

**СЕКЦІЯ 1: ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ФІЗИЧНІ СИСТЕМИ В БІОЛОГІЇ,
МЕДИЦИНІ ТА ТЕХНІЦІ**

ОСОБЛИВОСТІ ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРАПІЇ НА ПУЧКАХ ФОТОНІВ І ЕЛЕКТРОНІВ

Тимофєєв Володимир Іванович

доктор т.н., професор
Національний Технічний Університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

Дудзінський Юрій Михайлович

доктор ф-м.н., професор

Візіряко Марина Андріївна

студент

Одеський національний політехнічний університет
м. Одеса, Україна

Анотація: Доповідь присвячена роботі променевої терапії. Розглянуто фізику терапії пухлин електронами і розкладання пучків фотонів і електронів. Описано механізми фотоядерних реакцій.

Ключові слова: пучки фотонів, комптон-ефект, імпульс, енергія частинок, електрон.

Сфокусовані пучки фотонів і електронів отримують на прискорювачах елементарних частинок, а також можуть використовуватися природні радіоактивні джерела зовнішнього γ -випромінювання – ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{60}Co . При гальмуванні електронів після прискорювачів на мішені з важких елементів (платина, золото, свинець, вольфрам) випромінюються пучки фотонів значної енергії. При цьому виникає гальмівний спектр, форма якого представлена на рис. 1а, а кутовий розподіл гальмівних фотонів – на рис. 1б.

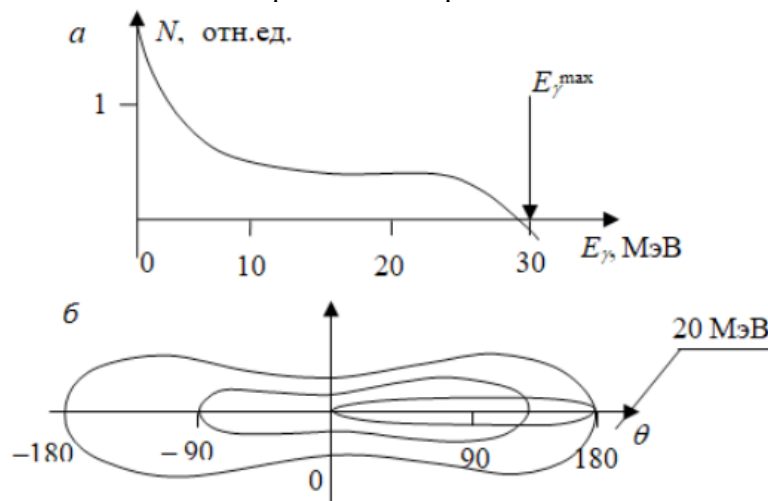


Рис.1. Енергетичний спектр гальмівного випромінювання (а) і його кутовий розподіл (б)

Пружне розсіяння змінює лише напрямок його руху, не змінюючи енергії. Перетин цього процесу постійний і описується співвідношенням:

$$\sigma_{\text{ког}} = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 0.66 \cdot 10^{22} \text{ см}^2, \quad (1)$$

Фотоефект призводить до зникнення фотона і появи замість нього вторинного електрона, що володіє основною частиною енергії фотона, оскільки йону атому в результаті віддачі передається лише невелика частина його енергії. При Комптон-ефекті тільки частина енергії первинного фотона передається вторинному електрону, а інша частина залишається у нього. Для біологічних тканин Комптон-ефект стає домінуючим при енергії фотонів $E_\gamma \geq 10 \text{ кеВ}$.

Механізм народження електрон-позитронних пар призводить, як і фотоефект, до зникнення первинного фотона і появи пари електрон-позитрон. При досить великій енергії фотонів ($h\nu \geq 2m_e c^2$) стає можливим процес утворення пари, при якому в полі ядра фотон поглинається, і народжуються електрон і позитрон. Розрахунок по КЕД і досвід свідчать про те, що цей процес відбувається не всередині ядра, а біля нього, в області, що має розмір комптонівської довжини хвилі $\lambda_0 = 2.4 \cdot 10^{-10} \text{ см}$. Оскільки при такій взаємодії фотона з полем ядра народжуються електрон і позитрон, то цей процес має енергетичний поріг, т. е. він відбувається, якщо $h\nu \geq 2m_e c^2$. Електрон і позитрон втрачають енергію в результаті радіаційного гальмування і іонізаційних втрат. Крім того позитрон, зустрічаючи на своєму шляху електрон, анігілює, утворюючи два фотони з енергією $E_\gamma = 0.51 \text{ МеВ}$. Анігіляція – це процес, в якому частка і її античастинка перетворюються в електромагнітне випромінювання (фотони) або інші елементарні частинки (лептони, кварки). Це процес, зворотний народженню пар γ -квантами. І той і інший процеси – це просто взаємоперетворення [1].

Як же відбувається анігіляція позитронів? Потрапивши в речовину, швидкі позитрони поведуться так само, як і електрони, т.е. При $T_i \geq \varepsilon$ вони відчувають радіаційне гальмування, а при $T_i \geq \varepsilon$ – іонізаційні втрати і, як правило, майже повністю втрачають свою швидкість. Надалі починається їх дифузія в речовині до зустрічі з вільними або зв'язаними в атомах електронами і подальша анігіляція позитронів. Перед анігіляцією обидві частки (електрон і позитрон) найчастіше знаходяться в стані, коли їх моменти кількості руху дорівнюють нулю (S -стан). Подальша їх доля залежить від взаємної орієнтації внутрішніх моментів кількості руху (спинив) і від того, чи вільний електрон або знаходиться в зв'язаному стані.

При зустрічі електрона і позитрона їх повна енергія, включаючи енергію спокою, майже цілком переходить в енергію електромагнітного випромінювання (процес, зворотний народженню пар) і частково передається якомусь третьому тілу, наприклад, ядра. Якщо анігіляція позитронів відбувається на електроні, що входять до складу атома, то можлива анігіляція з утворенням одного фотона, тому що імпульс утворення фотона буде компенсуватися віддачею атома або ядра, і закон збереження імпульсів буде виконуватися. Але, на відміну від процесу народження пар, анігіляція позитронів можлива і на вільних електронах, але при утворенні двох і більше квантів для виконання законів збереження енергії, імпульсу і спина. Якщо позитрон до моменту анігіляції зупинився, то фотони розлітаються в строго протилежних напрямках [2].

Якщо він рухається з деякою швидкістю, то фотони летять вперед під деяким кутом один до одного. Цей процес називають анігіляцією позитронів на льоту. Його перетин, а отже, і ймовірність, нижче, ніж для позитронів в стані спокою. Механізм народження електрон-позитронного пар в біологічних тканинах домінує при енергії фотонів $E_\gamma = 10 \text{ МеВ}$.

Вище енергії 10 МеВ помітний внесок дають процеси взаємодії фотонів безпосередньо з ядром тобто. починають відбуватися фотоядерні реакції. Ядерний фотоефект - поглинання γ -кванта ядром і випускання при цьому нуклона, т.е. (G, n) - реакція. Поріг ядерного фотоефекту – $(6 \dots 10) \text{ МеВ}$. Близько енергії зв'язку нуклонів в ядрах. Перетин ядерного фотоефекту $\sigma \approx Z$ і по величині значно менше перетинів фотоефекту, Комптон-ефекту і

утворення пар. У речовині фотони проходить значні відстані. При цьому їх інтенсивність зменшується за експоненціальним законом: $I = I_{0e} - \mu x$, де μ – лінійний коефіцієнт ослаблення, I_0 – інтенсивність випромінювання при $x = 0$ на поверхні середовища [3].

Фізика терапії електронами. Коротко розглянемо механізм дії електронів на біологічні тканини. Можна виділити наступні фізичні механізми втрати енергії електронами в речовині:

- іонізаційні втрати енергії (іонізаційні гальмування);
- радіаційні втрати енергії (радіаційне гальмування - це випускання фотонів при кулоновском взаємодії електронів з атомними електронами і ядрами або магнітним полем), які включають в себе гальмівне, синхротронное, черенковское і перехідне випромінювання фотонів;
- електроядерні реакції при взаємодії електронів з ядрами.

Проходження електронів через біологічну тканину має свої особливості. Вони володіють невеликою масою і тому сильно розсіюються, збільшуючи обсяг опромінюваної тканини. З цієї ж причини, електрони, рухаються по криволінійній траєкторії, т.е. прискорено. Тому вони, втрачаючи енергію, випромінюють фотони. Таке випромінювання називають радіаційним. Для електронів характерна конкуренція іонізаційних і радіаційних втрат енергії. Основний механізм радіаційних втрат енергії - гальмівне випромінювання. Рух електрона в біологічній тканині виглядає так. Вільний електрон проходить в тканинах певну відстань, здійснюючи уздовж свого треку акти іонізації: $A \rightarrow A^+ + e$. Таким чином відбувається передача енергії випромінювання біологічних середовищ. Крім того, частина енергії витрачається на збудження атомів: $A \rightarrow A^*$. Інша частина енергії випромінюється радіаційним чином.

Розтративши запас кінетичної енергії на іонізацію і збудження, вільний електрон уповільнює рух до швидкості, порівнянної зі швидкістю орбітальних електронів, а потім захоплюється нейтральним атомом з утворенням негативного іона: $e + A \rightarrow A^-$. В результаті першого і третього з перерахованих процесів енергія іонізуючої частинки витрачається на освіту пари іонів (позитивно і негативно заряджених іонів ($A + iA^-$)). На один іонізований атом припадає кілька збуджених атомів. Тому одна пара іонів утворюється при поглинанні близько енергії порядку $34eV$ – величини, значно більшою потенціалу іонізації. Частина цієї енергії витрачається на збудження інших атомів. Наприклад, на іонізацію атомів H, N, O, C, S, P витрачається в середньому $(10..15)eV$. Пробег електронів в речовині, на відміну від фотонів, має кінцеву величину. Максимальної величини пробігу досягає лише невелика частина електронів. На рис. 2 представлена залежність числа електронів від глибини їх проникнення [4].

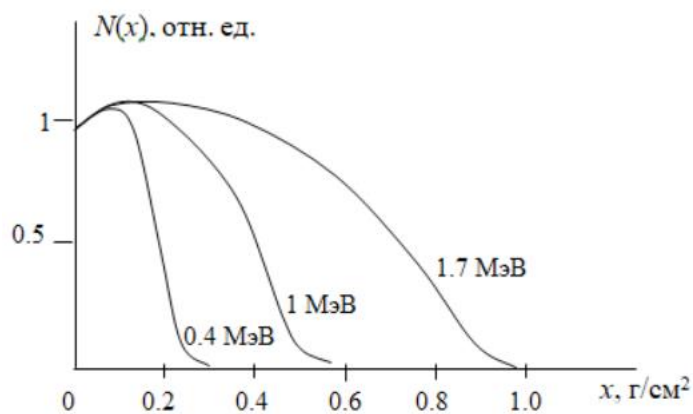


Рис.2. Розподіл повного числа електронів $N(x)$ в залежності від товщини шару речовини

Кількість електронів, що досягають шару речовини на глибині χ , залежить від багатьох чинників. На довжину пробігу електронів в середовищі впливає в першу чергу сильне відхилення електронів від початкового напрямку в поле атома внаслідок їх малої маси, причому частина електронів розсіюється назад.

По-друге, в результаті взаємодії з атомами середовища виникає потік вторинних електронів. З цієї причини в розподілі числа електронів, в залежності від глибини їх проникнення в речовину, спостерігається максимум на глибині від декількох міліметрів до сантиметрів. Фізична причина його виникнення – внесок вторинних електронів, які виникають в основному на поверхні речовини. Усередині речовини вторинних електронів виникає менше, так як потік первинних електронів зменшується.

По-третє, в середовищі виникають електронно-фотонні зливи, які призводять до виникнення додаткового потоку вторинних фотонів і електронів. Тому на деякій відстані від поверхні середовища виникає максимум кількості електронів в залежності від глибини як результат складання потоків первинних і вторинних електронів. і, як наслідок цього, в глибинному розподілі дози утворюється максимум. Глибина розташування максимуму залежить від енергії первинного пучка електронів.

Чим вище їх енергія, тим більше енергія вторинних електронів і, відповідно, їх середній пробіг. Флуктуації довжини пробігу визначаються розкидом пробігу частинок або стрегглінгом.

Максимальним пробігом частинок називається товщина шару речовини R , в якому затримуються всі частинки пучка [5]. Середнім пробігом частинок називається шар речовини R_{cp} , який проходять частинки в середньому:

$$R_{cp} = \frac{\sum N_i x_i}{\sum N_i} = \frac{\int x(N)dx}{\int (N)dx}, \quad (2)$$

де N_i – число частинок, що пройшли шар x_i . Для важких заряджених частинок залежність числа частинок в пучку від пробігу в речовині зображена на рис. 3а.

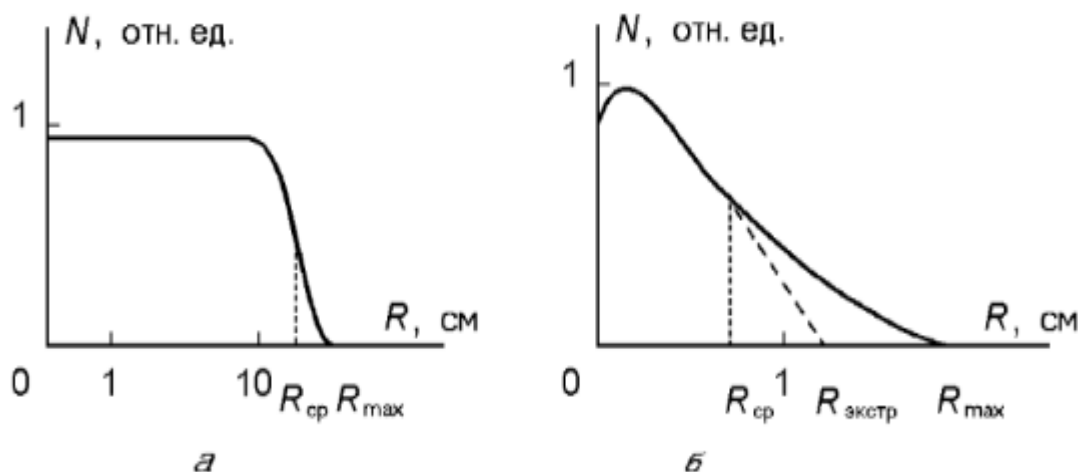


Рис. 3. Залежність числа частинок від глибини проникнення в речовину пучка
а) протонів і іонів; б) електронів

Для легких заряджених частинок вводяться поняття як середовищнього, так і максимального пробігу. Для електронів часто використовується поняття екстраполювати (практичного) пробігу (рис. 3б). Тобто такий шар речовини $R_{екстр}$, при якому продовження лінійно спадаючої ділянки залежності числа частини $N(R)$ перетинає вісь абсцис.

ДЖЕРЕЛА

1. Черняев А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А.П. Черняев. – М.: ФИЗМАТЛИТ.– 2004.– 152 с.
2. Khan Faiz M. Khan's The Physics of Radiation Therapy / Faiz M. Khan, John P. Gibbons // 5th Edition Wolters Kluwer Health. – 2014. – P. 624.
3. Купленников Э.Л. Пучки нейтронов для терапии / Э.Л. Купленников, А.Н. Довбня, Ю.Н. Телегин и др. // Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». – Харьков, 2011.– С. 36.
4. F.M. Wagner et al Neutron medical treatment of tumours – a survey of facilities / Wagner F.M. et al // JINST, 2012.– P. 1–16.
5. Cherry P. Practical Radiotherapy: Physics and Equipment / P. Cherry, A.M. Duxbury // Birmingham City University, 2nd Edition. – Wiley.– 2009.– P. 302.

ГІДРОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ КРОВООБІГУ

Азархов Олександр Юрійович

доктор мед. н., професор

ДВНЗ Приазовський державний технічний університет

м. Маріуполь, Україна

Дудзінський Юрій Михайлович

доктор ф-м.н., професор

Ісакова Ганна Володимирівна

студент

Одеський національний політехнічний університет

м. Одеса, Україна

Анотація: Доповідь присвячена основам кровообігу, які здійснюється завдяки тісній взаємодії серця і кровоносних судин. Було виявлене, що основне завдання останніх полягає в тому, щоб регулювати обсяг периферичного русла і його відповідність об'єму крові, а також сталість і адекватність кровопостачання органів і тканин.

Ключові слова: Кровообіг, кров, судини, клітини, рідина .

Розглянувши історію вивчення кровообігу, можна зробити висновок, що завдяки фізичним приладам і завдяки вивченню фізичних процесів, було зроблено безліч відкриттів в області кровообігу.

Переміщення крові по судинах діє за тим же законом, що і переміщення рідини в будь-яких системах трубок. В обох системах рушійною силою є тиск, що створюється на вході в систему, вірніше, різниця тисків на вході в систему і в місцях виходу. Основним завданням фізіології кровообігу є відділення прямих проявів загальних законів фізики від ефектів, опосередкованих фізіологічних регулювань. Виходячи з цього з традиційно фізіологічним підходом розробляється і біомеханічний, тісно пов'язаний з першим і спирається на методи механіки суцільних середовищ [1].

Швидкість руху рідини в системі трубок круглого перетину характеризується простою формулою Ома:

$$Q = \frac{\Delta P}{R}, \quad (1)$$

де: Q – це величина потоку, ΔP – градієнт (просторова різниця) тиску між будь-якими ділянками системи, R – опір трубок. Забезпечує адекватний обмін між кров'ю і тканинами один з найважливіших параметрів системи – швидкість потоку в судинах. Ця швидкість визначається за формулою: