

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ

Каиштанов С. Ф., к.т.н., доц., Демчук Г. В., к.т.н., доц. (каф. ОППЦБ КПІ ім. Ігоря Сікорського);

Татарин Р. В., Ситницький А. Р., студ. (гр. РА-91 ТЕФ КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Анотація. Проаналізовано існуючі види та особливості впливу лазерного випромінювання (ЛВ) на організм людини в діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм для кращого, більш чіткішого розуміння причин, за якими згідно із стандартом EN 60825-1 рекомендовано використання тих чи інших заходів з безпеки при експлуатації лазерних виробів.

Ступінь негативної дії потенційно шкідливого та небезпечного для організму людини ЛВ розглянуто з урахуванням фізичних параметрів джерел випромінювання (довжина хвилі, енергетична освітленість і енергетична експозиція, тривалість експозиції, розмір зображення пучка ЛВ).

Також надано рекомендації щодо забезпечення необхідних нормованих значень параметрів джерел ЛВ для дотримання вимог безпеки при їх експлуатації.

Ключові слова: лазер, безпека, біологічні об'єкти.

Abstract. The existing types and features of the effect of laser radiation on the human body in the wavelength range from 180 nm to 1 mm have been analyzed for a better, clearer understanding of the reasons for which, according to the EN 60825-1 standard, the use of certain safety measures during operation is recommended laser products.

The degree of negative effects of potentially harmful and dangerous laser radiation for the human body is considered taking into account the physical parameters of laser sources (wavelength, energy illumination and energy exposure, duration of exposure, image size of the laser beam).

Recommendations are also provided to ensure the necessary standardized values of parameters of laser radiation sources in order to comply with safety requirements during their operation.

Keywords: laser, safety, biological objects.

Вступ. З урахуванням положень стандарту EN 60825-1 [1] та розробленого на його основі стандарту ДСТУ EN 60825-1:2019 [2] у даній роботі виконано аналіз особливостей впливу лазерного випромінювання (ЛВ) на організм людини та інші біологічні системи в діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм, що повинно дати можливість більш чіткішого та глибокого розуміння причин, за якими у відповідності із стандартом EN 60825-1 рекомендовано використання тих чи інших заходів з безпеки при експлуатації лазерних виробів. Ступінь та характер негативної дії можливих потенційно шкідливих та небезпечних впливів ЛВ на організм людини розглянуто з урахуванням фізичних параметрів джерел ЛВ (довжина хвилі, енергетична освітленість і енергетична експозиція, тривалість експозиції, розмір зображення пучка ЛВ). Також надано рекомендації щодо забезпечення необхідних нормованих значень параметрів джерел лазерного випромінювання для дотримання вимог безпеки при їх експлуатації.

Аналіз стану питання. Лазер (laser) – це будь-який прилад, який, в більшості випадків, може створювати або підсилювати електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм головним чином, завдяки процесу керованої вимушеної емісії.



Лазерна апаратура може складатися з окремого лазера з джерелом живлення або без нього чи з одного або декількох лазерів в складній оптичній, електричній або механічній системі.

Сфера застосування лазерних технологій досить широка. Наприклад, лазерні системи можуть використовуватися для дослідження фізичних і оптичних явищ, обробки матеріалів, їх широко використовують в промисловості, бізнесі, розважальній індустрії, освіті, медицині, при проведенні наукових досліджень тощо. Також лазерну апаратуру використовують і в сфері ІТ-технологій для зчитування і запам'ятовування даних, передачі і відтворення інформації, створення голографічних відео зображень. В останній час інтенсивно застосовується і так звана демонстраційна лазерна апаратура (demonstration laser product) – це лазерна апаратура, що призначена та використовується для демонстрації різноманітних оптичних явищ, розваги, рекламування, створення художніх композицій тощо. Також до джерел ЛВ можна умовно віднести і напівпровідникові світло-випромінюючі діоди (СВД), які теж дуже активно використовуються людством у самих різноманітних сферах своєї діяльності.

Безумовно, що вплив лазерних технологій на оточуюче середовище, включаючи і людину, вже зараз досить значний і з часом він буде лише зростати, якщо не дотримуватися необхідних вимог з безпеки при їх застосуванні та відповідного нормування параметрів джерел лазерного випромінювання (ЛВ). В діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм, в якому працює більшість джерел ЛВ, ці параметри повинні встановлюватися у відповідності до вимог EN 60825-1.

Стандарт EN 60825-1 передбачає:

- запровадження системи класифікації лазерів та лазерних виробів, що працюють у діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм відповідно до ступеня небезпеки ЛВ з метою надання допомоги користувачам в оцінці небезпек та у визначенні необхідних заходів щодо контролю та захисту від них;
- встановлення відповідних вимог до виробника щодо надання необхідної інформації з безпеки експлуатації лазерних виробів та запобіжних заходів;
- забезпечення належної застороги для осіб, які стикаються з небезпеками, що пов'язані із можливим опроміненням від лазерних виробів за допомогою відповідних ярликів та інструкцій;
- зменшення ризиків травмування за допомогою зведення до мінімуму зайвого доступного опромінення та забезпечення посиленого контролю за небезпеками джерел лазерного випромінювання та запровадження необхідних з точки зору безпеки елементів захисту.

Безумовно, що все це може бути реалізовано в повній мірі лише за умови максимально повного розуміння як виробником, так і користувачами причин, за якими у відповідності із стандартом EN 60825-1 рекомендовано використання тих

чи інших заходів з безпеки при експлуатації лазерних виробів для зменшення негативної дії ЛВ на організм людини.

Мета роботи: проаналізувати існуючі види та особливості впливу лазерного випромінювання (ЛВ) на організм людини в діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм для кращого, більш чіткішого розуміння причин, за якими, згідно із стандартом EN 60825-1 рекомендовано використання тих чи інших заходів з безпеки при експлуатації лазерних виробів. з урахуванням фізичних параметрів джерел ЛВ.

Методики, матеріали і результати досліджень. Негативний вплив ЛВ на біологічні системи, зокрема, людину, може представляти тепловий вплив, термоакустичні перехідні процеси, фотохімічні процеси і нелінійні ефекти. Ступінь участі кожного з цих впливів щодо пошкодження біологічної тканини може бути пов'язана з певними фізичними параметрами самого джерела опромінення, найбільш важливими з яких є довжина хвилі, енергетична освітленість і енергетична експозиція, тривалість експозиції, розмір зображення пучка ЛВ.

При енергетичних експозиціях вище рівня максимально допустимої енергетичної експозиції (МДЕ), домінуючий вплив кожного з перелічених вище ефектів пов'язаний з тривалістю енергетичної експозиції. Так в залежності від її тривалості основними ефектами стають:

- термоакустичні перехідні процеси і нелінійні ефекти (при наносекундних і субнаносекундних опромінюваннях);
- теплові ефекти (при тривалості опромінювання від 1 мс до декількох секунд);
- фотохімічні ефекти (при тривалості опромінювання понад 10 с).

ЛВ відрізняється від більшості інших відомих видів випромінювання наявністю колімірованого пучка. Цей фактор разом з високою початковою енергією ЛВ призводить до передачі біологічним тканинам величезної кількості енергії. Основним моментом при їх пошкодженні є поглинання ЛВ будь-якого типу біологічної структурою, яке відбувається на атомарному або молекулярному рівні і залежить від довжини хвилі ЛВ.

Теплові ефекти. Якщо біологічна структура поглинула достатню кількість енергії ЛВ, то коливання складових її молекул збільшуються, а це означає збільшення кількості тепла. Пошкодження від ЛВ в більшості випадків пов'язані з нагріванням біологічної тканини під дією ЛВ. Зазвичай таке термічне пошкодження має обмежену площу, що визначається ділянкою поглинання лазерної енергії з центром в місці падіння пучка ЛВ. Клітини в межах цієї області мають ознаки опіку, при цьому пошкодження тканини пов'язано, головним чином, з руйнуванням протеїну.

Дія вторинних механізмів пошкодження тканини під впливом ЛВ пов'язана з часом існуючої реакції тканини на нагрівання, а також з тривалістю енергетичної експозиції ЛВ. Термохімічні реакції відбуваються і під час нагрівання, і під час охолодження і саме ці реакції визначають залежність розміру плями від теплового ураження. Якщо на тканину спрямований лазер з безперервним випромінюванням, або лазер з імпульсами, які мають значну тривалість у часі, то за рахунок існуючого ефекту теплопровідності, площа біологічної структури, що відчуває

вплив підвищеної температури, буде поступово збільшуватися, а тепловий фронт розширюватися і створювати все більш зростаючу зону пошкодження, так як все більше число клітин буде нагріватися вище допустимої теплової межі. Для даного типу теплового пошкодження, розмір зображення пучка ЛВ також має велике значення, оскільки ступінь периферійного поширення ушкодження внаслідок теплопровідності є функцією розміру, а також температури початкової області нагріву тканини.

На рис. 1 наведено схему пошкодження ЛВ біологічних структур у разі дії теплового або вибухового ефекту.

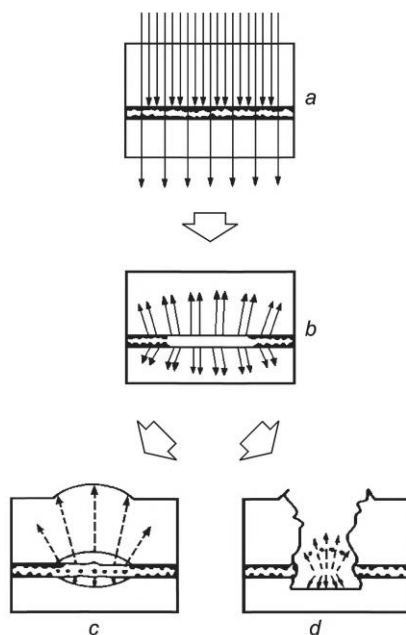


Рис. 1. Схема пошкодження ЛВ біологічних структур, де:

a – енергія ЛВ поглинається біологічною структурою; b – поглинена енергія створює тепло, яке розповсюджується у навколишні тканини; c – при впливі лазерів з безперервним випромінюванням або імпульсних лазерів із значною протяжністю імпульсу у часі тепловий фронт поступово розширюється і створює все більш зростаючу зону пошкодження; d – при впливі імпульсних лазерів із короткими імпульсами висока щільність потужності призводить до вибухового ефекту руйнування клітин і, як результат, до серйозного травмування навіть тих тканин, які віддалені від поглинаючих шарів.

Фотохімічні ефекти. З іншого боку, ступінь пошкоджень може бути обумовлена також і взаємодією ЛВ певних довжин хвиль та енергії з речовинами, що входять до складу біологічної тканини, коли енергія фотонів «поглинається» цими речовинами і передається електронам. При цьому, крім звільнення енергії, біологічна тканина також піддається впливу хімічної реакції, що супроводжує даний процес.

В результаті деякі тканини, такі як шкіра, кришталік ока і особливо його сітківка, можуть отримати незворотні зміни, викликані тривалим впливом ЛВ коротких довжин хвиль, наприклад, ультрафіолетового діапазону.

Як правило, фотохімічні зміни можуть призвести до пошкодження існуючої структури тканини, якщо тривалість опромінення досить значна або якщо

короткочасні опромінення повторюються протягом тривалого часу. При цьому залежності розміру плями від впливу ЛВ, як це має місце у випадках з тепловими ефектами при тепловій дифузії, не існує. Слід також знати, що фотохімічна реакція здатна нанести ушкодження і при низьких рівнях впливу ЛВ, а ушкодження, викликані лазерним опромінюванням, можуть носити патологічний та незворотній характер.

Нелінійні ефекти. Лазери з дуже короткими імпульсами, які характеризуються високою піковою потужністю (наприклад, з модульованою добротністю або із синхронізацією мод), можуть викликати пошкодження тканини при різних комбінаціях механізмів передачі енергії.

Енергія ЛВ впливає на біологічну мішень протягом дуже короткого часу, і тому створюється дуже значний рівень енергетичної експозиції. Тканини біологічної мішені нагріваються так швидко, що рідинні компоненти клітин перетворюються у газову фазу. У більшості випадків ці фазові зміни відбуваються так швидко і мають такий вибуховий характер, що клітини просто розриваються. Як правило, діючі перепади тиску утворюють навколо опікового центру біологічної тканини зону розриву округлої форми. Подібні перепади тиску, що виникають в результаті теплового розширення, можуть призводити до серйозного травмування навіть тих тканин, які віддалені від поглинаючих шарів, в результаті дії об'ємного фізичного зсуву.

Нелінійні оптичні ефекти, що можуть призводити до пошкодження органів зору людини, мають місце у разі опромінення імпульсним лазером із субнаносекундною тривалістю імпульсів, це приблизно від 10 пс до 1 нс. Виникають ці ефекти внаслідок дії механізму самофокусування очей, який призводить до додаткової концентрації енергії колімірованого пучка лазера. Також існують і інші нелінійні механізми, які відіграють негативну роль щодо пошкодження органів зору імпульсним ЛВ в субнаносекундному діапазоні.

Дані механізми, в першу чергу, негативно впливають на сітківку ока, а також змінюють значення рівнів безпечної енергетичної експозиції, приведені у стандарті EN 60825-1.

Цей орган людини спеціально пристосований для прийому і перетворення оптичного випромінювання. Можливі патологічні зміни, що викликаються надмірним світловим опроміненням, наведені в таблиці 1. Лазери, що випромінюють в ультрафіолетовому та інфрачервоному діапазоні С, становлять небезпеку для рогової оболонки ока, а лазерні системи, що випромінюють у видимому і інфрачервоному діапазоні А, можуть дуже негативно впливати на сітківку ока.

Для довжин хвиль менше 400 нм або понад 1400 нм найбільшою небезпекою є пошкодження лінзи або рогової оболонки. Залежно від довжини хвилі оптичне випромінювання поглинається переважно або виключно роговою оболонкою або лінзою.

Небезпека пошкодження ока. Опис анатомії ока приведено на рис. 2.

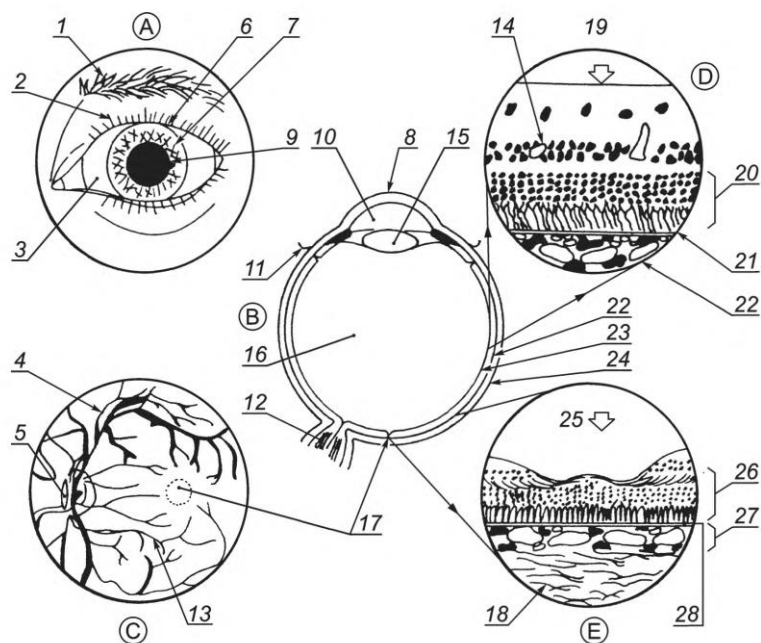


Рис. 2. Анатомія ока, де:

1 – брова; 2 – вія; 3, 18, 24 – склера; 4 – вена сітківки; 5 – оптичний диск; 6 – віко; 7 – райдужна оболонка; 8 – рогова оболонка (склоподібна передня поверхня ока); 9 – зіниця; 10 – водянисте тіло; 11 – кон'юнктива; 12 – вихід оптичного нерву; 13 – артерія сітківки; 14 – кровоносні судини; 15 – кришталик; 16 – склоподібне тіло; 17 – фовеа; 19, 25 – світло; 20, 26 – рецепторні клітини (палички і колбочки); 21, 28 – епітелій пігменту; 22, 27 – судинна оболонка.

Лазери видимого та ближнього інфрачервоного діапазону А особливо небезпечні для ока, оскільки очі, в силу своїх властивостей, є ефективними перетворювачами світла, в результаті чого тканини ока з сильною пігментацією, в першу чергу це сітківка ока, піддаються енергетичній експозиції високого рівня.

Таблиця 1.

Патологічні зміни, що пов'язані з надмірним опроміненням ока людини світлом

Спектральний діапазон *МКО	Око	Шкіра	
Ультрафіолетовий С (180 — 280 нм)	Фотокератит	Еритема (сонячний опік)	Опік шкіри
Ультрафіолетовий В (280 — 315 нм)		Процеси прискороного старіння шкіри	
Ультрафіолетовий А (315 — 400 нм)	Фотохімічна катаракта	Потемніння шкіри Фоточутлива реакція	
Видимий (400 — 780 нм)	Фотохімічне та теплове пошкодження сітківки		
Інфрачервоний А (730 — 1400 нм)	Катаракта, опік сітківки		
Інфрачервоний В (1.4 — 3.0 мкм)	Набряк, катаракта, опік рогової оболонки		
Інфрачервоний С (3.0 мкм — 1 мм)	Тільки опік рогової оболонки		

**Примітка: Спектральні діапазони, що визначені міжнародною комісією по освітленню (МКО), використовуються для опису біологічних змін і вони можуть не співпадати з спектральними діапазонами, приведеними у стандарті ІЕС 60825-1 для МДЕ.*

Так, наприклад, зростання опромінення від рогової оболонки сітківки до внутрішніх частин ока приблизно пропорційно відношенню площі зіниці до площі зображення на сітківці. Це зростання обумовлене тим, що світло, що пройшло через зіницю, фокусується у відповідну «точку» - зображення на сітківці. Зіниця має змінну апертуру і при максимальному розширенні її діаметр може досягати 7 мм. Зображення на сітківці, що відповідає такій зіниці, може мати діаметр від 10 до 20 мкм. Таким чином, зростання опромінення від рогової оболонки до сітківки становить від $2 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$. Якщо припустити, що це зростання дорівнює $5 \cdot 10^5$, то у цьому випадку пучок ЛВ, що створює на роговій оболонці енергетичну освітленість 50 Вт/м^2 , на сітківці ока буде створювати вже енергетичну освітленість $1 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$.

У випадку фокусування інтенсивного лазерного пучка на сітківці ока, лише невелика частина світла (до 5%) буде поглинатися пігментами в паличках та колбочках. Більша частина світла буде поглинатися безпосередньо пігментом (меланіном), що міститься в епітелії, при цьому ця поглинена енергія буде викликати місцевий нагрів, а це може призвести до опіку або пошкодження як епітелію пігменту, так і сусідніх з ним чутливих до світла паличок та колбочок, що може призвести навіть до втрати зору.

Залежно від величини енергетичної експозиції така втрата зору може мати як тимчасовий, так і постійний, незворотній характер [3] (на рис. 3, як приклад, представлені наслідки незворотного ушкодження ока променем лазера Nd: YAG /1064 нм/). Погіршення зору зазвичай помічається самим потерпілим тільки в тому випадку, коли пошкоджена центральна або найбільш чутлива частина сітківки, яка відповідає за гостроту зору. Якщо вона пошкоджена, то погіршення зору може спочатку виявлятися у вигляді появи розмитого білої плями, яка затіняє центральну область зору. Через два тижня або більший проміжок часу вона може перетворитися в чорну пляму.

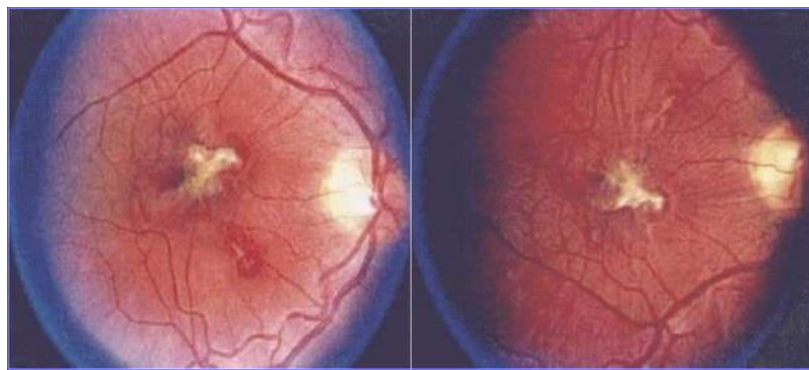


Рис. 3. Наслідки незворотного ушкодження ока променем лазера Nd: YAG (1064 нм)

Як це не дивно, але потерпілий навіть може не відчувати цю пляму і бачити нормально. Однак цю пляму можна відразу виявити, якщо дивитися на екран з листа білого паперу.

Пошкодження на периферійних ділянках можливо суб'єктивно виявити тільки при великих пошкодженнях сітківки. Невеликі периферійні ушкодження можуть

залишатися непоміченими і не виявлятися навіть при систематичних обстеженнях окулістами.

Найбільша небезпека пошкодження сітківки ока має місце при опроміненні ЛВ в діапазоні довжин хвиль від 400 до 1400 нм. У цьому діапазоні рогова оболонка, водянисте тіло, кришталік ока і склоподібне тіло мають максимальну проникливість для ЛВ на цих довжинах хвиль. Крім того, необхідно пам'ятати, що у разі добре колімірованого пучка ЛВ небезпека фактично не залежить від відстані між джерелом випромінювання і оком.

Небезпека пошкодження шкіри. Шкіра людини може витримувати набагато сильніший вплив лазерної енергії, ніж очі. Біологічний вплив на шкіру опромінення лазерів, які працюють у видимому (від 400 до 700 нм) або інфрачервоному (від 700 нм і вище) спектральному діапазоні, може призводити як до легкої еритеми, так і до опіку 2-го ступеня. У тканинах шкіри з високим поверхневим поглинанням, після опромінення випромінюванням лазерів з дуже короткими і потужними імпульсами, здебільшого відбувається обвуглювання без проміжної еритеми. Як правило, пігментація, поява виразок та шрамів на шкірі і пошкодження розташованих під шкірою органів можуть відбуватися лише при надзвичайно високому рівні енергетичної експозиції ЛВ. Що стосується прихованого або кумулятивного впливу ЛВ на шкіру, то ці фактори не є домінуючими. В той же час, за певних умов невеликі ділянки шкіри можуть придбати підвищену чутливість у разі періодичного повторювання місцевого опромінення, в результаті чого граничний рівень опромінення для мінімальних реакцій змінюється, а сама реакція тканин шкіри на низькі рівні опромінення стає більш сильнішою.

Висновки. Проведений аналіз існуючих видів та особливостей впливу лазерного випромінювання (ЛВ) на організм людини в діапазоні довжин хвиль від 180 нм до 1 мм, який виконано з урахуванням фізичних параметрів джерел випромінювання (довжина хвилі, енергетична освітленість і енергетична експозиція, тривалість експозиції, розмір зображення пучка ЛВ), дозволяє краще і більш чіткіше зрозуміти причини, за якими згідно із стандартом EN 60825-1 рекомендовано використання тих чи інших заходів з безпеки при експлуатації лазерних виробів. Все це, а також надані рекомендації щодо забезпечення необхідних нормованих значень параметрів джерел ЛВ для дотримання вимог безпеки при їх експлуатації, повинно сприяти підвищенню рівня безпеки при застосуванні апаратури із використанням лазерних технологій та зменшенню існуючих ризиків негативного впливу ЛВ на організм людини.

Література

10. EN 60825-1:2014 «Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements» (IEC 60825-1:2014, IDT).
11. ДСТУ EN 60825-1:2019 (EN 60825-1:2014, IDT; IEC 60825-1:2014, IDT) «Безпечність лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги».
12. <https://kfz-stahlrad.com.ua/zaxodi-bezpeki-pri-roboti-z-lazerami/>.