

**ВЛАДИМИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**БЕЗОПАСНОСТЬ  
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ  
ЛАЗЕРНО-ОПАСНЫХ ЗОН**

**Методические указания  
к практическому занятию**

**ВЛАДИМИР 1999**

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации

Владимирский государственный университет

Кафедра безопасности жизнедеятельности

**БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЛАЗЕРНО-ОПАСНЫХ ЗОН**

Методические указания к практическому занятию

Составитель  
Е.А. БАЛАНДИНА

Владимир 1999

УДК 621.865.8(075.8)

Рецензент  
Кандидат технических наук, доцент  
Владимирского государственного университета  
*М.В. Латышев*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Безопасность** лазерного излучения. Определение границ лазерно-опасных зон: Метод. указания к практическому занятию. /Владим. гос. ун-т; Сост. : Е. А. Баландина. Владимир, 1999. 40 с.

Предназначены для студентов спец. 1207, 0102, 072300, 1908 при выполнении практических работ по дисциплине “Безопасность жизнедеятельности”.

Рассматриваются основные параметры лазерного излучения, его воздействие на организм человека, выбор предельно-допустимых уровней энергии лазера и определение границ лазерно-опасных зон.

Табл. 16. Ил. 2. Библиогр.:5 назв.

УДК 621.865.8(075.8)

Основной особенностью применения лазеров в производственных процессах является значительное превышение безопасного уровня энергии (мощности) лазерного излучения. Это требует специальных мер по обеспечению безопасных условий труда, так как персонал, обслуживающий лазерные установки, находится в непосредственной близости от них.

Согласно “Санитарным нормам и правилам устройства и эксплуатации лазеров” № 2392-81 и ГОСТ 12.1.040-83 лазеры по степени опасности генерируемого излучения делятся на четыре класса. Выходное излучение лазерных установок 1-го класса не представляет опасности для глаз и кожи. Выходное излучение лазеров 2-го класса представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отраженным излучением. Выходное излучение лазеров 3-го класса опасно при облучении глаз прямым, зеркально отраженным, а также диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности и при облучении кожи прямым и зеркально отраженным излучением. Лазерные установки 4-го класса представляют опасность при облучении кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности.

Зеркально отраженным лазерным излучением является излучение, отраженное под углом, равным углу падения излучения. Диффузно отраженным лазерным излучением считается излучение, отраженное от поверхности, соизмеримой с длиной волны по всевозможным направлениям в пределах полусферы.

Класс опасности лазера наряду с его техническими характеристиками указывается в паспорте оборудования.

Воздействие лазерного излучения на человека отличается рядом особенностей. Вследствие того, что биологические ткани имеют разные спектральные характеристики поглощения, лазерное излучение действует избирательно на различные органы и системы и внутриклеточные структуры (в зависимости от наличия в них пигментных образований, способных поглощать излучение определенной длины волны). Воздействие лазерного излучения может вызвать в биологической ткани целый ряд эффектов: тепловой, ударный, фотохимический, светового давления, электрострикции, образования на уровне клетки микроволнового электромагнитного поля.

Важнейшим эффектом взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями является тепловой эффект. Специфика теплового действия лазерного излучения состоит в том, что в сложных структурах тканей могут нагреваться до высоких температур лишь некоторые слои, а при воздействии коротких импульсов — лишь некоторые элементы клеток, в то время как среднее по всей клетке приращение температуры мало. При достаточно высокой плотности мощности излучения выделяющееся в ткани тепло вызывает коагуляцию белков и других органических молекул, что клинически выявляется в виде ожогов тканей. Излучение ряда лазеров имеет высокую удельную мощность, достаточную не только для нагрева, но и для испарения любой биологической ткани.

При высокой мощности излучения или при работе лазера в режиме синхронизации мод (длительность импульса порядка  $10^{-12}$  с) наблюдается ударное действие лазерного излучения. Механизм возникновения ударного эффекта может быть различен: изменение агрегатного состояния тканевой воды, тепловое расширение без изменения агрегатного состояния, явление отдачи при испарении вещества с поверхности облучаемой ткани. В результате этих процессов в ткани возникает резкое повышение давления, которое распространяется сначала со сверхзвуковой скоростью, имея характер ударной волны, затем постепенно замедляется. При лазерном облучении кожи ударная волна, распространяясь во внутренних тканях, может вызвать их повреждение без каких-либо внешних проявлений.

Лазерное излучение также может инициировать в облучаемых тканях фотохимические реакции, являющиеся результатом активации биомолекул при поглощении кванта энергии излучения. Необходимо отметить и возможность образования в тканях свободных радикалов, которые, вступая в реакции с биомолекулами, нарушают нормальные метаболические процессы в клетке. Образование и накопление большого количества свободных радикалов в тканях человека, подвергшегося лазерному облучению, ведет к общему ухудшению состояния его здоровья.

Непосредственным результатом острого интенсивного облучения глаз лазерным излучением УФ-С и УФ-В-диапазонов является фотокератит, в развитии которого основную роль играет фотохимический механизм, а в основе эффектов лазерного УФ-А-излучения лежат и тепловой, и фотохимический механизмы. Лазерное излучение видимого и ИК-А-диапазонов длин волн вызывает ожоги сетчатки, причем механизм повреждения сетчатки короткими импульсами лазерного излучения отличается от ожогов, развивающихся вследствие воздействия длительных экспозиций, т. е. раз-

ные временные параметры лазерного излучения включают различные механизмы биологических изменений в сетчатке. Так, при очень коротких импульсах (например, при действии лазера с модулированной добротностью или в режиме синхронизации мод) повреждение сетчатки является следствием возникновения термоакустической ударной волны и локального нагрева гранул меланина до очень высоких температур (в некоторых случаях даже превышающих  $100^{\circ}\text{C}$ ), хотя повышение температуры в самой сетчатке при этом невелико. Преобладание нетермических способов передачи энергии облучения в ткани при сверхкоротких длительностях импульса дает основание считать подобные биологические эффекты специфически лазерными. При использовании длительностей лазерного излучения порядка 1 мкс ожоги сетчатки являются следствием тепловой денатурации белковых и сложных органических молекул ткани. И наконец, пороговые повреждения сетчатки при длительном (1-100 с) воздействии лазерного излучения инициируются фотохимическими реакциями в фоторецепторах и пигментном эпителии. Пороговые мощности (энергии) лазера, вызывающие повреждения сетчатки глаз в 50% случаев, представлены в табл.1 приложения.

Длинноволновое видимое и ИК-А-лазерное излучения вызывают также повреждения тканей передней части глаза. Лазерное излучение ИК-В-диапазона длин волн инициирует изменения в хрусталике и в роговичной оболочке. В ИК-С-диапазоне оптические среды глаза становятся непрозрачными, так как поглощение лазерного излучения этой области спектра водой (основной составляющей всех биологических тканей) является слишком высоким. Поэтому воздействие ИК-С-лазерного излучения на орган зрения ограничивается главным образом роговицей. Для длинноволнового ИК-диапазона механизм взаимодействия с биологическими тканями становится чисто тепловым. В ИК-С-области спектра так же, как и в УФ-А и УФ-В-диапазонах порог повреждения тканей глаза приближается по величине к порогу повреждения кожи. Пороговые мощности (энергия) лазера, вызывающие развитие кожных реакций в 50 % случаев под действием излучения, представлены в табл. 2 приложения.

В качестве основного нормируемого параметра лазерного излучения в СН № 2392-81 “Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров” установлена энергетическая экспозиция  $H$  облучаемых тканей. Энергетическая экспозиция - отношение энергии излучения, падающей на рассматриваемый участок поверхности, к площади этого участка, или произведение энергетической освещенности на длительность облучения. Пре-

дельно допустимые уровни (ПДУ) лазерного излучения относятся к спектральному диапазону от 0,2 до 20 мкм и регламентируются на роговице глаза и кожи. Кроме того, для длин волн от 0,4 до 1,4 мкм в СН № 2392-81 установлены также ПДУ энергетической экспозиции сетчатки глаза  $H_c$ , а специально для видимого диапазона спектра (0,4 - 0,75 мкм), кроме указанных параметров, нормируется также энергия излучения  $Q$  на сетчатке глаза.

Предельно допустимые уровни лазерного излучения исключают появление первичных биологических эффектов (органические изменения) для всего спектрального диапазона и вторичных биологических эффектов (неспецифические изменения в облучаемой ткани) для видимой области спектра.

Предельно допустимые уровни зависят от следующих параметров: длин волн лазерного излучения  $\lambda$ , мкм; длительности импульса  $\tau$ , с; частоты повторения импульсов  $f$ , Гц; длительности воздействия серий импульсов  $t$ , с.

В диапазоне 0,4 - 1,4 мкм ПДУ дополнительно зависят от углового размера источника излучения  $\alpha$ , рад, или от диаметра пятна засветки на сетчатке  $d_c$ , см; диаметра зрачка глаза  $d_3$ , см. В диапазоне длин волн от 0,4 до 0,75 мкм ПДУ зависят от фоновой освещенности роговицы глаза  $E_f$ , лк.

При работе лазера (установки) в импульсно-периодическом режиме при расчетах ПДУ должны учитываться энергетические характеристики максимального импульса серии. При известном времени воздействия  $t$  зависимость энергетической освещенности  $E_e$  от значения энергетической экспозиции определяется по формуле

$$H_e = E_e \cdot t \quad (1)$$

При оценке степени опасности облучения кожи лазерным излучением с длиной волны от 0,2 до 20 мкм энергетическая экспозиция облучаемой поверхности сравнивается с ПДУ.

При оценке степени опасности облучения глаз по первичным биологическим эффектам энергетическая экспозиция на роговице сравнивается с ПДУ облучения для точечного источника (если  $\alpha < 10^{-3}$  рад). Если уровень энергетической экспозиции (освещенности) меньше ПДУ, то облучение считается безопасным независимо от геометрии источника. Если уровень превышает ПДУ, то в этом случае должен быть определен угловой размер источника излучения  $\alpha$  по формуле

$$\alpha = d \cdot \cos \Theta / R, \quad (2)$$

где  $d$  - диаметр источника излучения, см;  $\Theta$  - угол между нормалью к поверхности источника и направлением наблюдения, град;  $R$  - расстояние от источника излучения до точки наблюдения, см.

Уровень излучения сравнивается с ПДУ для данного углового размера источника.

Облучение глаз прямым лазерным излучением приравнивается к случаю облучения глаз излучением от точечного источника. При источнике излучения сложной конфигурации за его диаметр принимается наименьший размер. Усреднение энергетической экспозиции допускается по круглому входному зрачку с диаметром не более 0,8 см. Угол поля зрения должен быть больше углового размера источника излучения.

При необходимости пересчет значений энергетической экспозиции роговицы глаза в значение энергии, поглощаемой сетчаткой, проводят по формуле

$$Q = 0,25 \pi H_{ер} d_3^2 \tau_{ГЛ}, \quad (3)$$

где  $H_{ер}$  - энергетическая экспозиция роговицы глаза;  $\tau_{ГЛ}$  - спектральный коэффициент поглощения излучения сетчаткой;  $d_3$  - диаметр зрачка глаза.

При воздействии на глаз лазерного излучения с длиной волны от 0,4 до 0,75 мкм оценка степени опасности излучения проводится как по первичным, так и по вторичным биологическим эффектам. Оценку степени опасности излучения по вторичным биологическим эффектам проводят путем сравнения значения энергетической экспозиции роговицы глаза с соответствующим ПДУ.

*ПДУ моноимпульсного и непрерывного лазерного излучения с длиной волны от 0,2 до 0,4 мкм.* Для лазерного излучения с длиной волны от 0,2 до 0,4 мкм нормируется энергетическая экспозиция  $H_{уф}$  на роговице и коже за общее время облучения в течение рабочего дня. Значения  $H$  приведены в табл. 3 приложения.

*ПДУ моноимпульсного и непрерывного лазерного излучения с длиной волны 0,4 - 1,4 мкм для роговицы глаза.* ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от излучения с длиной волны от 0,4 до 0,75 мкм, не вызывающего первичных  $H_{П}$  и вторичных  $H_{В}$  биологических эффектов, определяется по формулам

$$H_{П} = H_1 K_1, \quad (4)$$

$$H_{В} = 0,1 H_2 E_{ф}, \quad (5)$$

где  $H_1$  - энергетическая экспозиция на роговице глаза, Дж/см<sup>2</sup> в зависимости от длительности воздействия импульса  $\tau$  и углового размера источ-



ника излучения  $\alpha$  при максимальном диаметре зрачка глаза  $d_3$ , равном 0,8 см (табл. 4 приложения);  $K_1$  - поправочный коэффициент на длину волны лазерного излучения  $\lambda$  и диаметр зрачка глаза  $d_3$  (табл. 5 приложения);  $H_2$  - суммарная энергетическая экспозиция на роговице глаза за рабочий день в зависимости от диаметра зрачка и длины волны излучения (табл. 6 приложения).

Диаметр зрачка глаза в зависимости от фоновой освещенности роговицы глаза  $E_{\text{ф}}$  определяется по табл. 7 приложения.

В качестве ПДУ выбирается наименьшее из полученных значений  $H_{\text{П}}$  и  $H_{\text{В}}$ . ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от излучения с длиной волны от 0,75 до 1,4 мкм определяется по формуле (4).

*ПДУ моноимпульсного и непрерывного лазерного излучения дальней инфракрасной области спектра.* ПДУ энергетической экспозиции от излучения с длиной волны 1,4 - 20,0 мкм на роговице глаза и коже определяется по табл. 8 приложения. ПДУ энергетической экспозиции кожи в диапазоне 0,4 - 1,4 мкм также определяется по табл. 8 приложения.

*ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения с длиной волны от 0,2 до 0,4 мкм.* ПДУ энергетической экспозиции от каждого импульса на роговице и коже определяется по формуле

$$H_{\text{уф.имп}} = H_{\text{уф}} / (f t n), \quad (6)$$

где  $H_{\text{уф}}$  определяется по табл. 3 приложения;  $f$  - частота следования импульсов, Гц;  $t$  - длительность серии импульсов, с;  $n$  - количество серий импульсов за рабочий день.

*ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения с длиной волны 0,4 - 1,4 мкм для роговицы глаза.* ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от каждого импульса излучения с длиной волны 0,4 - 0,75 мкм, не вызывающей первичных  $H_{\text{П.имп}}$  и вторичных  $H_{\text{В.имп}}$  биологических эффектов, определяется по формулам

$$H_{\text{П.имп}} = H_{\text{П}} K_2, \quad (7)$$

$$H_{\text{В.имп}} = H_2 \Phi / (f t n), \quad (8)$$

где  $K_2$  - поправочный коэффициент на частоту повторения импульсов и длительность серии импульсов  $t$  (табл.9 приложения);  $n$  - количество серий импульсов за рабочий день.

При определении ПДУ по формулам (7) и (8) в качестве ПДУ выбирается наименьшее значение.

ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от излучения с длиной волны от 0,75 до 1,4 мкм определяется по формуле (7).

*ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения дальней инфракрасной области спектра для роговицы глаза.* ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза от каждого импульса излучения с длиной волны от 1,4 до 20,0 мкм определяется по формуле

$$N_{\text{имп}} = N K_3, \quad (9)$$

где  $N$  определяется по табл. 8 приложения;  $K_3$  - поправочный коэффициент на частоту повторения импульсов и длительность серии импульсов (табл. 10 приложения).

*ПДУ импульсно-периодического лазерного излучения для кожи.* ПДУ энергетической экспозиции кожи от каждого импульса лазерного излучения с длиной волны 0,4 - 1,4 мкм определяется по формуле

$$N_{\text{имп}} = N K_2, \quad (10)$$

где  $N$  определяется по табл. 8 приложения;  $K_2$  определяется по табл. 9 приложения.

ПДУ от каждого импульса лазерного излучения с длиной волны от 1,4 до 20,0 мкм определяется по формуле

$$N_{\text{имп}} = N K_3 \quad (11)$$

где  $N$  определяется по табл. 8 приложения;  $K_3$  - поправочный коэффициент (см. табл. 10 приложения).

В диапазоне 0,4 - 1,4 мкм ПДУ энергетической экспозиции сетчатки для первичных эффектов в зависимости от длительности воздействия и диаметра пятна засветки на сетчатке определяется по табл. 11 приложения.

В диапазоне 0,4 - 0,75 мкм ПДУ энергии  $Q$  на сетчатке для вторичных биологических эффектов в зависимости от фоновой освещенности роговицы определяется по табл. 12 приложения.

Величина  $Q$ , определенная по табл. 12 приложения, сравнивается с величиной  $Q^*$ , значения которой в зависимости от длительности импульса и диаметра пятна засветки на сетчатке определяются по табл. 13. Если  $Q$  больше  $Q^*$ , то за ПДУ облучения глаз принимается  $N_c$ , в противном случае за ПДУ облучения глаз принимается  $Q$ .

Для расчета уровней лазерного излучения и лазерно-опасных зон (ЛОЗ) при прямом лазерном излучении пользуются следующими формулами:

$$N = 4 Q \beta_0 \Gamma_0^2 / \pi (d_L + 2 R \gamma)^2, \quad (12)$$

где  $\beta_0$  и  $\Gamma_0$  - коэффициенты пропускания и увеличения оптической системы наблюдения (для невооруженного глаза  $\beta_0$  и  $\Gamma_0 = 1$ );  $d_L$  - начальный диаметр пучка, см;  $\gamma$  - угол расходимости луча, рад;  $R$  - расстояние до расчетной точки, см.

Характер лазерно-опасной зоны, создаваемой прямым лазерным излучением с равномерным распределением интенсивности, представлен на рис .1.

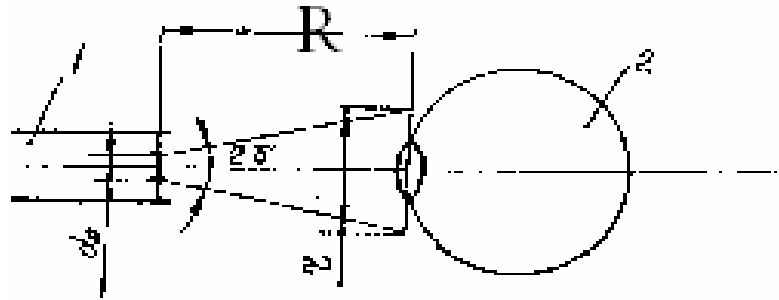


Рис.1. Характер лазерно-опасной зоны, создаваемой прямым излучением

Задаваясь различными значениями величины  $R$ , подсчитывают значения  $H$ . Расстояние, при котором выполняется условие  $H=H_{ПДУ}$ , соответствует длине ЛОЗ  $l_{ЛОЗ}$  и определяется по формуле:

$$l_{ЛОЗ} = 0,5 \gamma^{-1} (\sqrt{4 Q / \pi H_{ПДУ}} - d_L), \quad (13)$$

а наибольший радиус опасной зоны определяется так:

$$r_{ЛОЗ} = \sqrt{4 Q / \pi H_{ПДУ}}. \quad (14)$$

Расчет уровней облучения и ЛОЗ для отраженного от плоских зеркальных поверхностей излучения проводится с учетом уменьшения энергии излучения за счет коэффициента отражения по формуле (12).

При отражении лазерного излучения от поверхности плоской стеклянной оптической детали коэффициент отражения равен 0,04. Более точное значение определяется по формуле

$$\rho = ((n - 1) / (n + 1))^2, \quad (15)$$

где  $n$  - коэффициент преломления материала оптической детали для длины волны излучения лазера. Возможно отражение лазерного излучения от сферических зеркальных поверхностей (линз, объективов и т.д.). В этом случае уровни облучения роговицы глаза или кожи определяются по формуле

$$H = Q \rho / \pi r^2, \quad (16)$$

где  $r$  - радиус сечения отраженного луча, см ;

-для выпуклой поверхности  $r = (d_{Л} + 2 \gamma R_1) (R_2 + r_{сф} / 2) / r_{сф}$  ;

-для вогнутой поверхности  $r = (d_{Л} + 2 \gamma R_1) (R_2 - r_{сф} / 2) / r_{сф}$  ;

$R_1, R_2$  - расстояние от лазера до отражающей поверхности и от отражающей поверхности до расчетной точки;  $r_{сф}$  - радиус сферической поверхности. Длиной ЛОЗ является расстояние, на котором рассчитанный уровень излучения равен предельно допустимому.

Кроме зеркального возможно также диффузное отражение (от потолка и стен помещения, от экранов и мишеней, от поверхностей оборудования и одежды ). Расчет уровней облучения рассеянным излучением в этом случае проводится по формуле

$$H = Q \cdot \rho \cdot \cos \theta / \pi \cdot R_2^2, \quad (17)$$

где  $\theta$  - угол между направлением на расчетную точку и нормалью к поверхности (рис.2);  $\rho$  - коэффициент отражения в зависимости от материала поверхности ( табл. 14 приложения) .

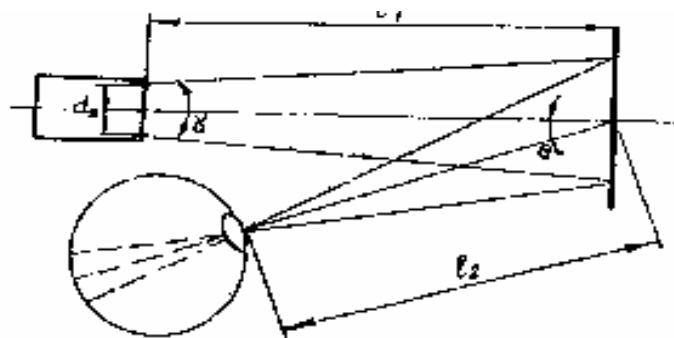


Рис. 2. Характер лазерно-опасной зоны при диффузном отражении (рассеянном излучении)

ЛОЗ , создаваемая диффузно отраженным излучением, определяется так:

$$l_{ЛОЗ} = \sqrt{Q \cdot \rho \cdot \cos \theta / \pi \cdot H_{ПДУ}}. \quad (18)$$

Инженерно-технические методы защиты предусматривают создание безопасных лазерных установок уменьшением мощности применяемого лазера и надежной экранировкой лазерной установки. Кроме того, все оптические устройства и приспособления для визуального наблюдения за мишенью снабжаются защитными фильтрами с полосой поглощения, включающей частоту излучения лазера. Тип светофильтра ( очков ) можно выбрать согласно ГОСТ 9411-75 по табл. 15 приложения.

Оптическая плотность светофильтров характеризуется уровнем затемнения, являющимся обратной величиной прозрачности материала.

Максимальная прозрачность материала для каждого диапазона излучения в соответствии с уровнями затемнения определяется по формуле  $S = (7/3) D \nu + 1$ , где  $\nu$  - оптическая плотность, равная  $\lg r_\nu$  ( $r_\nu$  - коэффициент пропускания лазерного излучения прозрачными средами глаза).

Противолазерные фильтры создаются на основе поглощающих стекол или пластмасс, диэлектрических тонкопленочных отражателей, комбинированных, состоящих из поглощающих стекол и диэлектрических тонкопленочных отражателей.

Поглощающие стекла и пластмассы наиболее употребительны, дешевы и на некоторой длине волны поглощают до 90% падающей на них световой энергии. Учитывая, что принцип защиты органа зрения в данном случае основан на поглощении световой энергии, которая, преобразуясь в тепловую, может привести к разрушению поглощающего фильтра (при высоких уровнях излучения), целесообразно устанавливать дополнительно на наружной (иногда на внутренней) стороне поглощающего фильтра тонкопленочные отражатели. Отражающие фильтры обладают выраженной частотной избирательностью; их изготавливают в основном из диэлектрических пленок на основе окислов титана или окислов кремния. При определенных частотах излучения может отражаться до 95% падающей световой энергии.

Комбинированные многослойные светофильтры являются наилучшими и состоят из отражающих зеркал и поглощающих материалов.

В настоящее время в России и за рубежом созданы противолазерные очки, поглощающие световое излучение лазера в диапазоне, практически перекрывающем 0,20 - 1,25 мкм. Следует указать, что цветные стеклянные фильтры обеспечивают ослабление лазерного излучения не более чем в  $10^9$  раз, очки с диэлектрическими покрытиями — не более чем в  $10^8$ .

Надежную защиту глаз от инфракрасного излучения газового лазера на углекислом газе создает фильтр, выполненный из двух пластинок плавленого кварца. Светофильтры противолазерных очков должны обеспечить снижение интенсивности облучения глаз до безопасной величины.

В качестве спецодежды для защиты от лазерного излучения используется халат и маска-шапочка, в этом случае уровень облучения определяется по формуле

$$H = H_{\text{ПДУ}} \varepsilon^m, \quad (19)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент пропускания ткани (ткань белая),  $\varepsilon = 0,06-0,08$ ;  $m$  - количество слоев ткани.

**Пример:** Определить ПДУ облучения, границу ЛОЗ и средства за-

щиты для лазерной технологической установки с  $\lambda = 0,69$  мкм. Длительность импульса -  $10^{-3}$  с. Частота - 10 Гц. Облучению подвергаются глаза и кожа оператора с диаметром пятна 100 мкм. Расстояние от точки наблюдения до поверхности - 0,5 м, угол между нормалью к поверхности и направлением наблюдения от 5 до 30 градусов. Фоновая освещенность 100 лк. Время воздействия - 8 часов. Энергия лазерного импульса 100 Дж. Диаметр зрачка оператора 0,5 см. Класс опасности лазера - III.

Решение: Определяем ПДУ энергетической экспозиции, не вызывающий первичных биологических эффектов, при угловом размере источника излучения (формула (2))

$$\alpha = 10^{-2} \cos(5^\circ \dots 30^\circ) / 50 = 1,7 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад} - \text{точечный источник.}$$

Для первичных биологических эффектов используются формулы (7) и (4)

$$H_1 = 7,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/см}^2 \quad (\text{табл. 4})$$

$$K_1 = 2,1 \quad (\text{табл. 5})$$

$$K_2 = 4,3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{табл. 9})$$

$$H_{\text{п.имп}} = 7,1 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} = 0,64 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/см}^2.$$

Для вторичных биологических эффектов используется формула (8).

$$H_2 = 9,9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2 \quad (\text{табл. 6}).$$

$$H_{\text{в.имп}} = 9,9 \cdot 10^{-2} \cdot 100 / 10 \cdot 2,9 \cdot 10^4 = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/см}^2.$$

В качестве ПДУ принимается величина  $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/см}^2$ . В соответствии с формулой (10) определяем ПДУ облучения кожи

$$H_{\text{имп}} = 4 \cdot 10^{-1} \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2.$$

Граница зоны, внутри которой отраженное излучение представляет опасность для глаз оператора, определяется по формуле (18):

$$l_{\text{ЛОЗ}} = \sqrt{100 \cdot 0,9 \cdot \cos 5^\circ / 3,14 \cdot 3,4 \cdot 10^{-5}} = 967 \text{ см} = 9,7 \text{ м.}$$

Для кожи лазерно-опасная зона вычисляется путем замены  $H_{\text{пду}}$  на значение ПДУ для кожи

$$l_{\text{ЛОЗ}} = \sqrt{100 \cdot 0,9 \cdot \cos 5^\circ / 3,14 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3}} = 140 \text{ см} = 1,4 \text{ м.}$$

Зону ограничения рассматриваем как зону повышенной опасности, так как в ней требуется использование средств индивидуальной защиты (СИЗ) глаз. Для уменьшения опасности поражения лазерным излучением на данной установке предусматривается использование лазерно-защитных

очков со светофильтрами СЗС-22 (ГОСТ 9411-75). Установки III класса опасности размещаются в отдельных помещениях, оборудуются внутренними замками, табло "Посторонним вход воспрещен" и знаком лазерной опасности в соответствии с ГОСТ 12.4.026-76.

**Задание для практической работы студентов:** определить ПДУ облучения, границу ЛОЗ и средства защиты для лазерной технологической установки, технические характеристики которой представлены в табл. 16 приложения.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Пороговые мощности (энергии) для повреждения сетчатки глаз излучением лазеров

Тип лазера и длина волны излучения	Объект воздействия	Пороговая мощность (энергия)	Длительность воздействия
Аргоновый газовый (488 и 514 нм)	Глазное дно	16 мВт	0,5 с
		25 мВт	0,2 с
		100 мВт	0,2 с
Гелий-неоновый газовый (632,8 нм)	Глазное дно	18 мВт	80,0 мс
		23 мВт	13,5 мс
		10 мВт	1 с
		15 мВт	100 мс
		40 мВт	10 мс
Рубиновый импульсный в свободном режиме генерации (694,3 нм)	Глазное дно	0,2 мДж	7 мс
		0,5 мДж	1,7 мс
		3,0 мДж	7 мс
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	Глазное дно	22 мкДж	10 нс
Неодимовый импульсный в режиме свободной генерации (1,06 мкм)	Глазное дно	1,0 мДж	7 мс
		4,7 мДж	6 мс
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	Глазное дно	0,3 Дж/см <sup>2</sup>	40 нс
Иттербий-эрбиевый импульсный свободной генерации (1,54 мкм)	Роговица	7,2 Дж/см <sup>2</sup>	1 мс
		4,7 Дж/см <sup>2</sup>	40 нс
Лазер на СО <sub>2</sub> постоянного излучения	Роговица	3,8 Вт/см <sup>2</sup>	1 с
		20-30 Вт/см <sup>2</sup>	0,1 с
		80 Вт/см <sup>2</sup>	0,01 с



Таблица 2

Пороговые мощности для развития кожных реакций при действии излучения некоторых лазеров

Тип лазера и длина волны излучения	Пороговая энергия, кДж/м <sup>2</sup>	Длительность воздействия
Азотный газовый (334 нм)	200	210 с
Аргоновый газовый (458-515 нм)	40-82	1 с
Рубиновый импульсный в режиме свободной генерации (694,3 нм)	Непигментированная кожа - 110-200	2,5 мс
	Пигментированная кожа - 22-69	2,5 мс
Тот же лазер в режиме модулированной добротности	2,5-3,4	75 нс
Неодимовый импульсный в режиме модулированной добротности (1060 нм)	25-57	75 нс
Неодимовый в свободном режиме генерации (1064 нм)	460-780	1 с
Лазер на СО <sub>2</sub> постоянного излучения	28	1 с

Таблица 3

Энергетическая экспозиция в ультрафиолетовой области на роговце и коже за общее время облучения в течение рабочего дня

$\lambda$ , мкм	H <sub>уф</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	$\lambda$ , мкм	H <sub>уф</sub> , Дж/см <sup>2</sup>
От 0,200 до 0,210	$1 \cdot 10^{-8}$	Свыше 0,290 до 0,300	$1 \cdot 10^{-5}$
Свыше 0,210 до 0,215	$1 \cdot 10^{-7}$	Свыше 0,300 до 0,370	$1 \cdot 10^{-4}$
Свыше 0,215 до 0,290	$1 \cdot 10^{-6}$	Свыше 0,370	$2 \cdot 10^{-3}$



Таблица 4

Энергетическая экспозиция  $H_1$  на роговице глаза в зависимости от длительности воздействия  $\tau$  и углового размера источника излучения  $\alpha$  при максимальном диаметре зрачка глаза

$\tau$ , с	$\alpha$ , рад							
	До 0,001 (точечный)	Свыше 0,001 до 0,005	Свыше 0,005 до 0,01	Свыше 0,01 до 0,05	Свыше 0,05 до 0,1	Свыше 0,1 до 0,5	Свыше 0,5 до 1	Свыше 1 до 2,5
$10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$
$10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
$10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
$10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
$10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$
$10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
$10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$
$10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$
1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-1}$
10	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-1}$	1,2
$10^2$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$9,8 \cdot 10^{-1}$	2,3
$10^3$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-1}$	1,6	3,8
$10^4$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	1,2	3,0	7,0
$3 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	1,6	4,0	1,2 - 10



Таблица 5

Поправочный коэффициент  $K_1$  на длину волны лазерного излучения и диаметр зрачка глаза  $d_3$

$d_3$ , см	$\lambda$ , мкм						
	От 0,40 до 0,42	Свыше 0,42 до 0,45	Свыше 0,45 до 0,90	Свыше 0,90 до 1,10	Свыше 1,10 до 1,20	Свыше 1,20 до 1,30	Свыше 1,30 до 1,40
0,8	2,3	1,4	0,8	1,0	2,3	7,0	23
0,7	3,0	1,8	1,0	1,3	3,0	9,1	30
0,6	4,1	2,5	1,4	1,8	4,1	13	41
0,5	6,0	3,6	2,1	2,6	6,0	18	60
0,4	9,2	5,6	3,2	4,0	9,2	28	92
0,3	16	9,9	5,7	7,1	16	50	160
0,2	37	22	13	16	37	110	370

Таблица 6

Энергетическая экспозиция  $H_2$  роговицы глаза в зависимости от длины волны излучения и диаметра зрачка глаза

$d_3$ , см	$\lambda$ , мкм						
	От 0,40 до 0,44	Свыше 0,44 до 0,48	Свыше 0,48 до 0,62	Свыше 0,62 до 0,67	Свыше 0,67 до 0,71	Свыше 0,71 до 0,73	Св, 0,73 до 0,75
0,8	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,62	2,6
0,7	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,81	3,4
0,6	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	1,1	4,7
0,5	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-2}$	1,6	6,8
0,4	0,12	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	0,15	2,5	16
0,3	0,20	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,27	4,4	18
0,2	0,45	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,61	9,9	42



Таблица 7

Зависимость диаметра зрачка глаза  $d_3$  от фоновой освещенности роговицы  $E_{\phi}$ 

Фоновая освещенность $E_{\phi}$ , лк	Диаметр зрачка $d_3$ , см	Фоновая освещенность $E_{\phi}$ , лк	Диаметр зрачка $d_3$ , см
0,01	0,8	2000	0,4
0,04	0,7	30000	0,3
8	0,6	300000	0,2
100	0,5		

Таблица 8

ПДУ энергетической экспозиции роговицы глаза лазерным излучением с длиной волны  
свыше 1,4 мкм и кожи свыше 0,4 мкм в зависимости от длины волны  $\lambda$  и длительности импульса  $\tau$

Длительность импульса $\tau$ , с	Длина волны излучения $\lambda$ , мкм				
	От 0,4 до 0,73	Свыше 0,73 до 2,4	Свыше 2,4 до 5,6	Свыше 5,6 до 9,3	Свыше 9,3 до 20
1	2	3	4	5	6
$10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
$10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$
$10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
$10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 8

1	2	3	4	5	6
$10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-1}$	2	$2 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-2}$	1	5	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
$10^{-1}$	4	20	2	$2 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$
1	10	60	6	$6 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
$10^1$	40	200	20	2	$8 \cdot 10^{-1}$
$10^2$	200	1000	100	10	4
$10^3$	800	4000	400	40	20
$10^4$	4000	20000	2000	200	80
$3 \cdot 10^4$	8000	40000	4000	400	200



Таблица 9

Поправочный коэффициент  $K_2$  на частоту повторения импульсов  $f$   
и длительность воздействия серии импульсов  $t$

Длительность серии импульсов $t$ , с	Частота повторения импульсов $f$ , Гц					
	До 10	Свыше 10 до 50	Свыше 50 до 100	Свыше 100 до 250	Свыше 250 до 500	Свыше 500 до 1000
0,1	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
1	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
10	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
100	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
1000	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
10000	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$
30000	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Таблица 10

Поправочный коэффициент  $K_3$  на частоту повторения импульсов  $f$   
и длительность воздействия серии импульсов  $t$

Длительность серии импульсов $t$ , с	Частота повторения импульсов $f$ , Гц					
	До 10	Свыше 10 до 50	Свыше 50 до 100	Свыше 100 до 250	Свыше 250 до 500	Свыше 500 до 1000
0,1	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
1	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$
10	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
100	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
1000	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
10000	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
30000	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Таблица 11

ПДУ энергетической экспозиции сетчатки  $H_c$ , не вызывающей биологических эффектов

Длительность импульса $\tau_{и}, c$	Диаметр сетчатки глаза, $d_c$ , см							
	$1,7 \cdot 10^{-3}$ (точечный)	Свыше $1,7 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$	Свыше $5 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$	Свыше $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$	Свыше $5 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-1}$	Свыше $1 \cdot 10^{-1}$ до $5 \cdot 10^{-1}$	Свыше $1 \cdot 10^{-1}$ до 1	Свыше 1 до 4
$10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$10^{-7}$	1	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$10^{-6}$	2	$6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$
$10^{-5}$	3	1	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$10^{-4}$	6	2	1	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$10^{-3}$	10	4	2	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$10^{-2}$	20	6	3	$6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-1}$	30	0,1	6	1	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
1	60	0,2	10	2	1	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$
10	100	40	20	4	2	$4 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$
100	200	60	30	6	3	$6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$
1000	300	100	60	10	6	1	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
10000	600	200	100	20	10	2	1	$3 \cdot 10^{-1}$
30000	800	300	100	30	10	3	1	$3 \cdot 10^{-1}$

Таблица 12

ПДУ энергии на сетчатке глаза Q, Дж, не вызывающей вторичных биологических эффектов

Ф <sub>p</sub> , лк	λ, мкм						
	От 0,4 до 0,44	Свыше 0,44 до 0,48	Свыше 0,48 до 0,63	Свыше 0,63 до 0,67	Свыше 0,67 до 0,71	Свыше 0,71 до 0,74	Свыше 0,74 до 0,75
От 1·10 <sup>-2</sup> до 5·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	42·10 <sup>-6</sup>	42·10 <sup>-7</sup>	22·10 <sup>-6</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	4·10 <sup>-4</sup>	6·10 <sup>-3</sup>
От 5·10 <sup>-2</sup> до 5·10 <sup>-1</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	2·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-2</sup>
От 5·10 <sup>-1</sup> до 5	1·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	3·10 <sup>-1</sup>
Свыше 5 до 50	1·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-1</sup>	3
Свыше 60 до 500	1·10 <sup>-1</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-1</sup>	2	30
Свыше 500 до 5000	1	2·10 <sup>-1</sup>	2·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-1</sup>	1	20	300
Свыше 5000 до 50000	10	2	2·10 <sup>-1</sup>	1	10	200	3000
Свыше 50000 до 100000	100	20	2	10	100	2000	30000

Таблица 13

Значение Q, Дж, в зависимости от длительности импульса  $\tau$  и диаметра пятна засветки на сетчатке  $d_c$ 

$\tau$ , с	$d_c$ , см							
	$1,7 \cdot 10^{-3}$ (точечный) источник	Свыше $1,7 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$	Свыше $5 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$	Свыше $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$	Свыше $5 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-1}$	Свыше $1 \cdot 10^{-1}$ до $5 \cdot 10^{-1}$	Свыше $5 \cdot 10^{-1}$ до 1	Свыше 1 до 4
$10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
$10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$
$10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$
$10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$
1	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-1}$
10	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
100	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$
1000	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	1
10000	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-1}$	3
30000	$2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$	1	4

Таблица 14

Значения коэффициента отражения  $\rho$  от материала отражающей поверхности

Материал	$\rho$	Материал	$\rho$
Бумага белая	0,95-0,98	Кожух прибора светло-серый	0,65-0,55
Светлая штукатурка	0,4-0,9	Черная бумага	0,04-0,05
Белая ткань, халат	0,65-0,55	Черный бархат	0,002

Таблица 15

Марки стекол, рекомендуемые для использования в противолазерных очках

Длина волны, мкм	0,48-0,51	0,53	0,69	0,84	1,06	1,54	10,6
Марка стекла (ГОСТ 9411-75)	ОС-12* ОС-13 ОС-23-1	ОС-12 ОС-13 ОС-23-21	СЗС-21** СЗС-22	СЗС-21 СЗС-22	СЗС-21 СЗС-22 СЗС-24	СЗС-24 СЗС-25 СЗС-26	БС-15*** - -

\* Оранжевое стекло,

\*\* Сине-зеленое стекло.

\*\*\* Бесцветное стекло.

Таблица 16

## Варианты задания для практической работы студентов

Вариант	Марка установки	Назначение	Активный элемент	Параметры выходного излучения				Диаметр пятна, мм	Фоновая освещенность, лк
				Длина волны, мкм	Длительность импульсов, мс	Энергия импульса, Дж	Частота повторения импульсов, Гц		
1	Кристалл-6	Прошивка отверстий	Стекло	1,06	0,2	4,0	20	1,0	100
2	Кристалл-7	То же	То же	1,06	0,2	5,0	5	0,4	
3	Кристалл-8	”	”	1,06	0,2	0,3	20	0,2	
4	ЛП-2	”	”	1,06	1,0	10	0,004	0,3	
5	Корунд	”	”	1,06	0,07	0,5	4—10	0,1	
6	УЛ-20М	Сварка	Рубин	0,694	1 - 7	30	0,2	0,1	
7	Квант-9М	Прошивка отверстий	Стекло	1,06	0,75	8,0	2,0	2,0	
8	Квант-10	Сварка	Стекло	1,06	6	30	1,0	2,0	
9	Квант-12	То же	Гранат	1,06	4	5	20	2,0	
10	СЛС-10-1	”	Стекло	1,06	4	8	0,5	2,0	
11	ГОС-30	Научные исследования	То же	1,06	1	30	0,006	2,0	
12	ГОС-301	То же	”	1,03	0,8	300	0,006	2,0	
13	ГОР-100М	”	Рубин	0,694	1	100	0,05	2,0	
14	ГОР-300	”	То же	0,694	0,5	300	0,003	2,0	
15	Арзни-206	”	”	0,694	0,5	2	2	2,0	

16	ГОС-1001	”	Стекло	1,06	1	1000	0,003	2,0	
----	----------	---	--------	------	---	------	-------	-----	--

Остальные исходные данные по заданию преподавателя.



## Библиографический список

1. Рахманов Б.Н., Чистов Е.Д. Безопасность при эксплуатации лазерных установок.- М.: Машиностроение, 1981. - 112 с.
2. Метрологическое обеспечение безопасности труда: Справ. В 2 т./ Под ред. И.Х.Сологына. Т.1. Измеряемые параметры физических опасных и вредных производственных факторов.- М.: Изд-во стандартов, 1988. - 240 с.
3. Реакция организма человека на воздействие опасных и вредных производственных факторов: Справ. В 2 т./ Под ред. Б.В.Бирюкова .Т. 2. Оценка реакций организма на воздействие опасных и вредных производственных факторов . М.: Изд-во стандартов ,1991. - 366 с.
4. ГОСТ 12.1.040-83 ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 8 с.
5. ГОСТ 12.1.031-81 ССБТ. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения.-М.: Изд-во стандартов,1981. - 24 с.

## БЕЗОПАСНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЛАЗЕРНО-ОПАСНЫХ ЗОН

Методические указания к практическим занятиям

Составитель

БАЛАНДИНА Елена Алексеевна

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой, доцент В.Т. Кондратьев

Редактор А.П.Володина

Корректор В.В.Гурова

Изд. лиц № 020275 от 13.11.96 . Подписано в печать

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники.

Гарнитура Таймс.Печать офсетная.

Усл.печ.л. 2,0

Уч.-изд.л. Тираж 125 экз.

Зак.

Владимирский государственный университет.

Подразделение оперативной полиграфии

Владимирского государственного университета.

Адрес университета и подразделения оперативной полиграфии:

600026 Владимир, ул.Горького, 87.

