

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Н. Э. Баумана.

Факультет РЛ
Кафедра РЛ 2

Реферат по теме
"Вопросы лазерной
безопасности"

студента
Майорова Павла
Леонидовича, группа РЛ 3-81.

Руководитель
Щетинкин
Владимир Савельевич.

1. Физиологические эффекты при воздействии лазерного излучения на человека.

Непосредственное воздействие на человека оказывает лазерное излучение любой длины волны, однако в связи со спектральными особенностями поражаемых органов и существенно различными предельно допустимыми дозами облучения обычно различают воздействие на глаза и кожные покровы человека.

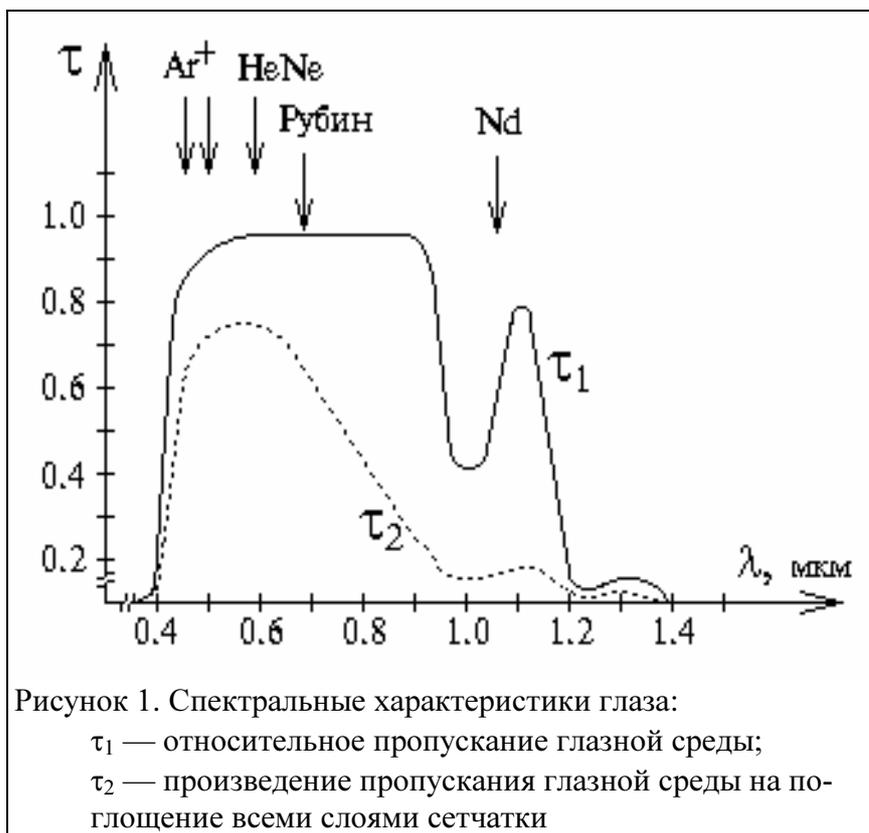
1.1. Воздействие лазерного излучения на органы зрения

Основной элемент зрительного аппарата человека — сетчатка глаза — может быть поражена лишь излучением видимого (от 0.4 мкм) и ближнего ИК-диапазонов (до 1.4 мкм), что объясняется спектральными характеристиками человеческого глаза (рис. 1). При этом хрусталик и глазное яблоко, действуя как дополнительная фокусирующая оптика, существенно повышают концентрацию энергии на сетчатке, что, в свою очередь, на несколько порядков понижает максимально допустимый уровень (МДУ) облученности зрачка.¹

1.1.1. МДУ прямого облучения сетчатки

Кроме длины волны λ , необходимо учитывать также длительность воздействия светового излучения. При очень коротких импульсах (когда не успевают сработать механизмы теплопроводности в области сетчатки) нормируют плотность энергии для видимого излучения ($0.4 < \lambda < 0.7$ мкм) при $\Delta t < 2 \cdot 10^{-5}$ с МДУ облучения роговицы глаза составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Дж/м²; для ИК-излучения ($1.05 < \lambda < 1.4$ мкм) при $2 \cdot 10^{-5} < \Delta t < 5 \cdot 10^{-5}$ с — на порядок больше, то есть $5 \cdot 10^{-2}$ Дж/м². Если длительность импульса превышает 20 мкс для видимого и 20÷50 мкс для ближнего (до 1.4 мкм) излучения, то нормируют в первом приближении плотность мощности: для видимого излучения МДУ составляет $18 \Delta t^{0.75}$ Вт/м²; для ИК-излучения — почти порядок больше, то есть $90 \Delta t^{0.75}$ Вт/м².

¹ Световой диаметр зрачка при расчете МДУ облучения принимают обычно равным 7 мм. Это не всегда соответствует действительности. Например, при большой светлоте (физиологическая оценка яркости) фона — из-за световой адаптации, в пожилом возрасте — из-за уменьшения чувствительности световых рецепторов.



Во всех рассматриваемых далее случаях переходная область спектра — от темно-красного ($\lambda > 700$ нм) до полностью невидимого ближнего ИК-излучения ($\lambda < 1050$ нм) — характеризуется монотонным повышением МДУ от минимального значения (для темно-красного излучения) до максимального (для полностью невидимого ИК-излучения) по закону $C_4 = 10^{(\lambda-700)/500}$.

Приведенные данные по МДУ охватывают область наиболее критических значений параметров облучения зрачка глаза, когда в интервале от 10^{-9} до 10 с причиной повреждения сетчатки является тепловое действие сфокусированного света при прямом наблюдении лазерного пучка, тогда как сверхкороткие лазерные импульсы вызывают в основном термоакустическое воздействие — протоплазма клеток из-за быстрого разогрева закипает и разрывает оболочку. В этом случае нормируют плотность мощности: для видимого излучения МДУ составляет $5 \cdot 10^6$ Вт/м², для ИК-излучения — $5 \cdot 10^7$ Вт/м².

Длительное ($\Delta t > 10$ с) прямое воздействие лазерного излучения на сетчатку приводит в основном к фотохимическим процессам ее разрушения. Чтобы избежать этого (как и в случае сверхкоротких импульсов), нормируют энергетическую освещенность (экспозицию). Для зеленого ($\lambda = 550$ нм) и более коротковолнового ($\lambda > 400$ нм) видимого света МДУ составляет 100 Дж/м². Что касается "теплых" цветов ($550 < \lambda < 700$ нм), то фотохимические процессы начинают играть заметную роль только при больших временных воздействиях лазерного излучения ($T_2 = 10^{0.02(\lambda-500)+1}$ с), и в этом случае МДУ нужно уменьшить в C_3 раз ($C_3 = 10^{0.015(\lambda-550)}$).

Сверхдлительное ($\Delta t > 10^3 \div 10^4$ с) прямое воздействие лазерного излучения характеризуется малым значением МДУ, а именно 0.01 Вт/м² для сине-зеленого ($0.4 < \lambda < 0.55$ мкм) излучения. Более длинноволновое видимое излучение ($550 < \lambda < 700$ нм) допускает МДУ = $10^{0.015(\lambda-500)+2}$ Вт/м². В случае

ИК излучения переход от экспозиционному к мощностному ограничению (когда существенную роль играют регенерационные процессы, компенсирующие фотохимическое разрушение) осуществляется при $\Delta t > 10$ с: для $1.05 < \lambda < 1.4$ мкм МДУ составляет 16 Вт/м^2 ; для $\lambda > 700$ нм (темно-красное излучение) и $\lambda < 1050$ нм (ближнее ИК излучение) монотонно возрастающий МДУ составляет $3.2 \cdot 10^{(\lambda-700)/500} \text{ Вт/м}^2$.

На перечисленные МДУ облучения ориентируются при однократном воздействии на глаз прямого лазерного излучения, фокусируемого хрусталиком в очень незначительное пятно на сетчатке.

При наличии последовательности импульсов не только ни один из них, но и усредненная облученность не должны превышать МДУ. При усреднении воздействия последовательности импульсов с длительностью $\Delta t < 10$ мкс и частотой повторения $f > 1$ Гц МДУ одиночного импульса должен быть уменьшен в C_5 раз:

$$C_5 = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{f}} & \text{для } 1 < f < 278 \text{ Гц} \\ 0.06 & \text{для } f > 278 \text{ Гц} \end{cases} \quad (1.1)$$

Если длительность отдельных импульсов Δt в последовательности превышает 10 мкс (а частота следования $f > 1$ Гц), то для импульса длительностью $N\Delta t$ за ограничение облученности принимают $(1/N)$ -ю часть МДУ.

Наиболее сложно определить МДУ для повторяющихся серий, состоящих из определенного числа импульсов. Когда в серии не более 10 импульсов, ее приравнивают к одному эквивалентному импульсу. При этом:

- 1) если Δt серии меньше 10 мкс, то за длительность эквивалентного импульса принимают длительность самого короткого импульса в серии, а за энергетическое воздействие — суммарное (полное) энергетическое воздействие всей серии;
- 2) если Δt серии больше 10 мкс, то за длительность эквивалентного импульса принимают суммарную длительность парциальных импульсов, а за энергетическое воздействие — суммарное энергетическое воздействие всей серии.

Если в серии более 10 импульсов, то МДУ рассчитывают как для одного, якобы непрерывного импульса, охватывающего всю последовательность.

1.1.2. МДУ для наружных покровов глаз человека

Невидимое УФ ($0.2 < \lambda < 0.4$ мкм) или ИК излучение ($1.4 < \lambda < 1000$ мкм) практически не доходит до сетчатки и потому может повреждать лишь наружные части глаз человека: УФ излучение вызывает фотокератит, средневолновое ИК излучение ($1.4 < \lambda < 3$ мкм) — отек, катаракту и ожог роговой оболочки глаза; дальнее ИК излучение ($3 \text{ мкм} < \lambda < 1 \text{ мм}$) — ожог роговицы. Поэтому МДУ облучения глаз при УФ и ИК излучении рассматривают здесь, хотя (из-за отсутствия фокусирующего действия хрусталика) численные значения данного МДУ на несколько порядков больше значений, приведенных в подразделе "МДУ прямого облучения сетчатки", и соответствуют МДУ для кожных покровов. К тому же для наружных покровов глаза и кожных покровов МДУ нормируют-

ся относительно апертуры диаметром 1 мм (для сетчатки — 7 мм), что еще более снижает требования лучевой безопасности в рассматриваемом случае. Тем не менее эти данные могут оказаться полезными, так как в настоящее время возрастает число коммерческих лазеров, работающих в УФ и ИК диапазонах.

Плотность мощности для сверхкоротких (менее 1 нс) импульсов почти одинакова в обоих диапазонах: 30 ГВт/м² в УФ области и 100 ГВт/м² в ИК области (1.4 мкм < λ < 1 мм).

При больших временах воздействия ситуация наиболее проста для жесткого (200 < λ < 320.5 нм) УФ излучения, где МДУ = 30 Дж/м², вплоть до длительностей облучения 30000 с, то есть свыше 8 часов.

Более сложна система задания МДУ для узкого участка УФ излучения с 302.5 < λ < 315 нм. Для сколько-нибудь длительного воздействия (10 < Δt < 30000 с) МДУ возрастает на 2.5 порядка по закону $C_2 = 10^{(\lambda - 295)/5}$ Дж/м². В области импульсных воздействий (1 нс < Δt < 10 с) такое быстрое нарастание МДУ имеет место лишь при Δt > T₁ = 10^{(λ-295)/5} с; если Δt < T₁, то МДУ не зависит от длины волны и составляет C₁ = 5600(Δt)^{0.75} Дж/м².

МДУ для ближней УФ области (315 < λ < 400 нм) в случае импульсного (1 нс < Δt < 10 с) облучения почти не меняется, составляя C₁ = 5600(Δt)^{0.25} Дж/м², плавно переходящее в 10 КДж/м² для времени облучения от 10 до 1000 с; если длительность облучения превышает 1000 с, то нормируют плотность мощности, и МДУ равно 10 Вт/м².

В ИК области МДУ облучения наружных покровов почти не зависит от длины волны и составляет: для сверхкоротких (Δt < 1 нс) импульсов 100 ГВт/м²; для гигантских (1 нс < Δt < 100 нс) импульсов 100 Дж/м²; для остальных (100 нс < Δt < 10 с) импульсов 5600(Δt)^{0.25} Дж/м². Плотность мощности при непрерывном облучении (10 с < Δt < 30000 с) не должна превышать 1 кВт/м².

Надо отметить, что такие значения справедливы и для дальней ИК области (0.1 < λ < 1 мм) с той лишь разницей, что МДУ задают здесь в апертуре диаметром 11 мм (а не 1 мм, как для УФ и основного ИК диапазонов).

1.1.3. Представление МДУ облучения как поверхности в координатах λ —

Δt

В 825-й публикации МЭК полностью, хотя и не всегда с достаточно высокой точностью, определены МДУ облучения роговой оболочки глаза человека прямым (то есть направленным непосредственно из оптической системы, а не рассеянным на каких-либо шероховатых поверхностях) лазерным излучением. Для удобства практического применения эти рекомендации МЭК представлены в виде таблицы 1.1.

В результате, во первых, появляется возможность достаточно просто (хотя и приближенно) определить численные значения МДУ при прямом облучении глаза человека лазерным излучением. При измерении следует лишь помнить следующие рекомендации МЭК по пространственному усреднению облученности: для 0.2 < λ < 0.4 мкм — внутри круга Ø 1 мм; для 0.4 < λ < 1.4 мкм — внутри круга Ø 7 мм (что соответствует зрачку глаза при темновой адаптации); для 1.4 < λ < 100 мкм — внутри круга Ø 1 мм; для 100 мкм < λ < 1 мм — внутри круга Ø 11 мм.

Во вторых, таблица 1.1 свидетельствует о том, что в разных спектральных поддиапазонах лазерное воздействие частично аддитивно. Эта ситуация относится к двух- и более волновым лазерам, в основном, к лазерным приборам и установкам, в которых используется лазерное излучение разных длин волн. В соответствии с рекомендацией МЭК весь диапазон длин волн лазерного излучения делят на четыре поддиапазона, внутри которых лазерное излучение полностью аддитивно (как для глаз: так и для кожных покровов):

1-é поддиапазон — УФ-С и УФ-В, $200 < \lambda < 315$ нм;

2-é поддиапазон — УФ-А, $315 < \lambda < 400$ нм;

3-é поддиапазон — весь видимый и ИК-А, $0.4 < \lambda < 1.4$ мкм;

4-é поддиапазон — ИК-В и ИК-С, $1.4 < \lambda < 1000$ мкм.

Кроме того, всегда суммируют воздействия облучений 2-го и 4-го поддиапазонов. Аналогичное суммирование проводят и при совместном воздействии на кожные покровы лазерных излучений 2-го и 3-го поддиапазонов.

Естественно, что принимать во внимание эффект аддитивного воздействия имеет смысл лишь при близких к МДУ значениях облучения для каждой из генерируемых длин волн. К сожалению, 825-я публикация МЭК не дает аналитического выражения для определения МДУ аддитивного облучения, а лишь указывает на необходимость особой осторожности, если длительности воздействия существенно различаются (например, совместное действие импульсного и непрерывного излучений). В случае, если длительности импульсов или время экспозиции соизмеримы (имеют один порядок), то полагают, что парциальное (на одной длине волны) облучение пропорционально МДУ для данного излучения, то есть суммарное относительное облучение не должно превышать единицы:

$$(O_{\Sigma})_{отн} = \frac{O(\lambda_1)}{M.D.U.(\lambda_1)} + \frac{O(\lambda_2)}{M.D.U.(\lambda_2)} + \dots < 1 \quad (1.2)$$

И, наконец, МЭК настоятельно напоминает об опасности любого облучения, в том числе лазерного, подчеркивая, что МДУ является не порогом безопасности, а лишь усредненным значением (определенным на основе многочисленных экспериментов) уровня опасности повреждения органов зрения (и кожного покрова) человека.

Таблица 1.1

МДУ прямого облучения глаз человека

Длина волны λ , нм	МДУ									
	Единица измерения	Условие	При длительности излучения Δt , с							
			$< 10^{-9}$	От 10^{-9} до 10^{-7}	От 10^{-7} до $1.8 \cdot 10^{-5}$	От $1.8 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$	От $5 \cdot 10^{-5}$ до 10	От 10 до 10^3	От 10^3 до 10^4	От 10^4 до $3 \cdot 10^4$
От 200 до 302.5 (УФ-С)	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—	—	—	—
	Дж/м ²	—	—	30	30	30	30	30	30	30
От 302.5 до 315 (УФ-В)	Дж/м ²	При $\Delta t \leq T_1$	—	C_1	C_1	C_1	C_1	—	—	—
	Дж/м ²	При $\Delta t > T_1$	—	C_2	C_2	C_2	C_2	—	—	—

	Дж/м ²	—	—	—	—	—	—	C ₂	C ₂	C ₂
	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—	—	—	—
От 315 до 400 (УФА)	Вт/м ²	—	3·10 ¹⁰	—	—	—	—	—	10	10
	Дж/м ²	—	—	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	10 ⁴	—	—
От 400 до 550	Вт/м ²	—	5·10 ⁶	—	—	—	—	—	—	10 ⁻²
	Дж/м ²	—	—	5·10 ⁻³	5·10 ⁻³	C ₆	C ₆	100	100	—
От 550 до 700	Дж/м ²	При Δt ≤ T ₂	—	—	—	—	—	C ₆	C ₆	—
	Дж/м ²	При Δt > T ₂	—	—	—	—	—	C ₃ ·10 ²	C ₃ ·10 ²	—
	Дж/м ²	—	—	5·10 ⁻³	5·10 ⁻³	C ₆	C ₆	—	—	—
	Вт/м ²	—	5·10 ⁶	—	—	—	—	—	—	C ₃ ·10 ⁻²
От 700 до 1050 (ИК-А)	Дж/м ²	—	—	5C ₄ ·10 ⁻³	5C ₄ ·10 ⁻³	C ₄ C ₆	C ₄ C ₆	C ₄ C ₆	—	—
	Вт/м ²	—	5C ₄ ·10 ⁶	—	—	—	—	—	3.2C ₄	3.2C ₄
От 1050 до 1400 (ИК-В)	Дж/м ²	—	—	5·10 ⁻²	5·10 ⁻²	5·10 ⁻²	5C ₆	5C ₆	—	—
	Вт/м ²	—	5·10 ⁷	—	—	—	—	—	16	16
От 1400 до 10 ⁶ (ИК-С)	Дж/м ²	—	—	100	C ₁	C ₁	C ₁	—	—	—
	Вт/м ²	—	10 ¹¹	—	—	—	—	10 ³	10 ³	10 ³

$$C_1 = 5.6 \cdot 10^3 (\Delta t)^{0.25};$$

$$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)};$$

$$C_3 = 10^{0.015(\lambda - 550)};$$

$$C_4 = 10^{(\lambda - 700)/500};$$

$$C_6 = 18(\Delta t)^{0.75};$$

$$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295) - 15};$$

$$T_2 = 10^{1 + 0.02(\lambda - 550)};$$

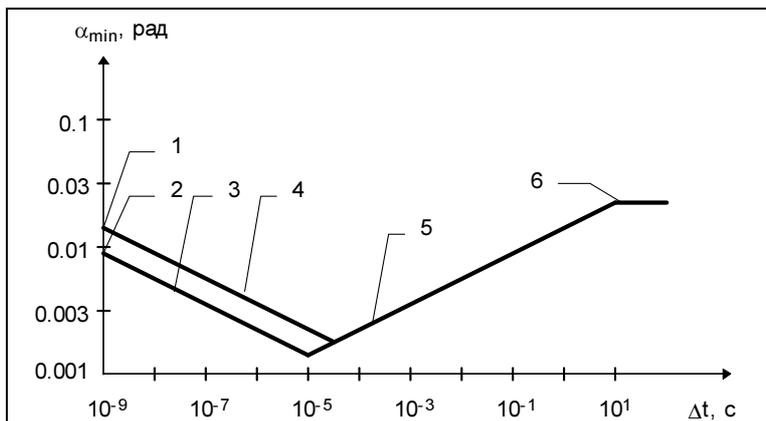


Рисунок 2. Предельный угол видения (предполагаемый угол поля зрения):

1 — 0.012 рад;

2 — 0.00885 рад;

3 — $0.00025(\Delta t)^{-0.17}$ (при $1050 \leq \lambda < 1400$ нм);

5 — $0.015 \cdot (\Delta t)^{0.21}$ (при $400 \leq \lambda < 1400$ нм);

6 — 0.24 рад.

1.1.4. МДУ облучения глаз рассеянным лазерным из- лучением

На практике наиболее вероятно именно рассеянное лазерное облучение. В этом случае важно при определении МДУ облучения перенормировать плотность излучения в диапазоне $0.4 < \lambda < 1.4$ мкм, достигающего сетчатки и поражающего ее. Эта перенормировка связана с тем, что характер и размер поражения сетчатки изменяются в связи с резким увеличением зоны облучения — от 0.01 мм (определяется абберацией глаза и дифракцией света на его зрачке), то есть угловой размер составляет примерно 1', или 0.0003 рад, до $\alpha = 0.015 \div 0.24$ рад. Последняя величина (эффективный угол зрения) во многом

зависит от длительности облучения и (для коротких импульсов) от длины волны. Все это видно из рисунка 2, где представлена кусочно-линейная аппроксимация $\alpha=\alpha(\Delta t)$ в двойном логарифмическом масштабе.

МДУ облучения глаза протяженным источником с угловым размером $\alpha_{\text{изл}} > \alpha$ приведены в таблице 1.2. Напомним, что при измерении энергетической яркости рассеянного (точнее: со значительным углом расходимости) излучения ее усреднение при измерении МДУ следует выполнять по углу α (см. рисунок 2). Кроме того, поскольку глаза устроены так, что не пропускают к сетчатке УФ и ИК излучение с $\lambda > 1.4$ мкм, то в этих диапазонах разница между МДУ, указанным в таблице 1.1, и МДУ, указанным в таблице 1.2, отсутствует.

Таблица 1.2

МДУ облучения глаз человека рассеянным лазерным излучением

Длина волны λ , нм	МДУ							
	Единица измерения	Условие	При длительности экспозиции Δt , с					
			$<10^{-9}$	От 10^{-9} до 10^{-7}	От 10^{-7} до 10	От 10 до 10^3	От 10^3 до 10^4	От 10^4 до $3 \cdot 10^4$
От 200 до 302.5	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—	—
	Дж/м ²	—	—	30	30	30	30	30
От 302.5 до 315	Дж/м ²	При $\Delta t \leq T_1$	—	C_1	C_1	—	—	—
	Дж/м ²	При $\Delta t > T_1$	—	C_2	C_2	—	—	—
	Дж/м ²	—	—	—	—	C_2	C_2	C_2
	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—	—
От 315 до 400	Вт/м ²	—	$3 \cdot 10^{10}$	—	—	—	10	10
	Дж/м ²	—	—	C_1	C_1	10^4	—	—
От 400 до 550	Вт/м ² ср	—	10^{11}	—	—	—	—	21
	Дж/м ² ср	—	—	C_7	C_7	$2.1 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	—
От 550 до 700	Дж/м ² ср	При $\Delta t \leq T_2$	—	—	—	$2C_8$	$2C_8$	—
	Дж/м ² ср	При $\Delta t > T_2$	—	—	—	$2.1 \cdot 10^5 C_3$	$2.1 \cdot 10^5 C_3$	—
	Дж/м ² ср	—	—	C_7	C_7	—	—	—
	Вт/м ² ср	—	10^{11}	—	—	—	—	$21C_3$
От 700 до 1050	Дж/м ² ср	—	—	$C_4 C_7$	$C_4 C_7$	$2C_4 C_8$	—	—
	кВт/м ² ср	—	$C_4 \cdot 10^8$	—	—	—	$6.4C_4$	$6.4C_4$
От 1050 до 1400	Дж/м ² ср	—	—	$5C_7$	$5C_7$	$10C_8$	—	—
	Вт/м ² ср	—	$5 \cdot 10^{11}$	—	—	—	$3.2 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^4$
От 1400 до 10^6	Дж/м ²	—	—	100	C_1	—	—	—
	Вт/м ²	—	10^{11}	—	—	10^3	10^3	10^3

$$C_1 = 5.6 \cdot 10^3 (\Delta t)^{0.25};$$

$$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)};$$

$$C_3 = 10^{0.015(\lambda - 550)};$$

$$C_4 = 10^{(\lambda - 700)/500};$$

$$C_7 = 10^5 (\Delta t)^{0.33};$$

$$C_8 = 1.9 \cdot 10^4 (\Delta t)^{0.75};$$

$$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295) - 15};$$

$$T_2 = 10^{1 + 0.02(\lambda - 550)};$$

Таблица 1.3

МДУ облучения наружных покровов человека

Длина волны λ , нм	МДУ							
	Единица измерения	Условие	При длительности экспозиции Δt , с					
			$<10^{-9}$	От 10^{-9} до 10^{-7}	От 10^{-7} до 10	От 10 до 10^3	От 10^3 до $3 \cdot 10^4$	

От 200 до 302.5	Дж/м ²	—	—	30	30	30	30
	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—
От 302.5 до 315	Дж/м ²	При $\Delta t \leq T_1$	—	C_1	C_1	—	—
	Дж/м ²	При $\Delta t > T_1$	—	C_2	C_2	—	—
	Дж/м ²	—	—	—	—	—	—
	Вт/м ²	—	$3 \cdot 10^{10}$	—	—	$10^{-3} C_3$	$10^{-3} C_2$
От 315 до 400	Дж/м ²	—	—	C_1	C_1	10^4	—
	Вт/м ²	—	$3 \cdot 10^{10}$	—	—	—	10
От 400 до 1400	Дж/м ²	—	—	200	C_9	—	—
	Вт/м ²	—	$2 \cdot 10^{11}$	—	—	2000	2000
От 1400 до 10^6	Дж/м ²	—	—	100	C_1	—	—
	Вт/м ²	—	10^{11}	—	—	1000	1000

$$C_1 = 5.6 \cdot 10^3 (\Delta t)^{0.25};$$

$$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295) - 15};$$

$$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)};$$

$$C_9 = 1.1 \cdot 10^4 (\Delta t)^{0.25};$$

1.2. МДУ лазерного облучения кожных покровов

При принятии должных мер безопасности (защитные очки и др.) повреждение зрительных органов человека обычно исключается. Однако остается возможность поражения кожных покровов (например, рук при обслуживании лазерной технологической установки). Что касается МДУ лазерного облучения для кожных покровов человека, то их значения, по рекомендации МЭК, отличаются от значений, рассмотренных ранее для глаз, лишь в области видимого и ближнего ИК излучения ($\lambda < 1.4$ мкм). При этом облучение усредняют в пределах круглой апертуры $\varnothing 1$ мм для всех длин волн менее 0.1 мм. Облучение в дальней ИК области ($0.1 < \lambda < 1$ мм) по-прежнему усредняют в апертуре $\varnothing 11$ мм.

Таким образом, при любом лазерном излучении, пользуясь данными таблиц 1.1 — 1.3, можно легко определить МДУ облучения, позволяющий избежать органических повреждений глаз и кожных покровов человека.

Применение того или иного способа обеспечения безопасности человека при лазерном излучении зависит от стадии изготовления или эксплуатации лазерного прибора. На защиту пользователя от лазерного облучения, превышающего МДУ, нацелены рекомендуемые МЭК конструктивные мероприятия, необходимые при изготовлении лазерных приборов. Поскольку эти мероприятия в той или иной степени обязательны для всех изготовителей лазерных приборов, целесообразно рассмотреть их более подробно.

2. Требования к изготовителям лазерных приборов в связи с обеспечением безопасности пользователей

МЭК рекомендует в связи с унификацией требований к конструкциям лазерных приборов разделять эти приборы на четыре класса с точки зрения опасности лазерного излучения для пользователей.

2.1. Лазерные излучатели класса 1

Наиболее безопасными как по своей природе (МДУ облучения никак не может быть превышен), так и по конструктивному исполнению являются лазерные приборы класса 1. В связи с таким двойным подходом допустимые пределы излучения (ДПИ) лазерных приборов класса 1 в спектральной области от 0.4 до 1.4 мкм, для которой возможно как точечное, так и протяженное повреждение сетчатки, характеризуются значениями в двух аспектах — энергетическом (в ваттах или джоулях) и яркостном. Соответствующие значения приведены в таблице 2.1 (кроме УФ излучения, а также ИК излучения от 1.4 мкм)

Таблица 2.1

ДПИ для лазеров класса 1

Длина волны λ , нм	ДПИ									
	Единица измерения	Условие	При длительности излучения Δt , с							
			$<10^{-9}$	От 10^{-9} до 10^{-7}	От 10^{-7} до $1.8 \cdot 10^{-5}$	От $1.8 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$	От $5 \cdot 10^{-5}$ до 10	От 10 до 10^3	От 10^3 до 10^4	От 10^4 до $3 \cdot 10^4$
От 200 до 302.5	мкДж	—	—	24	24	24	24	24	24	24
	кВт	—	24	—	—	—	—	—	—	—
От 302.5 до 315	мкДж	При $\Delta t \leq T_1$	—	$0.79C_1$	$0.79C_1$	$0.79C_1$	$0.79C_1$	—	—	—
	мкДж	При $\Delta t > T_1$	—	$0.79C_2$	$0.79C_2$	$0.79C_2$	$0.79C_2$	—	—	—
	мкДж	—	—	—	—	—	—	$0.79C_2$	$0.79C_2$	$0.79C_2$
	кВт	—	24	—	—	—	—	—	—	—
От 315 до 400	кВт	—	24	—	—	—	—	—	$7.9 \cdot 10^{-9}$	$7.9 \cdot 10^{-9}$
	мкДж	—	—	$0.79C_1$	$0.79C_1$	$0.79C_1$	$0.79C_1$	$7.9 \cdot 10^3$	—	—
От 400 до 550*	Дж	—	—	$21 \cdot 10^4$	C_{10}	C_{10}	C_{10}	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	—
	Дж/м ² ср	—	—	C_7	C_7	C_7	C_7	$2.1 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^5$	—
	Вт	—	200	—	—	—	—	—	—	$3.9 \cdot 10^{-7}$
	Вт/м ² ср	—	10^{11}	—	—	—	—	—	—	21
От 550 до 700*	мДж и Дж/м ² ср	При $\Delta t \leq T_2$	—	—	—	—	—	$10^3 C_{10}$	$10^3 C_{10}$	—
	мДж	При $\Delta t > T_2$	—	—	—	—	—	$3.9 C_3$	$3.9 C_3$	—
	МДж/м ² ср	—	—	$10^{-6} C_7$	$10^{-6} C_7$	$10^{-6} C_7$	$10^{-6} C_7$	—	—	—
	мДж и Дж/м ² ср	—	—	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^3 C_{10}$	$10^3 C_{10}$	$2 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
	мкВт	—	200	—	—	—	—	—	—	$0.39 \cdot 10^{-6} \cdot C_3$
	Вт/м ²	—	10^{11}	—	—	—	—	—	—	$21 C_3$
От 700 до 1050*	Дж	—	—	$2C_4 \cdot 10^7$	$2C_4 \cdot 10^7$	$C_4 C_{10}$	$C_4 C_{10}$	$C_4 C_{10}$	—	—
	Дж/м ² ср	—	—	$C_4 C_7$	$C_4 C_7$	$C_4 C_7$	$C_4 C_7$	$2C_4 C_8$	—	—
	кВт	—	$0.2 C_4$	—	—	—	—	—	$12 C_4$	$12 C_4$
	кВт/м ² ср	—	$C_4 \cdot 10^8$	—	—	—	—	—	$6.4 C_4$	$6.4 C_4$
От 1050 до 1400*	Дж	—	—	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 C_{10}$	$5 C_{10}$	—	—
	Дж/м ² ср	—	—	C_7	C_7	C_7	C_7	C_7	—	—
	Вт	—	$2 \cdot 10^3$	—	—	—	—	—	$6 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$
	Вт/м ² ср	—	$5 \cdot 10^{11}$	—	—	—	—	—	$3.2 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^4$
От 1400 до 10^5	мкДж	—	—	80	$0.4 C_9$	$0.4 C_9$	$0.4 C_9$	—	—	—
	Вт	—	$8 \cdot 10^4$	—	—	—	—	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$
От 10^5	Дж	—	—	10^{-2}	$10^{-4} C_1$	$10^{-4} C_1$	$10^{-4} C_1$	—	—	—

до 302.5*	Дж/м ²	—	—	30	30	30	30	30	30	30
	МВт	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—
	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—	—	—	—
От 302.5 до 315	мкДж	При $\Delta t \leq T_1$	—	4C ₁	4C ₁	4C ₁	4C ₁	4C ₁	—	—
	мкДж	При $\Delta t > T_1$	—	4C ₂	4C ₂	4C ₂	4C ₂	4C ₂	—	—
	мкДж	—	—	—	—	—	—	—	4C ₂	4C ₂
	Дж/м ²	При $\Delta t \leq T_1$	—	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	—	—
	Дж/м ²	При $\Delta t > T_1$	—	C ₂	C ₂	C ₂	C ₂	C ₂	—	—
	Дж/м ²	—	—	—	—	—	—	—	C ₂	C ₂
	МВт	—	0.12	—	—	—	—	—	—	—
От 315 до 400	ГВт/м ²	—	30	—	—	—	—	—	—	—
	Вт	—	$1.2 \cdot 10^5$	—	—	—	—	—	—	$4 \cdot 10^{-5}$
	Вт/м ²	—	$3 \cdot 10^{10}$	—	—	—	—	—	—	10
	мкДж	—	—	4C ₁	4C ₁	4C ₁	4C ₁	4C ₁	$4 \cdot 10^{-4}$	—
	Дж/м ²	—	—	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	10^4	—
От 400 до 700	Дж	—	—	10^{-6}	10^{-6}	5C ₁₀	5C ₁₀	—	—	—
	Дж/м ²	—	—	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	C ₆	C ₆	—	—	—
	Вт	—	1000	—	—	—	—	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
	Вт/м ²	—	$5 \cdot 10^6$	—	—	—	—	25**	25**	25**
От 700 до 1050	Дж	—	—	C ₄ 10 ⁶	C ₄ 10 ⁶	5C ₄ C ₁₀	—			
	Дж/м ²	—	—	$5 \cdot 10^{-3} \cdot C_4$	$5 \cdot 10^{-3} \cdot C_4$	C ₄ C ₆	—			
	Вт	—	$10^3 \cdot C_4$	—	—	—	—	—	—	$6 \cdot 10^{-4} \cdot C_4$
	Вт/м ²	—	$5 \cdot 10^6 C_4$	—	—	—	—	—	—	$3.2 C_4$
От 1050 до 1400	мДж	—	—	0.01	0.01	0.01	C ₆	C ₆	C ₆	—
	Дж/м ²	—	—	0.05	0.05	0.05	5C ₆	5C ₆	5C ₆	—
	Вт	—	10^4	—	—	—	—	—	—	$3 \cdot 10^{-3}$
	Вт/м ²	—	$5 \cdot 10^7$	—	—	—	—	—	—	16
От 1400 до 10 ⁵	мкДж	—	—	400	2C ₉	2C ₉	2C ₉	2C ₉	—	—
	Дж/м ²	—	—	100	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	—	—
	Вт	—	$4 \cdot 10^5$	—	—	—	—	—	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
	Вт/м ²	—	10^{11}	—	—	—	—	—	10^3	10^3
От 10 ⁵ до 10 ⁶	мДж	—	—	50	0.5C ₁	0.5C ₁	0.5C ₁	0.5C ₁	—	—
	Дж/м ²	—	—	100	C ₁	C ₁	C ₁	C ₁	—	—
	Вт	—	$5 \cdot 10^7$	—	—	—	—	—	0.5	0.5
	Вт/м ²	—	10^{11}	—	—	—	—	—	10^3	10^3

$$C_1 = 5.6 \cdot 10^3 (\Delta t)^{0.25};$$

$$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)};$$

$$C_4 = 10^{(\lambda - 700)/500};$$

$$C_6 = 18(\Delta t)^{0.75};$$

$$C_9 = 1.1 \cdot 10^4 (\Delta t)^{0.25};$$

$$C_{10} = 7 \cdot 10^{-4} (\Delta t)^{0.75};$$

$$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295) - 15};$$

$$T_2 = 10^{1 + 0.02(\lambda - 550)};$$

*— Здесь и далее необходимы двойные пределы для класса 3А.

**— Естественная защитная реакция на излучение более 0.25 секунд.

2.3.2. Лазерные излучатели подкласса 3Б

К ним относят излучатели средней мощности, непосредственное наблюдение которых даже невооруженным (без фокусирующей оптической системы) глазом опасно для зрения. Однако при соблюдении определенных условий — удалении глаза более чем на 13 см от рассеивателя и вре-

мени воздействия не более 10 с — допустимо наблюдение диффузно рассеянного излучения. Поэтому непрерывная мощность таких лазеров не может превышать 0.5 Вт, а энергетическая экспозиция — 100 кДж/м². Остальные значения ДПИ для лазеров подкласса 3Б приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

ДПИ для лазеров подкласса 3Б

Длина волны λ , нм	ДПИ			
	Единица измерения	При длительности излучения Δt , с		
		$<10^{-9}$	От 10^{-9} до 0.25	От 0.25 до $3 \cdot 10^4$
От 200 до 302.5	Дж	—	$3.8 \cdot 10^{-4}$	—
	Вт	$3.8 \cdot 10^{-5}$	—	$1.5 \cdot 10^{-3}$
От 302.5 до 315	Дж	—	$1.25 \cdot 10^{-5} \cdot C_2$	—
	Вт	$1.25 \cdot 10^4 \cdot C_2$	—	$5 \cdot 10^{-5} \cdot C_2$
От 315 до 400	Дж	—	0.125	—
	Вт	$1.25 \cdot 10^8$	—	0.5
От 400 до 700*	Дж/м ²	—	$3.14 \cdot C_7$ и $<10^5$	—
	Вт	—	—	0.5
	Вт/м ²	$3.14 \cdot 10^{11}$	—	—
От 700 до 1050*	Дж/м ²	—	$3.14 \cdot C_4 \cdot C_7$ и $<10^5$	—
	Вт	—	—	0.5
	Вт/м ²	$3.14 \cdot 10^{11}$	—	—
От 1050 до 1400*	Дж/м ²	—	$15.7 \cdot C_7$ и $<10^5$	—
	Вт	—	—	0.5
	Вт/м ²	$1.57 \cdot 10^{12}$	—	—
От 1400 до 10^6	Дж/м ²	—	10^5	—
	Вт	—	—	0.5
	Вт/м ²	10^{14}	—	—

$$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)},$$

$$C_4 = 10^{(\lambda - 700)/500},$$

$$C_7 = 10^5 (\Delta t)^{0.33};$$

*— Необходимы двойные пределы для класса 3Б.

2.4. Лазерные излучатели класса 4

Это мощные лазерные установки, способные повредить зрение и кожные покровы человека не только прямым, но и диффузно рассеянным излучением. Значения ДПИ в данном случае превышают значения, принятые для подкласса 3Б. Работа с лазерными излучателями класса 4 требует обязательного соблюдения соответствующих защитных мер.

2.5. Особенности использования ДПИ при классификации лазерных излучателей

Лазерные излучатели, генерирующие на двух или более длинах волн неаддитивно, классифицируются по наибольшему классу опасности для каждой из них. В случае попадания генерируемых волн в один поддиапазон (аддитивные воздействия) поступают аналогично определению МДУ, то есть сумма относительных излучений, нормированных по ДПИ для данной длины волны, не должна превышать единицы:

$$(I_{\Sigma})_{\text{отн}} = I_{\text{отн}}(\lambda_1) + I_{\text{отн}}(\lambda_1) + \dots = I_{\text{отн}}(\lambda_1) / \text{ДПИ}(\lambda_1) + I_{\text{отн}}(\lambda_1) / \text{ДПИ}(\lambda_2) + \dots < 1.$$

Если, например, через какое-либо отверстие корпуса защитного кожуха, или при введении оптического зонда, или в случае отказа блокировок лазерное излучение может попасть на человека — его глаза или только на кожные покровы, то классификацию осуществляют с учетом и этого дополнительного облучения.

Классификация лазерных приборов, излучающих повторяющиеся импульсы, осуществляют следующим образом. Последовательно определяют класс опасности для:

1. наиболее мощного импульса в серии;
2. средней мощности импульсов в серии, действующих якобы как один импульс с длительностью, равной длительности серии;
3. наиболее мощного импульса последовательности из n импульсов (за время проведения классификации) при мгновенной частоте повторения импульсов (определяемой по самому короткому интервалу) $f > 1$ Гц. Однако при длительности отдельных импульсов $\Delta t < 10$ мкс значение вклада каждого отдельного импульса уменьшают на значение коэффициента C_5 ; при $\Delta t > 10$ мкс одиночным считают импульс длительностью $T = \Delta t \cdot n$ и значение его вклада уменьшают в n раз;
4. наиболее мощного эквивалентного импульса, представляющего собой последовательность (группу) из $n < 10$ импульсов, повторяющихся с квазирегулярными интервалами. При этом энергетическая экспозиция эквивалентного импульса равна полной энергетической экспозиции группы импульсов, а длительность эквивалентного импульса равна или наименьшей длительности импульса в группе (при $\Delta t_{\text{гр}} < 10$ мкс), или сумме длительностей отдельных импульсов в группе (при $\Delta t_{\text{гр}} > 10$ мкс).

В результате лазерному прибору присваивают наиболее высокий класс опасности из вычисленных в пунктах 1 — 4. Если при определении ДПИ для эквивалентного импульса требования будут более жесткими, то, следуя пунктам 1 — 3, можно немного уменьшить получаемые значения. Причем если $n > 10$, то нужно следовать пункту 3.

Кроме того, 825-й публикацией МЭК предусмотрен целый ряд дополнительных организационно-технических мероприятий, обязательных для изготовителя, по обеспечению безопасности лазерных изделий.

3. Техничко-гигиеническая оценка лазерных изделий в России

В нашей стране на базе проведенных комплексных исследований и современных представлений о влиянии лазерного излучения на организм человека разработан и утвержден ряд нормативных документов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию лазерных изделий. Эти документы устанавливают единую систему обеспечения лазерной безопасности. В такую систему входят: технические средства снижения опасных и вредных производственных факторов, организационные мероприятия, контроль условий труда на лазерных установках.

В современной отечественной научно-технической и нормативной литературе дано несколько вариантов классификации лазерных изделий. С позиции обеспечения лазерной безопасно-

сти их классифицируют по основным физико-техническим параметрам и степени опасности генерируемого излучения.

В зависимости от конструкции лазера и конкретных условий его эксплуатации обслуживающий его персонал может быть подвержен воздействию опасных и вредных производственных факторов, перечень которых приведен в ГОСТ 12.1.040-83.

Уровни опасных и вредных производственных факторов на рабочем месте не должны превышать значений, установленных по электробезопасности, взрывоопасности, шуму, уровням ионизирующего излучения, концентрации токсических веществ и др.

3.1. Классы опасности лазерного излучения по СНиП 5804-91

Степень воздействия лазерного излучения на оператора зависит от физико-технических характеристик лазера — плотности мощности (энергии излучения), длины волны, времени облучения, длительности и периодичности импульсов, площади облучаемой поверхности.

Биологический эффект лазерного облучения зависит как от вида воздействия излучения на ткани организма (тепловое, фотохимическое), так и от биологических и физико-химических особенностей самих тканей и органов.

Наиболее опасно лазерное излучение с длиной волны:

380÷1400 нм — для сетчатки глаза,

180÷380 нм и свыше 1400 нм — для передних сред глаза,

180÷10⁵ нм (т.е. во всем рассматриваемом диапазоне) — для кожи.

Нашими гигиенистами выдвинуты требования, в соответствии с которыми в основу проектирования, разработки и эксплуатации лазерной техники должен быть положен принцип исключения воздействия на человека (кроме лечебных целей) лазерного излучения, как прямого, так и зеркально ил диффузно отраженного.

В соответствии со СНиП 5804-91 лазерные изделия по степени опасности генерируемого излучения подразделяют на 4 класса. При этом класс опасности лазерного изделия определяется классом опасности используемого в нем лазера. Классификацию лазеров с точки зрения безопасности проводит предприятие-изготовитель путем сравнения выходных характеристик излучения с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) при однократном воздействии. Определяя принадлежность лазерного изделия к тому или иному классу по степени опасности лазерного излучения, необходимо учитывать воздействие прямого или отраженного лазерного пучка на глаза и кожу человека и пространственные характеристики лазерного излучения (при этом различают коллимированное излучение, то есть заключенное в ограниченном телесном угле, и неколлимированное, то есть рассеянное или диффузно отраженное). Использование дополнительных оптических систем не входит в понятие "коллимация", а оговаривается отдельно.

Лазерные изделия с точки зрения техники безопасности классифицируют в основном по степени опасности генерируемого излучения. Установлены следующие 4 класса лазеров:

1 — к нему относят полностью безопасные лазеры, выходное излучение которых не представляет опасности для глаз и кожи человека;

- 2 — к нему относят лазеры, выходное излучение которых представляет опасность при облучении кожи или глаз человека коллимированным пучком. В то же время диффузно отраженное излучение лазеров этого класса безопасно как для кожи, так и для глаз;
- 3 — к нему относят лазерные устройства, работающие в видимой области спектра и выходное излучение которых представляет опасность при облучении как глаз (коллимированным и диффузно отраженным излучением на расстоянии менее 10 см от отражающей поверхности), так и кожи (только коллимированным пучком);
- 4 — наиболее опасный — к нему относят лазерные устройства, даже диффузно отраженное излучение которых представляет опасность для глаз и кожи на расстоянии менее 10 см.

При определении класса опасности лазерного излучения учитываются три спектральных диапазона.

Таблица 3.1

Класс опасности лазерного излучения	Диапазон		
	$180 < \lambda \leq 380$	$380 < \lambda \leq 1400$	$1400 < \lambda \leq 10^5$
	I	II	III
1	+	+	+
2	+	+	+
3	—	+	—
4	+	+	+

3.2. Гигиеническое нормирование лазерного излучения.

В соответствии со СНиП 5804-91 регламентируют ПДУ для каждого режима работы лазера и его спектрального диапазона. Нормируемыми параметрами с точки зрения опасности лазерного излучения являются энергия W и мощность P излучения, прошедшего ограничивающую апертуру диаметрами $d_a=1.1$ мм (в спектральных диапазонах I и II) и $d_a=7$ мм (в диапазоне II); энергетическая экспозиция H и облученность E , усредненные по ограничивающей апертуре:

$$H=W/S_a; \quad E=P/S_a \quad (3.1)$$

где S_a — площадь ограничивающей апертуры.

Угловой размер λ протяженного источника излучения определяется по формуле

$$\alpha = 2\sqrt{S_0 \cdot \cos\Theta} / \pi / l \quad (3.2)$$

где S_0 — площадь источника, l — расстояние от точки наблюдения до источника, Θ — угол между нормалью к поверхности источника и направлением визирования.

В случае протяженного источника излучения вводят дополнительный коэффициент $B \geq 1$ для всего диапазона возможных интервалов облучения при $\lambda > \lambda_{\text{пред}}$ — углового размере точечного источника.

ПДУ лазерного излучения устанавливают для двух условий — однократного и хронического облучения. Под хроническим понимают "систематически повторяющееся воздействие, которо-

му подвергаются люди, профессионально связанные с лазерным излучением". ПДУ при этом определяют как:

- 1) уровни лазерного излучения, при которых "существует незначительная вероятность возникновения обратимых отклонений в организме" человека;
- 2) уровни излучения, которые "при работе установленной продолжительности в течение всего трудового стажа не приводят к травме (повреждению), заболеванию или отклонению в состоянии здоровья как самого работающего, так и последующих его поколений".

ПДУ хронического воздействия рассчитывают путем уменьшения в $5 \div 10$ раз ПДУ однократного воздействия.

ПДУ при одновременном воздействии излучений с разными длинами волн устанавливают так: для кожи и передних сред глаза — в спектральных диапазонах I и III (длина волн $180 < \lambda \leq 380$ нм и $1400 < \lambda \leq 10^5$ нм соответственно); для сетчатки глаза — в диапазоне II (длина волн $380 < \lambda \leq 1400$ нм). В каждом из этих случаев действие различных источников считают аддитивным:

$$W_{n \partial y} = C_1 W_{n \partial y}^{(1)} + \dots + C_n W_{n \partial y}^{(n)} = \sum_{i=1}^n C_i W_{n \partial y}^{(i)}$$

$$P_{n \partial y} = C_1 P_{n \partial y}^{(1)} + \dots + C_n P_{n \partial y}^{(n)} = \sum_{i=1}^n C_i P_{n \partial y}^{(i)}$$
(3.3)

где n — число источников излучения, действие которых аддитивно, i — условный порядковый номер источника, $W_{n \partial y}^{(i)}$, $P_{n \partial y}^{(i)}$ — предельно допустимые значения энергии (или мощности) каждого источника; C_i — относительный энерговклад каждого источника, определяемый как отношение энергии (мощности) источника с порядковым номером i к суммарной энергии (мощности) всех источников.

3.2.1. ПДУ лазерного излучения УФ диапазона

Для УФ излучения с длиной волны $\lambda = 180 \div 380$ нм (как коллимированного, так и рассеянного) при однократном воздействии на глаза и кожу человека нормируют $H_{пду}$, $E_{пду}$ и $W_{пду}$, $P_{пду}$. В этом спектральном диапазоне диаметр ограничивающей апертуры $d_a = 1.1 \cdot 10^{-3}$ м. Поэтому

$$W_{n \partial y} = H_{n \partial y} \cdot 10^{-6},$$

$$P_{n \partial y} = E_{n \partial y} \cdot 10^{-6},$$
(3.4)

где ПДУ облучения зависит от длительности воздействия и длины волны

Таблица 3.2

Предельные дозы при однократном воздействии на глаза
и кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения

Длина волны λ , нм	Длительность воздействия t , с	$H_{пду}$, Дж·м ⁻² ; $E_{пду}$, Вт·м ⁻²
$180 < \lambda \leq 380$	$t \leq 10$	$H_{пду} = 2.5 \cdot 10^7 \sqrt[3]{t^2}$
$380 < \lambda \leq 302.5$	$10 < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{пду} = 25$; $E_{пду} = 25/t$

$302.5 < \lambda \leq 315$	$10 < t \leq T_1$	$H_{\text{ПДУ}} = 4.4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{t}$
$302.5 < \lambda \leq 315$	$T_1 < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{\text{ПДУ}} = 0.8 \cdot 10^{0.2(\lambda-295)}$; $E_{\text{ПДУ}} = 0.8 \cdot 10^{0.2(\lambda-295)}/t$
$315 < \lambda \leq 380$	$10^{-9} < t \leq 10$	$H_{\text{ПДУ}} = 4.4 \cdot 10^3 \sqrt[4]{t}$
$315 < \lambda \leq 380$	$10 < t \leq 3 \cdot 10^4$	$H_{\text{ПДУ}} = 8 \cdot 10^3$; $E_{\text{ПДУ}} = 8 \cdot 10^3/t$

- Примечания:
1. Во всех случаях $W_{\text{пду}} = H_{\text{пду}} \cdot 10^{-6}$; $P_{\text{пду}} = E_{\text{пду}} \cdot 10^{-6}$.
 2. Для второго спектрального поддиапазона $T_1 = 10^5 \cdot 10^{0.8(\lambda-295)}$, где λ в нанометрах.
 3. Ограничивающая апертура составляет $1.1 \cdot 10^{-3}$ м.

На практике важное значение имеет предельно допустимая однократная суточная доза.

Таблица 3.3

Предельные однократные суточные дозы при облучении глаз и кожи лазерным излучением

Длина волны λ , нм	$H_{\text{ПДУ}}^2 (3 \cdot 10^4) \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$;
$180 < \lambda \leq 380$	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	$8 \cdot 10^3$
$315 < \lambda \leq 380$	$8 \cdot 10^3$

3.2.2 ПДУ лазерного излучения при облучении глаз в диапазоне $380 < \lambda \leq 1400$ нм

Таблица 3.4

Предельные дозы при однократном воздействии на глаза
коллимированного лазерного излучения

Длина волны λ , нм	Длительность воздействия t , с	$W_{\text{ПДУ}}$, Дж
$380 < \lambda \leq 600$	$t \leq 2.3 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2.3 \cdot 10^{-11} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-8}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$5.9 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{t^2}$
$600 < \lambda \leq 750$	$t \leq 6.5 \cdot 10^{-11}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$6.5 \cdot 10^{-11} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$1.2 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

750< λ ≤1000	$t \leq 2.5 \cdot 10^{-10}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$2.5 \cdot 10^{-10} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$3 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$
1000< λ ≤1400	$t \leq 10^{-9}$	$\sqrt[3]{t^2}$
	$10^{-9} < t \leq 5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}
	$5 \cdot 10^{-5} < t \leq 1$	$7.4 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{t^2}$

Примечания: 1. Длительность воздействия меньше 1 с.
2. Ограничивающая апертура = $7 \cdot 10^{-3}$ м.

3.2.3 ПДУ лазерного излучения при облучении кожи в диапазоне 380< λ ≤1400 нм

Таблица 3.7

Предельные дозы при однократном воздействии на кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения

Длина волны λ , нм	Длительность излучения t, с	$H_{\text{ПДУ}}$, Дж·м ⁻² ; $E_{\text{ПДУ}}$, Вт·м ⁻²
380< λ ≤500	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{\text{ПДУ}} = 2.5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^2$
500< λ ≤900	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{\text{ПДУ}} = 7 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^2$
900< λ ≤1400	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{\text{ПДУ}} = 2 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^2$

Примечания: 1. Ограничивающая апертура = $1.1 \cdot 10^{-3}$ м.
2. $W_{\text{пду}} = 10^{-6} H_{\text{пду}}$; $P_{\text{пду}} = 10^{-6} E_{\text{пду}}$.

3.2.4. ПДУ лазерного излучения в диапазоне 1400< λ ≤10⁵ нм

Таблица 3.8

Предельные дозы при однократном воздействии на глаза и кожу коллимированного или рассеянного лазерного излучения

Длина волны λ , нм	Длительность	$H_{\text{ПДУ}}$, Дж·м ⁻² ;
----------------------------	--------------	---

	облучения t, с	$E_{\text{ПДУ}}, \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$
$1400 < \lambda \leq 1800$	$10^{-10} < t \leq 1$	$H_{\text{ПДУ}} = 2 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 2 \cdot 10^4 / \sqrt[5]{t}$
	$t > 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^2$
$1800 < \lambda \leq 2500$	$10^{-10} < t \leq 3$	$H_{\text{ПДУ}} = 7 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$3 < t \leq 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^2$
$250 < \lambda \leq 10^5$	$10^{-10} < t \leq 10^{-1}$	$H_{\text{ПДУ}} = 2.5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[5]{t}$
	$10^{-1} < t \leq 1$	$H_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$1 < t \leq 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$E_{\text{ПДУ}} = 5 \cdot 10^2$

Примечания: 1. Ограничивающая апертура = $1.1 \cdot 10^{-3}$ м.
 2. $W_{\text{пду}} = 10^{-6} H_{\text{пду}}$; $P_{\text{пду}} = 10^{-6} E_{\text{пду}}$.

3.2.5. Определение класса лазерного изделия по степени опасности излучения, генерируемого лазером

Для определения класса опасности лазера (и лазерного изделия в целом) предельно допустимые уровни излучения для глаз и кожи человека в зависимости от режима генерации и спектрального диапазона излучения сопоставляют с ограничениями по классам, данными в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Соотношения для определения классов по степени опасности генерируемого излучения

Длина волны λ , нм	Класс опасности	Режим генерации излучения		
		Одиночные импульсы	Серии импульсов	Непрерывное излучение
$180 < \lambda \leq 380$	1	$W_i(t_n) \leq H_{\text{пду}}(t_n) S_{\text{п}}$	$W_i^c(t_n) \leq H_{\text{пду}}^c(t_n) S_{\text{п}}$	$P(t) \leq E_{\text{пду}}(t) S_{\text{п}}$ *
	1	$\sum_{i=1}^M W_i(t_n) \leq H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4) S_{\text{п}}$	$\sum_{i=1}^M W_i^c(t_n) \leq H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4) S_{\text{п}}$	$\sum_{i=1}^M P_i(t_i) t_i \leq H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4) S_{\text{п}}$
	2	$W_i(t_n) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}(t_n)$	$W_i^c(t_n) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}(t_n)$	$P(t) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot E_{\text{пду}}(t_n)$ *
	2	$\sum_{i=1}^M W_i(t_n) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4)$	$\sum_{i=1}^M W_i^c(t_n) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4)$	$\sum_{i=1}^M P_i(t_i) t_i \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4)$
	4	$W_i(t_n) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}(t_n)$	$W_i^c(t_n) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}(t_n)$	$P(t) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot E_{\text{пду}}(t_n)$ *
	4	$\sum_{i=1}^M W_i(t_n) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4)$	$\sum_{i=1}^M W_i^c(t_n) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4)$	$\sum_{i=1}^M P_i(t_i) t_i > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{\text{пду}}^{\Sigma} \cdot (3 \cdot 10^4)$
$380 < \lambda \leq 750$	1	$W(t_n) \leq \begin{cases} W_{\text{пду}}(t_n), d_n \leq 7\text{мм} \\ \frac{d_n^2}{49} W_{\text{пду}}(t_n), d_n > 7\text{мм} \end{cases}$	$W^c(t) \leq \begin{cases} W_{\text{пду}}^c(t), d_n \leq 7\text{мм} \\ \frac{d_n^2}{49} W_{\text{пду}}^c(t), d_n > 7\text{мм} \end{cases}$	$P(t) \leq \begin{cases} P_{\text{пду}}(t), d_n \leq 7\text{мм} \\ \frac{d_n^2}{49} P_{\text{пду}}(t), d_n > 7\text{мм} \end{cases}$ **
	2	$W(t_n) \leq 8 \cdot 10^2 \cdot W_{\text{пду}}(t_n)$	$W^c(t) \leq 8 \cdot 10^2 \cdot W_{\text{пду}}^c(t)$	$P(t) \leq 8 \cdot 10^2 \cdot P_{\text{пду}}(t)$ **
	3	$W(t_n) \leq \pi \cdot 10^4 \cdot W_{\text{пду}}(t_n)$ ***	$W^c(t) \leq \pi \cdot 10^4 \cdot W_{\text{пду}}^c(t)$ ***	$P(t) \leq \pi \cdot 10^4 \cdot P_{\text{пду}}(t)$ * ***
	4	$W(t_n) > \pi \cdot 10^4 \cdot W_{\text{пду}}(t_n)$ ***	$W^c(t) > \pi \cdot 10^4 \cdot W_{\text{пду}}^c(t)$ ***	$P(t) > \pi \cdot 10^4 \cdot P_{\text{пду}}(t)$ * ***

Окончание таблицы 3.9

Длина волны λ , нм	Класс опасности	Режим генерации излучения		
		Одиночные импульсы	Серии импульсов	Непрерывное излучение
750 < λ ≤ 1400	1	$W(t_i) \leq \begin{cases} W_{пду}(t_i), d_n \leq 7\text{мм} \\ \frac{d_n^2}{49} W_{пду}(t_i), d_n > 7\text{мм} \end{cases}$	$W^c(t) \leq \begin{cases} W_{пду}^c(t), d_n \leq 7\text{мм} \\ \frac{d_n^2}{49} W_{пду}^c(t), d_n > 7\text{мм} \end{cases}$	$P(t) \leq \begin{cases} P_{пду}(t), d_n \leq 7\text{мм} \\ \frac{d_n^2}{49} P_{пду}(t), d_n > 7\text{мм} \end{cases} *$
	2	$W(t_i) \leq 8 \cdot 10^{-2} \cdot W_{пду}(t_i)$	$W^c(t) \leq 8 \cdot 10^{-2} \cdot W_{пду}^c(t)$	$P(t) \leq 8 \cdot 10^{-2} \cdot P_{пду}(t) \quad **$
	3	$W(t_i) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}(t_i) \quad ***$	$W^c(t) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}^c(t) \quad ***$	$P(t) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot E_{пду}(t) \quad * \quad ***$
	4	$W(t_i) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}(t_i) \quad ***$	$W^c(t) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}^c(t) \quad ***$	$P(t) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot E_{пду}(t) \quad * \quad ***$
1400 < λ ≤ 10 ⁵	1	$W(t_i) \leq H_{пду}(t_i) S_{п}$	$W^c(t) \leq H_{пду}^c(t) S_{п}$	$P(t) \leq E_{пду}(t) S_{п} \quad *$
	2	$W(t_i) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}(t_i)$	$W^c(t) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}^c(t)$	$P(t) \leq \pi \cdot 10^{-2} \cdot E_{пду}(t) \quad *$
	4	$W(t_i) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}(t_i)$	$W^c(t) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot H_{пду}^c(t)$	$P(t) > \pi \cdot 10^{-2} \cdot E_{пду}(t) \quad *$

* Длительность воздействия непрерывного излучения в диапазонах 180 < λ ≤ 380 нм, 750 < λ ≤ 1400 нм и 1400 < λ ≤ 10⁵ нм составляет 10 с (наиболее вероятное время пребывания человека в состоянии полной неподвижности).

** Длительность воздействия непрерывного излучения в диапазоне 380 < λ ≤ 750 нм составляет 0.25 с (время мигательного рефлекс).

*** Предельно допустимые уровни $H_{пду}$ и $E_{пду}$ для кожи.

Оглавление

1.1. Воздействие лазерного излучения на органы зрения.....	2
1.1.1. МДУ прямого облучения сетчатки.....	2
1.1.2. МДУ для наружных покровов глаз человека	4
1.1.3. Представление МДУ облучения как поверхности в координатах $\lambda - \Delta t$	5
1.1.4. МДУ облучения глаз рассеянным лазерным излучением	7
1.2. МДУ лазерного облучения кожных покровов.....	9
2. Требования к изготовителям лазерных приборов в связи с обеспечением безопасности пользователей	9
2.1. Лазерные излучатели класса 1.....	10
2.2. Лазерные излучатели класса 2.....	11
2.3. Лазерные излучатели класса 3.....	11
2.3.1. Лазерные излучатели подкласса 3А	11
2.3.2. Лазерные излучатели подкласса 3Б.....	12
2.4. Лазерные излучатели класса 4.....	13
2.5. Особенности использования ДПИ при классификации лазерных излучателей	13
3. Техничко-гигиеническая оценка лазерных изделий в России	14
3.1. Классы опасности лазерного излучения по СНиП 5804-91	15
3.2. Гигиеническое нормирование лазерного излучения.....	16
3.2.1. ПДУ лазерного излучения УФ диапазона.....	17
3.2.2 ПДУ лазерного излучения при облучении глаз в диапазоне $380 < \lambda \leq 1400$ нм	18
3.2.3 ПДУ лазерного излучения при облучении кожи в диапазоне $380 < \lambda \leq 1400$ нм	19
3.2.4. ПДУ лазерного излучения в диапазоне $1400 < \lambda \leq 10^5$ нм.....	19
3.2.5. Определение класса лазерного изделия по степени опасности излучения, генерируемого лазером	20