

Тема 8. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ

8.1. Основные классы опасности и характеристики

Лазер – распространенное название оптического квантового генератора (ОКГ). Генерирует электромагнитные волны ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов.

Лазерное излучение генерируется при длине волн $\lambda = 0,2 - 1000$ мкм.

Особенности лазерного излучения - монохроматичность; острая направленность пучка; когерентность.

Свойства лазерного излучения: высокая плотность энергии (10^{10} - 10^{12} Дж/см²); высокая плотность мощности излучения (10^{20} - 10^{22} Вт/см²).

По виду излучение лазерное излучение подразделяется:

- прямое излучение;
- рассеянное;
- зеркально-отраженное;
- диффузное (излучение, отраженное от поверхности, соизмеримой с длиной волны по всем возможным направлениям в пределах полусферы).

Классификация лазеров по степени опасности излучения – это один из ключевых аспектов обеспечения безопасности работников при работе с оборудованием, генерирующим лазерное излучения. Наиболее распространено присвоения класса опасности на основе схемы классификации лазерных изделий (СКЛ), сформулированных еще в 1981 году Рахмановым Б.Н. и Чистовым [2]. По данной схеме класс лазера определяется на основании 2-х параметров:

- выходной мощности;
- предельно допустимых уровней (ПДУ) излучения при однократном воздействии.

Классификация по степени опасности генерируемого излучения [2, 3]

Лазерные изделия в зависимости от генерируемого излучения подразделяются на четыре класса опасности.

Класс 1. Лазерные изделия безопасные при предполагаемых условиях эксплуатации.

Класс 2. Лазерные изделия, генерирующие видимое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм. Защита глаз обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания.

Класс 3А. Лазерные изделия безопасные для наблюдения незащищенным глазом. Для лазерных изделий, генерирующих излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, защита обеспечивается естественными реакциями, включая рефлекс мигания. Для других длин волн опасность для незащищенного глаза не больше чем для класса 1.

Класс 3В. Непосредственно наблюдение таких лазерных изделий всегда опасно. Видимое рассеянное излучение обычно безопасно.

Класс 4. Лазерные изделия, создающие опасное рассеянное излучение. Они могут вызвать поражение кожи, а также создать опасность пожара. При их использовании следует соблюдать особую осторожность.

Класс опасности лазерных изделий определяется при их разработке и указывается в технических условиях на изделия, эксплуатационной, ремонтной и другой технической и рекламной документации.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения при однократном воздействии — уровни излучения, при воздействии которых существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме работающего. Предельно допустимые уровни лазерного излучения (ПДУ) при регулярном воздействии — уровни излучения, воздействие которых при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводит к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья работающего в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколения [3].

Вредные воздействия лазерного излучения

В зависимости от типа, конструкции и целевого назначения лазеров и

лазерных установок (далее по тексту - лазерных изделий) на обслуживающий персонал могут воздействовать следующие опасные и вредные факторы [4]:

- лазерное излучение;
- сопутствующие факторы:
 - ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное излучения от источников накачки, плазменного факела и материалов мишени;
 - высокое напряжение в цепях управления и источниках электропитания;
 - электромагнитное излучение промышленной частоты и радиочастотного диапазона;
 - рентгеновское излучение от газоразрядных трубок и других элементов, работающих при анодном напряжении более 5 кВ;
 - шум;
 - вибрация;
 - токсические газы и пары от лазерных систем с прокачкой, хладагентов и др.;
 - продукты взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами;
 - повышенная температура поверхностей лазерного изделия;
 - опасность взрыва в системах накачки лазеров.
 - опасность взрывов и пожаров при попадании лазерного излучения на горючие материалы.

Лазерный луч оказывает на человека следующие воздействия:

- 1) термические воздействия;
- 2) энергетические воздействия;
- 3) фотохимические воздействия;
- 4) механическое воздействие (колебания типа ультразвуковых в облученном организме);
- 5) электрострикция (деформация молекул в поле лазерного излучения).

Вредные воздействия лазерный луч оказывает на органы зрения, а также имеют место биологические травмы при облучении кожи. Повреждение кожи может быть вызвано лазерным излучением любой длины волны рассматриваемого спектрального диапазона.

Опасны также лучи, отраженные от любой даже незеркальной поверхности. Общее воздействие выражается в виде расстройства центральной нервной системы, сердечно-сосудистой системы, мозгового кровообращения.

Допустимый предел излучения (ДПИ) - максимально допустимый уровень излучения, разрешенный для определенного класса лазерного изделия [3].

Лазерно безопасным расстоянием для глаз является наименьшее расстояние, на котором энергетическая экспозиция (энергия) не превышает ПДУ для глаз.

Энергетической экспозицией является отношение энергии излучения, падающей на рассматриваемый участок поверхности, к площади этого участка.

В таблице 8.1 приведены возможные опасные и вредные факторы при эксплуатации лазеров разных классов.

Таблица 8.1

Опасные и вредные факторы при эксплуатации лазеров разных классов опасности

№	Опасные и вредные производственные факторы	Класс опасности лазера			
		I	II	III	IV
1	Лазерное излучение: - прямые	-	+	+	+
	- диффузно отраженные	-	-	+	+
2	Повышенная напряженность электрического поля	- (+)	+	+	+
3	Повышенная запыленность, загазованность воздуха рабочей зоны	-	-	- (+)	+
4	Повышенный уровень ультрафиолетовой радиации	-	-	- (+)	+
5	Повышенная яркость света	-	-	- (+)	+
6	Повышенный уровень шума и вибраций	-	-	- (+)	+
7	Повышенный уровень ионизирующих излучений	-	-	-	+

8	Повышенный уровень электромагнитного излучения: СВЧ и ВЧ диапазонов	-	-	-	- (+)
9	Повышенный уровень инфракрасной радиации	-	-	- (+)	+
10	Повышенная температура поверхности оборудования	-	-	- (+)	+

Примечание: (+) – возможны для некоторых типов лазеров в данном классе

8.2. Нормируемые показатели и параметры

Нормируемыми параметрами лазерного излучения являются *энергетическая экспозиция* H и *облученность* E , усредненные по ограничивающей апертуре.

Ограничивающая апертура - круглая диафрагма, ограничивающая поверхность, по которой производится усреднение облученности или энергетической экспозиции [4].

Предельно допустимые уровни нормируемых параметров зависят от:

- длины волны лазерного излучения, мкм;
- продолжительности импульса, с;
- частоты повторения импульса, Гц;
- длительности воздействия излучения, с.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения устанавливаются для двух условий облучения - однократного и многократного для трех диапазонов длин волн [4]:

I – $180 < \lambda \leq 380$ нм;

II – $380 < \lambda \leq 1400$ нм;

III – $1400 < \lambda \leq 1 \cdot 10^5$ нм,

где λ - длина волны лазерного излучения.

Для определения предельно допустимых уровней $H_{пду}$ и $E_{пду}$ при воздействии лазерного излучения на кожу усреднение производится по ограничивающей апертуре диаметром 1,1 мм.

Для определения предельно допустимых уровней $H_{пду}$ и $E_{пду}$ при

воздействии на глаза лазерного излучения в диапазонах I и III усреднение производится также по апертуре диаметром 1,1 мм, а в диапазоне II - по апертуре диаметром 7 мм.

Наряду с энергетической экспозицией и облученностью нормируемыми параметрами являются также *энергия* W и *мощность* P излучения, прошедшего через указанные ограничивающие апертуры.

При оценке воздействия на глаза лазерного излучения в диапазоне II ($380 < \lambda < 1400$ нм) нормирование энергии и мощности лазерного излучения, прошедшего через ограничивающую апертуру диаметром 7 мм, является первостепенным.

Энергетические параметры H , E , W и P связаны соотношениями:

$$H_{\text{пду}} = \frac{W_{\text{пду}}}{S_a}; E_{\text{пду}} = \frac{P_{\text{пду}}}{S_a},$$

где S_a - площадь ограничивающей апертуры.

Контроль параметров лазерного излучения следует проводить [3]:

- а) при приемке в эксплуатацию новых лазерных изделий классов 3А, 3В, 4;
- б) при внесении изменений в конструкцию действующих лазерных изделий, влияющих на параметры лазерного излучения;
- в) при изменении конструкции средств коллективной защиты;
- г) при организации рабочих мест;
- д) при сертификации лазерных изделий;
- е) при плановом контроле.

При контроле лазерного облучения проводят два вида дозиметрического контроля [3]:

- предупредительный - определение значений энергетических параметров лазерного излучения в границах границы рабочей зоны, находящихся на минимально возможных расстояниях от источника излучения, проводят во всех случаях, перечисленных выше;

- индивидуальный - измерение величины энергетических параметров излучения, воздействующего на глаза или кожу конкретного работника в течение рабочего дня проводят в случаях: при изменении конструкции средств коллективной защиты; при организации новых рабочих мест; когда не исключено случайное воздействие лазерного излучения на глаза или кожу.

Под энергетической освещенностью понимается отношение потока излучения, падающего на малый участок поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади этого участка.

Ограничивающей апертурой является круглая диафрагма дозиметра, ограничивающая поверхность, по которой производится усреднение энергетической освещенности или энергетической экспозиции. Диаметр ограничивающей апертуры равен 7 мм при дозиметрическом контроле лазерного излучения с длинами волн 380-1400 нм и 1,1 мм для других диапазонов длин волн.

В зависимости от вида дозиметрического контроля измеряются следующие энергетические параметры лазерного излучения:

а) при предупредительном и индивидуальном контроле:

- максимальное за время контроля значение энергии одиночного импульса излучения или импульса из серии импульсов излучения, проходящего через ограничивающую апертуру W_{\max} , Дж;

- максимальное за время контроля значение энергетической экспозиции от одиночного импульса излучения или от импульса из серии импульсов излучения, проходящего через ограничивающую апертуру H_{\max} , Дж/м² или Дж/см²;

- максимальное за время контроля значение средней мощности непрерывного излучения, проходящего через ограничивающую апертуру P_{\max} , Вт;

- максимальное за время контроля значение облученности от непрерывного излучения, проходящего через ограничивающую апертуру E_{\max} Вт/см² или Вт/м²;

б) при индивидуальном контроле:

- суммарное значение энергии (энергетической экспозиции) всех

импульсов в серии импульсов излучения, проходящего через ограничивающую апертуру W_{Σ} , Дж; H_{Σ} , Дж/м² или Дж/см²;

- суммарное значение энергетической экспозиции за рабочий день H_p (480 мин), Дж/м².

В СанПиН 2.2.4.3359-16 [1] установлены предельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения в диапазоне длин волн от 180 до $1 \cdot 10^5$ нм при эксплуатации различного типа лазерных установок.

В таблицах 8.2-8.7 приведены предельно допустимые уровни (ПДУ) в зависимости от спектрального интервала.

Таблица 8.2.

Соотношения для определения $H_{пду}$, $E_{пду}$ при однократном действии на глаза и кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в диапазоне I. Ограничивающая апертура - 1,1 мм

Спектральный интервал λ , нм	Время действия t , с	$H_{пду}$, Дж · м ⁻² ; $E_{пду}$, Вт · м ⁻² ; ($W_{пду} = H_{пду} \cdot 10^{-6}$; $P_{пду} = E_{пду} \cdot 10^{-6}$)
$180 < \lambda \leq 380$	$t \leq 10^{-9}$	$H_{пду} = 2,5 \cdot 10^7 \sqrt{t^2}$
$180 < \lambda \leq 302,5$	$10^{-9} < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{пду} = 25$
		$E_{пду} = 25 / t$
$302,5 < \lambda \leq 315$	$10^{-9} < t \leq 10^{-15} \cdot 10^{0,8(\lambda-295)}$	$H_{пду} = 4,4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{t}$
	$10^{-15} \cdot 10^{0,8(\lambda-295)} < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{пду} = 0,8 \cdot 10^{0,2(\lambda-295)}$ $E_{пду} = \frac{0,8 \cdot 10^{0,2(\lambda-295)}}{t}$
$315 < \lambda \leq 380$	$10^{-9} < t \leq 10$	$H_{пду} = 4,4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{t}$
	$10 < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{пду} = 8 \cdot 10^3$ $E_{пду} = 8 \cdot 10^3 / t$

Таблица 8.3

Предельные однократные суточные дозы $H_{пду}^{\Sigma}$ за рабочую смену при действии на глаза и кожу лазерным излучением в спектральном диапазоне I

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

Таблица 8.4

Соотношения для определения $H_{пду}$ при однократном действии на глаза коллимированного лазерного излучения в спектральном диапазоне II .
 Время действия меньше 1 с. Ограничивающая апертура – 7 мм

Спектральный интервал λ , нм	Время действия t , с	$H_{пду}$, Дж/м ²
380 < λ ≤ 600	$t \leq 2,3 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^4 \sqrt[3]{t^2}$
	$2,3 \cdot 10^{-11} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$1,5 \sqrt[3]{t^2}$
600 < λ ≤ 750	$t \leq 6,5 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^4 \sqrt[3]{t^2}$
	$6,5 \cdot 10^{-11} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$3,1 \sqrt[3]{t^2}$
750 < λ ≤ 1 000	$t \leq 2,5 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^4 \sqrt[3]{t^2}$
	$2,5 \cdot 10^{-10} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$7,8 \sqrt[3]{t^2}$
1 000 < λ ≤ 1 400	$t \leq 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^4 \sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
	$5,0 \cdot 10^{-5} < t \leq 1,0$	$19,2 \sqrt[3]{t^2}$

Таблица 8.5

Соотношения для определения $E_{пду}$ при однократном действии на глаза коллимированного лазерного излучения в спектральном диапазоне II .
 Время действия больше 1 с. Ограничивающая апертура - 7 мм

Спектральный интервал λ , нм	Время действия t , с	$E_{пду}$, Вт/м ²
380 < λ ≤ 500	$1,0 < t \leq 5,0 \cdot 10^2$	$1,8 / \sqrt[3]{t}$
	$5,0 \cdot 10^2 < t \leq 10^4$	$96 / t$
	$t > 10^4$	$9,6 \cdot 10^{-3}$
500 < λ ≤ 600	$1,0 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$	$1,5 / \sqrt[3]{t}$
	$2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$	$260 / t$
	$t > 10^4$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
600 < λ ≤ 700	$1,0 < t \leq 2,2 \cdot 10^3$	$31 / \sqrt[3]{t}$
	$2,2 \cdot 10^3 < t \leq 10^4$	$520 / t$
	$t > 10^4$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
700 < λ ≤ 750	$1,0 < t \leq 10^4$	$3,1 / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	0,1
750 < λ ≤ 1 000	$1,0 < t \leq 10^4$	$7,8 / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	0,4
1 000 < λ ≤ 1 400	$1,0 < t \leq 10^4$	$19,2 / \sqrt[3]{t}$
	$t > 10^4$	0,9

Таблица 8.6

Соотношения для определения $H_{пду}$, $E_{пду}$ при однократном действии на кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в спектральном диапазоне II. Ограничивающая апертура - 1,1 мм

Спектральный интервал λ , нм	Время действия t , с	$H_{пду}$, Дж/м ² ; $E_{пду}$, Вт/м ²
380 < λ ≤ 500	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{пду} = 2,5 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{пду} = 50 \cdot 10^3 \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^2$
500 < λ ≤ 900	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{пду} = 7,0 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^2$
900 < λ ≤ 1 400	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{пду} = 2,0 \cdot 10^4 \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{пду} = 2,0 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t}$
	$t > 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^2$

Таблица 8.7

Соотношения для определения $H_{пду}$, $E_{пду}$ при однократном действии на глаза и кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения в спектральном диапазоне III. Ограничивающая апертура - 1,1 мм

Спектральный интервал λ , нм	Время действия t , с	$H_{пду}$, Дж/м ² ; $E_{пду}$, Вт/м ²
1 400 < λ ≤ 1 800	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{пду} = 2,0 \cdot 10^4 \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{пду} = 2,0 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t}$
	$t > 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^2$
1 800 < λ ≤ 2 500	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{пду} = 7,0 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^2$
2 500 < λ ≤ 10 ⁵	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{пду} = 2,5 \cdot 10^3 \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{пду} = 5,0 \cdot 10^3 \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{пду} = 5,0 \cdot 10^2$

8.3. Методы и средства защиты от лазерного излучения

Методы защиты от лазерного излучения подразделяются на:

- организационные,
- инженерно-технические,
- санитарно-гигиенические,

- планировочные,
- применение средств индивидуальной защиты.

Мероприятия по организации безопасных условий труда

Предназначены для исключения попадания работников в опасные зоны при работе с лазерными установками.

Мероприятия:

- обучение и проведение инструктажей операторов по безопасным приемам труда;
- размещение лазерных изделий, организация рабочих мест и помещений;
- опасная зона должна быть четко обозначена и ограждена стойкими;
- рабочая зона должна иметь предупредительные знаки;
- контроль лазерной опасности;
- выполнение требования электробезопасности;
- медицинский контроль.
- классификацию лазерных изделий по степени опасности генерируемого излучения;
- перечень опасных и вредных производственных факторов;
- выполнение требований к конструкции лазерных изделий;
- выполнение требований и меры безопасности при эксплуатации и обслуживании лазерных изделий;
- применение средств коллективной защиты, а при необходимости индивидуальной.

Средства индивидуальные защиты от лазерного излучения.

Применяются только в том случае, когда коллективные средства защиты не позволяют обеспечить выполнение безопасных условий труда.

Средства индивидуальной защиты от лазерного излучения:

- средства защиты глаз и лица: защитные очки, щитки;
- средства защиты рук: перчатки;
- специальную одежду.

Дополнительная литература

1. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».
2. Рахманов Б.Н., Чистов Е.Д. Безопасность при эксплуатации лазерных установок. – М.:Машиностроение, 1981.
3. ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий/
4. СанПиН 5804-91 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров»