

## ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ННЦ ХФТИ

*Н.И. Айзацкий<sup>1</sup>, Б.В. Борц<sup>1</sup>, А.Н. Водин<sup>1</sup>, П.А. Демченко<sup>1</sup>, А.Ю. Зелинский<sup>1</sup>,  
И.М. Карнаухов<sup>1</sup>, В.А. Кушнир<sup>1</sup>, В.В. Митроченко<sup>1</sup>, А.О. Мыцыков<sup>1</sup>, И.М. Неклюдов<sup>1</sup>,  
С.Н. Олейник<sup>1</sup>, Ф.А. Пеев<sup>1</sup>, Г.Д. Пугачев<sup>1</sup>, С.А. Солдатов<sup>1</sup>, И.В. Ушаков<sup>1</sup>, Й. Гохар<sup>2</sup>,  
И. Большинский<sup>3</sup>, Я.Л. Чи<sup>4</sup>, С.Л. Пэй<sup>4</sup>, С.Х. Вонг<sup>4</sup>, В.Б. Лиу<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина;

<sup>2</sup>Аргоннская национальная лаборатория, США;

<sup>3</sup>Национальная лаборатория Айдахо, США;

<sup>4</sup>Институт физики высоких энергий, Пекин, Китай

E-mail: demchenko@kipt.kharkov.ua

Приведены концепция и основные характеристики источника нейтронов, основанного на подкритической урановой сборке, управляемой линейным ускорителем электронов. Первичные нейтроны образуются в результате фотоядерных реакций в мишени из вольфрама или природного урана.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» (Украина) совместно с Аргоннской национальной лабораторией (ANL, США) разрабатывается исследовательская ядерная установка «Источник нейтронов, основанный на подкритической сборке, управляемой ускорителем электронов». Источник нейтронов (ИН) предназначен для научных и прикладных исследований в области ядерной физики, физики конденсированного состояния вещества, радиационного материаловедения, биологии, производства медицинских радиоизотопов, трансмутации радионуклидов.

Принцип получения интенсивного потока нейтронов в данной установке основан на размножении нейтронов внешнего источника в среде из делящегося ядерного материала. Геометрия среды и масса делящегося материала выбраны таким образом, чтобы эффективный коэффициент размножения нейтронов,  $k_{eff}$ , при любых исходных событиях не превышал 0,98 ( $k_{eff} \leq 0,98$ ), т.е. размножающей средой является подкритическая сборка.

Такое решение гарантирует ядерную безопасность установки, т.е. исключает возможность образования критических масс и соответственно возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления. При этом величина нейтронного потока в ИН регулируется интенсивностью внешнего источника.

При внесении внешнего источника нейтронов (драйвера) с интенсивностью  $Q_0$  (н/с) в размножающую среду с эффективным коэффициентом размножения нейтронов  $k_{eff}$  суммарный выход нейтронов составляет  $Q = Q_0 / (1 - k_{eff})$  (н/с). При значении  $k_{eff}^{max} = 0,98$  (максимальное проектное значение) скорость генерации нейтронов за счёт деления ядер среды увеличивается в 50 раз. Если известны интенсивность источника-драйвера  $Q_0$  и коэффициент размножения нейтронов  $k_{eff}$ , то мощность энерговыделения  $P_f$  за счёт деления ядер определяется соотношением

$$P_f = Q_0 k_{eff} E_f / \nu (1 - k_{eff}), \quad (1)$$

где  $\nu$  – среднее число нейтронов, образующихся при делении ядра урана-235 ( $\nu \approx 2,42$ );  $E_f \approx 200$  МэВ – средняя энергия, выделяющаяся в акте деления [1].

Наиболее интенсивные источники нейтронов могут быть построены на основе ускорителей релятивистских заряженных частиц, в частности, протонов или электронов. Нейтроны образуются при бомбардировке пучками этих частиц мишени из тяжёлых элементов (нейтронопроизводящей мишени). В случае протонов релятивистских энергий нейтроны образуются вследствие каскадов адрон-адронных столкновений, приводящих к разрушению (spallation) ядер [1-4]. В результате, один протон образует до нескольких десятков нейтронов в зависимости от его энергии и материала мишени [2].

При бомбардировке мишени электронами первичные нейтроны (фотонейтроны) образуются вследствие фотоядерных реакций ( $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$ ,  $(\gamma, f)$  и др.) под действием жёсткого тормозного  $\gamma$ -излучения, которое возникает при торможении электронов на ядрах материала мишени [5].

Интенсивность источника первичных нейтронов (драйвера)  $Q_0 = \delta_n I$  (н/с) пропорциональна току пучка  $I$  ускоренных частиц и выходу нейтронов  $\delta_n$  из мишени, т.е. числу нейтронов на одну бомбардируемую частицу. В свою очередь, выход  $\delta_n$  зависит от элементного состава мишени, типа и энергии  $E$  бомбардирующих частиц.

Несмотря на то, что затраты энергии на получение одного нейтрона в случае протонного ускорителя приблизительно в 30 раз меньше, чем для электронного [5], в данном проекте для внешнего источника нейтронов (драйвера) был выбран линейный ускоритель электронов. Это было обусловлено, во-первых, высокой стоимостью и сложностью протонного ускорителя релятивистских энергий ( $E \geq 1$  ГэВ) [4]. Во-вторых, в ННЦ ХФТИ имеется многолетний опыт разработки, строительства и эксплуатации линейных ускорителей электронов широкого диапазона энергий как для научных исследований, так и технологических применений.

В мировой научной литературе гибридные установки, интегрирующие в единый комплекс ускоритель заряженных частиц, конвертор нейтронов и подкритическую сборку, в которой протекает цепная ядерная реакция деления, интенсивность которой контролируется током пучка ускорителя, получили название *ADS-систем (Accelerator Driven Systems)*.

Основные характеристики источника нейтронов, разрабатываемого в ННЦ ХФТИ, приведены в Табл.1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Энергия электронов, МэВ	100
Средняя мощность электронного пучка, кВт	100
Нейтронпроизводящая мишень	Уран, вольфрам
Выход фотонейтронов мишени, н/с	$3,01 \cdot 10^{14}$ (U-мишень) $1,88 \cdot 10^{14}$ (W-мишень)
Эффективный коэффициент размножения нейтронов сборки	Не более 0,98
Делящийся материал активной зоны	Низкообогащённый уран с 19,7 % изотопа уран-235
Отражатель нейтронов	Двухзональный: внутренняя зона – бериллий, внешняя – графит
Замедлитель, теплоноситель	Деионизированная вода (H <sub>2</sub> O)
Поток нейтронов в активной зоне, н/см <sup>2</sup> ·с	$1,95 \cdot 10^{13}$ (U-мишень) $1,14 \cdot 10^{13}$ (W-мишень)
Энерговыделение при делении урана, кВт	192 (U-мишень) 131 (W-мишень)

Функциональными системами, обеспечивающими работу ИН, являются: линейный ускоритель электронов, система транспортировки пучка на нейтронпроизводящую мишень, сканирующее устройство для получения однородного распределения плотности тока пучка на мишени, нейтронпроизводящая мишень, подкритическая урановая сборка, комплекс экспериментального оборудования для проведения исследований с использованием нейтронов.

В настоящей статье приводятся конструкция и технические параметры основных функциональных систем источника нейтронов.

## 2. НЕЙТРОНОПРОИЗВОДЯЩАЯ МИШЕНЬ

Конструкция мишени была выбрана на основе результатов численного моделирования. Численное моделирование включало два основных аспекта:

- расчёт нейтронно-физических характеристик мишени, при которых наблюдается максимальный выход фотонейтронов (выбор материала и геометрии мишени, энергии электронов, расчёт спектра и углового распределения эмиттируемых нейтронов);
- расчёт термогидравлических характеристик мишени (определение максимально допустимой мощности пучка при выбранной энергии электронов

и размерах мишени, распределение энергии диссипации пучка в объёме мишени, выбор конструкции мишени, обеспечивающей необходимый теплосъём, и соответственно входного давления теплоносителя, его температуры и скорости течения в охлаждающих каналах).

Моделирование нейтронно-физических характеристик мишени выполнялось, используя код *MCNPX (Monte Carlo N-Particle Transport Code)*, основанный на методе Монте-Карло [6]; для термогидравлических расчетов использовался численный код *STAR-CCM+ 5.06* [7].

Рассматривалось два варианта мишеней: из вольфрама и природного урана. Моделирование показывает, что в интервале энергий электронов  $50 \text{ МэВ} \leq E \leq 200 \text{ МэВ}$  выход нейтронов пропорционален энергии. При энергии 100 МэВ выход из урановой мишени  $\delta_n \approx 5\%$  на один электрон, из вольфрамовой – в 2 раза ниже.

Линейные потери энергии электрона в мишени из урана при начальных значениях энергии 50, 100, 150, 200 МэВ приведены на Рис.1. Линейные потери определяют распределение плотности мощности энерговыделения в объёме мишени.

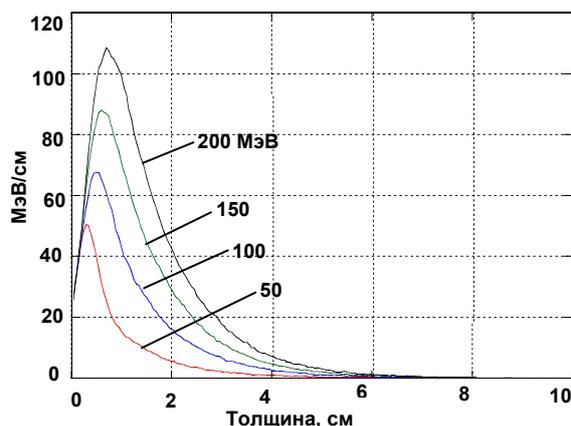


Рис.1. Линейные потери в урановой мишени при нескольких начальных энергиях электронов

Согласно Рис.1, максимум объёмной плотности энерговыделения находится на расстоянии 3...8 мм от поверхности мишени при изменении энергии электронов от 50 до 200 МэВ.

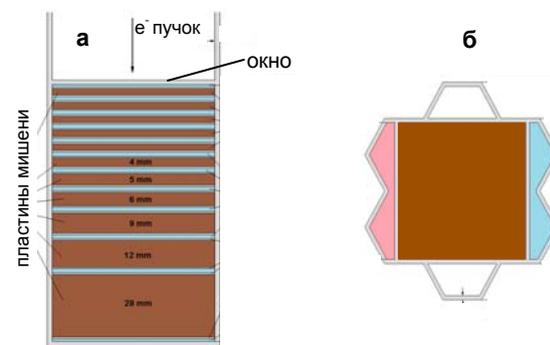


Рис.2. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы нейтронпроизводящей мишени из урана

На основании результатов моделирования, с учётом технико-экономических ограничений для ускорителя ИН были выбраны: энергия электронов 100 МэВ и средняя мощность пучка 100 кВт.

Конструкция нейтронопроизводящей мишени, разработанная с учётом термогидравлического моделирования, приведена на Рис.2.

Для обеспечения теплосъёма мишень набрана из последовательности пластин квадратной формы 66×66 мм, разделённых зазорами 1,75 мм для прокачки охлаждающей воды. Толщины пластин выбраны с учётом объёмной плотности диссипации энергии пучка. Полная толщина набора составляет: для урановой мишени приблизительно 80 мм и вольфрамовой около 69 мм. На пластины нанесено антикоррозионное покрытие, препятствующее поступлению в теплоноситель активированных соединений материала мишени и продуктов деления. Пучок электронов попадает на мишень через вакуумное окно, отделяющее вакуумный электропровод пучка от мишени. Окно изготовлено из алюминиевого сплава и охлаждается проточной водой.

Пакет пластин мишени собран в корпусе из алюминиевого сплава, вдоль которого расположены каналы для охлаждающей воды.

Квадратная форма пластин мишени выбрана с тем, чтобы обеспечить приблизительно равномерное среднее распределение плотности тока пучка в плоскости мишени, используя двумерное сканирование. Средняя плотность мощности пучка на мишени составляет около 2,4 кВт/см<sup>2</sup>.

Учёт реальной конструкции нейтронопроизводящей мишени даёт для интегральных выходов нейтронов значения:  $3,01 \cdot 10^{14}$  и  $1,88 \cdot 10^{14}$  нейтр./с соответственно для урановой и вольфрамовой мишеней, при мощности пучка 100 кВт и энергии электронов 100 МэВ.

Параметры теплоносителя, требуемые для охлаждения мишеней, следующие: температура на входе 25°C, на выходе 30°C, давление на входе 269 кПа, расход 17,25 м<sup>3</sup>/ч. Конструкция нейтронопроизводящих мишеней и параметры системы охлаждения исключают кипение теплоносителя на поверхности пластин.

### 3. ПОДКРИТИЧЕСКАЯ СБОРКА (ПКС)

Подкритическая сборка на тепловых нейтронах служит для размножения первичных фотонейтронов в результате деления ядер урана-235 и включает: активную зону из делящегося материала, замедлитель нейтронов, отражатель нейтронов, теплоноситель.

Конструкция сборки подобна исследовательскому реактору на тепловых нейтронах бассейнового типа. Отличие ПКС от исследовательского ядерного реактора заключается в следующем:

- нет механически перемещаемых поглотителей нейтронов, используемых при пуске реактора, остановке и для регулировки мощности цепной реакции деления;
- отсутствие при  $k_{eff} \leq 0,98$  быстродействующих поглотителей нейтронов для аварийного гашения самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР) (система аварийной защиты);
- наличие нейтронопроизводящей мишени.

Нормативные документы Украины и рекомендации МАГАТЭ допускают для ПКС при  $k_{eff} \leq 0,98$  отсутствие системы аварийного гашения СЦР. Остановка цепной реакции деления актиноидов в ПКС осуществляется выключением пучка электронов.

Численное моделирование нейтронно-физических характеристик, на основе которых выбрана конструкция ПКС, были проведены, используя код *MCNPX*. Цель расчётов заключалась в выборе материалов и геометрии активной зоны и отражателя нейтронов, при которых коэффициент размножения нейтронов не превышает максимального проектного значения ( $k_{eff} \leq 0,98$ ). В качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя используется деионизированная вода ( $H_2O$ ).

Как следует из выражения (1), мощность энерговыделения  $P_f$  за счёт деления ядер активной зоны ПКС при выбранном делящемся актиноиде ( $E_f, \nu$ ) зависит только от интенсивности внешнего источника  $Q_0$  и  $k_{eff}$ . Однако плотность мощности энерговыделения и соответственно максимальная плотность нейтронного потока  $\Phi$  зависят от характерных размеров активной зоны. Оптимизация ПКС была направлена на достижение максимальной величины плотности нейтронного потока  $\Phi$  в активной зоне при минимальном количестве делящегося материала.

Материалом активной зоны выбран низкообогащённый уран с содержанием 19,7% изотопа уран-235 в виде топливных сборок ВВР-М2 производства корпорации ТВЭЛ, Россия. На Рис.3 приведена конструкция ТВС ВВР-М2.

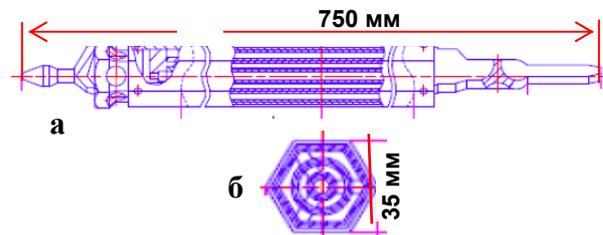


Рис.3. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы тепловыделяющей сборки ВВР-М2

Она включает три топливных элемента трубчатой формы: два коаксиальных цилиндрической формы и внешний – гексагональной. Топливные участки элементов (*сердечники*) толщиной 1 мм и длиной 500 мм представляют собой алюминиевую матрицу, в которой однородно, в виде мелкодисперсного порошка, распределен диоксид урана  $UO_2$ . Топливные сердечники покрыты защитным слоем алюминия толщиной 0,75 мм. Объём между элементами заполнен водой, которая одновременно является теплоносителем и замедлителем нейтронов.

Трёхмерная модель ПКС представлена на Рис.4. Тепловыделяющие сборки 3 располагаются вокруг нейтронопроизводящей мишени 2, образуя плотную гексагональную структуру активной зоны.

Отражатель нейтронов состоит из двух зон. Первая зона примыкает непосредственно к активной зоне ПКС. Она собрана из нескольких рядов бериллиевых блоков 4 в виде шестигранных призм, размер которых подобен размеру ТВС. Вторая зона представляет собой цилиндрический блок 5 из реак-

торного графита плотностью  $1,84 \text{ г/см}^3$ . Диаметр графитового блока около 1,2 м, высота – 0,7 м. В шестигранной выборке блока располагаются: нейтронообразующая мишень 2, активная зона 3, бериллиевый отражатель 4.

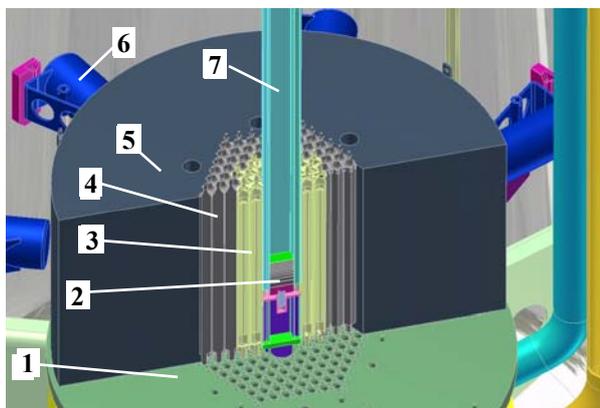


Рис.4. 3D-модель подкритической сборки:

- 1 – опорная плита; 2 – нейтронопроизводящая мишень; 3 – ТВС активной зоны; 4 – блоки отражателя из бериллия; 5 – отражатель из графита; 6 – нейтронный канал; 7 – вакуумный электропровод пучка электронов

Все основные узлы подкритической сборки собраны на опорной плите 1 (см. Рис.4), которая находится в цилиндрическом баке из алюминиевого сплава, заполненном деионизированной водой. Диаметр бака около 2 м, высота 2,2 м. Теплосъём осуществляется за счёт циркуляции воды, которая одновременно служит замедлителем быстрых нейтронов деления.

При начальной загрузке для получения  $k_{eff} \approx 0,98$  необходимо в ПКС при урановой мишени установить 37 ТВС, при вольфрамовой – 42 ТВС. Увеличение загрузки на 5 ТВС в случае вольфрамовой мишени связано с существенным поглощением нейтронов в вольфраме.

Таблица 2

Мишень	Число ТВС	$k_{eff}$	Нейтронный поток в активной зоне, $\text{н/см}^2 \cdot \text{с}$	Нейтронный поток в мишени, $\text{н/см}^2 \cdot \text{с}$	Энерговыделение в активной зоне, кВт
W	42	0,97878	$1,166 \cdot 10^{13}$	$1,363 \cdot 10^{13}$	131
U	37	0,97588	$1,968 \cdot 10^{13}$	$2,475 \cdot 10^{13}$	194

В Табл.2 для двух вариантов нейтронопроизводящих мишеней, бомбардируемых пучком мощностью 100 кВт с энергией электронов 100 МэВ, приведены значения: коэффициента размножения нейтронов; величины нейтронного потока вблизи мишени и в активной зоне; мощность энерговыделения в активной зоне в результате деления урана.

#### 4. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

Важными характеристиками ускорителя-драйвера, кроме выбранных мощности пучка 100 кВт и энергии электронов 100 МэВ, являются значения поперечных и продольного эмиттансов. Эти параметры определяют величину потерь тока

частиц на элементах конструкции ускорителя и системе транспортировки пучка на мишень. В свою очередь, потери частиц определяют уровень паразитного тормозного излучения, активацию оборудования, требования к радиационной защите и её стоимость.

Предварительная концепция линейного ускорителя для управления работой ПКС и технические требования были разработаны специалистами ННЦ ХФТИ. Разработку проектно-конструкторской документации и изготовление ускорителя выполняет Институт физики высоких энергий (ИФЭ), Пекин, КНР.

Основные характеристики линейного электронного ускорителя-драйвера для ПКС приведены в Табл.3. Структурная схема ускорителя представлена на Рис.5. Она включает: трёхэлектродную электронную пушку 1 с энергией инжекции 100 кэВ и током до 2 А, предгруппирователь 2, группирователь 3 и десять ускоряющих секций 4 на бегущей волне.

Таблица 3

Параметр	Значение
Энергия электронов, МэВ	100
Средняя мощность пучка, кВт	100
Частота ВЧ-питания, МГц	2856
Частота посылок тока, Гц	625
Длительность импульса тока, мкс	2,7
Максимальный ток в импульсе, А	0,55
Энергетический разброс, %	1
Нормализованный эмиттанс, м·рад	$5 \cdot 10^{-7}$
Импульсная (МВт) /средняя (кВт) мощность клистрона	30/50
Тип волны ускоряющей секции	$2\pi/3$
Длина ускоряющей секции, м	1,33
Число ускоряющих секций	10
Длина ускорителя, м	22,3

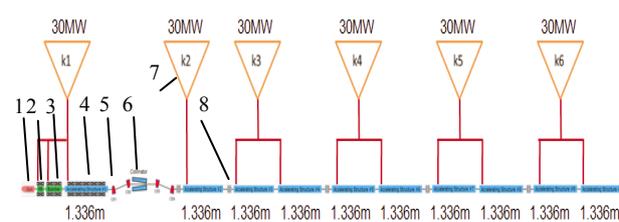


Рис.5. Схема электронного ускорителя-драйвера:

- 1 – электронная пушка; 2 – предгруппирователь; 3 – группирователь; 4 – ускоряющая секция; 5 – магнитный диполь; 6 – коллиматор пучка; 7 – клистронный усилитель ВЧ-питания; 8 – квадрупольный триплет

Прирост энергии электронов в каждой из секций составляет 10 МэВ (при СВЧ-мощности 10 МВт). Тип колебаний электрического поля в ускоряющей структуре  $2\pi/3$ . Длина ускоряющей секции 1,33 м.

Фокусировка пучка в предгруппирователе, группирователе и первой ускоряющей секции осуществляется продольным магнитным полем, создаваемым внешними соленоидами. Для фокусировки пучка в основной части ускорителя используются четыре магнитных квадрупольных триплета 8.

Предгруппирователь представляет собой объёмный резонатор с импульсной мощностью высоко-частотного (ВЧ) питания до 10 кВт. В качестве группирователя используется короткая ускоряющая секция на бегущей волне. Мощность ВЧ-питания группирователя ~2...3 МВт.

ВЧ-питание ускорителя осуществляется от шести клистронных усилителей на базе клистрона *Toshiba E37311* с рабочей частотой 2856 МГц, импульсной мощностью 30 МВт и средней 50 кВт. Первый клистрон используется для питания предгруппирователя, группирователя и первой ускоряющей секции (см. Рис.5). Потребляемая мощность составляет 16 МВт. Мощность питания второй секции составляет 20 МВт. Остальные 8 секций потребляют по 10 МВт, при этом питание двух секций осуществляется от одного клистрона.

На выходе из первой ускоряющей секции сгустки электронов в фазовом пространстве представляют собой плотное ядро с длинными хвостами. Последние при движении в последующих секциях и канале транспортировки могут быть потеряны. Поэтому после первой секции установлен энергетический фильтр (*chicane*) для удаления низкоэнергетичных электронов и уменьшения потерь тока в процессе дальнейшего ускорения и транспортировки на нейтронопроизводящую мишень. Он состоит из четырёх магнитных диполей 5 и коллиматора 6 (см. Рис.5). В результате, суммарная мощность потерь пучка на участке секций №№2-10 не превышает 1 кВт, а энергетический разброс в пучке на выходе ускорителя не более 41 %.

Общая длина ускорителя составляет около 22,3 м. Ускоритель располагается в туннеле, стены которого являются радиационной защитой.

Для транспортировки электронного пучка от выхода ускорителя до нейтронопроизводящей мишени, расположенной в баке ПКС, используется система транспортировки.

## 5. СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Канал транспортировки должен:

- обеспечить размеры огибающей пучка с минимальными потерями тока электронов на элементах конструкции канала;
- изменить направление траектории пучка из горизонтального на вертикальное для последующего ввода в ПКС;
- обеспечить сканирование пучка в пределах рабочей поверхности мишени с приблизительно однородным распределением средней плотности тока.

Схема канала транспортировки показана на Рис.6. Для поворота пучка на 90° в вертикальной плоскости используются два дипольных электромагнита *B1*, *B2* и квадрупольная линза *Q11* для компенсации хроматических aberrаций пучка.

Каждый из дипольных магнитов поворачивает пучок на 45°. Квадрупольные линзы *Q6-Q11* формируют требуемую огибающую электронного пучка в канале транспортировки и на входе в сканер.

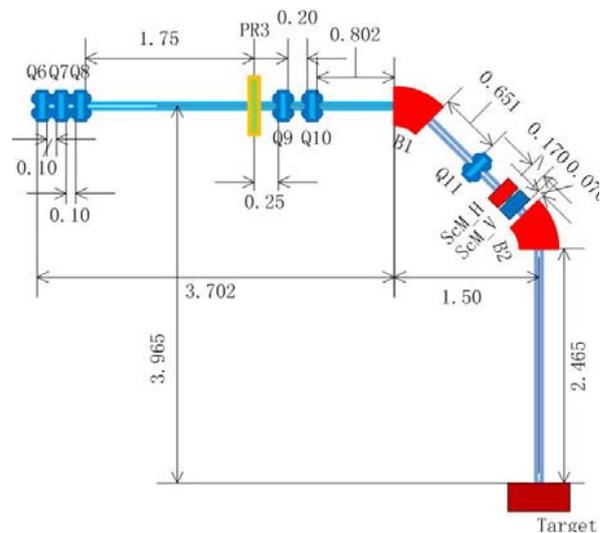


Рис.6. Схема системы транспортировки: *Q6-Q11* - квадрупольные линзы; *PR3* - профилометр; *B1*, *B2* - поворотные дипольные магниты; *ScM (H,V)* - электромагниты сканера; *Target* – нейтронопроизводящая мишень

Два электромагнита *SC-H* и *SC-V* сканирующего устройства (см. Рис.6) обеспечивают перемещение пучка в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, создавая приблизительно равномерное распределение плотности тока пучка на поверхности мишени.

Область сканирования на мишени представляет квадрат размером 66×66 мм. Сканирование является необходимым условием для исключения разрушения мишени пучком с высокой плотностью мощности. Средняя во времени поверхностная плотность мощности пучка не должна превышать 2,4 кВт/см<sup>2</sup>.

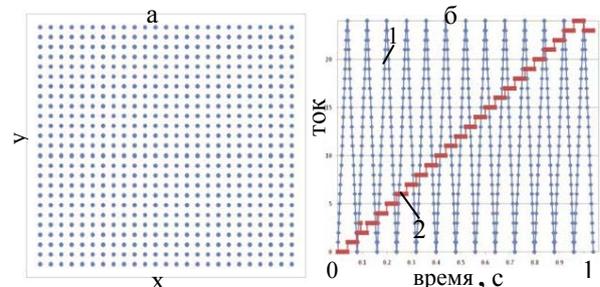


Рис.7. Положения  $(x,y)$  посылок пучка в плоскости мишени (а); формы импульсов токов во времени для сканирования в горизонтальном – 1 и вертикальном – 2 направлениях (б)

Для обеспечения требуемых размеров области облучения при диаметре пучка электронов 2...3 мм углы сканирования в каждой плоскости должны изменяться в интервале 0...25 мрад.

Для перемещения пучка с энергией 100 МэВ и длительностью 2,7 мкс специалисты *ИНЕР* предложили вариант «медленного» сканирования.

Перемещение пучка от импульса к импульсу по поверхности мишени осуществляется изменением во времени формы тока в обмотках сканирующих магнитов (Рис.7,б). Перемещение пучка в горизонтальной плоскости осуществляется магнитным полем, изменяющимся по пилообразному закону с частотой 12,5 Гц (см. Рис.7,б).

При сканировании в течение посылки 2,7 мкс пучок не успевает сместиться по горизонтали  $X$ . За время между посылками 1,6 мс магнитное поле изменяется, и следующая посылка тока смещается на величину диаметра пучка. После достижения пучком края мишени, за время между посылкой тока поле магнита вертикального отклонения изменяется скачком (см. Рис.7,б) и смещает пучок на 2,6 мм по координате  $Y$ .

На Рис.7,а показана последовательность положений пучка на мишени при частоте посылок 625 Гц. Полный цикл сканирования (длительность кадра развёртки) осуществляется за одну секунду. Затем цикл повторяется. Таким образом за 1 секунду пучок проходит (25×25) положений в плоскости мишени (см. Рис.7,а).

На Рис.8 приведен общий вид подкритической сборки с участком канала транспортировки электронного пучка.

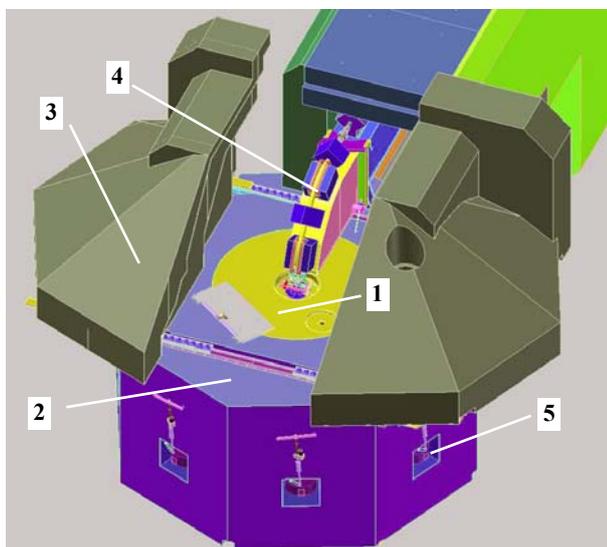


Рис.8. Общий вид подкритической сборки с каналом транспортировки электронного пучка:

- 1 - верхняя крышка бака ПКС; 2,3 - радиальная и аксиальная части биологической защиты;
- 4 - канал транспортировки; 5 - терминалы для подключения нейтронных каналов

Биологическая защита ПКС и канала транспортировки состоит из тяжёлого бетона плотностью  $4,6 \text{ г/см}^3$  [8]. Аксиальная (верхняя) часть защиты выполнена раздвижной для смены мишеней и обслуживания устройств канала транспортировки электронного пучка. Горизонтальные нейтронные каналы с экспериментальной аппаратурой для нейтронно-физических исследований подключаются к выходным терминалам 5, оборудованным шиберами для отсечки потока нейтронов.

## 6. КОМПОНОВКА ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Установка сооружается на производственной территории ННЦ ХФТИ и располагается в отдельном здании, состоящем из экспериментального зала, инженерно-лабораторного корпуса и пристройки для линейного ускорителя электронов (Рис.9).

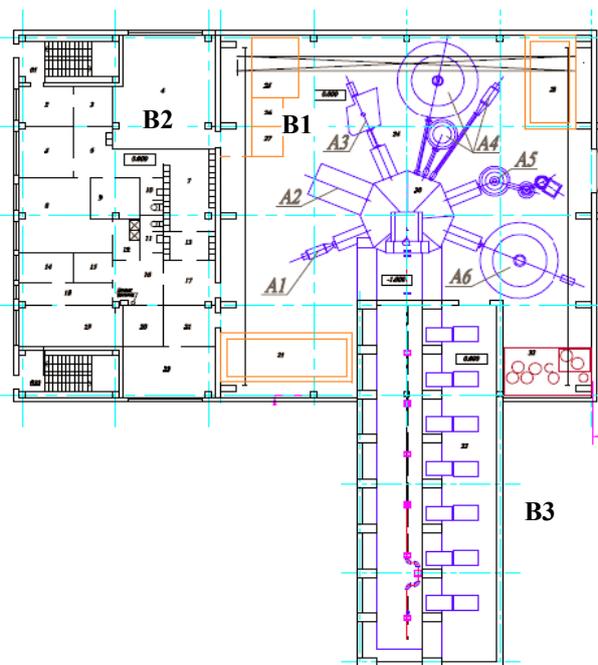


Рис.9. План здания источника нейтронов: B1 - экспериментальный зал; B2 - инженерно-лабораторный корпус; B3 - пристройка для линейного ускорителя электронов

В центре экспериментального зала B1 располагается подкритическая сборка, окружённая биологической защитой из тяжёлого бетона. Для работы с внешними пучками нейтронов используется 6 горизонтальных каналов для вывода нейтронов из ПКС. К каналам подключено экспериментальное оборудование для нейтронно-физических исследований и приложений.

По функциональному назначению это оборудование включает: спектрометр квазиупругого рассеяния A1, биологический бокс A2; аппаратуру для нейтронно-активационного анализа A3, спектрометры холодных нейтронов A4; трёхосный спектрометр A5, порошковый дифрактометр A6 (см. Рис.9).

Для получения медицинских радиоизотопов и для радиационного материаловедения облучаемые образцы в специальных кассетах помещаются в области ПКС с требуемыми спектральными характеристиками и плотностью нейтронного потока.

В отдельных частях экспериментального зала находятся: помещение для «горячих камер», хранилище для выдержки облучённых топливных сборок и мишеней, другое оборудование.

В пристройке для линейного ускорителя электронов на первом этаже расположена клистронная галерея с модуляторами системы высокочастотного питания. Ускоритель расположен на втором этаже в туннеле, стены которого являются одновременно биологической защитой от ионизирующих излучений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что особенностью источника нейтронов ННЦ ХФТИ являются пульсирующие во времени параметры нейтронного поля ПКС, что связано с импульсным режимом работы ускорителя-драйвера. Амплитуда пульсаций зависит от длительности и частоты посылок тока пучка электронов, а также от координат точки, в которой

измеряются характеристики нейтронного потока. В данном сообщении приведены средние во времени значения интегрального потока нейтронов и энерговыделения.

Сооружаемая установка является не только экспериментальной базой для нейтронно-физических исследований и приложений в ННЦ ХФТИ, но и представляет самостоятельный объект исследований как ADS-система. На ИН предполагается выполнить цикл работ, связанных с особенностью работы гибридных установок *ускоритель заряженных частиц+подкритическая сборка* с мощностью деления ядер до 200 кВт. Они включают, в частности:

- экспериментальные исследования *нейтронники ADS*: пространственных, энергетических, временных характеристик нейтронного поля; *on-line* контроль реактивности системы [9]; компенсации реактивности в процессе выгорания топлива и накопления продуктов деления;

- проблемы радиационной и ядерной безопасности;

- вопросы надёжности, эксплуатационного ресурса систем и узлов ядерной установки, обоснованности конструкторских и технологических решений.

В настоящее время выполнены: концептуальный проект ИН, технико-экономическое обоснование, проект архитектурно-строительной части с инженерными системами обеспечения. Подготовлен ряд документов, согласно ядерному законодательству Украины, в частности, анализ ядерной и радиационной безопасности и оценка воздействия установки на окружающую среду. Проводится разработка проектно-конструкторской документации на технологические системы и узлы нейтронного источника.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. H. Nifenecker, et al. Basics of Accelerator-Driven Subcritical Reactors // *Nucl. Instrum. and Methods*. 2001, A463, p.428-467.
2. D. Hilscher, U. Jahnke, F. Goldenbaum, et al. Neutron Production by Hadron-Induced Spallation Reactions in Thin and Thick Pb and U Targets from 1 to 5 GeV // *Nucl. Instrum. and Methods*. 1999, A414, p.100-116.
3. C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono, et al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier // *CERN Report*. CERN/AT/95-44(ET), Geneva, 1995.
4. S. Henderson. Spallation Neutron Source Progress, Challenges and Upgrade Options // *Proceedings of EPAC08*. Genoa, Italy, 2008, p.2892-2896.
5. D. Ridicas, H. Safa and M-L. Giacri. Conceptual study of Neutron Irradiator-Driven by Electron Accelerator // *7<sup>th</sup> Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, 11-16 October, 2002, Korea/OECD/NEA*, p.1001-1011.
6. MCNPX Extensions Version 2.5.0. LA-UR-05-2675, Los-Alamos, 2005.
7. STAR-CCM+5.06 Users Guide, CD-adapco, Mellville, NY, USA.
8. Z. Zhong, Y. Gohar. Biological Shield Design and Analysis of KIPAT Accelerator Driven Subcritical Facility // *Nuclear Technology*. 2009, v.168, №3, p.871-876.
9. C.-M. Persson, P. Seltborg, A. Ahlander, et al. Analysis of reactivity determination methods in the subcritical experiment Yalina // *Nucl. Instrum. and Methods*. 2005, A554, p.374-383.

Статья поступила в редакцию 14.10.2011 г.

## NSC KIPAT NEUTRON SOURCE

*M.I. Ayzatskiy, B.V. Borts, A.N. Vodin, P.A. Demchenko, A.Yu. Zelinskiy, I.M. Karnaukhov, V.A. Kushnir, V.V. Mitrochenko, A.O. Mytsykov, I.M. Neklyudov, S.N. Oleynik, F.A. Peev, G.D. Pugachev, S.A. Soldatov, I.V. Ushakov, Y. Gohar, I. Bolshinsky, Ya.L. Chi, S.L. Pei, S.H. Wang, W.B. Liu*

Conception and basic descriptions of a neutron source based on a subcritical uranium assembly driven by a linear electron accelerator are presented. The primary neutrons are produced as a result of photonuclear reactions in a tungsten or natural uranium target.

## ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ ННЦ ХФТІ

*M.I. Айзацький, Б.В. Борц, О.М. Водін, П.О. Демченко, А.Ю. Зелінський, І.М. Карнаухов, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, А.О. Мициков, І.М. Неклюдов, С.М. Олійник, Ф.А. Пєєв, Г.Д. Пугачов, С.А. Солдатов, І.В. Ушаков, Й. Гохар, І. Болшинський, Я.Л. Чи, С.Л. Пей, С.Х. Ванг, В.Б. Ліу*

Надано концепцію та основні характеристики джерела нейтронів на основі підкритичної уранової збірки, що керується лінійним прискорювачем електронів. Первинні нейтрони утворюються в наслідок фотоядерних реакцій в мішені з вольфраму або природного урану.