

PACS: 29.25.Dz

THERMAL AND EPITHERMAL NEUTRON GENERATION FOR NUCLEAR MEDICINE USING ELECTRON LINEAR ACCELERATOR

V.I. Kasilov, S.P. Gokov, A.N. Dovbnya, S.A. Kalenik, **K.S. Kokhnyuk**, S.S. Kochetov,
A.A. Khomich, O.A. Shopen

NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology"

1, Akademicheskaya st., Kharkov, Ukraine, 61108

E-mail: kasilovvi@kipt.kharkov.ua

Received March 30, 2016, revised October 18, 2016

In this paper, to obtain streams of thermal and epithermal neutrons are used delayed neutrons emitted from the target with a fissile material. The target preliminarily activated with help of electron beam from linear accelerator with an energy of 20 MeV and a power of 9 Watts. At the same time to obtain a stream of thermal as well as epithermal neutron density $6 \cdot 10^{-5} \text{ n / (cm}^2 \text{ s)}$ The results of experiment are presented where half-decay curves have been measured of emitting delayed neutrons radioactive nuclei produced in the fission process. It has been shown that the activated target, which contains the fissile material, presents a compact small size source of delayed neutrons. It can be delivered to the formator where thermal and epithermal neutrons are formed during a certain time period with help of the moderator, absorber and collimator. Then this target is moved to the activator being replaced with another target. Thus, pulsed neutron flux is produced. The duration of neutron pulse corresponds to the presence time of the activated target in the formator, and time interval between pulses is determined by the delivery time of the target from the activator to the formator. Given that the yield of neutrons from the target is directly proportional to the power of the beam of accelerated electrons, shows that the beam power of 1.5 - 3 kW, the flux density of thermal and epithermal neutrons can reach the values of $(2-3) \cdot 10^9 \text{ n / (cm}^2 \text{ s)}$. Such a neutron beam can be used in nuclear medicine, in particular, in neutron capture therapy of oncologic diseases.

KEY WORDS: nuclear medicine, delayed neutrons, thermal neutrons, linear accelerator, moderator, neutron source

ГЕНЕРАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ТА ЕПІТЕПЛОВИХ НЕЙТРОНІВ НА ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ ЯДЕРНОЇ МЕДИЦИНИ

В.І. Касілов, С.П. Гоков, А.М. Довбня, С.А. Каленик, **К.С. Кохнюк**, С.С. Кочетов, О.О. Хомич, О.О. Шопен

ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут"

вул. Академічна 1, м. Харків, Україна, 61108

У даній роботі, для отримання потоків теплових і епітеплових нейтронів використовувались запізнені нейтрони, які вилітали з мішені, що містила подільний матеріал. Мішень попередньо активувалася пучком електронів лінійного прискорювача з енергією 20 МеВ і потужністю 9 Вт. При цьому був отриманий потік теплових і епітеплових нейтронів щільністю $6 \cdot 10^{-5} \text{ n / (cm}^2 \text{ s)}$ Наводяться результати експерименту, в якому виміряні криві напіврозпаду радіоактивних ядер, що утворилися в процесі поділу випускають запізнені нейтрони. Показано, що активована мішень, що містить подільний матеріал є компактним малогабаритним джерелом запізневих нейтронів. Вона може бути доставлена в формувач, де за допомогою сповільнювача, поглинача і коліматора відбувається формування нейтронів теплових або епітеплових енергій протягом певного проміжку часу, після чого ця мішень відправляється в активатор, а на її місце приходять інша мішень. Таким чином, утворюється імпульсний потік нейтронів. Тривалість імпульсу цього потоку відповідає часу знаходження активованої мішені в формувачу, а відстань між імпульсами визначається часом транспортування активованої мішені з активатора в формувач. З огляду на те, що вихід нейтронів з мішені прямо пропорційний потужності пучка прискорених електронів, показано, що при потужності пучка 1,5 - 3 кВт, щільність потоку теплових і епітеплових нейтронів може досягати значень $(2-3) \cdot 10^9 \text{ n / (cm}^2 \text{ s)}$. Такий пучок нейтронів може бути використаний в ядерній медицині, зокрема, в нейтронозахватній терапії при лікуванні онкологічних захворювань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ядерна медицина, запізнілі нейтрони, теплові нейтрони, лінійний прискорювач електронів, сповільнювач, джерело нейтронів

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ

В.И. Касилов, С.П. Гоков, А.Н. Довбня, С.А. Каленик, **К.С. Кохнюк**, С.С. Кочетов, А.А. Хомич, О.А. Шопен

ННЦ "Харьковский физико-технический институт"

ул. Академическая 1, г. Харьков, Украина, 61108

В данной работе, для получения потоков тепловых и эпитепловых нейтронов используются запаздывающие нейтроны, вылетающие из мишени, содержащей делящийся материал. Мишень предварительно активировалась пучком электронов линейного ускорителя с энергией 20 МэВ и мощностью 9 Вт. При этом получен поток тепловых и эпитепловых нейтронов плотностью $6 \cdot 10^{-5} \text{ n / (cm}^2 \text{ s)}$ Приводятся результаты эксперимента, в котором измерены кривые полураспада радиоактивных ядер, образовавшихся в процессе деления и испускающих запаздывающие нейтроны. Показано, что активированная мишень, содержащая делящийся материал является компактным малогабаритным источником запаздывающих нейтронов. Она может быть доставлена в формируватель, где с помощью замедлителя, поглотителя и коллиматора происходит формирование нейтронов тепловых или эпитепловых энергий в течение определенного промежутка времени, после чего данная мишень отправляется в активатор, а на ее место приходит другая мишень. Таким образом, образуется импульсный поток нейтронов. Длительность импульса которого соответствует времени нахождения активированной мишени в формирувателе,

а расстояние между импульсами определяется временем транспортировки активированной мишени из активатора в формирователь. Учитывая, что выход нейтронов из мишени прямо пропорционален мощности пучка ускоренных электронов, показано что при мощности пучка 1,5 – 3 кВт, плотность потока тепловых и эпитепловых нейтронов может достигать значений (2-3) 10^9 н/(см²·с). Такой пучок нейтронов может быть использован в ядерной медицине, в частности, в нейтронозахватной терапии при лечении онкологических заболеваний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ядерная медицина, запаздывающие нейтроны, тепловые нейтроны, линейный ускоритель электронов, замедлитель, источник нейтронов

В последнее время, в ядерной медицине используются пучки нейтронов для нейтронозахватной терапии (НЗТ) [1], которая является одним из наиболее перспективных направлений в решении проблемы избирательного поражения злокачественных новообразований. Для этого необходимо иметь пучки тепловых или эпитепловых нейтронов с плотностью потока (2-3) 10^9 н/(см²·с), а также лекарственные соединения дающие возможность селективной доставки с их помощью в опухоль элементов с высоким сечением захвата тепловых или эпитепловых нейтронов, таких как ¹⁰B и ¹⁵⁷Gd. При взаимодействии тепловых и эпитепловых нейтронов с этими элементами возникает вторичное излучение. Именно это излучение поражает опухолевые клетки.

Идея использования нейтронов в НЗТ, основанная на фундаментальном различии между нормальными и раковыми клетками, была предложена еще в 1936 г. Лочером Д.Л. [2]. Известно, что раковые клетки имеют повышенную скорость роста и деления. Поэтому лекарственные соединения, представляющие собой клеточные «строительные блоки» поглощаются преимущественно раковыми клетками. Применение таких лекарственных соединений открывает возможность селективной доставки с их помощью в опухоль элементов с высоким сечением захвата тепловых или эпитепловых нейтронов, таких как ¹⁰B и ¹⁵⁷Gd.

Внедрение НЗТ для лечения злокачественных опухолей происходило по довольно сложному пути. В 1941г. было впервые показано, что определенное химическое соединение позволяет получить более высокую концентрацию ¹⁰B в клетке раковой опухоли по сравнению со здоровыми клетками. С 1952 по 1962 г. в Брукхейвенской национальной лаборатории и Массачусетском технологическом институте (США) курс лечения с помощью НЗТ на медицинском реакторе прошли 44 пациента [3]. Однако эксперименты не дали ожидаемых положительных результатов и были приостановлены. Причина, как выяснилось впоследствии, заключалась в низкой концентрации бора в раковых клетках.

Эксперименты по НЗТ онкологических заболеваний интенсивно начали проводиться в Японии с 1967 г. В основном для этого использовалась БНЗТ (бор нейтронозахватная терапия) на реакторе НТР (технологический институт Мусаши). Позже аналогичные исследования были продолжены на более современных реакторах KURRI (университет Киото) и JRR4 (агентство атомной энергии) [4-7].

С 1994г. на реакторах в Брукхейвене и Массачусетсе возобновились эксперименты по лечению пациентов с опухолями головного мозга.

В 1997 г. клинические испытания начались в Голландии, в 1999 г. - в Финляндии. К исследовательским работам по этой тематике подключились в Аргентине, Италии, Швеции и в других странах. При этом, практически, онкологические центры перешли к использованию в БНЗТ реакторов, способных производить тепловые и эпитепловые нейтроны. На сегодняшний день лучшей установкой считается реактор MITR (Массачусетс) [8]. Он генерирует на выходе канала М-011 плотность потока тепловых нейтронов ($5,9 \cdot 10^9$ н/(см² с.)), при дозе быстрых нейтронов и фотонов < 20 и (188 ± 10) мГр/мин соответственно.

В настоящее время в мире функционируют 14 исследовательских центров по НЗТ [9], которые используют чаще всего пучки нейтронов от реакторов. Реактор TAPIRO [10], номинальная мощность которого 5 кВт, с регулируемым размером пучка. В Китае планируют создавать реакторы мощностью на 300 кВт, с двумя терапевтическими пучками нейтронов – тепловых и промежуточных. В России разработан эскизный проект 10 кВт реакторной установки «Марс», предназначенной для лечения онкологических опухолей. Малые габариты и масса < 70 т позволяет устанавливать реактор на территории клиники.

В последнее время наблюдается возрастающий интерес к созданию малогабаритных, относительно недорогих ускорителей, способных непосредственно в онкологических центрах генерировать нейтроны для нейтронной и нейтронозахватной терапии. Среди наиболее перспективных проектов в [11] отмечается: продвижение проекта (Сан-Мартин, Аргентина); сооружение ускорителя в Линьяро (Италия); начало двух проектов в Японии (Осака, Университет Киото); запуск ускорителя в Новосибирске. В Обнинске (Россия) на каскадном ускорителе КГ-2.5 планируется генерация нейтронов с энергией 0,7 МэВ, что приемлемо для проведения НЗТ опухолей головного мозга. Введен в эксплуатацию циклотрон НМ-30 с плотностью потока эпитепловых нейтронов $1,2 \cdot 10^9$ н/(см² с.) (институт реакторных испытаний Киото, Япония). Это в два раза больше, чем на реакторе KURRI, на котором проведено 275 клинических испытаний.

К сожалению, в Украине до настоящего времени таких работ не проводилось в связи с отсутствием физических установок, генерирующих пучки нейтронов для НЗТ. В настоящее время в Харькове в ННЦ ХФТИ заканчивается сооружение нейтронного источника на подкритической сборке управляемой пучком линейного ускорителя электронов. На нем предусмотрено создание каналов тепловых и эпитепловых нейтронов для НЗТ на ряду с каналами для проведения экспериментов по физике [12].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В настоящее время в мире для НЗТ используются источники нейтронов на базе ядерных реакторов, обладающие плотностью потока в активной зоне 10^{14} - 10^{15} нейтронов / см^2 с. К сожалению, эти установки не могут быть использованы непосредственно в клиниках из-за их больших габаритов, а кроме того место проведения лучевой терапии на каналах тепловых или эпитепловых нейтронов не может быть расположено на расстоянии более 5м от активной зоны реактора. Известно, что угловое распределение нейтронов в активной зоне реактора изотропно, поэтому плотность потока нейтронов, выходящих из активной зоны, будет уменьшаться пропорционально квадрату расстояния и не будет достигать необходимых значений для НЗТ.

Опыт практической работы показал, что реакторная физическая установка должна иметь не только терапевтические пучки с различными спектральными и геометрическими характеристиками, но и пучки диагностические, исследовательские и аналитические [8]. Поэтому усилия специалистов направлены на снижение мощности, массы и габаритов источников нейтронов с возможностью их размещения непосредственно в онкологических центрах и получение с их помощью интенсивных потоков нейтронов широкого энергетического диапазона.

Один из способов решения этих проблем заключается, возможно, в использовании ускорителей заряженных частиц для генерации нейтронов, в том числе, и линейных ускорителей электронов с мощностью пучка до 20 кВт. На их основе возможно было бы создать компактный источник нейтронов. Такие ускорители электронов в Украине в настоящее время используются для фундаментальных и прикладных ядерных исследований в ННЦ ХФТИ в городе Харькове.

В настоящей работе, рассматривается возможность получения тепловых или эпитепловых нейтронов для нейтронозахватной терапии при использовании запаздывающих нейтронов, испускаемых из предварительно активированных электронным пучком мишеней из делящихся материалов. Предварительные результаты исследований в этом направлении представлены в [13].

Суть этого метода заключается в следующем. При взаимодействии пучка электронов с мишенью из делящегося материала, в нем генерируется излучение γ -квантов и нейтронов, вызывающее процесс деления тяжелых ядер. В результате деления ядер, образовавшиеся осколки испускают запаздывающие нейтроны. После активации мишень транспортируется в устройство формирователь, где запаздывающие нейтроны, испускаемые из нее, с помощью замедлителя замедляются до тепловых или эпитепловых энергий. С помощью отражателей, поглотителей и коллиматоров замедленные нейтроны формируются в пучок с параметрами необходимыми для использования при облучении объекта (раковой опухоли).

Цель работы – разработка нового метода генерации нейтронов и создание компактного, малогабаритного нейтронного источника на основе запаздывающих нейтронов.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Эксперимент проводился на ускорителе ЛУЭ-300 (ННЦ ХФТИ) на канале вывода пучка электронов с энергией до 30 МэВ. Схема эксперимента и экспериментального оборудования представлена на рис. 1.

Пучок электронов из линейного ускорителя с энергией 20 МэВ выводился на активатор, в котором находилась мишень из делящегося материала. Мишень размещалась в объеме, заполненном водой. Вода использовалась в качестве охлаждающей жидкости и замедлителя нейтронов. В данном эксперименте использовалась мишень ^{238}U с 2% обогащением ^{235}U . Мониторинг пучка электронов осуществлялся с помощью ламели, установленной за мишенью.

При бомбардировке мишени электронным пучком в ней генерируются γ -кванты и фотонейтроны, которые стимулируют реакцию деления ядер с образованием осколков.

Как известно, процесс деления начинается с образования составного ядра, которое через 10^{-14} с делится на два осколка. Часть энергии деления переходит в энергию возбуждения осколков деления, которые ведут себя как любые возбужденные ядра – либо переходят в основные состояния, излучая γ -кванты, либо испускают нуклоны и превращаются в новые ядра, которые могут оказаться в возбужденном состоянии и их поведение будет аналогично поведению ядер образовавшихся при делении исходного ядра. Чаще всего, при вылете из ядра испускаемым нуклоном является нейтрон, а для осколков деления ядра это еще более вероятно, так как они перегружены нейтронами, что приводит к понижению энергии связи последних. Энергия возбуждения осколков деления, примерно, равна 20 МэВ, что намного больше энергии связи нейтронов в осколках поэтому происходит испускание одного или двух нейтронов каждым из осколков спустя 10^{-17} - 10^{-14} секунды с момента образования. В результате, практически сразу, после деления составного ядра осколки деления испускают два или три нейтрона, которые принято называть мгновенными.

В результате β^- -распадов могут образовываться ядра в возбужденных состояниях, которые переходят в основные состояния путем излучения γ -квантов либо, крайне редко, превращаются в другие ядра, путем испускания нейтронов. Такие нейтроны называются запаздывающими при делении ^{235}U тепловыми нейтронами. образовавшиеся ядра - предшественники запаздывающих нейтронов распределены по шести группам с разными относительными вкладами и периодами полураспада.

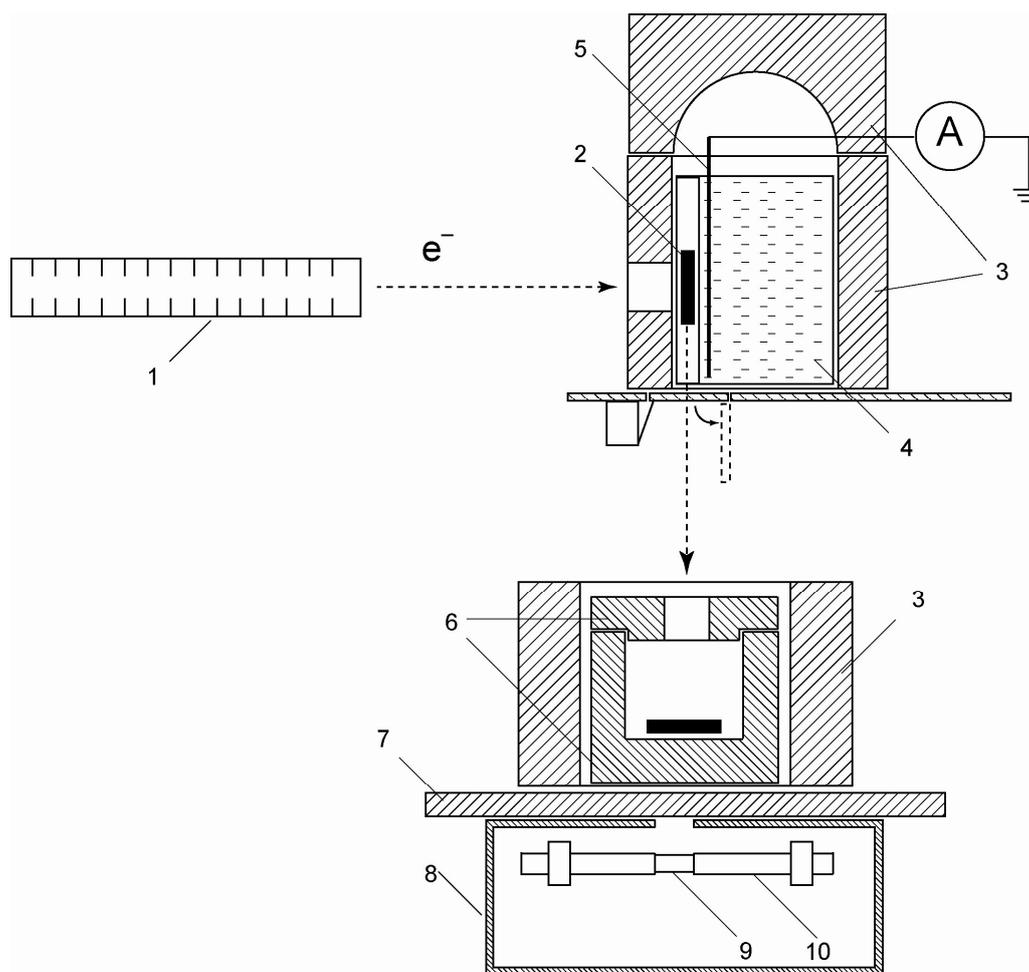


Рис. 1. Схема эксперимента и экспериментального оборудования

1-линейный ускоритель электронов; 2- мишень из делящегося материала; 3- графитовый отражатель; 4- сосуд с охлаждающей жидкостью- замедлителем нейтронов; 5- монитор пучка электронов; 6- полиэтиленовый замедлитель нейтронов; 7- свинцовый фильтр; 8- радиационная защита счетчика нейтронов; 9- счетчик нейтронов СМН-11; 10- кадмиевый поглотитель

Групповые параметры запаздывающих нейтронов в случае деления ^{235}U тепловыми нейтронами представлены в таблице [14].

Таблица

Группы запаздывающих нейтронов

Группа	Относительный вклад $a_i \pm \Delta a_i$	Период полураспада, $T_i \pm \Delta T_i$
1	$0,038 \pm 0,001$	$53,95 \pm 0,028$
2	$0,211 \pm 0,004$	$22,34 \pm 0,13$
3	$0,197 \pm 0,004$	$6,40 \pm 0,08$
4	$0,396 \pm 0,005$	$2,26 \pm 0,03$
5	$0,132 \pm 0,004$	$0,494 \pm 0,017$
6	$0,026 \pm 0,001$	$0,179 \pm 0,006$

Как видно из таблицы 1 периоды полураспада по группам меняются от сотен миллисекунд до 54 секунд.

В работе [15] нами было определено среднее время жизни, равное 10 сек для радиоактивных ядер, испускающих запаздывающие нейтроны.

Что же касается относительных вкладов, из таблицы 1 видно, что основной вклад в испускание запаздывающих нейтронов вносят 2,3,4 и 5 группы, что существенно при выборе времени измерения числа запаздывающих нейтронов излучаемых активированной мишенью.

Средняя энергия запаздывающих нейтронов деления для ^{235}U составляет 0,45 МэВ, которые необходимо замедлять до тепловых или эпитепловых энергий. Чтобы получить наибольший выход замедленных нейтронов из формирователя нами экспериментально подбирались оптимальная толщина замедлителя и она составила 4 см.

Как видно из схемы эксперимента, представленной на рис.1, сосуд с водой установлен в графитовом цилиндре, который служит в качестве отражателя замедленных нейтронов. Замедленные до тепловых энергий нейтроны с помощью отражателя направляются на мишень ^{238}U с 2% обогащением ^{235}U , что приводит к возбуждению реакции деления ^{235}U с сечением 680 барн, при этом образуются осколки деления, испускающие запаздывающие нейтроны. Заметим, ^{238}U в образовании запаздывающих нейтронов играет не основную роль, поскольку он не делится тепловыми нейтронами, а делится только быстрыми с энергией выше 1 МэВ с поперечным сечением около 1 барн, а также γ -квантами с сечением реакции порядка 1 мбарн. Поэтому его вклад в образование запаздывающих нейтронов существенно меньше по сравнению с ^{235}U .

В нашем эксперименте активация мишени пучком электронов производилась в течение 3 минут. После истечения времени активации пучок отключался, а мишень автоматически сбрасывалась в приемник блока формирования тепловых и эпитепловых нейтронов.

Приемник блока формирования тепловых и эпитепловых нейтронов был изготовлен из полиэтилена в виде стакана с крышкой толщиной 4 см, который является замедлителем.

Полиэтиленовый стакан, изображенный на рис.1, был окружен со всех сторон графитовым отражателем с целью увеличения потока замедленных нейтронов при выводе из формирователя на облучаемый объект. В канале детектирования регистрация нейтронов осуществлялась с помощью счетчика нейтронов СНМ-11. Между счетчиком нейтронов и замедлителем устанавливался свинцовый фильтр, предназначенный для уменьшения сопровождающего γ -фона. Толщина фильтра подбиралась экспериментально и в нашем случае составила 2 см. В результате этого поток γ -квантов (сопровождающий фон) уменьшился в 15 раз, а поток замедленных нейтронов уменьшился всего на 40%.

После прохождения свинцового фильтра, поглотителя, формирующего спектральный состав замедленных нейтронов и коллиматора пучок может быть направлен на облучаемый объект. При достижении плотности потока нейтронов $(2-3) \cdot 10^9$ н/(см²·с) в качестве облучаемого объекта может быть раковая опухоль.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем эксперименте замедленные нейтроны регистрировались с помощью канала детектирования, который состоял из счетчика медленных нейтронов СНМ-11 и предусилителя-формирователя. Сформированные импульсы нейтронов подавались на пересчетное устройство на базе ПЭВМ, где производилась их запись в массив данных. Перед началом измерений была произведена калибровка канала детектирования для данной геометрии эксперимента с помощью Pu-Be стандартного источника с интенсивностью $1,15 \cdot 10^5$ нейтронов/с, и определена эффективность регистрации, которая составила $1,15 \cdot 10^{-3}$. После этого измерялась серия распадных кривых радиоактивных ядер, испускающих запаздывающие нейтроны, которые проходили через замедлитель. Для того, чтобы отделить замедленные нейтроны от быстрых, после замедлителя устанавливались поглотители из бора или кадмия. Измерения каждой распадной кривой производилось за время равное 180 с. Заметим, что в настоящем эксперименте во время детектирования регистрировалось число отсчетов от нейтронов, прошедших через счетчик СНМ-11. Поэтому, чтобы перейти к реальному числу нейтронов прошедших через счетчик СНМ-11 нужно число отсчетов, записанное в массив данных разделить на эффективность регистрации $1,15 \cdot 10^{-3}$.

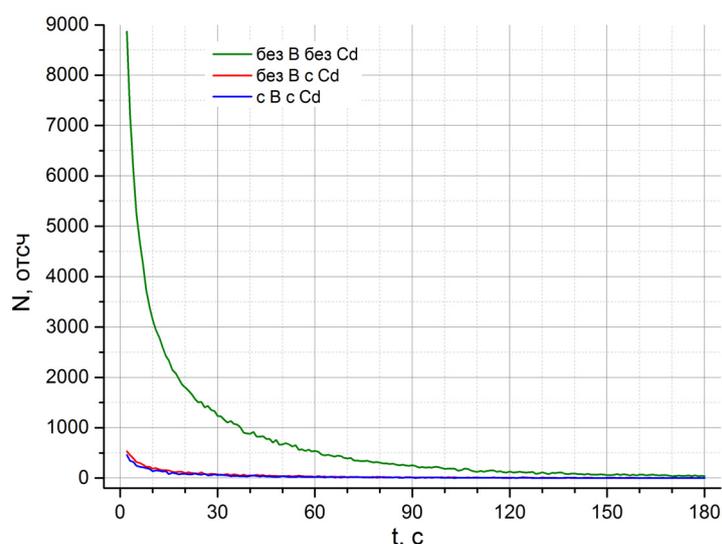


Рис. 2. Распадные кривые радиоактивных ядер, испускающих запаздывающие нейтроны, замедленные в полиэтиленовом замедлителе

Результаты измерений распадных кривых представлены на рис.2.

Верхняя кривая относится к измерению числа отсчетов от нейтронов при отсутствии поглотителя из кадмия и бора на пути пучка нейтронов от замедлителя к счетчику. Нижняя кривая относится к измерению числа отсчетов от нейтронов, когда поглотитель из кадмия и бора установлен между замедлителем и счетчиком.

Как видно из Рис.2 количество зарегистрированных отсчетов от нейтронов под кривыми очень сильно отличается. Это означает, что когда установлен поглотитель между замедлителем и счетчиком, происходит поглощение кадмием тепловых нейтронов с энергией меньше 0,5 эВ, и бором эпитепловых с энергиями от 0,5 до 10кэВ.

Таким образом на нижних кривых представлено число зарегистрированных нейтронов с энергией выше 10 кэВ.

Вычитая число отсчетов от быстрых нейтронов на нижней кривой от суммарного числа отсчетов от быстрых и замедленных нейтронов на верхней кривой, получим число отсчетов от замедленных нейтронов. Результаты вычитания представлены на рис.3.

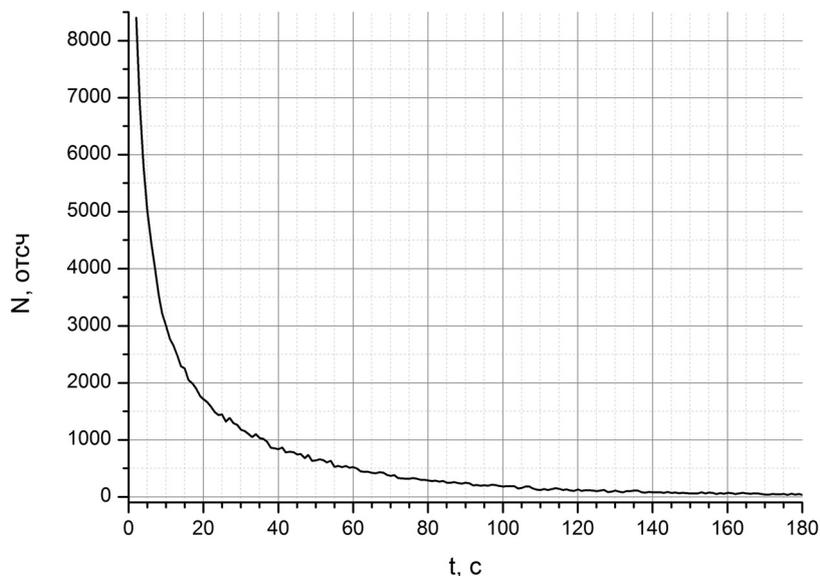


Рис. 3. Распадная кривая радиоактивных ядер, испускающих запаздывающие нейтроны, замедленные до энергий в диапазоне от 0,5эВ до10кэВ.

После обработки распадной кривой, представленной на рис.3 была получена зависимость от времени излучения средней плотности потока замедленных нейтронов, падающих на предполагаемый объект из активированной мишени, находящейся в устройстве-формирователе. Результаты обработки данных представлены в виде гистограммы на Рис. 4. Для построения гистограммы на Рис.4, время измерения кривой периода полураспада 179 с (одна секунда из 180 с пошла на транспортировку образца из активной зоны в блок-формирователь) разбивалось на 20 интервалов. Первые 19 по 9 с, последний – 8 с.

Для математической обработки распадных кривых использовалась следующая процедура: Для этого возьмем серию распадных кривых, и пусть $\sum_i N_i^k$ – сумма событий под кривой распада с номером k. Тогда средняя

плотность потока нейтронов в рассматриваемом интервале времени составит $P_k = \sum_i N_i^k / tS\eta$, где t – длительность интервала, S – 3,6 см² – эффективная площадь детектора, η – эффективность регистрации.

Из рис.4 видно, что плотность потока замедленных нейтронов экспоненциально спадает в зависимости от времени излучения активированным образцом запаздывающих нейтронов в устройстве-формирователе. Так, например, при времени излучения замедленных нейтронов из активированного образца в течение 10 секунд, плотность потока замедленных нейтронов в 4 раза выше по сравнению со средней плотностью потока замедленных нейтронов при времени излучения образца равном 180 секунд. Предположим, что мы имеем систему, показанную схематически на Рис.5, в которой используются две мишени – одна расположена в активаторе и активируется электронным пучком, другая активированная мишень находится в блоке – формирователе и в это время излучает запаздывающие нейтроны в течение определенного промежутка времени. После окончания времени нахождения мишени в формирователе, излучающей запаздывающие нейтроны и активации мишени в активаторе они меняются местами с помощью пневмопочты (рис. 5). Такая процедура может повторяться столько раз сколько необходимо для набора терапевтической дозы на облучаемом объекте. При этом активированная мишень является компактным источником запаздывающих нейтронов, который может быть перемещен в формирователь на расстояние 20 – 50 м за время порядка 1 -2 с. и размещаться в непосредственной близости от облучаемого объекта.

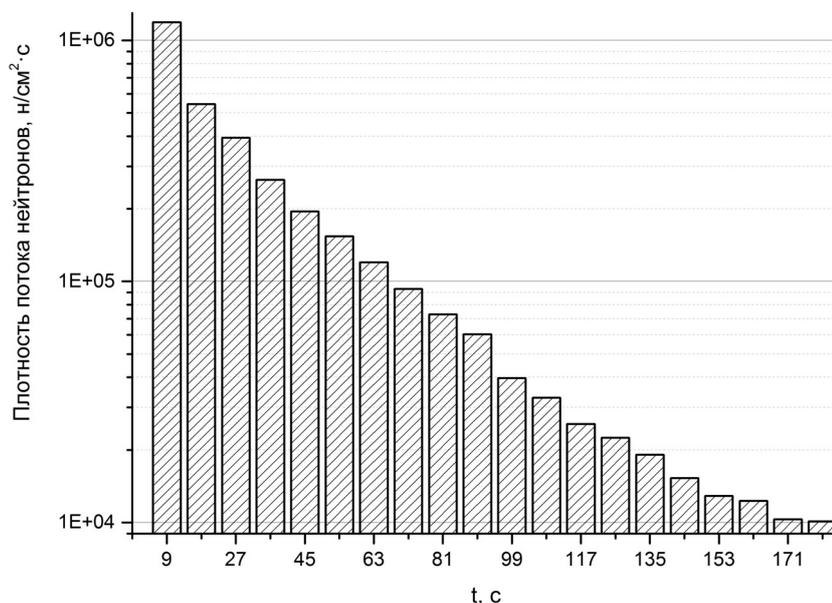


Рис. 4. Плотность потока замедленных нейтронов в зависимости от времени излучения запаздывающих нейтронов в устройстве-формирователе (в логарифмическом масштабе)

Таким образом, описанная процедура может быть использована при создании, так называемого, импульсного источника тепловых или эпитепловых нейтронов. После прохождения нейтронов через фильтры поглощатели и коллиматор мы получаем пучок с необходимыми параметрами для проведения нейтрон захватной терапии. Терапевтическая доза будет определяться количеством импульсов тепловых или эпитепловых нейтронов.

В наших измерениях на мишень выводился пучок электронов с энергией 20МэВ и средним током 0,45мкА что соответствует мощности пучка электронов 9×10^3 кВт. При такой мощности пучка электронов и данной геометрии измерения зарегистрированы нейтроны с плотностью потока 6×10^5 н/(см² с) с энергией замедленных нейтронов в интервале от 0,5эВ до 10кэВ. При этом доля нейтронов с энергией выше 10кэВ, которые считаются фоном, составила 5,5%. Как было сказано выше - для клинического применения метода НЗТ необходимы потоки тепловых нейтронов плотностью (2-3) 10^9 н/(см² с.), причем примесь быстрых нейтронов не должна превышать 1 %. Однако, в наших измерениях для заданной геометрии 5,5% фона составляют нейтроны с энергией в интервале от 10кэВ до 0,5МэВ. Заданная геометрия измерений считается радиальной, поскольку источник нейтронов находится в прямой видимости детектора. Для уменьшения этого фона, необходимо использовать касательную геометрию расположения активированной мишени в формирователе, относительно замедлителя через который проходят запаздывающие нейтроны в устройстве-формирователе, подобно тому, как это сделано в работе [4] на исследовательском реакторе IRT MIFI. В этом случае источник нейтронов не находится в прямой видимости детектора. После замедления запаздывающих нейтронов, пучок нейтронов с энергией в интервале от 0,5эВ до 10кэВ транспортируется через формирующий коллиматор на облучаемый объект.

Полученная в нашей работе плотность потока эпитепловых нейтронов от пучка электронов с энергией 20МэВ и средним током 0,45мкА в 5×10^3 раз меньше необходимой для использования в НЗТ. Однако известно, что плотность потока нейтронов прямо пропорциональна мощности пучка электронов, взаимодействующего с мишенью. Для того, чтобы получить необходимую плотность потока эпитепловых нейтронов, нужно увеличить мощность пучка электронов, выведенных из линейного ускорителя в 5×10^3 раз, т.е. мощность в пучке электронов, используемых в нашем эксперименте 9×10^3 кВт необходимо умножить на 5×10^3 и тогда получим 45кВт, необходимые для генерации нужной плотности потока эпитепловых нейтронов при использовании мишени ²³⁸U с 2% обогащением ²³⁵U. Однако, используя мишени ²³⁸U с более высоким 15-20% обогащением ²³⁵U мы сможем увеличить плотность потока эпитепловых нейтронов в 7.5-10 раз за счет увеличения концентрации ²³⁵U в мишени. Уменьшая время пребывания мишени, излучающей запаздывающие нейтроны в устройстве-формирователе от 180с до 10-20с. мы сможем увеличить плотность потока эпитепловых нейтронов в 2-3 раза за счет экспоненциального роста плотности потока эпитепловых нейтронов в зависимости от времени излучения активированного образца. Таким образом, можно достичь увеличения плотности потока эпитепловых нейтронов в 15-30 раз. А это означает, что мощность в пучке электронов, выведенного из линейного ускорителя, можно уменьшить до 1,5- 3кВт и такие пучки можно реализовать на линейных ускорителях ННЦ ХФТИ.

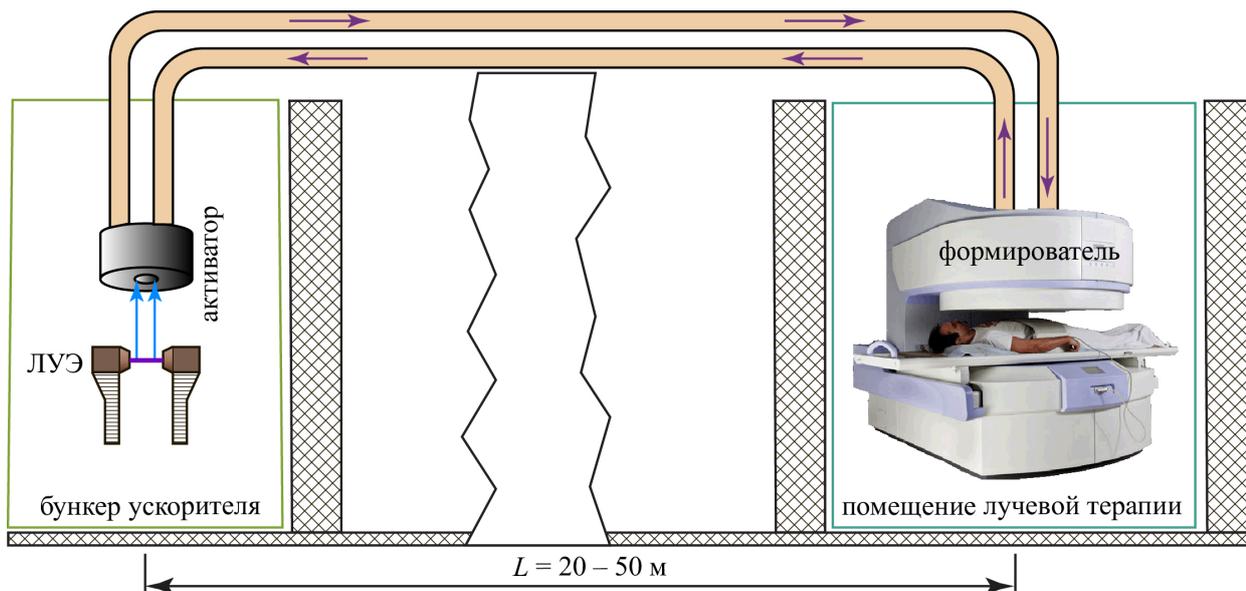


Рис. 5. Принципиальная схема пневмопочты

ВЫВОДЫ

Предложен новый метод генерации тепловых или эпитепловых нейтронов, основанный на использовании запаздывающих нейтронов деления, образующихся при активации мишени из делящегося материала электронным пучком.

Проведенные экспериментальные исследования этого метода на ускорителе ЛУЭ-300 на канале вывода пучка ускоренных электронов на энергию до 30 МэВ показали, что после активации мишени из делящегося материала пучком ускоренных электронов она становится компактным источником нейтронов, который можно транспортировать за короткое время порядка 1-2 с. на расстояние 20 - 50 м в формирователь замедленных нейтронов. При этом формирователь замедленных нейтронов находится в непосредственной близости от облучаемого объекта.

Показано также, что применение данного метода для генерации тепловых и эпитепловых нейтронов дает возможность создавать компактные источники нейтронов на базе линейных ускорителей электронов. Создание таких источников открывает возможности располагать их непосредственно на территории клиник, и проводить сеансы облучения онкологических больных, а на существующих действующих ускорителях создавать кабинеты лучевой терапии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dovbnja A.N., Kuplennikov Je.L., Kandybej S.S., Krasil'nikov V.V. Nejtrony protiv raka [Neutrons against cancer] / EChAJa. Fizika jelementarnyh chastic i atomnogo jadra. – 2014. – Vol.45. – No. 5-6. – P.1751 – 1786. (In Russian)
2. Locher G.L. Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons // Am. J. Roentgenology. – Vol.36. – P. 1-13.
3. Rolf F. et.al. Boron Neutron Therapy of Cancer. Current Status and Future Prospects // Clin. Cancer Res. 2005. – Vol.11(11). P. 3987-4002.
4. Zaycev K.N. Portnov A.A. i dr./ Nejtronozahvatnaya terapiya teplovymi nejtronami na IRT MIFI [BNCT thermal neutrons at the IRT MEPhi] // Atomnaya ehnergiya. – 2001. – Vol.91. – Iss. 4. (In Russian)
5. Hatanaka H., Nakagava Y. Clinical Results of Long-Surviving Brain Tumor Patients Who Underwent Boron Neutron Therapy // Intern. J. Rad. Oncol. Biol. Phys. – 1994. - Vol. 28. – P.1061-1066.
6. Mishima Y. Selective Thermal Neutron Capture Therapy of Cancer Cells Using Their Specific Metabolic Activities Melanomas Prototype // Cancer Neutron-Capture Therapy. N.Y.: Plenum Press, 1996. – P. 1-26.
7. Gueulette J. et al. Specification of Radiation Quality in Fast Neutron Therapy; Microdosimetric and Radiobiological Approach in Fast Neutrons and High-LET Particles in Cancer Therapy / Eds.: R. Engenhart-Cabillic and Wambersice. I(st Ed. Berlin; Ytidelberg; Spinger-Verlag, 1998. – Vol. 150. – P. 31-53.
8. Harling O.K. et. Al. The MIT User Center for Neutron Capture Therapy Research // Rad. Res. - 2005. – Vol. 164. – P. 221-229.
9. Reley K.J. et. Al. The International Dosimetry Exchange for BNCT: A Basis for Poling and Collectively Analyzing Clinical Results // 12 Congress BNCT, Japan, 2006.],
10. Borisov G.I. Teoreticheskie i jeksperimental'nye fizicheskie metody nejtronnoj terapii [Theoretical and experimental physical methods of neutron therapy] // EChAJa. – 2011. – Vol. 42. – No. 5. – P. 1371-1479. (In Russian)
11. Taskaev S.Ju. Uskoritel'naja koncepcija nejtronozahvatnoj terapii.1. Uskoriteli (obzor). Preprint IJaF 2011-15. Novosibirsk, 2011. – P.19. (In Russian)
12. Ajzackij N.I., Borc B.V., Vodin A.N., Demchenko P.A., Zelinskij A.Ju., Karnauhov I.M. i dr. // Istochnik nejtronov NNC HFTI [Neutron Source KIPT] // VANT. – 2012. – No.3(79). – P.3-9. (In Russian)
13. Kasilov V.I., Gokov S.P., Dovbnja A.N. i dr. «O vozmozhnosti ispol'zovaniya zapazdyvajushih nejtronov deleniya v formiro-

- vanii puchkov dlja jadernoj mediciny» [On the possibility of using delayed neutron fission in forming beams for nuclear medicine] / Tezisy XXIII mezhdunarodnogo seminara po uskoriteljam zarjzhennyh chastic. 08-14 sentjabrja 2013 g. Alushta, Krym. (In Russian)
14. Piksajkin V.M., Kazakov L.E., Korolev G.G., Isaev S.G., Roshchenko V.A., Tarasko M.Z. Otnositel'nyj vyhod i period ot del'nyh grupp zapazdyvayushchih nejtronov pri delenii ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu ehpiteplovymi nejtronami [The relative yield and between individual groups of delayed neutrons in the fission of ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu by epithermal neutron] // Atomnaya ehnergiya. – 2000. – Vol.92. – No.2 – P.135-143. (In Russian)
 15. Homich A.A., Kasilov V.I., Kirichenko V.V. i dr. Model' vyhoda zapazdyvayushchih nejtronov deleniya v ehksperimente na impul'snom linejnom uskoritele elektronov [Model of delayed fission neutrons in experiments on pulsed electron linear accelerator] // Visnyk Harkivs'kogo universitetu. – 2006. – No. 732. – P.87-95. (In Russian)