи, являющегося результатом случайного облучения лазерным излучением (дополнительно см. 8.4.5.3). Такой риск возможен, если для защиты глаз используют очки с высокой оптической плотностью фильтров;

c) если практически невозможно обеспечить полную защиту при помощи технических и/или административных средств контроля;

d) если защитные очки обеспечивают:

1) понижение максимального обоснованно ожидаемого лазерного излучения до безопасного уровня,

2) способность выдерживать максимальное обоснованно ожидаемое лазерное излучение, достаточное для принятия мер по его прекращению время, и

3) человек, надевший очки, способен использовать их без дискомфорта и без существенного ухудшения обзора.

8.4.5.2.2 При выборе защитных очков следует учитывать следующие факторы:

a) рабочая длина волны (длины волн). В фильтрах защитных очков используют материалы, обеспечивающие защиту в определенном диапазоне длин волн;

b) обоснованно ожидаемый худший случай эффективного облучения (определяют в соответствии с разделом 3), выраженный или в единицах падающего потока излучения ($Вт \cdot м^{-2}$), или в единицах энергетической экспозиции ($Дж \cdot м^{-2}$);

c) применяемое значение МВЭ для глаз (определяют в соответствии с разделом 4), выраженное в единицах эффективного облучения;

d) фактическое облучение и диаметр пучка (эти параметры определяют подбор очков, защищающих от падающего лазерного излучения);

e) оптическую плотность D_λ лазерных защитных очков в зависимости от длины волны. Оптическая плотность должна быть достаточной, чтобы уменьшить излучение до уровня ниже МВЭ в течение обоснованно ожидаемого времени облучения. Значение D_λ, необходимое для обеспечения защиты глаз, можно вычислить по формуле

$$D_\lambda = \log 10\ [(\text{максимальное обоснованно ожидаемое облучение})/(\text{МВЭ})].$$

8.4.5.2.3 Другие важные факторы включают в себя:

a) Пропускание видимого света, способность видеть предупреждающий световой сигнал или другие индикаторы через фильтры.

b) Защитные очки должны быть удобны для ношения, создавать как можно более широкое поле зрения, иметь полное прилегание при достаточной вентиляции для избежания запотевания и обеспечения достаточной видимости. Важно, чтобы оправа и боковые участки создавали защиту, эквивалентную линзам.

c) Энергетическая экспозиция или облученность, при которой происходит повреждение очков.

d) Прочность материалов (стойкость к удару).

e) Любые соответствующие национальные правила.

8.4.5.2.4 Все лазерные защитные очки должны иметь четкую маркировку с указанием:

a) рабочей длины волны;

b) оптической плотности на рабочей длине волны.

8.4.5.2.5 Для защитных очков необходимо также учитывать, что:

a) должны быть известны любые ограничения максимального уровня лазерного излучения, которое может воздействовать на защитные очки (с учетом возможности повреждения материала фильтра при высоких уровнях облучения);

b) при использовании различных видов защитных очков полезно наносить цветную маркировку или другие знаки, указывающие на применение с конкретным лазером;

c) при работе с видимым лазерным излучением иногда желательно видеть лазерный луч в целях выравнивания или по другим эксплуатационным причинам. В этом случае защитные фильтры для глаз определяют на основе снижения случайного облучения до уровня, эквивалентного классу 2, если для защиты достаточно естественной реакции глаз (моргание).

При определении МВЭ в уравнении для D_λ за основу берут время 0,25 с;

d) защитные очки разработаны для защиты от случайного облучения лазерным излучением. Их не следует использовать для защиты от преднамеренного облучения или непосредственного наблюдения лазерного пучка. Защитные очки должны периодически проверяться для учета износа или повреждений. Дата проверки должна быть зарегистрирована, а защитные очки заменены (если необходимо). Защитные очки должны быть проверены на пригодность каждый раз перед использованием;

e) мощность падающего пучка, уровень энергии, поглощенное излучение в материале фильтра могут привести к серьезному повреждению и внезапному выходу фильтра из строя. Поэтому защитные очки после одиночного случайного облучения излучением высокого уровня следует заменять.

8.4.5.3 Защитная одежда

Если персонал может облучаться излучением, уровень которого превышает МВЭ для кожи, то предусматривают соответствующую защитную одежду. Обычно применяют маски или перчатки, но иногда требуется использование защиты всего тела.

Такую защиту следует предусматривать везде, где возможен серьезный риск причинения вреда здоровью (дополнительно к опасности для глаз) (см. раздел 7), но при таких обстоятельствах степень опасности учитывают комплексно.

8.5 Обслуживание оборудования

8.5.1 Увеличение рисков во время обслуживания лазерного оборудования

Лазерное оборудование классифицируют на основе уровня лазерного излучения, доступного во время обслуживания. При обслуживании и эксплуатации могут потребоваться удаление предохранительных крышек, разборка защитных частей изделия и/или существенное изменение в работе лазерного оборудования, что увеличивает риск травматизма. Возможны дополнительные опасности, например электрическая. Операции по обслуживанию и эксплуатации могут потребовать более высокого уровня обучения технике безопасности, чем необходимо для нормальной эксплуатации лазерного оборудования.

Перед обслуживанием лазерного оборудования следует оценить все риски. Необходимо вести учет всех операций и любых изменений в работе лазерного оборудования.

Обслуживание встроенных лазеров может увеличить риск поражения лазерным излучением. В операции по обслуживанию включают выравнивание пучка, другие операции регулирования и появление беспорядочных лазерных пучков (т. е. пучков, проходящих в неожиданных направлениях). Для безопасного обслуживания часто необходимо вокруг лазерного оборудования установить временную зону, соответствующую увеличению уровня риска (см. ниже) и ввести особые процедуры и правила безопасности (например, если необходимо систематически выравнивать пучок). Изготовители после запроса обслуживающего персонала должны давать рекомендации относительно безопасных процедур во время обслуживания.

8.5.2 Временные зоны использования лазера

Временную зону использования лазера устанавливают, если возможен доступ людей к опасным уровням лазерного излучения (например, во время обслуживания) и если люди, не имеющие права доступа, не осознают присутствия лазерной опасности и/или соответственно не обучены необходимым процедурам безопасности.

Для врéменных зон использования лазера следует руководствоваться теми же правилами, что и для зон использования лазера (см. 8.4.2). Если нормативные требования к техническому контролю доступа труднодостижимы, то для обеспечения врéменного ограничения доступа усиливают меры административного контроля. Если безопасный доступ в зону не обеспечивается техническими средствами, то у входа в зону следует размещать соответствующие предупреждения и запрещающие знаки. При определенных обстоятельствах для обеспечения врéменных ограничений доступа может быть желательно присутствие дежурного.

8.5.3 Меры контроля во время обслуживания оборудования

При установлении мер контроля во время обслуживания оборудования там, где есть серьезный риск поражения лазерным излучением, особое внимание следует уделить:

a) уменьшению уровня эмиссии до необходимого максимума;

b) ограничению диапазона перемещения пучка в пространстве для уменьшения неопределенности направления пучка во время выравнивания;

c) предварительной проверке выравнивания пучка близко к лазеру и только затем увеличению расстояния для минимизирования неуверенности в положении пучка;

d) размещению прерывателей пучка в большой зоне после экранов мишеней во время выравнивания, с тем чтобы прервать лазерный пучок, когда он не попадает в мишень;

e) обеспечению выравнивания пучка вспомогательными визуальными средствами (например, камерами, флуоресцентными или чувствительными к нагреву экранами и средствами просмотра). Их также используют в случае видимого лазерного излучения, когда появляется необходимость снять защитные очки, чтобы яснее видеть пучок;

f) удобству лазерных защитных очков, подходящих для использования в течение длительного периода, когда адекватная защита другими средствами невыполнима;

g) обеспечению техническими средствами для передачи контроля за лазером (например, переносимыми вручную пожаробезопасными устройствами), когда для обслуживания необходимы двое или несколько человек, особенно если один человек находится в отдалении от лазера для того, чтобы дать другому команду запустить лазер;

h) использованию неотражающих покрытий или диффузно отражающих поверхностей на инструментах, требованию накрывания или удаления драгоценностей, часов и т.д. из зоны использования лазера, чтобы минимизировать случайные отражения.

8.5.4 Услуги других организаций по техническому обслуживанию лазерного оборудования

Если другая организация (например, поставщик лазерного оборудования) заинтересована в обслуживании лазерного оборудования, то процедура должна предусматривать передачу его на техническое обслуживание и принятие в эксплуатацию после завершения работы. Для достижения результата может быть полезной предварительная переписка пользователя лазерного оборудования с организацией, которая будет проводить техническое обслуживание. Проверка, восстановление блокирующих устройств должны быть частью поставки оборудования пользователю.

Необходима оценка риска при внешнем обслуживании, даже если обслуживающая организация полностью контролирует эксплуатацию. Ответственность за установление зоны использования лазера до начала обслуживания (если такая зона требуется) определяется на договорной основе. При отсутствии договора ответственность за проведение всех необходимых мероприятий на месте несет пользователь.

9 Поддержание безопасной работы

Должен выполняться регулярный контроль зон использования лазера и должна вестись документация, где должно регистрироваться проведение всех необходимых процедур по контролю, позволяющих достигнуть приемлемого риска. В случае необходимости должны быть пересмотрены защитные процедуры, обеспечивающие безопасную работу. Результаты расследования происшествий (см. раздел 10) должны использоваться для оценки эффективности и адекватности мер контроля.

Обстоятельства, которые могут выявить необходимость в переоценке риска и пересмотре защитных процедур и мер контроля, включают в себя:

a) модификацию, или изменение местоположения, или замену лазерного оборудования;

b) изменение условий эксплуатации;

c) изменение окружающей среды, в которой эксплуатируется лазерное оборудование;

d) изменение требований к персоналу, имеющему доступ к лазерному оборудованию, или к тем, кто потенциально может быть облучен;

e) признаки любого отступления от требований техники безопасности.

10 Рапорт о происшествии и исследование несчастного случая

В случае фактического или предполагаемого опасного облучения лазерным излучением или других поражений от лазера (несчастный случай), или нарушений нормальной работы защиты, способных повлечь за собой несчастный случай, эмиссия лазера должна быть немедленно прекращена. О происшествии должно быть сообщено руководству, ответственному за эксплуатацию по месту происшествия.

На месте фактического или предполагаемого опасного облучения по мере необходимости должно быть обеспечено медицинское обслуживание. В случае фактического или предполагаемого поражения глаз в течение 24 ч офтальмологом должна быть проведена медицинская экспертиза. Это полезно для получения всех характеристик лазерного пучка и поможет офтальмологу при лечении. Во всех случаях фактического или предполагаемого опасного облучения необходимо исследовать все обстоятельства происшествия, определить вероятную дозу облучения и оформить документальное заключение. Перед повторным использованием лазера должна быть определена причина возможного отказа и проведены необходимые изменения в системе защитных мер контроля.

11 Медицинское наблюдение

Обычная проверка зрения у персонала, работающего с лазерным оборудованием, не относится к программе наблюдения здоровья. Проверку зрения иногда проводят для других целей, например для юридической экспертизы. Некоторые используемые процедуры с медицинской точки зрения сами по себе опасны, проводятся только в случае необходимости и не применяются при обычных проверках.

Таблица 5 — МВЭ сетчатки прямым воздействием лазерного излучения

Длина волны λ, нм	Длительность излучения t, с									
	От 10^{-13} до 10^{-11}	От 10^{-11} до 10^{-9}	От 10^{-9} до 10^{-7}	От 10^{-7} до $1{,}8 \cdot 10^{-5}$	От $1{,}8\ 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$	От $5\ 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-3}$	От $1\ 10^{-3}$ до 10	От 10 до 10^2	От 10^2 до 10^3	От 10^3 до $3\ 10^4$
180—302,5	$3 \cdot 10^{10}$ Вт·м$^{-2}$		30 Дж·м$^{-2}$							
302,5—315			C_2 Дж·м$^{-2}$, если $t > T_1$ C_1 Дж·м$^{-2}$, если $t \le T_1$					C_2 Дж·м$^{-2}$		
315—400			C_1 Дж·м$^{-2}$					10^4 Дж·м$^{-2}$		10 Вт·м$^{-2}$
400—450[a]	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$ Дж·м$^{-2}$	$2{,}7 \cdot 10^4\ t^{0{,}75}$ Дж·м$^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$ Дж·м$^{-2}$		$18\ t^{0{,}75}$ Дж·м$^{-2}$			100 Дж·м$^{-2}$		
450—500[a]								100 C_3 Дж·м$^{-2}$ и[b] 10 Вт·м$^{-2}$	C_3 Вт·м$^{-2}$	
500—700[a]								10 Вт·м$^{-2}$		
700—1050[a]	$1{,}5 \cdot 10^4\ C_4$ Дж·м$^{-2}$	$2{,}7 \cdot 10^4\ t^{0{,}75}\ C_4$ Дж·м$^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}\ C_4$ Дж·м$^{-2}$		$18\ t^{0{,}75}\ C_4$ Дж·м$^{-2}$			10 C_4 C_7 Вт·м$^{-2}$		
1050—1400[a]	$1{,}5 \cdot 10^{-3}\ C_7$ Дж·м$^{-2}$	$2{,}7 \cdot 10^5 \cdot t^{0{,}75}\ C_7$ Дж·м$^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}\ C_7$ Дж·м$^{-2}$			$90 t^{0{,}75}\ C_7$ Дж·м$^{-2}$				
1400—1500	10^{12} Вт·м$^{-2}$		10^3 Дж·м$^{-2}$				5600 $t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$	1000 Вт·м$^{-2}$		
1500—1800	10^{13} Вт·м$^{-2}$		10^4 Дж·м$^{-2}$							
1800—2600	10^{12} Вт·м$^{-2}$		10^3 Дж·м$^{-2}$				5600 $t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$			
2600—10^6	10^{11} Вт·м$^{-2}$		100 Дж·м$^{-2}$	5600 $t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$						

[a] Значения МВЭ, приведенные в настоящей таблице для диапазона длин волн 400—600 нм (область опасности для сетчатки), применяют к размерам видимых источников не более 1,5 мрад (эти значения МВЭ охватывают прямое наблюдение большинства одиночных лазерных источников) Повышение предела применяют к источникам бóльших размеров (таких как определенные составные источники или диффузные отражатели), которые приведены в таблице 6.

[b] В диапазоне длин волн 450—500 нм применяют двойной предел для длительностей излучения от 10 до 100 с, и экспозиция не должна превышать любой применяемый предел.

Примечания

1 Поправочный коэффициент и единицы величин см. таблицу 8.

2 МВЭ для длительности излучения менее 10^{-9} с и для длин волн менее 400 нм и более 1400 нм устанавливают равной эквивалентному значению энергетической освещенности от предела энергетической экспозиции при 10^{-9} с МВЭ для длительности излучения менее 10^{-13} с для всех длин волн устанавливают равной эквивалентному значению энергетической освещенности от МВЭ при 10^{-13} с.

Таблица 6 — МВЭ сетчатки прямым воздействием лазерного излучения от протяженных источников в диапазонах длин волн 400—1400 нм (область опасности для сетчатки)

Длина волны λ, нм	Длительность излучения t, с							
	От 10^{-13} до 10^{-11}	От 10^{-11} до 10^{-9}	От 10^{-9} до $1{,}8\cdot10^{-5}$	От $1{,}8\ 10^{-5}$ до $5\ 10^{-5}$	От $5\ 10^{-5}$ до 10	От 10 до 10^2	От 10^2 до 10^4	От 10^4 до $3\ 10^4$
400—700[a]	$1{,}5\ 10^{-4}\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	$2{,}7\ 104\ t^{0.75}\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	$5\cdot10^{-3}\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	$18\ t^{0.75}\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	От 400 до 600 нм[a]	Фотохимическая опасность для сетчатки		
						100 C_3 Дж·м$^{-2}$ используют γ_p = 11 мрад	1 C_3 Вт·м$^{-2}$ используют $\gamma_p = 1{,}1\ t^{0.5}$ мрад	1 C_3 Вт·м$^{-2}$ используют γ_p = 110 мрад
						t		
					От 400 до 700 нм[a]	Термическая опасность для сетчатки		
						$18 C_6\ T_2^{-0.25}$ Вт·м$^{-2}$, если $t > T_2$ $18\ t^{0.75}\ C_6$ Дж·м$^{-2}$, если $t \le T_2$		
700—1050	$1{,}5\cdot10^{-4}\ C_4\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	$2{,}7\cdot10^4\ t^{0.75}\ C_4\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	$5\cdot10^{-3}\ C_4\ C_6$ Дж·м$^{-2}$	$18\ t^{0.75}\ C_4\ C_6$ Дж·м$^{-2}$		$18\ C_4\ C_6\ C_7\ T_2^{\ 0.25}$ Вт·м$^{-2}$, если $t > T_2$		
1050—1400	$1{,}5\ 10^{-3}\ C_6\ C_7$ Дж·м$^{-2}$	$2{,}7\cdot10^5\ t^{0.75}\ C_6\ C_7$ Дж·м$^{-2}$	$5\cdot10^{-2}\ C_6\ C_7$ Дж·м$^{-2}$		$90\ t^{0.75}\ C_6\ C_7$ Дж·м$^{-2}$	$18\ t^{0.75}\ C_4\ C_6\ C_7$ Дж·м$^{-2}$, если $t \le T_2$		

[a] В диапазоне длин волн от 400 до 600 нм применяют двойные пределы, и излучение лазера не должно превышать применяемые пределы. Обычно пределы фотохимической опасности применяют только для экспозиции длительностью более 10 с, однако для длин волн в диапазоне 400—484 нм и для видимых источников размерами от 1,5 до 82 мрад применяют двойной предел фотохимической опасности 100 C_3 Дж·м$^{-2}$ для экспозиций не менее 1 с.

Примечания

1 Поправочные коэффициенты и единицы величин см. в таблице 8.

2 Угол γ_p — ограниченный угол приема при измерениях.

Таблица 7 — МВЭ кожи лазерным излучением

Длина волны λ, нм	Длительность излучения t, с					
	$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$	$10 - 10^{3}$	$10^{3} - 3 \cdot 10^{4}$
180—302,5	$3 \cdot 10^{10}$ Вт·м$^{-2}$	30 Дж·м$^{-2}$				
302,5—315		C_2 Дж·м$^{-2}$, если $t > T_1$ C_1 Дж·м$^{-2}$, если $t \geq T_1$		C_2 Дж·м$^{-2}$		
315—400		C_1 Дж·м$^{-2}$		10^{4} Дж·м$^{-2}$	10 Вт·м$^{-2}$	
400—700	$2 \cdot 10^{11}$ Вт·м$^{-2}$	200 Дж·м$^{-2}$		$1{,}1 \cdot 10^{4}\ t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$	2000 Вт·м$^{-2}$	
700—1400	$2 \cdot 10^{11}\ C_4$ Вт·м$^{-2}$	200 C_4 Дж·м$^{-2}$		$1{,}1 \cdot 10^{4}\ C_4\ t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$	2000 C_4 Вт·м$^{-2}$	
1400—1500	10^{12} Вт·м$^{-2}$	10^{3} Дж·м$^{-2}$		5600 $t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$	1000 Вт·м$^{-2}$ [a]	
1500—1800	10^{13} Вт·м$^{-2}$	10^{4} Дж·м$^{-2}$				
1800—2600	10^{12} Вт·м$^{-2}$	10^{3} Дж·м$^{-2}$		5600 $t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$		
2600—10^{6}	10^{11} Вт·м$^{-2}$	100 Дж·м$^{-2}$	5600 $t^{0{,}25}$ Дж·м$^{-2}$			

[a] При облучении поверхности кожи более 0,1 м^2 МВЭ уменьшают до 100 Вт·м$^{-2}$.
Для площадей 0,01 м^2—0,1 м^2 МВЭ изменяют обратно пропорционально облученной площади кожи.

Примечания

1 Поправочные коэффициенты и единицы величин — по таблице 8.

2 Сведения об эффектах воздействия облучения для длительностей менее 10^{-9} с ограничены. МВЭ для таких длительностей облучения получена как производная облученности, применяющейся к 10^{-9} с.

Таблица 8 — Поправочные коэффициенты для МВЭ

Параметр	Спектральный диапазон, нм
$C_1 = 5{,}6 \cdot 10^{3}\ t^{0{,}25}$	302,5—315
$T_1 = 10^{0{,}8(\lambda - 295)} \cdot 10^{-15}$ с	302,5—315
$C_2 = 10^{0{,}2(\lambda - 295)}$	302,5—315
$T_2 = 10 \cdot 10^{[(\alpha - \alpha_{min})/98{,}5]}$ с [a]	400—1400
$C_3 = 1{,}0$	400—450
$C_3 = 10^{0{,}02(\lambda - 450)}$	450—600
$C_4 = 10^{0{,}002(\lambda - 700)}$	700—1050
$C_4 = 5$	1050—1400
$C_5 = N^{-1/4}$ [b]	400—10^{6}
$C_6 = 1$ при $\alpha \leq \alpha_{min}$	400—1400
$C_6 = \alpha/\alpha_{min}$ при $\alpha_{min} < \alpha \leq \alpha_{max}$	400—1400
$C_6 = \alpha_{max}/\alpha_{min} = 66{,}7$ при $\alpha > \alpha_{max}$ [c]	400—1400

Окончание таблицы 8

Параметр	Спектральный диапазон, нм
$C_7 = 1$	700—1150
$C_7 = 10^{0,018(\lambda-1150)}$	1150—1200
$C_7 = 8$	1200—1400

[a] $T_2 = 10$ с при $\alpha < 1,5$ мрад и $T_2 = 100$ с при $\alpha > 100$ мрад.

[b] C_5 применяют только при длительностях импульса менее 0,25 с.

[c] C_6 применяют только к импульсным лазерам и лазерам непрерывного излучения, когда преобладают тепловые повреждения.

[d] Ограничивающий приемный угол γ должен быть равным α_{max}.

$\alpha_{min} = 1,5$ мрад;

$\alpha_{max} = 100$ мрад.

N – число импульсов при определенной длительности излучения (см. 5.2).

Примечания

1 Сведения об эффектах воздействия облучения для длительностей облучения менее 10^{-9} с для длин волн менее 400 нм и более 1400 нм ограничены.

2 Поправочные коэффициенты C_1—C_7 и контрольные точки T_1 и T_2, используемые в таблицах 5—7, определены далее.

3 Об ограничении апертур см. таблицу 2.

4 В формулах в таблицах 5—7 и в настоящих примечаниях длину волны выражают в нанометрах, длительность облучения t в секундах и угол α в миллирадианах.

Таблица 9 — Зоны, где используется лазер

Класс лазера	Характеристика опасности	Пример зоны	План защитных мер контроля
Класс 1, Класс 2	Минимальная. Примечание — встроенные лазеры могут порождать сопутствующие опасности	Неограниченная. Зона при эксплуатации лазера обычно не требуется	В целях безопасности необходимо следовать инструкциям изготовителя и предупреждениям на знаках
Класс 1М. Расходящийся пучок. Класс 2М. Расходящийся пучок (т. е. изделия, не соответствующие классам 1 или 2 по условию 2)	Локальная опасность для глаз, если используются оптические средства наблюдения, например лупы	Локальная. Допускается свободная планировка, если непосредственно над областью вокруг лазера осуществляется эффективный контроль	Рекомендуется обучение. Предотвращение использования луп для глаз, других увеличивающих приборов (линз) вблизи лазера. Предотвращение перефокусировки или коллимирования пучка
Класс 1М. Коллимированный пучок. Класс 2М. Коллимированный пучок (т. е. изделия, не соответствующие классам 1 или 2 по условию 1)	Серьезная опасность для глаз, если используются оптические средства наблюдения, например бинокли или телескопы	Огорожена либо свободная планировка. Доступ в РНОГЗ контролируют процедурными средствами, например с помощью знаков, инструкций и обучения. В случае свободной планировки доступ в РНОГЗ для публики должен быть закрыт	Требуется обучение. Рекомендуется иметь штатного сотрудника, ответственного за безопасность при работе с лазером. Предотвращение использования телескопов и биноклей. Предотвращение перефокусировки пучка

Окончание таблицы 9

Класс лазера	Характеристика опасности	Пример зоны	План защитных мер контроля
Класс 3R	Низкий уровень опасности для глаз	Неограниченная, т. е. ответственность за безопасность несет пользователь	Рекомендуется обучение. Предотвращение прямого облучения глаз
Класс 3B	Опасность для глаз. Возможна опасность для кожи в верхнем диапазоне класса	Огорожена и защищена блокирующим устройством. Доступ контролируют техническими средствами	Требуются обучение и штатный сотрудник, ответственный за безопасность при работе с лазером. Обеспечивают безопасность с помощью ключа. Закрывают пучок, насколько возможно, включая полную изоляцию, там, где это выполнимо. Вводят комплекс мер по безопасности на рабочем месте. Используют СИЗ, если невозможно предотвратить риск облучения
Класс 4	Опасность для глаз и кожи. Возможна опасность возникновения пожара и задымления	Огорожена и защищена блокирующим устройством. Доступ контролируют техническими средствами	Требуются обучение и штатный сотрудник, ответственный за безопасность при работе с лазером. Обеспечивают безопасность с помощью ключа. Закрывают пучок, насколько возможно, включая полную изоляцию, там, где это выполнимо. Вводят комплекс мер по безопасности на рабочем месте. Используют СИЗ, если невозможно предотвратить риск облучения. Принимают меры защиты против сопутствующих опасностей (например, возгорание, задымление)

Примечание — Сведения в настоящей таблице описывают нормальную работу лазеров (т. е. не обслуживание или ремонт) и являются только руководством при использовании лазеров. Оценка риска может указать на то, что лазер данного класса должен быть отнесен к более высокой или более низкой категории, или на то, что необходимы различные системы защитных средств контроля для уменьшения риска.

Приложение А
(справочное)

Образцы систем блокировки для зон использования лазеров

Примечание — В настоящем приложении приведена информация относительно возможностей по проектированию систем контроля опасностей на основе систем блокировки, связанных с использованием лазеров. Настоящее приложение предназначено для тех, кто незнаком с использованием этих систем, но не отвергает иные решения, которые могут обеспечить необходимый уровень защиты в конкретных обстоятельствах. Возможности, описанные здесь, приведены в качестве примера.

А.1 Введение

Системы блокировки могут использоваться для прекращения лазерной эмиссии всякий раз, когда дверь, открывающая доступ в зону, где используются лазеры, открыта.

Есть много различных способов формировать системы блокировки в зависимости от специфических требований, которые делят на две основных категории: блокировка с запиранием и блокировка без запирания (см. рисунки А.1—А.3). Не все элементы систем блокировок всегда необходимы, они приведены в данном приложении для полноты описания.



Рисунок А.1 — Назначение системы блокировки

А.2 Группы элементов

А.2.1 Блокирующая контрольная система

Конструкция блокирующей контрольной системы должна быть отказоустойчивой и поддерживать защитную функцию в случае неисправности элемента системы (примером отказа элемента может служить замыкание контакта реле). Должна быть также предусмотрена кнопка сброса, обеспечивающая отключение системы (при открывании двери), соответственно необходимо намеренное действие (не простым закрыванием двери), чтобы возобновить эмиссию лазера. Примечательно, что соединитель дистанционной блокировки в соответствии с МЭК 60825-1 требуется для всех лазерных изделий классов 3В и 4 и его можно использовать для связи с дверными выключателями, поэтому наличие механизма сброса не требуется и, таким образом, предполагается, что пользователи рассматривают установку собственного механизма сброса самостоятельно.

А.2.2 Выключатели блокировки двери

Механические выключатели блокировки двери являются самыми простыми. Их конструкция должна обеспечивать принудительный разрыв цепи (т. е. контактная пружина должна срабатывать независимо от открывания двери), чтобы предотвратить залипание или замыкание контактов. Магнитные или другие бесконтактные переключатели пригодны на раздвижных дверях или там, где требуется высокий уровень гигиены. Такие переключатели кодируют (т. е. обе части переключателя конструктивно работают как единое устройство), чтобы избежать случайного раскрытия, также в конструкции переключателя должно быть предусмотрено устранение возможности замыкания контактов.

А.2.3 Переключатели с ручным управлением

Средство ручного управления блокирующим устройством позволяет подготовленному персоналу временно отключить защитную блокировку, если использование ручного управления разрешено, а безопасность не поставлена под угрозу (см. 8.4.2). Необходимо исключить возможность лазерного излучения через открытый дверной проем во время проведения регламентных работ.

Если установленная система ручного управления не охраняется, следует разместить кнопочный переключатель вне помещения. Если установленный ручной переключатель расположен вне помещения (существенно, если помещение можно оставить незанятым в то время, когда возможно прохождение лазерного пучка), то для управления доступом целесообразно использовать клавишный переключатель, клавиатуру или закодированную магнитную карту. Ручное управление само по себе должно быть надежно, его действие ограничено по времени, независимо от переключателей и таким образом должна быть обеспечена защита от его длительного использования, даже при отказе ручного переключателя в положении «Включено».

А.2.4 Прерыватель

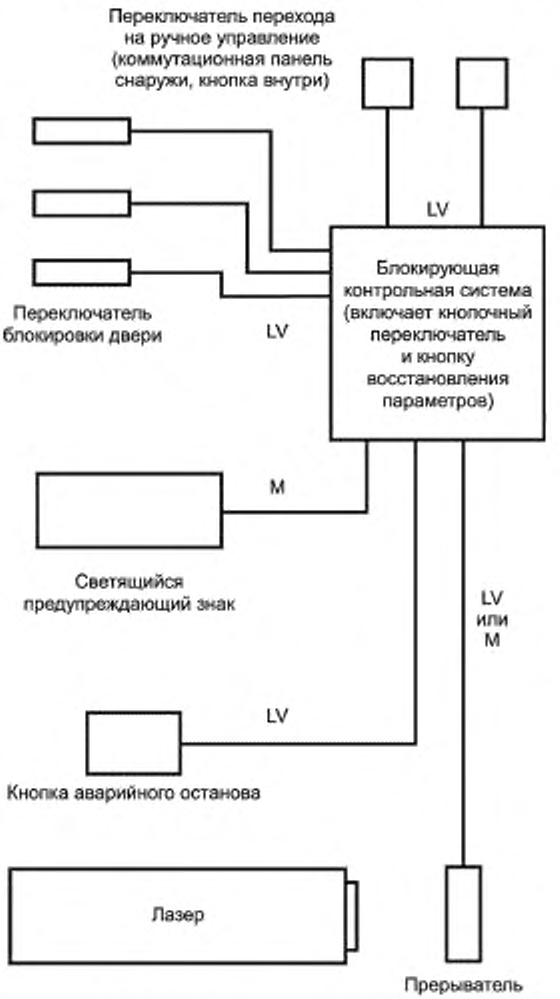
Если для прекращения лазерной эмиссии используется прерыватель пучка без выключения источника электропитания лазера, то должно быть конструктивно обеспечено, чтобы прерыватель всегда оставался в закрытом положении, даже если питание прерывателя будет отключено, и выдерживал случайное воздействие лазерного пучка без повреждений.

А.2.5 Освещенный предупредительный знак

Освещенный предупредительный знак полезен для административного контроля, особенно там, где используется система без блокировки, и помогает избегать ненужных прерываний лазерного излучения. Освещенный предупредительный знак должен показывать «Включено» при работе лазера. Освещенные предупредительные знаки, управляемые вручную, обычно неэффективны.

А.2.6 Система блокировки без запирания (см. рисунок А.2)

Такие системы являются самыми распространенными. Они выполняют функцию безопасности, прерывая лазерное излучение в случае открывания двери, в их конструкции также предусматривают предотвращение перезапуска, пока все двери не закрыты. Ручное управление может использоваться, чтобы позволить уполномочен-



LV — низкое напряжение, M — питающая сеть

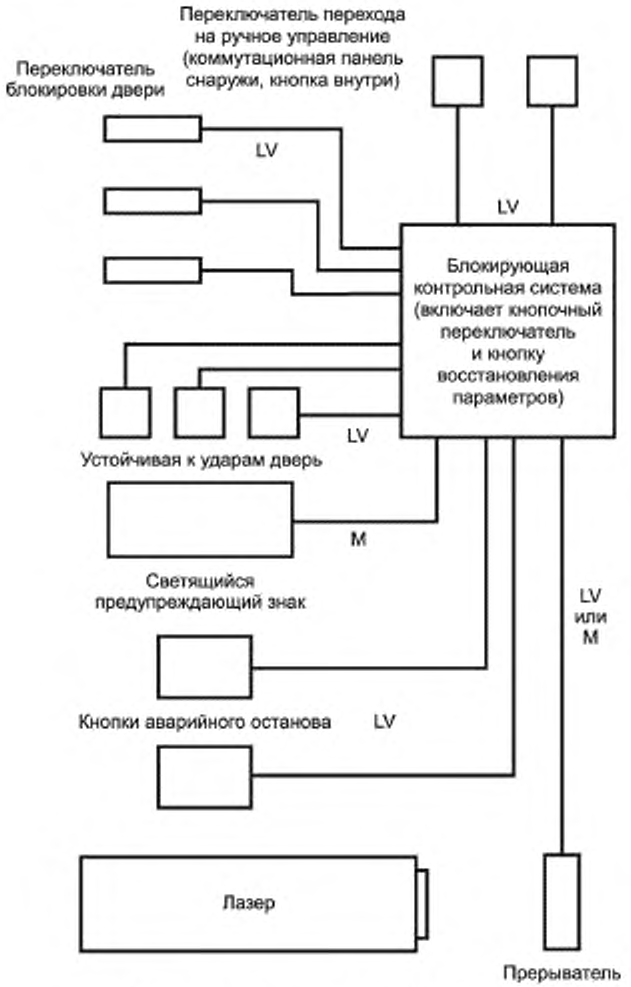
Рисунок А.2 — Система блокировки без запирания

ному персоналу входить в опасную зону и покидать ее без прерывания лазерного излучения (см. А.2.3), при этом используемые освещенные предупредительные знаки указывают состояние лазера при открытых дверях. Каждое устройство, прерывающее лазерное излучение, должно отключать электропитание, хотя возможны негативные последствия для работы лазера (например, нестабильность его работы или ускорение отказов его компонентов), за исключением относительно низких по мощности диодных лазеров. Часто по причинам практичности такие решения отклоняют. При осуществлении адекватных процедурных средств контроля случайное срабатывание блокировки при несанкционированном доступе считается крайне маловероятным. Альтернативным методом блокировки является отказоустойчивый прерыватель, прекращающий лазерное излучение (см. А.2.4).

А.2.7 Переключатель аварийного останова

Если для кнопки аварийного останова лазерного излучения нет легкого доступа во всех частях помещения, то в систему блокировки включают необходимое их число.

А.2.8 Система блокировки с запиранием (см. рисунок А.3)



LV - низкое напряжение; M - питающая сеть

Рисунок А.3 — Система блокировки с запиранием

Системы блокировки с запиранием физически предотвращают несанкционированный доступ в зону действия лазерного излучения и устраняют его нежелательные прерывания. Блокировка лабораторной двери вручную неприемлема, т. к. человек может оказаться заблокированным внутри в случае аварии. Хранение ключей вне помещения неприемлемо, т. к. в чрезвычайной ситуации или при пожаре их могут не найти. Система блокировки должна быть отказоустойчивой, прерывать излучение лазера и позволять доступ персонала в помещение при нарушении энергоснабжения или аварии. Управление электронными замками возможно при помощи кодового ключа или магнитной карты при условии обеспечения доступа с возможностью управления блокировкой для любого лица без ключа или карты. Допускается блокировка двери захлопыванием (см. А.2.9) при условии, чтобы ее можно было легко открыть при возникновении чрезвычайной ситуации. Для прекращения лазерного излучения, когда требуется аварийный доступ, лазер блокируют при помощи прерывателя или отключением электропитания. Допускается использовать переключатели блокировки двери при условии, что при открытой двери запуск лазера невозможен, и обеспечивается его отключение, если дверь открыта.

А.2.9 Электрические замки (электромеханические защелки)

Надежные электрические замки могут быть установлены для удержания двери в закрытом положении при подаче напряжения для предотвращения несанкционированного входа. (Обычные замки, закрываемые ключом, не используют.) Такие устройства устанавливают на дверных коробках и закрывают дверную задвижку при подаче напряжения. (Задвижка не должна управляться ручкой двери.) Дверь закрывается при подаче напряжения, но не открывается. Если электромеханическая защелка не находится под напряжением, дверь открывают как обычно.

Переключатели аварийного останова устанавливают за каждой дверью, где используется система блокировки, чтобы обеспечить вход в случае чрезвычайной ситуации. Кнопка на каждой двери внутри помещения связана с переключателем и обеспечивает выход, при этом по крайней мере одна легкодоступная кнопка останова в чрезвычайной ситуации должна быть установлена в комнате. При нажатии переключатель останова должен обеспечивать безопасность, одновременно прерывая лазерный пучок, обесточивая электромеханические защелки и таким образом позволяя выход.

Назначение системы блокировки

Стены и двери предполагают наличие опасности в пределах зоны, контролируемой лазером.

Блокирующая система, соединенная с дверями, способна при наличии опасности ограничить доступ только для подготовленного персонала и уполномоченных лиц в надлежащем защитном снаряжении.

Приложение В
(справочное)

Примеры расчетов

В.1 Введение

В настоящем приложении представлены рабочие примеры с использованием дополнительной информации и формул из МЭК 60825-10 и МЭК 60825-1. Определение МВЭ представлено в В.3 с примерами для малого источника, лазера с непрерывным излучением или в В.4 — для лазера, генерирующего одиночные импульсы, или в В.5 — для систем с периодически повторяющимися импульсами. Определение НОГР для малых источников приведено в В.6, а для протяженных — в В.7. Вычисление оптической плотности защитных очков представлено в В.8, а вычисление составных малых источников — В.9.

В.2 Символы, используемые в примерах, приведенных в настоящем приложении

Таблица В.1

Символ	Единица измерений	Определение
a	м	Диаметр выходящего лазерного пучка
α	рад	Угол, стягиваемый видимым источником (или диффузное отражение), который наблюдается как точка в пространстве
α_f	рад	Угол, на который в глазу стягивается видимый источник на расстоянии r_f = 100 мм
α_{min}	рад	Минимальный угол, стягиваемый источником, для которого применим критерий протяженного источника
α_{max}	рад	Угол, стягиваемый видимым источником, свыше которого МВЭ не зависит от размера источника (α_{max} = 0,1 рад)
C_1, C_2,...,C_7	1	Поправочные коэффициенты (см. таблицу 8)
d_u	м	Диаметр наименьшего круга на определенном расстоянии r от видимого источника, через который проходит u % полной мощности (или энергия) лазера. В случае Гауссовского пучка d_{63} относится к точке, в которой облученность (энергетическая экспозиция) снижается до 1/e от его центрального пикового значения
D_e	м	Диаметр выходного зрачка оптической системы
D_o	м	Диаметр объектива оптической системы
η	1	Часть полной мощности (или энергии) лазера, собранная через апертуру, расположенную на определенном расстоянии r от видимого источника
F	Гц	Частота повторения импульсов
G	1	Квадратный корень из отношения падающей на сетчатку оптически вооруженного глаза энергетической освещенности (энергетической экспозиции) к ее значению в случае оптически невооруженного глаза
H	Дж·м$^{-2}$	Энергетическая экспозиция
E	Вт·м$^{-2}$	Облученность на расстоянии r от видимого источника
H_0	Дж·м$^{-2}$	Энергетическая экспозиция выходного пучка
E_0	Вт·м$^{-2}$	Облученность выходного пучка на нулевом расстоянии от видимого источника
k	1	Коэффициент модовой структуры лазера со значениями в пределах от k = 1 для пучков с гауссовским профилем до k = 2,5 для пучков с неизвестной модовой структурой лазера
L_p	Дж·м$^{-2}$·ср$^{-1}$	Интегрированная энергетическая яркость протяженного источника
λ	нм	Длина волны излучения лазера
M	1	Усиление оптического инструмента

Окончание таблицы В.1

Символ	Единица измерений	Определение
$H_{МВЭ}$	Дж·м$^{-2}$	Максимальная возможная экспозиция
$E_{МВЭ}$	Вт·м$^{-2}$	
μ	м$^{-1}$	Атмосферный коэффициент ослабления для указанной длины волны
N	1	Число импульсов в пределах длительности экспозиции
NA	1	Числовая апертура лазерного источника
NA_m	1	Числовая апертура объектива микроскопа
НОГР	м	Номинальное опасное для глаз расстояние
OD	1	Оптическая плотность (коэффициент пропускания), определенная как логарифм по основанию 10 из аналога коэффициента пропускания (см. также МЭК 60050, термин 845-04-66; в настоящем стандарте символ D не используется во избежание вероятности перепутать его с символом, обозначающим диаметр)
P_0	Вт	Полная мощность излучения (или поток излучения) на выходе непрерывного лазера или средняя мощность излучения для лазера с повторяющимися импульсами
P_p	Вт	Выходная мощность излучения импульса импульсного лазера
φ	рад	Угол расхождения выходящего лазерного пучка
π	1	Числовая постоянная 3,142
Q	Дж	Полная выходная энергия излучения импульсного лазера
r	м	Расстояние от видимого источника до наблюдателя, измеряемой апертуры или диффузной мишени
r_1	м	Расстояние от лазерной мишени до наблюдателя или измеряемой апертуры
$r_{1,max}$	м	Максимальное расстояние от лазерной мишени до наблюдателя, когда применимы критерии протяженного источника
t	с	Длительность одиночного лазерного импульса
T	с	Общая длительность экспозиции для последовательности импульсов
T_1, T_2	с	Контрольные точки времени (см. таблицу 8)

В.3 Максимально возможная экспозиция (МВЭ) — введение

Максимально возможная экспозиция определена в 2.44 как уровень лазерного облучения, до которого при нормальных условиях может облучиться персонал без вредных последствий, возникающих сразу или через длительный промежуток времени повреждений. Значения максимально возможной экспозиции установлены ниже известных уровней опасности. Значения МВЭ должны оцениваться как ориентиры безопасного облучения, а не как границы между безопасными и опасными уровнями облучения.

Значения МВЭ зависят от:

- длины волны излучения;
- времени экспозиции или длительности импульса;
- спектра длин волн, если ткань облучается более чем одной длиной волны;
- природы облучаемой ткани и
- стягиваемого источником угла (который определяет размер изображения, относящегося к сетчатке глаза) в диапазоне длин волн от 400 до 1 400 нм.

Примеры, представленные в этом приложении, иллюстрируют процедуры вычисления при непосредственном наблюдении диффузных отражений и протяженных источников, а также для импульсного или модулированного излучения.

Выбор времени экспозиции очевиден как в случае импульсного лазера, так и лазера с непрерывным излучением или лазера с периодически повторяющимися импульсами в видимом диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, а при облучении глаз используют время 0,25 с. Для лазеров с непрерывным излучением или периодически повторяющимися импульсами, работающих на длинах волн вне видимого диапазона, требуется заключение сотрудника, ответственного за безопасность при работе с лазером, о вероятном времени облучения.

Примечание — Значения МВЭ при облучении глаз приведены в таблицах 5 и 6, а при облучении кожи — в таблице 7.

В примерах приведены пошаговые процедуры вычисления для типичных длин волн и других параметров облучения. Когда необходимо вычислить МВЭ, пользователь может применить эти процедуры для конкретной ситуации.

В.4 МВЭ — одиночный малый источник

При наблюдении малого источника стягиваемый источником угол $\leq \alpha_{min}$. Следующие четыре примера иллюстрируют способы вычисления МВЭ для одиночного малого источника для лазеров с непрерывным излучением или периодически повторяющимися импульсами.

Пример В.4.1

Определить МВЭ для гелий-кадмиевого лазера λ = 325 нм с длительностью излучения t = 0,1 с.

Решение: для определения МВЭ в таблице 5 на пересечении строки диапазона длин волн 315—400 нм и колонки с длительностью излучения 1×10^{-3}—10 с находим C_1, а его значение, Дж·м$^{-2}$, приведено в таблице 8:

$$C_1 = 5{,}6\cdot10^{3}\ t^{0,25};$$

$$H_{МВЭ} = 5{,}6\cdot10^{3}\cdot0{,}1^{0,25} = 3{,}15\cdot10^{3}\ Дж\cdot м^{-2}.$$

МВЭ в единицах энергетической освещенности после деления на длительность эмиссии t равна

$$E_{МВЭ} = H_{МВЭ}/t = 3{,}15\cdot10^{3}/0{,}1 = 3{,}15\cdot10^{4}\ Вт\cdot м^{-2}$$

Пример В.4.2

Определить МВЭ одиночного импульса рубинового лазера λ = 694 нм с длительностью облучения $t = 10^{-3}$ с.

Решение: в таблице 5 значение МВЭ находят на пересечении строки диапазона длин волн 400—700 нм и колонки с длительностью излучения $t = 5\cdot10^{-5}$ с — 10^{-3} с.

Значение МВЭ $H_{МВЭ} = 18\ t^{0,75}$ Дж·м$^{-2}$.

Тогда

$$H_{МВЭ} = 18(10^{-3})^{0,75} = 0{,}1\ Дж\cdot м^{-2}.$$

Пример В.4.3

Определяют МВЭ одиночного импульса лазера на арсениде галлия λ = 905 нм с длительностью импульса t = 100 нс.

Решение: по таблице 5 находят значение МВЭ на пересечении строки длин волн 700—1050 нм с длительностью излучения $t = 10^{-7}$—$1{,}8\cdot10^{-5}$ с.

МВЭ, выраженная как энергетическая экспозиция, равна

$$H_{МВЭ} = 5\cdot10^{-3}\ C_4\ Дж\cdot м^{-2}$$

Коэффициент C_4 вычисляют по формуле, приведенной в таблице 8:

$$C_4 = 10^{0,002\,(\lambda-700)} = 2{,}57.$$

Тогда

$$H_{МВЭ} = 5\cdot10^{-3}\cdot2{,}57 = 12{,}9\cdot10^{-3}\ Дж\cdot м^{-2}$$

Пример В.4.4

Определяют МВЭ для гелиево-неонового лазера непрерывного излучения (He-Ne) λ = 633 нм.

Решение: поскольку лазер работает в видимой части спектра и не предназначен для непосредственного наблюдения, используют длительность излучения T = 0,25 с. По таблице 5 находят значение МВЭ на пересечении строки длин волн 400—700 нм с длительностью излучения $t = 1\cdot10^{-3}$—10 с.

МВЭ, выраженная как энергетическая экспозиция, равна

$$H_{МВЭ} = 18\ t^{0,75}\ Дж\cdot м^{-2};$$

$$H_{МВЭ} = 18\ (0{,}25)^{0,75} = 6{,}36\ Дж\cdot м^{-2}.$$

МВЭ в единицах энергетической освещенности после деления на длительность эмиссии t = 0,25 с равна

$$E_{МВЭ} = 25\ Вт\cdot м^{-2}.$$

В.5 МВЭ — системы с повторяющимися импульсами

Правила, применимые к лазерам с повторяющимися импульсами (или к повторяющимся облучениям от сканирующих лазерных систем), приведены в 4.2 МЭК 60825-10 и обеспечивают детализацию блок-схемы с пошаговым вычислением МВЭ для лазера с повторяющимися импульсами.

Пример В.5.1

Определяют МВЭ малого источника при непосредственном наблюдении пучка для излучения аргонового лазера (λ = 488 нм), работающего с частотой повторения импульсов F = 1 мГц и длительностью импульсов $t = 10^{-8}$ с.

Решение: поскольку этот лазер работает в видимой области спектра, намеренное наблюдение не предполагается, а длительность облучения будет ограничена рефлексом мигания до T = 0,25 с. Если предположить возможность намеренного наблюдения излучения в диапазоне длин волн 400—600 нм 1 с или более, то оценивают предел фотохимического воздействия на глаза дополнительно к тепловому и применяют самое ограничительное значение МВЭ.

Подраздел 5.2 включает в себя три критерия, которые нужно рассмотреть и для оценки применить самый ограничительный.

Из 5.2, перечисление a), облучение от любого одиночного импульса не должно превышать МВЭ для одиночного импульса. Таким образом, энергетическая экспозиция для периода времени 10^{-8} с по таблице 5:

$$H_{\text{одиноч}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Из 5.2, перечисление b), среднее облучение для последовательности импульсов с длительностью облучения T не должно превышать МВЭ для одиночного импульса с длительностью облучения T. Для длительности облучения 0,25 с предел энергетической экспозиции определяют по таблице 5:

$$H_T = 18\, t^{0,75} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} = 18(0,25)^{0,75} = 6,36 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Для $N = 2,5 \cdot 10^5$ импульсов за период 0,25 с критерием средней облученности одиночным импульсом для энергетической экспозиции является

$$H_{\text{одиноч. в среднем}} = H_T/N = 6,36/2,5 \cdot 10^5 = 2,55 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Из 5.2, перечисление c), среднее облучение от импульса в пределах последовательности импульсов не должно превышать МВЭ от одиночного импульса, умноженного на поправочный коэффициент C_5 (где $C_5 = N^{-1/4}$). Максимальная длительность облучения, для которой должно быть применено требование перечисления c), является T_2 в диапазоне длин волн 400—1400 нм, где T_2 = 10 с для $\alpha \le \alpha_{min}$.

Поскольку лазер работает с высокой частотой повторения импульсов, применяют примечание 3 к 5.2, перечисление c). Тогда требуется, чтобы если в пределах периода T_i (см. таблицу 3 для $T_i = 18 \cdot 10^{-6}$с) проходят несколько импульсов, то для определения N они считались как одиночный импульс, и энергетическую экспозицию одиночного импульса сравнивают с МВЭ за время T_i. Следовательно, эффективная частота повторения импульсов

$$F_E = 1/T_i = 1 / (18 \cdot 10^{-6}) = 55,56 \text{ кГц}.$$

МВЭ для импульса длительностью T_i приведена в таблице 5 и равна $5 \cdot 10^{-3}$ Дж·м$^{-2}$.

Эффективное число импульсов за 0,25 с:

$$H_E = T\ F_E = 0,25 \cdot 55,56 \cdot 10^3 = 1,39 \cdot 10^4.$$

Для $N_E = 1,39 \cdot 10^4$ импульсов и длительности периода T_i, равной 0,25 с, энергетическая экспозиция по этому критерию была бы равна

$$H_{\text{последовательности}} = H_{\text{одиноч. эфф}}\ (N_E)^{-n/4} = 5 \cdot 10^3\ (1,39 \cdot 10^4)^{-1/4} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Условия 5.2, перечисление a), и 5.2, перечисление b), применимы к импульсу энергии Q, в то время как условие 5.2, перечисление c), применимо к импульсу энергии $= Q\ T_i\ F = 18\ Q$. Следовательно, деление $H_{\text{последовательности}}$ на 18 (что дает $2,55 \cdot 10^{-5}$ Дж·м$^{-2}$) позволяет сравнивать вычисленные в 5.2 три значения МВЭ. В этом примере критерии 5.2, перечисление b), и 5.2, перечисление c), равны, являются самыми ограничительными; поэтому МВЭ одиночного импульса для этой системы равна $2,55 \cdot 10^{-5}$ Дж·м$^{-2}$.

Пример В.5.2

Определяют МВЭ при непосредственном наблюдении пучка для лазера на иттриево-алюминиевом гранате с неодимом (λ = 1064 нм), частотой F = 20 Гц и длительностью импульса t = 1 мс.

Решение: лазер работает в невидимой части спектра, поэтому рефлекс мигания никакой защиты не дает. Приемлемая оценка времени случайного опасного облучения дает значение 10 с. Для этого периода времени общее число импульсов

$$N = TF = 10 \cdot 20 = 200.$$

Подраздел 5.2 включает в себя три критерия, которые нужно рассмотреть, и для оценки принимают самый ограничительный.

Из 5.2, перечисление a), облучение одиночным импульсом не должно превышать МВЭ для одиночного импульса. При облучении пучком от малого источника МВЭ определяют из таблицы 5 значение C_7 = 1, а длину волны 1064 нм — по таблице 8. Таким образом, энергетическая экспозиция по таблице 5 для периода времени 1 мс:

$$H_{\text{одиноч}} = 90\, t^{0,75}\, C_7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} = 90 \cdot 0,001^{0,75} \cdot 1 = 0,506 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Из 5.2, перечисление b), среднее облучение для последовательности импульсов с длительностью облучения T не должно превышать МВЭ для одиночного импульса с длительностью облучения T. Для длительности облучения 10 с (общее время облучения) предел энергетической экспозиции определяют по таблице 5:

$$H_T = 90\, t^{0,75}\, C_7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} = 90 \cdot 10^{0,75} \cdot 1 = 506 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Для N = 200 импульсов за период 10 с критерием средней облученности одиночным импульсом для энергетической экспозиции является

$$H_{\text{одиночн. в среднем}} = \frac{H_T}{N} = \frac{506}{200} = 2{,}53 \text{ Дж·м}^{-2}.$$

Из 5.2, перечисление c), среднее облучение от импульса в пределах последовательности импульсов не должно превышать МВЭ от одиночного импульса, умноженного на поправочный коэффициент C_5 (где $C_5 = N^{-1/4}$). Для N = 200 импульсов за период 10 с критерием средней облученности является

$$H_{\text{последовательности}} = H_{\text{одиночн}}\, N^{-0{,}25} = 0{,}506 \cdot (200)^{-0{,}25} = 0{,}135 \text{ Дж·м}^{-2}.$$

Пока предел для последовательности импульсов по критериям 5.2, перечисление c), является самым ограничительным, МВЭ одиночного импульса для этой системы равен 0,135 Дж·м$^{-2}$. МВЭ может быть выражена в единицах облученности для длительности импульса по формуле

$$E_{\text{МВЭ}} = \frac{H_{\text{послед}}}{t} = \frac{0{,}135 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}}{10^{-3}\text{с}} = 135 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

B.6 Номинальное опасное для глаз расстояние (НОГР)

Как указано в 5.5, НОГР определяют как расстояние от выходной апертуры, на котором облученность или энергетическая экспозиция падают ниже соответствующей МВЭ. Облученность на расстоянии r от лазерного источника определяют (см. МЭК 60825-10) по формуле

$$E = \frac{4P_0\, e^{-\mu r}}{\pi (a + r\varphi)^2}. \qquad \text{(B.1)}$$

Примечание — α и φ измеряют на профиле пучка в точках с уровнем 1/e, если предполагается, что профиль пучка гауссовский. На практике только газовые лазеры имеют гауссовский профиль пучка, большинство твердотельных лазеров имеют отчетливо нерегулярную многомодовую структуру пучка, и в этом случае следует применять формулу

$$L = \frac{Ie^{-\mu r}}{r^2},$$

где I — интенсивность излучения (Вт·ср$^{-1}$).

Если значение I неизвестно и не может быть измерено, значение P_0 в уравнении (B.1), приведенном выше, следует увеличить в 2,5 раза, если известно, что лазерные системы имеют многомодовую структуру пучка. В МЭК 60825-10 символ k используют для расчета пучков нерегулярной модовой структуры, и значения ранжируются в пределах от k = 1 для пучков с гауссовским профилем до k = 2,5 для пучков неизвестной модовой структуры.

Выражение $e^{-\mu r}$ учитывает потери на затухание в атмосфере и в большинстве случаев им можно пренебречь, тогда уравнение (B.1) с учетом коэффициента k

$$E = \frac{4kP_0}{\pi (a + r\varphi)^2}. \qquad \text{(B.2)}$$

В случае замены E на $E_{\text{МВЭ}}$ r становится равным НОГР, и выражение может быть решено для НОГР:

$$\text{НОГР} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\frac{4k \cdot P_0}{\pi E_{\text{МВЭ}}}} - \frac{a}{\varphi}; \qquad \text{(B.3)}$$

или

$$\text{НОГР} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\frac{4kQ}{\pi H_{\text{МВЭ}}}} - \frac{a}{\varphi}, \qquad \text{(B.4)}$$

где Q — энергия в импульсе и $H_{\text{МВЭ}}$ — МВЭ в импульсе, выраженная как энергетическая экспозиция.

Если требуется учитывать влияние затухания в атмосфере, то решение уравнения (B.1) с использованием r невозможно. Достаточно точное решение для атмосферного коэффициента ослабления μ может быть получено из формулы

$$\mu = 10^{-3}\, \frac{3{,}91}{V}\left(\frac{550}{\lambda}\right)^A \text{м}^{-1}, \qquad \text{(B.5)}$$

где $A = 0{,}585\, V^{0{,}33}$;

V — визуальное расстояние, км;

λ — длина волны в нм ($400 < \lambda < 2000$).

Применение оптических средств наблюдения

При использовании оптических средств (телескопы, бинокли и т. д.) для наблюдения источника лазерного излучения при расчете НОГР следует учитывать увеличение попадающего в глаз излучения.

Попадающее в глаз излучение от лазера, наблюдаемого через бинокль, увеличивается на коэффициент оптического усиления G. В МЭК 60825-10 приведены следующие рекомендации:

a) для 400 нм ≤ λ <1 400 нм, если диаметр пучка больше диаметра линзы объектива

$$G = \tau M^2 \qquad (B.6)$$

или, если диаметр пучка лазера меньше диаметра зрачка глаза:

$$G = \frac{\tau \cdot D_o^2}{49}. \qquad (B.7)$$

Используют тот, значение которого меньше, и где

τ — коэффициент передачи для соответствующей длины волны (= 1, если неизвестен);

M — коэффициент усиления средства наблюдения, и

D_o — диаметр объектива линзы, мм;

b) для 320 нм ≤ λ < 400 нм и 1 400 нм ≤ λ < 4 500 нм:

$$G = \tau M^2 .$$

В этом диапазоне излучение поглощается прежде достижения им сетчатки;

c) для λ < 320 нм и λ > 4 500 нм.

Маловероятно, что в этом диапазоне излучение будет передано через средство наблюдения. Расширенная НОГР теперь становится равной

$$НОГР_{Расшир} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\frac{4kGQ}{\pi H_{МВЭ}}} - \frac{a}{\varphi}. \qquad (B.8)$$

Если не используются специальные лазерные ослабляющие фильтры или неизвестен фактический коэффициент передачи используемых оптических средств на длине волны лазера, то потери на пропускание в оптических средствах наблюдения недопустимы, так как многие оптические приборы имеют высокое пропускание (> 0,8), распространяющееся в инфракрасную область спектра свыше 2000 нм.

Примечание — Выходное излучение лазеров классов 1; 1М; 2; 2М и 3R можно наблюдать через увеличительную оптику при отражении от диффузного экрана или незеркальной поверхности, если удовлетворяется критерий непосредственного наблюдения протяженных источников и излучение находится в области от 400 до 1400 нм.

В МЭК 60825-10 предоставлены две блок-схемы, помогающие при вычислении НОГР лазеров непрерывного излучения и импульсно-периодических лазеров, испускающих одну или более длин волн, и расширенной НОГР, при использовании оптических средств наблюдения.

Пример В.6.1

У лазера с гауссовским профилем пучка (k = 1) выходная мощность 4 Вт, расходимость пучка 0,7 мрад и выходной диаметр пучка 1 мм. При соответствующей МВЭ, равной 10 Вт·м$^{-2}$, вычисляют НОГР, пренебрегая затуханием в атмосфере.

Решение: вышеприведенные значения подставляют в уравнение (В.3):

$$НОГР = \frac{1}{0{,}7 \cdot 10^{-3}}\sqrt{\frac{4 \cdot 4}{\pi 10}} - \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0{,}7 \cdot 10^{-3}} = 1019 - 1{,}4 = 1018 \text{ м} = 1{,}02 \text{ км}.$$

Пример В.6.2

Оптика, расширяющая пучок и подобранная к лазеру из предыдущего примера, уменьшает расходимость пучка до 0,1 мрад и увеличивает выходной диаметр пучка до 7 мм. Вычисляют НОГР.

Решение: новое значение НОГР:

$$НОГР = \frac{1}{0{,}1 \cdot 10^{-3}}\sqrt{\frac{4 \cdot 4}{\pi 10}} - \frac{7 \cdot 10^{-3}}{0{,}1 \cdot 10^{-3}} = 7136 - 70 = 7066 \text{ м} = 7{,}07 \text{ км}.$$

Следует отметить, что при определении НОГР расходимость пучка имеет важное значение.

Пример В.6.3

Лазер в примере В.4.2 работает на длине волны 550 нм. Вычисляют НОГР при условии, что визуальное расстояние равно 10 км.

Решение: атмосферный коэффициент ослабления μ получен с использованием уравнения (В.5):

$$\mu = 10^{-3}\,\frac{3{,}91}{10}\left(\frac{550}{550}\right)^{1{,}25} = 3{,}91\cdot10^{-4}\ \text{м}^{-1}.$$

НОГР может теперь быть получено из уравнения (В.3) включением атмосферного коэффициента ослабления:

$$\text{НОГР} = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\frac{4kP_0e^{-\mu r}}{\pi\cdot E_{\text{МВЭ}}}} - \frac{a}{\varphi}$$

и, решая повторно (для r = НОГР), получают

$$\text{НОГР} = \frac{1}{0{,}1\cdot10^{-3}}\sqrt{\frac{4\cdot4\cdot e^{(-3{,}91\,10^{-4}\ r)}}{\pi\cdot10}} - \frac{7\cdot10^{-3}}{0{,}1\cdot10^{-3}} = 3{,}52\ \text{км}.$$

Пример В.6.4

Гелий-неоновый (He-Ne) лазер для топографической съемки (λ = 633 нм) с выходной мощностью 3 мВт излучает пучок с начальным диаметром 13 мм, который на расстоянии 50 м от лазера расширяется до 18 мм, вычисляют:

a) сколько времени можно безопасно непосредственно наблюдать излучение лазера с расстояния 60 м;

b) каково минимальное расстояние для безопасного непосредственного наблюдения излучения этого лазера в течение 3 мин.

Решение:

a) выходная мощность $P_0 = 3\cdot10^{-3}$ Вт; начальный диаметр пучка a = 0,013 м. Поэтому расхождение луча

$$\varphi = \frac{0{,}018 - 0{,}013}{50} = 10^{-4}\ \text{рад}.$$

Принимают, что профиль пучка лазера гауссовский (k = 1), тогда энергетическая освещенность в диапазоне r может быть определена с использованием уравнения (В.2):

$$E = \frac{4P_0}{\pi(a + r\varphi)^2},$$

тогда

$$E = \frac{4\cdot3\cdot10^{-3}}{\pi(0{,}013 + 60\cdot10^{-4})^2} = 10{,}58\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Для длительности излучения в диапазоне от 10 до $3\cdot10^4$ с соответствующее значение МВЭ приведено в таблице 5 и равно

$$E_{\text{МВЭ}} = 10\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Так как это значение меньше излучения пучка на расстоянии 60 м, то длительность излучения будет менее 10 с. В таблице 5 для длительности излучения в диапазоне от $1\cdot10^{-3}$ до 10 с соответствующее значение МВЭ равно

$$H_{\text{МВЭ}} = 18\,t^{\,0{,}75}\ \text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$$

и эквивалентно

$$E_{\text{МВЭ}} = 18\,t^{\,-0{,}25}\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Таким образом, максимальная длительность излучения получена приравниванием этого значения $E_{\text{МВЭ}}$ к 10,58 Вт·м$^{-2}$ и решением для t:

$$18\,t^{\,-0{,}25} = 10{,}58\ \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Тогда $t = \left(\frac{10{,}58}{18}\right)^{-4} = 8{,}38$ с;

b) минимальный диапазон для безопасного наблюдения может быть получен решением уравнения (В.3) для НОГР. В этом случае длительность излучения t = 180 с (3 мин) и из таблицы 5 $E_{\text{МВЭ}} = 10$ Вт·м$^{-2}$:

$$\text{НОГР} = \frac{1}{0{,}1\cdot10^{-3}}\sqrt{\frac{4\cdot3\cdot10^{-3}}{\pi\cdot10}} - \frac{13\cdot10^{-3}}{0{,}1\cdot10^{-3}} = 65{,}4\ \text{м}.$$

Пример В.6.5

Переносной прибор для топографической съемки с инфракрасным лазером имеет следующие характеристики:

- длина волны λ . . . . . 903 нм;
- частота повторения импульсов F . . . . . 300 Гц;
- пиковая мощность импульса P_p . . . . . 30 Вт;
- энергия импульса Q. . . . . 600 нДж;
- расходимость пучка φ . . . . . .10 мрад;
- эффективный выходной диаметр апертуры a.....55 мм.

Принимают, что профиль пучка лазера гауссовский и определяют НОГР:

a) при наблюдении невооруженным глазом и при

b) наблюдении с использованием бинокля 8×50.

Решение:

a) при наблюдении невооруженным глазом.

Из спецификации на лазер длительность импульса

$$t_h = Q/P_p = (6\cdot10^{-7})/30 = 20 \text{ нс}.$$

В этом примере предполагается, что угол α меньше α_{min}. Если нет непосредственного наблюдения, длительность излучения принимают равной 100 с; за это время число импульсов

$$N = F\cdot t = 300 \text{ Гц}\cdot 100 \text{ с} = 3\cdot10^4.$$

По 5.2 принимаем МВЭ при непосредственном наблюдении как самое ограничительное.

Оценка облучения на основе воздействия одиночного импульса [см. условие 5.2, перечисление a)]

По таблице 5 МВЭ одиночного импульса такого излучения с длительностью излучения 20 нс:

$$H_{МВЭ} = 5\cdot10^{-3}\ C_4 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2},$$

где $C_4 = 10^{0{,}002\ (903-700)} = 2{,}55$, следовательно

$$H_{МВЭ} = 5\cdot10^{-3}\cdot2{,}55 = 1{,}275\cdot10^{-2} \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Оценка усредненного облучения [см. условие 5.2, перечисление b)]

Для определения МВЭ для длительности облучения 100 с применяют таблицу 5. При $a \le 1{,}5$ мрад $T_2 = 10$ с, поэтому применяем условие $t > T_2$:

$$E_{МВЭ\ средн} = 10\ C_4\ C_7 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2},$$

где $C_4 = 2{,}55$ и $C_7 = 1$.

Так как частота повторения импульсов составляет 300 Гц, усредненное значение МВЭ за импульс составит

$$H_{МВЭ\ средн} = \frac{E_{МВЭ\ средн}}{F}\ \frac{10\cdot2{,}55\cdot1}{300} = 8{,}5\cdot10^{-2} \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Оценка облучения для последовательности импульсов [см. условие 5.2, перечисление c)]

Среднее значение облученности для последовательности импульсов не должно превышать МВЭ для одиночного импульса, умноженного на поправочный коэффициент C_5 (где $C_5 = N^{-1/4}$). Максимальная длительность облучения, для которой должно быть применено требование перечисления c), является T_2 в диапазоне длин волн 400—1400 нм, где $T_2 = 10$ с при $a \le \alpha_{min}$. Следовательно

$$H_{МВЭ\ одиноч.\ имп} = H_{МВЭ} = 5\cdot10^{-3}\cdot2{,}55 = 1{,}275\cdot10^{-2} \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}.$$

$$H_{МВЭ\ послед.\ имп} = H_{МВЭ\ одиноч.\ имп}\cdot N^{-1/4} = 1{,}275\cdot10^{-2}\ (10\cdot300)^{-1/4} \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}.$$

$$H_{МВЭ\ послед.\ имп} = 0{,}135\cdot1{,}275\cdot10^{-2} = 1{,}72\cdot10^{-3} \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Вывод — условие 5.2, перечисление c), является самым ограничивающим для МВЭ в импульсе, поэтому при непосредственном наблюдении $H_{МВЭ} = 1{,}72\cdot10^{-3}$ Дж·м$^{-2}$. Подстановка этого значения МВЭ в уравнение (В.4) дает

$$НОГР = \frac{1}{0{,}01}\sqrt{\frac{4\cdot600\cdot10^{-9}}{\pi\,1{,}72\cdot10^{-3}}} - \frac{0{,}055}{0{,}01} = 2{,}11 - 5{,}5 = -3{,}39 \text{ м}.$$

Поскольку результат отрицательный, лазер безопасен при непосредственном наблюдении на любом расстоянии. Следовательно, при наблюдении невооруженным глазом этот лазер безопасен, и соответствующее значение НОГР равно нулю;

b) наблюдение с использованием бинокля.

Для того чтобы определить расширенное НОГР, определяют коэффициент оптического усиления G биноклей из уравнений (В.6) и (В.7) и меньшее из двух значений подставляют в уравнение (В.8).

Принимают, что специальные лазерные ослабляющие фильтры не используются:
($\tau = 1$), тогда из уравнения (В.6) получаем

$G = M^2 = 8^2 = 64$ и уравнение (В.7) дает $G = \frac{D_0^2}{49} = \frac{50^2}{49} = 51$. Тогда подстановка

$G = 51$ в уравнение (В.8) дает

$$НОГР_{расширенное} = \frac{1}{0{,}01}\sqrt{\frac{4 \cdot 51 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{\pi 1{,}72 \cdot 10^{-3}}} - \frac{0{,}055}{0{,}01} = 9{,}6 \text{ м}.$$

Следовательно, наблюдать работу такого лазерного прибора в бинокль 8×50 с расстояния меньше 9,6 м опасно.

Пример В.6.6

Измеритель дальности на основе лазера на стекле с неодимом с модулированной добротностью имеет следующие характеристики:

- длина волны λ . . . . . 1060 нм;
- пиковая импульсная мощность P_p . . . . . 1,5 МВт;
- энергия импульса Q_p . . . . . 45 мДж;
- частота повторения импульсов F . . . . . 12 Гц;
- выходной диаметр апертуры пучка a . . . . . 10 мм;
- угол расходимости пучка φ . . . . . 1 мрад.

Определяют:

a) НОГР для невооруженного глаза;

b) НОГР для невооруженного глаза, когда на апертуре дальномера установлен 10 %-ный пропускающий фильтр и

c) НОГР при непосредственном наблюдении с использованием оптических средств диаметром 50 мм.

Пренебрегают эффектами ослабления пучка или преломления фокуса из-за пропускания атмосферы.

Решение:

a) ширина импульса t_p может быть вычислена из условия $P_p \cdot t_p = Q_p$,

при $1{,}5 \cdot 10^6$ $t_p = 45 \cdot 10^{-3}$ получим $t_p = 30$ нс (т. е. $10^{-9} < t_p < 5 \cdot 10^{-5}$ с). Частота повторения пульсов F равна 12/60 = 0,2 Гц.

В этом примере $\alpha \le \alpha_{min}$. Если нет непосредственного наблюдения, используем длительность облучения 100 с; за это время число импульсов

$$N = F \cdot t = 0{,}2 \text{ Гц} \cdot 100 \text{ с} = 20.$$

Используют самую ограничительную МВЭ при непосредственном наблюдении, вычисленное из подраздела 5.2.

Оценка облучения на основе воздействия одиночного импульса [см. условие 5.2, перечисление a)]

По таблице 5 МВЭ одиночного импульса такого излучения с длительностью излучения 20 нс:

$$H_{МВЭ} = 5 \times 10^{-2} \, C_7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2},$$

по таблице 8 $C_7 = 1$, поэтому

$$H_{МВЭ \text{ одиноч. имп}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Оценка усредненного облучения [см. условие 5.2, перечисление b)]

По таблице 5 МВЭ для длительности излучения 100 с:

$$H_{МВЭ} = 90 \cdot t^{0{,}75} \, C_6 \, C_7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2},$$

где $C_7 = 1$. При 20 импульсах за 100 с средняя МВЭ за импульс

$$H_{МВЭ \text{ средн}} \frac{90 \cdot 100^{0{,}75}}{20} = 142 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Оценка облучения для последовательности импульсов [см. условие 5.2, перечисление c)]

Максимальная длительность излучения, для которой должно быть применено требование перечисления c), является T_2 в диапазоне длин волн 400—1400 нм, где $T_2 = 10$ с, при $\alpha \le \alpha_{min}$. Поэтому при вычислении $H_{МВЭ \text{ последов. имп}}$ используют поправочный коэффициент $N^{-1/4} = (10 \cdot 0{,}2)^{-1/4} = 0{,}84$:

$$H_{МВЭ \text{ последов. имп}} \, H_{МВЭ \text{ одиночн. имп}} \, N^{-1/4} = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}84 = 4{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Вывод: условие 5.2, перечисление c), предполагает самое ограничивающее значение МВЭ для импульса, поэтому при непосредственном наблюдении $H_{МВЭ} = 4{,}2 \cdot 10^{-2}$ Дж·м$^{-2}$. После подстановки этого значения МВЭ в уравнение (В.4) с учетом того, что модовая структура этого твердотельного лазера неизвестна, энергия импульса должна быть увеличена на коэффициент $k = 2{,}5$. Поэтому

$$НОГР = \frac{1}{\varphi}\sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}5 \cdot Q}{\pi \cdot H_{МВЭ\ последов.\ имп}}} - \frac{a}{\varphi};$$

$$НОГР = \frac{1}{10^{-3}}\sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}5 \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-2}}} - \frac{10^{-2}}{10^{-3}} = 1837\ м.$$

Поэтому НОГР для лазерного измерителя дальности равен 1,84 км;

b) если на апертуре дальномера установлен 10 %-ный пропускающий фильтр, НОГР уменьшается. В этом случае, используя предыдущее уравнение для НОГР, умножают энергию импульса на коэффициент 0,1 и учитывают влияние 10 %-ного фильтра. Тогда новое значение НОГР определяется уравнением

$$НОГР = \frac{1}{10^{-3}}\sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{\pi\ 4{,}2 \cdot 10^{-2}}} - \frac{10^{-2}}{10^{-3}} = 574\ м;$$

c) НОГР при непосредственном наблюдении лазера с использованием оптических средств диаметром 50 мм увеличивается на коэффициент оптического усиления G и может быть определено из уравнения (B.7); после подстановки в уравнение (B.8) получают $НОГР_{Расширенная}$.

Из уравнения (B.7), принимая $\tau = 1$, $G = 50^2/49 = 51$, и из уравнения (B.8):

$$НОГР_{Расширенная} = \frac{1}{10^{-3}}\sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}5 \cdot 51 \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{\pi\ 4{,}2 \cdot 10^{-2}}} - \frac{10^{-2}}{10^{-3}} = 13{,}18\ км.$$

Таким образом, при очень короткой длительности импульса лазера с использованием оптических средств даже самое краткое по времени облучение глаза может быть опасным на расстоянии менее 13,18 км от лазера.

B.7 Диффузные отражения и протяженные источники

Примерами протяженных источников являются:

a) лазерное излучение в диапазоне длин волн 400—1400 нм при отражениях его от диффузной поверхности (видимый источник);

b) изображение, сформированное на сетчатке глаза диффузным отражением, большее, чем определенное минимальное значение относящегося к сетчатке глаза изображения, определяемого пределом стягиваемого угла α_{min}, где α_{min} равен 1,5 мрад и измерен на расстоянии не менее 100 мм от видимого источника (см. 5.4).

В МЭК 60825-10 определены три области для наблюдения диффузного отражения. Предполагается, что источник диффузного отражения с диаметром пятна D, тогда α_{min} определяется в диапазоне r_{max} (= D/α_{min}), за пределами которого существует малый источник. Этим определяется первая из этих трех областей для наблюдения диффузного отражения. Вторая область существует, когда стягиваемый угол $\geq \alpha_{max}$ = 0,1 рад соответствует диапазону r_{min} (= D/α_{max}). Между r_{min} и r_{max} есть зона перехода между очень большими, относящимися к сетчатке глаза изображениями, и условиями наблюдения малого источника. В МЭК 60825-10 предложена блок-схема, которая помогает вычислению диапазонов опасности, однако перед переходом к модулю 2 этой блок-схемы проверяют, что $r_{max} \geq 100$ мм; если нет, переходят к модулю 7A или 7B блок-схемы в зависимости от значения МВЭ. Точно так же проверяют, что $r_{min} \geq 100$ мм; если нет, переходят к модулю 5A или 5B блок-схемы в зависимости от значения МВЭ.

Пример B.7.1

Излучение лазера с модулируемой добротностью на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом (λ = 1064 нм, $t = 10^{-8}$ с), прежде чем быть отраженным от идеального рассеивателя, расширено и сформирован пучок диаметром 2 см.

a) Определяют дальность, на которой будут условия наблюдения протяженного источника.

b) Вычисляют значение МВЭ на расстоянии 2,5 м от рассеивателя.

Решение: значение стягиваемого угла определяют уравнением

$$\alpha = 2\ \text{arctg}\ \frac{d_{63}}{2r_1} \approx \frac{d_{63}}{r_1},$$

где d_{63} — диаметр лазерного пучка перед рассеивающей мишенью.

a) В предельном случае $\alpha = \alpha_{min}$, поэтому

$$r_{1,\ max} = \frac{d_{63}}{\alpha_{min}}.$$

Для этого примера

$$r_{1\ max} = \frac{0{,}02\ м}{1{,}5 \cdot 10^{-3}\ рад} = 13{,}3\ м.$$

На расстояниях, больших, чем $r_{1,\ max}$ = 13 м, возникают условия наблюдения малого источника.

МВЭ малого источника для указанной длительности излучения определяют по таблице 5:

$$H_{МВЭ} = 5{\cdot}10^{-2}{\cdot}C_7\ Дж{\cdot}м^{-2},$$

где C_7 = 1 для λ = 1 064 нм (см. таблицу 8).

Таким образом,

$$H_{МВЭ} = 5{\cdot}10^{-2}{\cdot}1\ Дж{\cdot}м^{-2} = 5{\cdot}10^{-2}\ Дж{\cdot}м^{-2}.$$

b) На расстояниях меньше $r_{1,\ max}$ = 13 м возникают условия наблюдения протяженного источника.

МВЭ малого источника для указанной длительности излучения определяют по таблице 6:

$$H_{МВЭ} = 5{\cdot}10^{-2}\ C_6\ C_7\ Дж{\cdot}м^{-2},$$

где также C_7 = 1 и $C_6 = \alpha/\alpha_{min}$ для $\alpha_{min} < \alpha \le \alpha_{max}$ (α_{max} = 0,1 рад).

На расстоянии r_1 = 2,5 м

$$\alpha = \frac{d_{бз}}{r_1} = \frac{0{,}020\ м}{2{,}5\ м} = 8{\cdot}10^{-3}\ рад\ и$$

$$C_6 = \frac{\alpha}{\alpha_{min}} = \frac{8{,}0{\cdot}10^{-3}\ рад}{1{,}5{\cdot}10^{-3}\ рад} = 5{,}33.$$

Следовательно, МВЭ при наблюдении протяженного источника на расстоянии 2,5 м равна

$$H_{МВЭ} = 5{\cdot}10^{-2}{\cdot}5{,}33{\cdot}1\ Дж{\cdot}м^{-2} = 0{,}27\ Дж{\cdot}м^{-2}.$$

Пример В.7.2

Найти максимальную энергию излучения от лазера в примере 7.1, позволяющую безопасное наблюдение отраженного от совершенного диффузора излучения с расстояния менее 0,2 м от глаза наблюдателя.

Решение: с расстояния менее 0,2 м условия наблюдения таковы, что угол приема α больше, чем α_{max} = 0,1 рад:

$$\alpha = \frac{d_{бз}}{r_1} = \frac{0{,}020\ м}{2{,}5\ м} = 0{,}1\ рад.$$

Энергетическая экспозиция падающего пучка может вызвать опасное диффузное отражение в условиях наблюдения этого протяженного источника и может быть выражена как МВЭ интегральной энергетической яркости. Это выполняется делением диффузного отражения излучения, равного МВЭ, на телесный угол, равный максимальному приемному углу. Когда максимальный приемный угол α_{max} = 0,1 рад соответствует телесному углу Ω, выраженному как $\Omega \approx \pi\ (\alpha_{max}/2)^2 = 7{,}85{\cdot}10^{-3}$ ср, и диффузное отражение излучения, равное МВЭ, как интегральная энергетическая яркость равно:

$L_{МВЭ} = (C_6/\Omega)\ H_{МВЭ\ малого\ источника} = (66{,}66/7{,}85{\cdot}10^{-3})\ H_{МВЭ\ малого\ источника}$;

$L_{МВЭ} = 8{,}5{\cdot}10^{3}{\cdot}H_{МВЭ\ малого\ источника}\ Дж{\cdot}м^{-2}{\cdot}ср^{-1}$.

Интегральную энергетическую яркость в данном случае МВЭ вычисляют подстановкой МВЭ малого источника из В.5.2:

$$L_{МВЭ} = 8{,}5{\cdot}10^{3}{\cdot}5{,}0{\cdot}10^{2}\ Дж{\cdot}м^{-2}{\cdot}ср^{-1} = 425\ Дж{\cdot}м^{-2}{\cdot}ср^{-1}.$$

Интегральная энергетическая яркость диффузного отражения связана с энергетической экспозицией падающего пучка через выражение

$$H = \pi\ L_p.$$

Следовательно, энергетическая экспозиция как источник опасности при 100 %-ном отражении от белого диффузного отражателя равна

$$H_{МВЭ} = \pi\ ср \cdot L_{МВЭ}\ Дж{\cdot}м^{-2}{\cdot}ср^{-1} = 1{,}34{\cdot}10^{3}\ Дж{\cdot}м^{-2}.$$

Тогда, предполагая, что энергия излучения равномерно распределена по площади участка поверхности A, энергетическая экспозиция, достаточная, чтобы произвести опасное отражение, равна:

$$Q_{МВЭ} = H_{МВЭ}\ A = H_{МВЭ}\ (\pi/4)\ d^{\,2}_{бз} = 1{,}34{\cdot}10^{3}\ (\pi/4)\ 0{,}02^2 = 0{,}42\ Дж.$$

Пример В.7.3

Найти минимальное безопасное расстояние наблюдения по нормали от экрана совершенного диффузора, если выходное излучение лазера в примере В.5.2 сфокусировано на экран.

Решение: в данном случае излучение отражено полусферически и направлено наружу от точки фокуса на диффузной поверхности Ламберта, поэтому применимы условия наблюдения малого источника. На расстоянии r_1 от Ламбертова источника энергетическая экспозиция равна

$$H = \frac{Q\cos\theta}{\pi r_1^2},$$

где θ — угол наблюдения относительно нормали к поверхности.

НОГР для Ламбертова источника определяется с использованием МВЭ малого источника:

$$\text{НОГР} = \sqrt{\frac{Q\cos\theta}{\pi H_{\text{МВЭ малый источник}}}}.$$

Максимальное выходное излучение лазера, определенное в предыдущем примере, равно 0,42 Дж, а угол наблюдения относительно нормали к поверхности θ = 0 рад. С учетом идеального отражения от поверхности НОГР равно

$$\text{НОГР} = \sqrt{\frac{0{,}42\cos\theta}{\pi\,0{,}05}} = 1{,}6 \text{ м}.$$

В.8 Защита глаз

Оптическая плотность D_λ защитных очков обычно сильно зависит от длины волны излучения лазера и должна быть достаточной, чтобы уменьшить излучение до уровня ниже МВЭ на максимально обоснованное ожидаемое время экспозиции (см. 8.4.5.2.2). Значение D_λ, обеспечивающее необходимый уровень защиты зрения, вычисляют из уравнения (В.9) или уравнения (В.10), где

$$D_\lambda = \lg\frac{E_0}{\text{МВЭ}}, \qquad \text{(В.9)}$$

если E_0 — максимальная предполагаемая интенсивность падающего в незащищенный глаз излучения, а МВЭ выражена как интенсивность падающего излучения или если

$$D_\lambda = \lg\frac{H_0}{\text{МВЭ}}, \qquad \text{(В.10)}$$

где H_0 — максимальная предполагаемая энергетическая экспозиция в незащищенном глазу, а МВЭ выражена как энергетическая экспозиция.

Пример В.8.1

Найти оптическую плотность защитных очков для оператора лазерного дальномера из примера В.6.6.

Решение: МВЭ одиночного импульса с длительностью экспозиции 100 с была вычислена в примере В.6.6 и равна $4{,}2\cdot10^{-2}$ Дж·м$^{-2}$. Энергетическая экспозиция, испытанная человеком при непосредственном наблюдении лазерного излучения, равна

$$H_0 = \frac{4k\cdot Q}{\pi d_{63}^2},$$

где d_{63} равно 10 мм, Q = 45 мДж и k = 2,5 для неизвестной модовой структуры, тогда H_0 = 1432 Дж·м$^{-2}$ и оптическая плотность определяется уравнением В.10

$$D_\lambda = \lg\frac{1432}{4{,}2\cdot10^{-2}} = 4{,}53.$$

Обычно в интересах безопасности результат округляют до следующего целого значения, тогда оптическая плотность будет равна 5.

Пример В.8.2

Найти оптическую плотность защитных очков для оператора лазерного дальномера из примера В.6.1.

Решение: МВЭ равна 10 Вт·м$^{-2}$. Энергетическая экспозиция, испытанная человеком при непосредственном наблюдении лазерного излучения, H_0 равна

$$H_0 = \frac{4kQ}{\pi d_{63}^2},$$

где d_{63} равняется 1 мм, P = 4 Вт и, как определено в примере В.6.1, k = 1.

Поскольку диаметр пучка в 1 мм меньше ограничивающей апертуры 7 мм (см. таблицу 2) на длине волны излучения (550 нм в примере В.6.3), то интенсивность падающего излучения вычисляют с учетом ограничивающей апертуры, а не фактического диаметра пучка, следовательно, $E_0 = 1{,}04\cdot10^5$ Вт·м$^{-2}$ и оптическая плотность определяется уравнением В.9

$$D_\lambda = \lg\frac{1{,}04\cdot10^5}{10} = 4{,}0.$$

Таким образом, оптическая плотность равна 4.

В.9 Составные малые источники

В.9.1 Комплексный лазерный источник на диодной матрице

Найти МВЭ, применимую для непосредственного наблюдения пучка, для времени 10 с при облучении на расстоянии 1 м от комплексного лазерного источника на диодной матрице на арсениде галлия (905 нм). Источник состоит из двух рядов по 10 диодов в каждом, которые установлены позади коллимирующей оптической системы. Выходная мощность источника 6 Вт, частота повторения импульсов F составляет 12 кГц. Длительность импульса 80 нс. Выходная апертура (коллимирующая линза) составляет 5 см в диаметре, диаметр выходящего пучка составляет 3,5 см в точке максимальной энергетической освещенности 1/e (т. е. измеряемая круглая апертура 3,5 см может собрать 63 % мощности пучка). Осевая энергетическая освещенность пучка (в среднем) на расстоянии 1 м равна $3{,}6\times10^{3}$ Вт·м$^{-2}$. Расхождение пучка 25 мрад по горизонтали и 3 мрад по вертикали, расстояние от выходной апертуры 1 м, размер пучка составляет приблизительно 3,0×3,8 см соответственно.

Фотография внутри пучка (используют инфракрасный фильм) на расстоянии 1 м от выходной апертуры показывает, что каждый диод стягивает проекционную линию изображения 2,2 мрад в длину и менее 0,5 мрад в ширину. Каждый диод отделен углом 3,0 мрад (от центра до центра), а ряды отделены углом 2,3 мрад (см. рисунок В.1). Использование инфракрасного электронно-оптического преобразователя с фильтром, имеющим оптическую плотность 4, для уменьшения бликов показало, что эти угловые разделения постоянны для всех расстояний при наблюдении между 10 см и 2 м[1)].

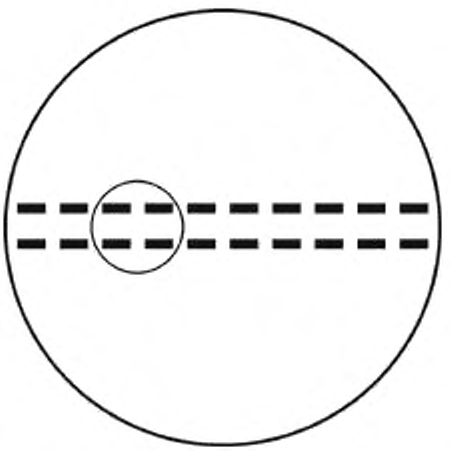


Рисунок В.1 — Лазерный источник на диодной матрице с двумя группами

Решение: МВЭ, применимая к лазерному источнику на диодной матрице, должна быть наиболее ограничивающей, исходя из оценки каждого отдельного источника и каждой возможной группировки диодной матрицы. Однако оценка может быть упрощена при использовании консервативного предположения, что вся мощность излучения исходит от одного точечного источника. Это всегда увеличивает уровень опасности и, если бы она не приводила к чрезмерно ограничительным мерам контроля, то не был бы нужен более сложный анализ протяженного источника.

Определение применяемой (наиболее ограничивающей) МВЭ требует эмпирического подхода, начиная с МВЭ для одного диода, двух соседних диодов, группы из трех или четырех и т. д. и всего множества, заданного для вычислений; признание, что в каждом случае мощность или энергия усреднены по стягиваемому углу α, применимому к такому расположению источников. Полезно воссоздать карту расположения источников, для изучения различных комбинаций диодов (см. рисунок В.1). Общее число импульсов N за время экспозиции 10 с составляет 120000.

МВЭ одиночного импульса для усредненной оценки мощности задан (см. таблицу 6 для импульса длительностью 80 нс) следующим выражением:

$$H_{\text{МВЭ последов. имп}} = C_5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} C_4 C_6 \ \text{Дж·м}^{-2} = 120000^{-0{,}25} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}57\ C_6 \ \text{Дж·м}^{-2} = 6{,}9 \cdot 10^{-4}\ C_6 \ \text{Дж·м}^{-2}.$$

[1)] Это свойство объяснено в главе 15 Sliney и Wolbarsht, Безопасность лазерных и других оптических источников, Нью-Йорк: Plenum Publishing Co., 1980.

Для того чтобы сравнить МВЭ одиночного импульса со средней интенсивностью излучения пучка, удобно выразить вышеупомянутую МВЭ (выраженную в единицах энергетической экспозиции) как облученность, усредненную по частоте импульсов F в секунду следующим образом:

$$E_{\text{МВЭ последов. имп } F} = H_{\text{МВЭ последов. имп}} \cdot F = 6{,}9 \cdot 10^{-4}\ C_6\ \text{Дж·м}^{-2} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{4}\ \text{Гц} = 8{,}28 \cdot C_6\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

МВЭ одиночного импульса для усредненной оценки мощности задана (см. таблицу 6 для экспозиции 10 с) следующим выражением:

$$H_{\text{МВЭ сред}} = 18 \cdot t^{\,0{,}75}\ C_4 C_6\ \text{Дж·м}^{-2} = 18 \cdot t^{\,0{,}75} \cdot 2{,}57\ C_6\ \text{Дж·м}^{-2} = 260 \cdot C_6\ \text{Дж·м}^{-2}.$$

Вышеупомянутую МВЭ, выраженную как энергетическая экспозиция, можно также выразить как энергетическую освещенность, усредненную по экспозиции 10 с, следующим образом:

$$E_{\text{МВЭ сред}} = H_{\text{МВЭ сред}}/t = 260 \cdot C_6\ \text{Дж·м}^{-2}/(10\ \text{с}) = 26 \cdot C_6\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

Так как C_6 зависит только от стягиваемого группой диодов угла, в уравнениях для $E_{\text{МВЭ последов. имп, } F}$ и $E_{\text{МВЭ, сред}}$ сохраняется то же значение, следовательно, для этого примера $E_{\text{МВЭ последов. имп, } F}$ является наиболее ограничивающим.

Установка с одним диодом

Отдельный диод стягивает угол 0,5 мрад (по вертикали) и 2,2 мрад (по горизонтали). МВЭ для прямоугольных источников определяют среднеарифметическим значением стягиваемых углов. По 3.3.3 перед определением значения любой стягиваемый угол менее 1,5 или более 100 мрад заменяют на 1,5 или 100 мрад соответственно. Поэтому среднее значение должно быть

$$(1{,}5 + 2{,}2)/2\ \text{мрад} = 1{,}85\ \text{мрад}.$$

Это значение больше 1,5 мрад, поэтому отдельный диод считают протяженным источником и поправочный коэффициент $C_6 = 1{,}85/1{,}5 = 1{,}23$. Применяемая МВЭ должна быть

$$E_{\text{МВЭ, диода}} = E_{\text{МВЭ последов. имп, } F} = 8{,}28 \cdot 1{,}23 = 10{,}2\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

Это значение МВЭ не применяют к общей энергетической освещенности, а предпочтительнее к энергетической освещенности отдельного диода. Предполагая, что все диоды имеют одинаковую мощность излучения, это значение МВЭ сравнивают с общей энергетической освещенностью, деленную на число диодов, т. е. на 20.

$$E_{\text{диода}} = E_{\text{общая}}/20 = 3\ 600/20 = 180\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

Значение МВЭ превышено на расстоянии 1 м на множитель $180/10{,}2 = 17{,}6$.

Горизонтальная группа из двух диодов

Возможна расстановка группы из двух диодов, расположенных рядом по горизонтали, стягивающих углы 0,5 мрад (по вертикали) и 5,2 мрад (по горизонтали). При замене 0,5 мрад на 1,5 мрад в соответствии с 4.3.3 среднеарифметическое значение двух угловых размеров равно $(1{,}5 + 5{,}2)/2$ мрад = 3,35 мрад. Поправочный коэффициент $C_6 = 3{,}35/1{,}5 = 2{,}23$, следовательно, применяют следующую МВЭ:

$$E_{\text{МВЭ гор, два}} = E_{\text{МВЭ последов. имп, } F} = 8{,}28 \cdot 2{,}23 = 18{,}5\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

Энергетическая освещенность этой группы вдвое больше энергетической освещенности одного диода, поэтому сравнивают МВЭ следующим образом:

$$E_{2\ \text{диода}} = E_{1\ \text{диод}} \cdot 2 = 180 \cdot 2 = 360\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

На расстоянии 1 м множитель опасного фактора равен $360/18{,}5 = 19{,}5$. Следовательно, такая расстановка двух диодов увеличивает опасный фактор, т. е. требуется более консервативная МВЭ, чем для одного диода.

Вертикальная группа из двух диодов

Возможна расстановка группы из двух диодов, расположенных рядом по вертикали, стягивающих углы 2,8 мрад (по вертикали), 2,2 мрад (по горизонтали). Среднеарифметическое значение двух угловых размеров 2,5 мрад. Следовательно, поправочный коэффициент $C_6 = 2{,}5/1{,}5 = 1{,}67$. Применяемая МВЭ:

$$E_{\text{МВЭ, верт, два}} = E_{\text{МВЭ последов. имп. } F} = 8{,}28 \cdot 1{,}67 = 13{,}8\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

Так как энергетическая освещенность этой группы вдвое больше энергетической освещенности одного диода, поэтому сравнивают МВЭ следующим образом:

$$E_{2\ \text{диода}} = E_{1\ \text{диод}} \cdot 2 = 180 \cdot 2 = 360\ \text{Вт·м}^{-2}.$$

На расстоянии 1 м множитель опасного фактора равен $360/13{,}8 = 26{,}1$. Следовательно, при таком расположении опасный фактор больше, чем в предыдущем примере.

Группа из четырех диодов

Возможна расстановка группы из двух диодов, расположенных рядом (2×2) и стягивающих углы 2,8 мрад (по вертикали) и 5,2 мрад (по горизонтали). Среднеарифметическое значение двух угловых размеров равно 4 мрад. Следовательно, поправочный коэффициент C_6 = 4/1,5 = 2,67. Применяемая МВЭ:

$$E_{\text{МВЭ, 4 диода}} = E_{\text{МВЭ последов. имп. } F} = 8{,}28 \cdot 2{,}67 \text{ Вт·м}^{-2} = 22{,}1 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

Так как энергетическая освещенность этой группы вчетверо больше энергетической освещенности одного диода, то МВЭ сравнивают следующим образом:

$$E_{\text{4 диода}} = E_{\text{1 диод}} \cdot 4 = 180 \cdot 4 = 720 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

На расстоянии 1 м множитель опасного фактора равен 720/22,1 = 32,5. Следовательно, при таком расположении опасный фактор больше, чем во всех предыдущих.

Горизонтальная группа из десяти диодов

Возможна расстановка группы из 10 диодов, расположенных рядом по горизонтали, стягивающих углы 0,5 мрад (по вертикали) и 29,2 мрад (по горизонтали). Заменяют 0,5 мрад на 1,5 мрад в соответствии с 4.3.3, тогда среднеарифметическое значение двух угловых размеров (1,5 + 29,2)/2 мрад = 15,3 мрад. Поправочный коэффициент C_6 = 15,3/1,5 = 10,2.

$$E_{\text{МВЭ, 10 диодов}} = E_{\text{МВЭ последов. имп. } F} = 8{,}28 \cdot 10{,}2 = 84{,}5 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

Так как группа содержит 10 диодов, МВЭ сравнивают следующим образом:

$$E_{\text{10 диодов}} = E_{\text{1 диод}} \cdot 10 = 180 \cdot 10 = 1800 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

На расстоянии 1 м множитель опасного фактора равен 1800/84,5 = 21,3.

Группа из двадцати диодов

Последняя рассматриваемая расстановка — группа из 20 диодов, расположенных рядом по горизонтали в два ряда. Стягиваемый по вертикали угол аналогичен группе из 4 диодов, т.е. 2,8 мрад и по горизонтали 29,2 мрад. Среднее значение составляет 16 мрад. Поправочный коэффициент C_6 = 16/1,5 = 10,7 и, соответственно, значение МВЭ равно:

$$E_{\text{МВЭ, 20 диодов}} = E_{\text{МВЭ последов. имп. } F} = 8{,}28 \cdot 10{,}7 = 88{,}3 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

На расстоянии 1 м множитель опасного фактора равен 3600/88,3 = 40,7. Следовательно, при таком расположении опасный фактор больше, чем во всех предыдущих.

После вычислений ясно, что другие группы, например три расположенных рядом по горизонтали диода, шесть расположенных рядом диодов (2 × 3) и т. д., дают опасные факторы менее 40,7. Поэтому значение опасного фактора 40,7 используют для оценки опасности матрицы.

Дополнительные замечания

Важно отметить, что при других расположениях диодов предельный случай можно получить из группировки только части источника, а не из совокупности всех элементов. Например, допускается рассчитывать другое множество, составленное из 20 диодов, расположенных в двух рядах по 10 диодов в каждом, с такими же угловыми размерами и теми же расстояниями по вертикали, как в примере, описанном выше, но с расстоянием от центра до центра диода по горизонтали 6 мрад.

В этом случае стягиваемый угол, который используется для всего множества, равен (2,8 + 56,2)/2 мрад = = 29,5 мрад, и наиболее ограничивающая МВЭ задается $E_{\text{МВЭ последов. имп. } F}$. Следовательно, поправочный коэффициент C_6 = 29,5/1,5 = 19,7 и применяют следующую МВЭ:

$$E_{\text{МВЭ, 20 диодов}} = E_{\text{МВЭ последов. имп. } F} = 8{,}28 \cdot 19{,}7 = 163 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

Опасный фактор всего множества равен 3600/163 = 22,1.

Тогда C_6 = 11,5/1,5 = 7,67. Стягиваемый этой группой угол равен (2,8 + 20,2)/2 = 11,5 мрад. Тогда C_6 = 11,5/11 = 1,05. Следовательно, применяемая МВЭ:

$$E_{\text{МВЭ, восемь}} = E_{\text{МВЭ последов. имп. } F} = 8{,}28 \cdot 7{,}67 \text{ Вт·м}^{-2} = 63{,}5 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

Это значение сравнивают следующим образом:

$$E_{\text{МВЭ, 8 диодов}} = E_{\text{1 диод}} \cdot 8 = 180 \cdot 8 = 1440 \text{ Вт·м}^{-2}.$$

Опасный фактор такой группировки равен 1440/63,5 = 22,7. Так как значение 22,7 является наибольшим, то оно рассматривается как опасный фактор для этого множества.

Факт, что целая матрица дает опасный фактор, меньший, чем для группы из восьми диодов, не означает, что целая матрица из 20 диодов менее опасна, чем собранная из восьми диодов. Это значит, что в конкретном случае правильная оценка опасности не получена, т. к. 20 диодов рассматривались как один однородный источник со стягиваемым углом 29,5 мрад, а анализ части проводился как для всего множества. Необходимо учитывать факт, что в целом источник неоднороден.

Требование к оптической плотности

Для защиты пользователя на расстоянии 1 м от лазерного излучения требуется защитный фильтр с коэффициентом ослабления 40,7. Оптическая плотность 1,7 согласуется с коэффициентом ослабления 50 и обеспечивает адекватную защиту от лазера на расстоянии 1 м.

Также необходимо, чтобы фильтр обеспечивал защиту от излучаемой мощности, т. к. даже при достаточной оптической плотности возможны повреждения от излучения.

Используя упрощенный подход и аппроксимируя точечный источник вместо вычислений для группы, получают МВЭ для всего множества 8,28 Вт·м$^{-2}$. Таким образом, после аппроксимации точечного источника на расстоянии 1 м получают облученность, превышающую МВЭ в 3600/8,28 = 435 раз. Требуемая оптическая плотность должна быть lg 435 = 2,64 или больше. Следует отметить, что аппроксимация точечного источника приводит к оценке опасности, более чем в четыре раза превышающей оценку, полученную при более точном подходе к группе диодов.

Использование оптического устройства

Обычные телескопы и бинокли не позволяют сфокусировать объекты на расстоянии 1 м. Однако для настоящего примера возможно использование устройства с кратностью 3$^{\times}$ для наблюдения лазера с расстояния 1 м. Для этого требуется дополнительный анализ.

Апертура этого устройства — 21 мм, т.е. менее размера пучка. Поэтому увеличивают мощность на коэффициент $3^2 = 9$. Стягиваемый в пространстве угол увеличивают на коэффициент 3 для устройства с кратностью 3$^{\times}$. Это необходимо для выполнения ранее приведенных вычислений, но с учетом новых значений для угловых размеров и мощности каждой группы.

Так как метод измерения требует максимального приемного угла α_{max} = 100 мрад для приема излучения (см. 4.3.3.), когда один из двух угловых размеров группы, например горизонтальный (обозначенный $\alpha_{гор}$), больше, чем α_{max}, мощность группы должна быть уменьшена на коэффициент $\alpha_{max}/\alpha_{гор}$, с тем чтобы исключить часть источника, находящуюся вне приемного угла. Кроме того, любой стягиваемый угол должен быть ограничен до α_{max} для определения среднеарифметического значения, используемого при вычислении C_6, как указано в 4.3.3. Однако в этом конкретном примере все стягиваемые углы меньше α_{max}.

Анализ наблюдения с помощью оптических устройств различных диодных групп показывает, что максимальное значение опасного фактора получено в группе из 20 диодов. Это значение, равное 122, требует дополнительной оптической плотности lg 122 = 2,1.

Следует отметить, что в других ситуациях оценка проще, если источник является равномерным, или пучок больше апертуры 3$^{\times}$ оптического устройства, или стягиваемые каждой группой углы (включают всю площадь) находятся между α_{min} и α_{max} при наблюдении как вооруженным, так и невооруженным глазом. Фактически в этом случае оптика может собрать приблизительно в девять раз большую мощность, но источник будет казаться в три раза больше. Следовательно, пока поправочный коэффициент C_6 в три раза больше, опасность, исходящая от этого оптического устройства, в три раза выше опасности для невооруженного глаза.

В этом конкретном случае, даже если источник является неоднородным, опасный фактор приблизительно в три раза выше для невооруженного глаза. Однако в других случаях результаты могут быть иными.

Обычно бинокль пропускает приблизительно 70 % излучения на конкретной длине волны с подводом 0,15 дополнительной оптической плотности. Следовательно, необходимая оптическая плотность с трехкратным увеличением составляет OD = 2,1 – 0,15 = 1,95. Таким образом, OD 1,95 или более обеспечивает защиту как для вооруженного, так и для невооруженного глаза при прямом наблюдении пучка на расстоянии 1 м от выходной апертуры.

Приложение С
(справочное)

Учет биофизических факторов

С.1 Анатомия глаза (см. рисунок С.1)

С.1.1 Рисунок С.1 (А) Анатомия глаза

Диаграмма внешнего вида левого глаза. Края век ограничивают поле зрения глаза до формы миндаля. Основные части передней поверхности глаза на схеме снабжены надписями и указаны пунктирными линиями и стрелками.

С.1.2 Рисунок С.1 (В) Схема повреждения биологических структур лазером

Схема горизонтального сечения левого глаза. Глаз разделен на две части: переднюю камеру, которая ограничена роговой оболочкой, радужной оболочкой и хрусталиком, и заднюю камеру, которая ограничена сетчаткой и содержит желеобразное стекловидное вещество.

С.1.3 Рисунок С.1 (С)

Внутренняя полость неповрежденного глаза, видимая через офтальмоскоп. Этот прибор направляет пучок света через зрачок и освещает внутреннюю полость глаза, позволяя видеть глазное дно, которое имеет красноватый оттенок, однако хорошо видны главные сосуды сетчатки. Другими важными частями являются беловатый оптический диск и центральная ямка. Центральная ямка представляет собой небольшое углубление в сетчатке, которое может быть более интенсивно окрашено, чем окружающая сетчатка; она является областью наиболее острого зрения.

С.1.4 Рисунок С.1 (D)

Структура сетчатки в разрезе [см. рисунок С.1(В)], увеличенная по сравнению с натуральной примерно в 320 раз. Сетчатка состоит из ряда слоев нервных, а также фоточувствительных клеток: палочек и колбочек, т. е. свет, падающий на поверхность сетчатки, проходит через слои нервных клеток, а затем достигает фоточувствительных клеток. Под слоем палочек и колбочек находится слой, который называется «пигментным эпителием» и содержит коричневато-черный пигмент — меланин; ниже находится слой с тонкими кровеносными сосудами хориокапиллярами.

Конечным поглощающим слоем является хороид, который содержит как пигментные клетки, так и кровеносные сосуды.

С.1.5 Рисунок С.1 (Е)

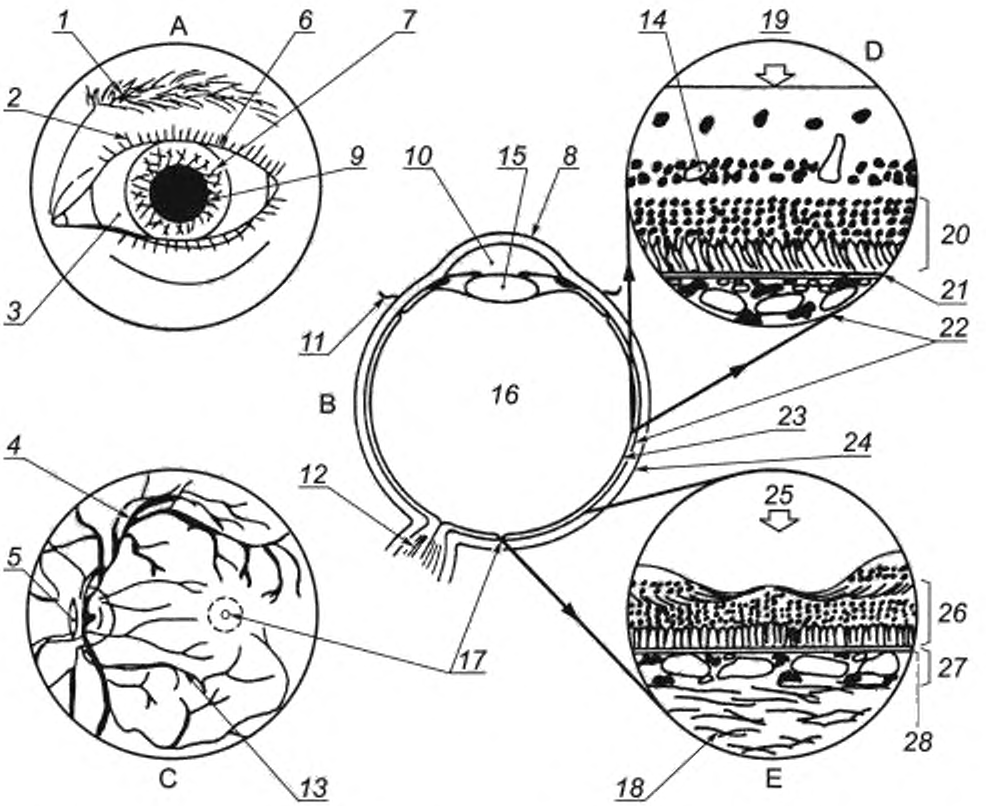
Структура области центральной ямки, увеличенная примерно в 150 раз. В ней представлены только колбочки. Нервные клетки расположены радиально в этой области наиболее острого зрения. Пигмент пятна, наиболее сильно поглощающий излучение в диапазоне от 400 до 500 нм, расположен в волоконном слое Хенла.

С.2 Влияние лазерного излучения на биологическую ткань

Механизм повреждения лазерным излучением аналогичен для всех биологических систем и может включать в себя тепловые воздействия, термоакустические переходные процессы, фотохимические процессы и нелинейные эффекты. Степень участия каждого из этих воздействий в повреждении ткани может быть связана с определенными физическими параметрами источника облучения, наиболее важными из которых являются длина волны, длительность импульса, размер изображения, облученность и энергетическая экспозиция.

При экспозициях выше пороговых доминирующее воздействие связано с длительностью импульса облучения. Так, при увеличении длительности импульса, т. е. при наносекундных и субнаносекундных облучениях, основными являются акустические переходные процессы и нелинейные эффекты; при длительностях от 1 мс до нескольких секунд — тепловые эффекты; при длительностях свыше 10 с — фотохимические эффекты.

Лазерное излучение отличается от большинства других известных видов излучения коллимированностью пучка. Этот фактор совместно с высокой начальной энергией приводит к передаче тканям большого количества энергии. Основным моментом при повреждении лазерным излучением любого типа является поглощение излучения биологической структурой. Поглощение происходит на атомарном или молекулярном уровне и зависит от длины волны. Таким образом, длина волны определяет, какая ткань может быть повреждена от излучения конкретного лазера.

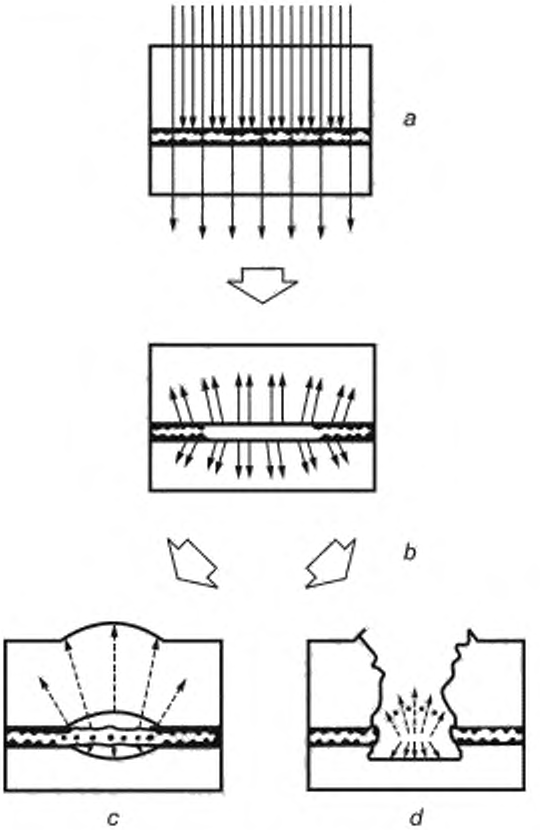


1 — бровь; *2* — ресница; *3* — склера, *4* — вена сетчатки; *5* — оптический диск; *6* — веко; *7* — радужная оболочка; *8* — роговая оболочка (стекловидная передняя поверхность глаза); *9* — зрачок; *10* — водянистое тело; *11* - конъюктива; *12* — выход оптического нерва; *13* - артерия сетчатки; *14* — кровеносные сосуды; *15* — хрусталик; *16* — стекловидное тело; *17* — фовеа; *18* — склера, *19* — свет; *20* — рецепторные клетки (палочки и колбочки); *21* — эпителий пигмента, *22* — сосудистая оболочка; *23* — сетчатка, *24* — склера; *25* — свет; *26* — рецепторные клетки (колбочки), *27* — сосудистая оболочка; *28* — эпителий пигмента

Рисунок С.1 — Анатомия глаза

Тепловые эффекты

Если структура поглотила достаточное количество энергии излучения, то колебания составляющих ее молекул увеличиваются, а это означает увеличение количества тепла. Повреждения от лазерного излучения в большинстве случаев связаны с нагревом поглощающей ткани или тканей. Обычно такое термическое повреждение имеет ограниченную площадь, расположенную по сторонам участка поглощения лазерной энергии с центром в месте падения пучка. Клетки в пределах этой области имеют признаки ожога, и повреждение ткани связано, главным образом, с разрушением протеина. Как показано выше, действие вторичных механизмов повреждения при воздействии лазерного излучения может быть связано с временем реакции нагрева ткани, т. е. непосредственно с длительностью импульса лазера (см. рисунок С.2) и временем поглощения тепла. Термохимические реакции происходят во время нагревания и во время охлаждения и определяют зависимость размера пятна от теплового поражения. Если на ткань направлен непрерывный лазер или лазер, генерирующий длинные импульсы, то вследствие проводимости площадь структуры, испытывающей воздействие повышенной температуры, постепенно увеличивается. Такой распространяющийся тепловой фронт создает возрастающую зону повреждения, т. к. все большее число клеток нагревается выше теплового предела. Размер изображения пучка также имеет большое значение, поскольку степень периферийного распространения вследствие проводимости является функцией размера, а также температуры начальной области нагрева ткани. Такой тип теплового повреждения обычно связан с воздействием непрерывных лазеров, лазеров с длинными импульсами, но также возможен и от лазеров с короткими импульсами. Для облучаемых поверхностей с размером пятна 1—2 мм или менее от лучевого теплового потока определяется размер поврежденного пятна.



a — лазерная энергия поглощается биологической структурой; *b* — поглощенная энергия создает тепло, которое распространяется в окружающие ткани; *c* — при воздействии непрерывных лазеров или лазеров с длинными импульсами сохранение теплового фронта постепенно увеличивает область поражения; *d* — при воздействии лазеров с короткими импульсами высокая плотность мощности создает взрывное разрушение клеток и повреждение в результате физического смещения

Рисунок С.2 — Схема повреждения биологических структур лазером

Фотохимические эффекты

Степень повреждений может быть также обусловлена поглощением света молекулами. Этот процесс вызывается поглощением света с определенной энергией. Однако помимо освобождения энергии вещество также подвергается воздействию химической реакции, присущей этому состоянию. Эта фотохимическая реакция способна нанести повреждение и при низких уровнях воздействия. В этом процессе некоторые биологические ткани, такие как кожа, хрусталик глаза и, в особенности, сетчатка, могут показать необратимые изменения, вызванные длительным воздействием облучения ультрафиолетом и светом коротких длин волн. Такие фотохимические изменения могут привести к повреждению структуры, если длительность облучения является чрезмерной или кратковременные облучения повторяются в течение длительного времени. Отдельные фотохимические реакции, вызываемые лазерным облучением, могут носить характер патологии или ухудшения. Фотохимические реакции в общем следуют закону Бунзена и Роско и для длительности примерно от 1 до 3 ч или менее (играют роль соответствующие механизмы) пороговой величиной является энергетическая экспозиция в постоянном или широком диапазоне по длительности воздействия. Зависимость размера пятна, как происходит в случаях с тепловыми эффектами, при тепловой диффузии не существует.

Нелинейные эффекты

Лазеры с короткими импульсами, характеризующиеся высокой пиковой мощностью (например, с модулированной добротностью или синхронизацией мод), могут вызывать повреждение ткани при различных комбинациях механизмов передачи энергии. Энергия воздействует на биологическую мишень в течение очень короткого времени, и поэтому создается высокая облученность. Ткани мишени нагреваются так быстро, что жидкие компоненты клеток преобразуются в газ. В большинстве случаев эти фазовые изменения происходят так быстро и

имеют такой взрывной характер, что клетки разрываются. Перепады давления, возникшие в результате, создают вокруг ожогового центра круглую зону разрыва. Подобные перепады давления могут создаваться тепловым расширением и приводить к травмам тканей, удаленных от поглощающих слоев, в результате объемного физического смещения. При облучении с субнаносекундной длительностью приблизительно между 10 пс и 1 нс вследствие самофокусировки глаз в них концентрируется энергия коллимированного пучка лазера, что приводит к понижению порога безопасной экспозиции. Также проявляются другие нелинейные оптические механизмы, которые играют роль в повреждении сетчатки глаза в субнаносекундном диапазоне.

Все описанные выше механизмы повреждения воздействуют на сетчатку, влияют на точки прерывания программы или изменяют значение уровней безопасной экспозиции, приведенных в настоящем стандарте.

Таблица С.1 — Патологические изменения, связанные с чрезмерным облучением светом

<table>
<tr><th>Спектральный диапазон МКО[а)]</th><th>Глаз</th><th colspan="2">Кожа</th></tr>
<tr><td>Ультрафиолетовый С
(180—280 нм)</td><td rowspan="2">Фотокератит</td><td rowspan="2">Эритема
(солнечный ожог).
Процессы ускоренного старения кожи.
Увеличение пигментации</td><td rowspan="2">—</td></tr>
<tr><td>Ультрафиолетовый В
(280—315 нм)</td></tr>
<tr><td>Ультрафиолетовый А
(315—400 нм)</td><td>Фотохимическая катаракта</td><td rowspan="2">Потемнение пигмента.
Фоточувствительные реакции</td><td rowspan="5">Ожог кожи</td></tr>
<tr><td>Видимый
(400—780 нм)</td><td>Фотохимическое и тепловое повреждение сетчатки</td></tr>
<tr><td>Инфракрасный А
(730—1400 нм)</td><td>Катаракта, ожог сетчатки</td><td rowspan="3">—</td></tr>
<tr><td>Инфракрасный В
(1,4—3,0 мкм)</td><td>Отек, катаракта,
ожог роговой оболочки</td></tr>
<tr><td>Инфракрасный С
(от 3,0 мкм до 1 мм)</td><td>Только ожог роговой оболочки</td></tr>
<tr><td colspan="4">[а)] Спектральные диапазоны, определенные МКО, следует использовать для описания биологических изменений, при этом надо учитывать, что они могут не полностью соответствовать спектральным диапазонам в таблицах значений МВЭ.</td></tr>
</table>

С.2.1 Опасность повреждения глаз

Краткое описание анатомии глаза приведено в С.1. Глаз специально приспособлен для приема и преобразования оптического излучения. Поглощающее свойство глаза по отношению к излучению с различными длинами волн показано на рисунке С.2, а патологические изменения, вызываемые чрезмерным облучением, приведены в таблице С.1. Так, например, лазеры, излучающие в ультрафиолетовом и дальнем инфракрасном диапазоне, представляют опасность для роговой оболочки глаза, а системы, излучающие в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, могут воздействовать на сетчатку.

Лазеры видимого и ближнего инфракрасного диапазона особенно опасны для глаз, поскольку глаз в силу своих свойств является эффективным преобразователем света, в результате чего ткани с сильной пигментацией подвергаются энергетической экспозиции высокого уровня. Возрастание облученности от роговой оболочки сетчатки к внутренним частям глаза примерно пропорционально отношению площади зрачка к площади изображения на сетчатке. Это возрастание обусловлено тем, что свет, прошедший через зрачок, фокусируется в «точке» на сетчатке. Зрачок имеет переменную апертуру, но его диаметр может достигать 7 мм при максимальном расширении, что характерно для молодого возраста. Изображение на сетчатке, соответствующее такому зрачку, может иметь диаметр от 10 до 20 мкм. Из-за внутриглазного рассеивания и аберраций роговицы возрастание облученности от роговой оболочки к сетчатке составляет примерно 2×10^5. Если предположить, что возрастание составляет 5×10^5, то пучок, дающий на роговой оболочке энергетическую освещенность 50 Вт·м$^{-2}$, которая на сетчатке соответственно будет равна 1×10^7 Вт·м$^{-2}$. В настоящем стандарте предполагается, что зрачок диаметром 7 мм представляет собой предельную апертуру, что при облучении глаз является самым плохим случаем (зрачок измерялся у людей молодого возраста).

В качестве исключения допускается, что при определении предела экспозиции для защитных ограничений против фоторетинита при наблюдении яркого видимого лазерного источника (400—700 нм) для периода, превышающего 10 с, применяют зрачок диаметром 7 мм. В этом случае 3 мм зрачок принят как условие наихудшего случая; однако усреднение измерений энергетической освещенности до апертуры 7 мм считается приемлемым для физиологических движений зрачка в пространстве.

Если интенсивный лазерный пучок фокусируется на сетчатке, то лишь небольшая часть света (до 5 %) будет поглощаться пигментами в палочках и колбочках. Бóльшая часть света будет поглощаться пигментом, называемым меланином, содержащимся в эпителии. (В области пятна некоторое количество энергии в диапазоне от 400 до 500 нм будет поглощаться пигментом пятна.) Поглощенная энергия будет вызывать местный нагрев и ожог как эпителия пигмента, так и соседних чувствительных к свету палочек и колбочек. Этот ожог или повреждение может привести к потере зрения. Фотохимические повреждения, даже нетепловые, также локализуются в эпителии пигмента.

В зависимости от экспозиции такая потеря зрения может иметь временный или постоянный характер. Ухудшение зрения обычно замечается самим пострадавшим, только если повреждена центральная или наиболее чувствительная часть пятна. Центральная ямка — углубление в центре пятна, является наиболее важной частью сетчатки, поскольку в ней достигается наибольшая острота зрения. Именно эта часть сетчатки используется тогда, когда необходимо «что-то хорошо разглядеть». Угол видения центральной ямки равен углу видения Луны. Если эта область повреждена, то ухудшение зрения может сначала проявляться в виде появления размытого белого пятна, затеняющего центральную область зрения. Через две или более недели оно может превратиться в черное пятно. Пострадавший даже может перестать ощущать это пятно и видеть нормально. Однако его можно сразу обнаружить, если смотреть на пустой визуальный объект, например лист белой бумаги. Повреждения на периферийных участках можно субъективно обнаружить только при обширных повреждениях сетчатки. Небольшие периферийные повреждения могут оставаться незамеченными и не обнаруживаться даже при систематических обследованиях окулистами.

В диапазоне длин волн 400—1400 нм самая большая опасность — повреждение сетчатки глаза. Роговая оболочка, водянистое тело, хрусталик глаза и стекловидное тело проницаемы для излучения на этих длинах волн. В случае хорошо коллимированного пучка опасность фактически не зависит от расстояния между источником излучения и глазом, потому что относящееся к сетчатке глаза изображение предполагается в виде пятна диаметром приблизительно от 10 до 20 мкм. В этом случае с учетом теплового равновесия относящаяся к сетчатке глаза зона опасности ограничивается стягиваемым углом α_{min}, который в общем соответствует сетчатке глаза диаметром приблизительно 25 мкм.

В случае протяженного источника опасность меняется в зависимости от расстояния наблюдения от источника до глаза, потому что мгновенная облученность сетчатки глаза зависит от излучения источника и особенностей хрусталика глаза; термическая диффузия тепловой энергии от больших изображений на сетчатке глаза менее действенна и приводит к зависимости размера пятна на сетчатке глаза для тепловых повреждений, которые не содержат фотохимической опасности (преобладающей только в диапазоне 400—600 нм). Кроме того, движения глаз далее распространяют поглощенную энергию излучения лазера, работающего в непрерывном режиме, и приводят к разным зависимостям риска для отличающихся размеров изображения на сетчатке глаза.

В качестве основы для ограничений при облучении глаз в области сетчатки глаза применяют поправочный коэффициент, учитывающий движение глаз при длительности наблюдения более 10 с. При быстрых движениях глаз поглощенная энергия распространяется при минимальных изображениях на сетчатке глаза (25 мкм или менее) при длительности 0,1—10 с, поэтому условия наблюдения ограничивают с запасом по безопасности. За 0,25 с на сетчатке глаза появляется небольшое освещенное пятно диаметром приблизительно 50 мкм. За 10 с относящаяся к сетчатке глаза освещенная зона увеличивается приблизительно до 75 мкм и минимальный коэффициент, с запасом по безопасности, равен 1,7 по отношению к стабильному состоянию глаза с учетом размера пятна. За 100 с обычно образуется освещенная зона не менее 135 мкм (измерения проводят на 50 % точек), поэтому с запасом по безопасности минимальный коэффициент равен 2—3 или более.

Данные исследований движения глаз, относящихся к сетчатке, и исследований тепловых повреждений были объединены для получения контрольной точки времени T_2, за которое движения глаз компенсируют увеличенный теоретический риск теплового повреждения при повышенной облученности сетчатки глаза в сравнении с неподвижным глазом. Так как тепловой порог повреждения, выраженный как мощность излучения, проникающего в глаза, понижается при увеличении длительности воздействия t при повышении мощности до уровня 0,25 (т. е. понижение только на 44 % при десятикратном увеличении длительности), то только умеренное увеличение воздействия на сетчатку глаза может компенсировать увеличение риска для большего времени наблюдения. Постоянно увеличивающаяся область воздействия излучения на сетчатке глаза как результат значительных движений глаз при увеличении времени наблюдения увеличивает компенсационное время, необходимое для уменьшения воздействия тепловой диффузии в больших протяженных источниках. Таким образом, для увеличения стягиваемого угла α контрольная точка T_2 увеличивается с 10 с для малых источников до 100 с — для больших источников. При времени более 100 с не происходит дальнейшего увеличения риска теплового поражения при

малых и средних размерах изображения. При определении пределов и условий измерения учитывают эти переменные с некоторым упрощением, приводящим к консервативному определению риска. Предполагается, что относящиеся к сетчатке глаза тепловые пороги повреждения изменяются обратно пропорционально размеру изображения (стабилизированному) приблизительно между 25 мкм и 1 мм (1 мкм соответствует угловому размеру 59 мрад); при размере изображения свыше 1,7 мм (соответствует угловому размеру свыше 100 мрад) зависимости нет.

Для повреждений сетчатки глаза, вызванных фотохимическим путем, нет зависимости размера пятна для устойчивого изображения. В отличие от механизма теплового поражения пороги для фотохимического поражения сильно зависят от длины волны и дозы облучения, таким образом пороги воздействия уменьшаются обратно пропорционально увеличению времени воздействия. Исследования фотохимического повреждения сетчатки глаза от дуговой сварки со стягиваемыми углами от 1 до 1,5 мрад показывают, что типичные размеры повреждения примерно от 185 до 200 мкм (соответствуют визуальным углам от 11 до 12 мрад), и ясно указывают на влияние движений глаз во время фиксации; эти и другие исследования движений глаз во время фиксации приводят к установлению МВЭ, защищающей от фотохимического поражения сетчатки глаз. Эти исследования также привели к определению МВЭ при усреднении размеров источников более 11 мрад для длительности воздействия от 10 до 100 с. Следовательно, источники со стягиваемым углом менее 11 мрад рассматривают одинаково с точечными источниками, а величина α_{min} расширена до наблюдения непрерывного лазера. Этот подход не является строго корректным, поскольку измерение энергетической освещенности источников со стягиваемым углом 11 мрад неэквивалентно усредненной энергетической освещенности при углах больше поля зрения γ 11 мрад, если источник не имел прямоугольного распределения излучения. Следовательно, в настоящем стандарте различие сделано между стягиваемым углом источника и усредненной энергетической освещенностью для значения МВЭ при фотохимическом воздействии. Для времени наблюдения приблизительно от 30 до 60 с прерывистое движение глазами обычно является психосоматическим, определяется визуальной задачей, и обычно неверно предполагают, что источник света был бы отображен исключительно в ямке с длительностью более 100 с. По этой причине γ_p увеличен линейно на квадратный корень из t. Минимальный стягиваемый угол α_{min} корректно оставить углом приведения 1,5 мрад для всех длительностей воздействия, используемых в оценке тепловой опасности, относящейся к сетчатке глаза. Однако для оценки фотохимической опасности, относящейся к сетчатке глаза, решения различны, поскольку угол γ_p является линейным для измерения энергетической освещенности, а для применения к протяженным источникам важно, чтобы угол приблизительно превышал 11 мрад.

Расстояние наблюдения

В случае точечного типа источника с расходящимся пучком опасность увеличивается с уменьшением расстояния между сужением пучка и глазом, т. к. с уменьшением расстояния собранная мощность увеличивается, в то время как размер изображения на сетчатке глаза, можно считать, остается дифракционно-ограниченным истинными лазерными источниками до расстояния, близкого к 100 мм (вследствие аккомодационных способностей глаза). Самая большая опасность происходит на самом коротком расстоянии аккомодации. При дальнейшем уменьшении расстояния опасность для невооруженного глаза также понижается, поскольку быстро растет изображение на сетчатке глаза и соответственно уменьшается облученность, даже если собирается больше мощности. Для того чтобы смоделировать риск наблюдения коллимированного пучка с биноклем или телескопом, принимают за основу самое близкое расстояние, равное примерно 2 м с 50-миллиметровой апертурой, которое принимают базовым для ясного наблюдения.

Для целей настоящего стандарта самое короткое расстояние аккомодации человеческого глаза установлено равным 100 мм для всех длин волн от 400 до 1400 нм. Это является компромиссом, потому что на расстоянии менее 100 мм не могут аккомодировать глаза молодые люди и некоторое число близоруких. Это расстояние можно использовать для измерения облученности в случае непосредственного наблюдения пучка.

Для длин волн менее 400 или более 1400 нм самой большой опасностью является повреждение линзы или роговой оболочки. В зависимости от длины волны оптическое излучение поглощается большей частью или исключительно роговой оболочкой или линзой (см. таблицу С.1). Для источников с расходящимся пучком (протяженный или точечный) на этих длинах волн следует избегать коротких расстояний между источником и глазом.

В диапазоне длин волн 1500—2600 нм излучение проникает в водянистое тело. Поэтому нагревающий эффект рассеивается по большему объему глаза, и МВЭ для экспозиции менее 10 с увеличивают. Самое большое увеличение МВЭ происходит для самых коротких по длительности импульсов в пределах диапазона длин волн 1500—1800 нм, когда объем абсорбции максимальный. Для отрезков времени более 10 с с учетом теплопроводности тепловая энергия перераспределяется так, чтобы воздействие от глубины проникновения не было существенным.

С.2.2 Опасность повреждения кожи

Кожа может выдерживать гораздо более сильное воздействие лазерной энергии, чем глаз. Биологическое воздействие облучения кожи лазерами, работающими в видимом (от 400 до 700 нм) или инфракрасном (от 700 нм) спектральных диапазонах, может приводить как к легкой эритеме, так и к ожогу 2-й степени. В тканях с высоким поверхностным поглощением после облучения излучением лазеров с очень короткими и мощными импульсами большей частью происходит обугливание без промежуточной эритемы.

Пигментация, изъязвление кожи, появление на ней шрамов и повреждение расположенных под кожей органов могут происходить при чрезвычайно высокой облученности. Установлено, что скрытые или кумулятивные воздействия лазерного излучения не являются преобладающими. Однако отдельные исследования показали, что при определенных условиях небольшие участки тканей человека могут приобрести повышенную чувствительность к повторяющимся местным облучениям, в результате чего уровень облучения для минимальных реакций изменяется, а реакции тканей при таком низком уровне облучения становятся более сильными.

В диапазоне длин волн 1500—2600 нм исследования биологических порогов показывают, что риск повреждения кожи аналогичен риску для глаз. Для длительностей воздействия до 10 с МВЭ увеличивают в пределах этого спектрального диапазона.

С.3 МВЭ и усредненная облученность

В настоящем стандарте значения МВЭ были адаптированы в соответствии с имеющимися рекомендациями ICNIRP. Аналогично были адаптированы апертуры усредненной облученности (измерительные апертуры), рекомендованные ICNIRP, либо применялся дополнительный практический фактор по безопасности технического комитета МЭК ТК 76.

Таблица С.2 — Пояснение к измерительным апертурам, применяемым к соответствующим значениям МВЭ

Спектральный диапазон λ, нм	Время экспозиции t, с	Диаметр апертуры, мм	Комментарии и обоснование диаметра апертуры
180—400	$t < 3 \cdot 10^4$	1	Разброс в эпителии роговицы и в слое роговой оболочки до 1 мм; предположение о неподвижности облучаемой ткани для условия непрерывного облучения приемлемо для МЭК. Однако из-за движения глаз при продолжительной экспозиции рекомендуется 3,5 мм
400—600 (фотохимический)	$t > 10$	3 для определения МВЭ, но для измерений используют 7	Боковое движение зрачка диаметром 3 мм в пространстве воспроизводит апертуру диаметром 7 мм, усредненную для непрерывного излучения лазера, что применимо для механизма фотохимического повреждения
400—1400 (термический)	Любое значение t	7	Диаметр расширенного зрачка и боковое движение зрачка для непрерывного излучения лазера
$\lambda > 1400$	$t < 0{,}35$	1	Тепловая диффузия в слое роговицы глаза и тканях эпителия
$\lambda > 1400$	$0{,}35 < t < 10$ $t > 10$	$1{,}5 \cdot t^{3/8}$ 3,5	Большая тепловая диффузия и движение «ткань-мишени» (при облучении) относительно пучка после 0,35 с
$10^5 \le \lambda \le 10^6$	Любое значение t	11	Апертура больше, чем предел дифракции (т. е. приблизительно $10^{\times}$) для точных измерений

С.4 Справочные документы

1 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines onlimits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 µm. *Health Phys.* 1996, 71 (5), 804–819

2 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Revision of guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1,4 µm. *Health Phys.* 79 (4), 431–440

3 NESS, J., ZWICK, H.A., STUCK, B.A., LUND, D.J., MOLCHANY, J.A. and SLINEY, D.H. Retinal image motion during deliberate fixation: implications to laser safety for long duration viewing. *Health Phys.* 78 (2), 131–142

4 ROACH, W.P., JOHNSON, P.E. and ROCKWELL, B.A. Proposed maximum permissible exposure limits for ultrashort laser pulses, *Health Phys.* 76 (4), 349–354

5 SLINEY, D.H. and WOLBARSHT, M.L. *Safety with Lasers and Other Optical Sources*, New York, Plenum Publishing Corp., 1980

6 United Nations Environment Programme (UNEP); World Health Organization (WHO). International Radiation Protection Association (IRPA). *Environmental Health Criteria No. 23: Lasers and Optical Radiation*, Geneva, WHO, 1982

Библиография

[1] МЭК 60027-1:1992 Обозначения буквенные, применяемые в электротехнике. Часть 1. Основные положения
(IEC 60027-1:1992) (Letter symbols to be used in electrical technology — Part 1: General)
[2] МЭК 60050-845 Международный электротехнический словарь — Глава 845: Освещение
(IEC 60050-845) (International Electrotechnical Vocabulary (IEV) — Chapter 845: Lighting)
[3] IEC 60300-3-9:1995 *Dependability management — Part 3: Application guide — Section 9: Risk analysis of technological systems*
[4] IEC 60601-2-22:1995 *Medical electrical equipment — Part 2: Particular requirements for the safety of diagnostic and therapeutic laser equipment*
[5] IEC 60825-1 *Safety of laser products — Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*
[6] МЭК 60825-2 Безопасность лазерных устройств. Часть 2. Безопасность волоконно-оптических систем связи
(IEC 60825-2) [Safety of laser products — Part 2: Safety of optical fiber communication systems (OFCS)]
[7] МЭК/ТО 60825-3 Безопасность лазерных устройств. Часть 3. Руководящие указания по применению лазеров для зрелищных мероприятий
(IEC/TR 60825-3) (Safety of laser products — Part 3: Guidance for laser displays and shows)
[8] МЭК 60825-4 Безопасность лазерных устройств. Часть 4. Устройства защиты от лазерного воздействия
(IEC 60825-4) (Safety of laser products — Part 4: Laser guards)
[9] МЭК/ТО 60825-5 Безопасность лазерных устройств. Часть 5. Контрольный перечень к МЭК 60825-1 для изготовителей
(IEC/TR 60825-5) (Safety of laser products — Part 5: Manufacturers checklist for IEC 60825-1)
[10] IEC 60825-6 *Safety of laser products — Part 6: Safety of products with optical sources, exclusively used for visible information transmission to the human eye*
[11] IEC 60825-7 *Safety of laser products — Part 7: Safety of products emitting infrared optical radiation, exclusively used for wireless 'free air' data transmission and surveillance*
[12] МЭК/ТО 60825-8 Безопасность лазерных устройств. Часть 8. Руководящие указания по безопасному использованию лазерных лучей для людей
(IEC/TR 60825-8) (Safety of laser products — Part 8: Guidelines for the safe use of laser beams on humans)
[13] МЭК/ТО 60825-9 Безопасность лазерных устройств. Часть 9. Максимально допустимое воздействие некогерентного оптического излучения
(IEC/TR 60825-9) (Safety of laser products — Part 9: Compilation of maximum permissible exposure to incoherent optical radiation)
[14] МЭК/ТО 60825-10 Безопасность лазерных устройств. Часть 10. Руководство по применению и пояснительные замечания к МЭК 60825-1
(IEC/TR 60825-10) (Safety of laser products — Part 10: Application guidelines and explanatory notes to IEC 60825-1)
[15] IEC 61010-1:2001 *Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use — Part 1: General requirements*
[16] МЭК 61040 Детекторы, контрольно-измерительные приборы и оборудование для измерения мощности и энергии лазерного излучения
(IEC 61040) (Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation)
[17] ISO/IEC Guide 2 *Standardization and related activities. General vocabulary*
[18] ISO/IEC Guide 51:1999 *Safety aspects — Guidelines for their inclusion in standards*
[19] ISO 1000:1992 *SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units*
[20] EN 207 *Personal eye-protection. Filters and eye-protectors against laser radiation (laser eye-protectors)*
[21] EN 208 *Personal eye-protection. Eye-protectors for adjustment work on lasers and laser systems (laser adjustment eye-protectors)*
[22] 1999/519/EC, Council Recommendation of 12 July 1999: On the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)
[23] Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 1998, Vol. 74, No 4, pp. 494—522
[24] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 um. *Health Phys.*, 1996, 71 (5), 804—819

УДК 621.375.826:001.4:006.354 ОКС 13.160, 31.260 Т58 ОКП 63 4200

Ключевые слова: лазерное излучение; длина волны; длительность импульса; энергетическая экспозиция; максимально возможная экспозиция; опасные излучения; УФ-, видимое-, ИК-излучение; энергетическая освещенность; яркость; расходимость пучка; коллимированный пучок; номинальная опасная для глаз зона

Редактор *В. Н. Колысов*
Технический редактор *В. Н. Прусакова*
Корректор *С. В. Смирнова*
Компьютерная верстка *В. Н. Романовой*

Сдано в набор 24.02.2014. Подписано в печать 05.06.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 7,60. Тираж 67 экз. Зак. 346.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru
gost.e-ecolog.ru
Набрано и отпечатано в Калужской типографии стандартов, 248021 Калуга, ул. Московская, 256.

gost.e-ecolog.ru