

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКОЙ

М. И. Братченко¹, В. В. Ганн¹, И. С. Гук¹, А. Н. Довбня¹, С. В. Дюльдя¹, С. Г. Кононенко¹,
Ф. А. Пеев¹, А. С. Тарасенко¹, M. van der Wiel², J. I. M. Botman²

¹ ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

² TUE, Eindhoven, The Netherlands

Рассматривается возможность использования сверхпроводящего линейного ускорителя электронов в качестве драйвера для создания прототипа будущих ядерных энергетических установок с управляемыми подкритическими сборками. Ускоритель будет работать в непрерывном режиме с максимальной частотой следования импульсов 13 МГц. Максимальная энергия электронов в пучке составляет 130 МэВ, средний ток – около 1 мА. Для одного из возможных вариантов подкритической сборки с помощью программы *SCALE5* (ORNL, США) и разработанной в ННЦ ХФТИ на основе пакета *Geant4* программы *RaT 3.0* рассчитаны нейтронные поля, создаваемые в нейтронообразующей мишени, активной зоне и отражателе сборки при энергии электронов 100 МэВ.

Введение

В большинстве промышленно развитых стран мира ядерная энергетика занимает существенную долю в общем производстве электроэнергии, а в Японии и Франции превышает 50 %. С вводом в эксплуатацию новых энергоблоков на Хмельницкой и Ровенской АЭС в Украине этот порог был также превышен с 2004 г. [1]. Основные проблемы, связанные с эксплуатацией существующих АЭС, связаны с надкритическим режимом работы реакторов, требующим сложной и надежной системы управления, и наработкой большого количества радиоактивных отходов, имеющих большое время жизни. В связи с рядом инцидентов на атомных станциях стимулируется поиск более надежных вариантов ядерных энергоустановок, использующих распад тяжелых ядер.

Одно из таких направлений [2 - 5] предполагает использовать ядерные установки с подкритическими сборками, для управления которыми используются источники нейтронов на основе ускорителей протонов. Такие установки позволяют реализовать так называемый ториевый топливный цикл, проводить трансмутацию радиоактивных изотопов, сжигать нарабатываемый в реакторах с тепловыми нейтронами плутоний. Типичные параметры ускорителя протонов, драйвера подкритической сборки: энергия – 1÷1,7 ГэВ, ток – более 10 мА [3, 5, 6]. Линейный ускоритель протонов, являющийся наиболее перспективным вариантом драйвера, с такими параметрами пучка будет иметь длину около 1 км. Одной из главных проблем создания такого линака является активация оборудования ускорителя из-за потерь пучка, что может привести к невозможности прямого обслуживания систем из-за высокой степени радиационного облучения

персонала. Стоимость линейного ускорителя протонов на энергию 1 ГэВ и средним током 1,4 мА для нейтронного источника SNS, строительство которого будет закончено в 2006 г. в США [7], составляет около 1 млрд долларов.

В связи с этим важно проверить основные принципы, заложенные в основу таких огромных по стоимости проектов, на установках, значительно меньших масштабов. Такая возможность существует при создании управляющего источника нейтронов на основе ускорителя электронов.

В работе [8] показано, что для получения потоков менее 10^{17} н/с фотоядерные процессы предпочтительнее реакций, индуцированных протонами, а стоимость ускорителя, без затрат на капитальное строительство и зарплату, для ускорителя электронов на порядок ниже.

В настоящей работе анализируется возможность создания в ННЦ ХФТИ модели энергетической установки при использовании в качестве драйвера сверхпроводящего линейного ускорителя электронов. Такая установка должна состоять из ускорителя, системы транспортировки пучка к мишени, нейтронообразующей мишени и подкритической сборки из топливных элементов. Приведены результаты расчета нейтронных полей в мишени, топливной сборке, отражателе для одного из возможных вариантов подкритической сборки с учетом свойств применяемых материалов и реальной геометрии элементов установки.

Сверхпроводящий драйвер

Использование ускорителя в качестве драйвера подкритической сборки предъявляет к нему ряд требований, часть которых были сформулированы и обсуждены в ходе семинара «Установка с подкритической сборкой, управляемая ускорителем частиц» [9].

Энергия электронов в ускорителе должна быть заключена в интервале 100 ... 200 МэВ, это обеспечивает достаточно большой выход нейтронов на один ускоренный электрон, а, с другой стороны, объем нейтронной мишени будет достаточно большим для уменьшения плотности энерговыделения и улучшения условий охлаждения мишени. Для демонстрации основных принципов взаимодействия драйвера с управляемой подкритической сборкой поток нейтронов должен быть максимальным. Наибольший ток можно получить на линейных ускорителях электронов. Существующие источники высокочастотного питания ускорителей и инжекторы позволяют получить средний ток на выходе такого ускорителя в нужном диапазоне энергии электронов, близкий к 1 мА. Таким образом, средняя мощность в пучке может быть близка к 100 кВт, что выдвигает очевидные требования на поперечные размеры пучка на мишени, связанные как с радиационной стойкостью материала, так и со съемом тепла.

Принципиально важным является вопрос о временной структуре пучка ускорителя. В установке предполагается использование хорошо отработанных технологий изготовления и эксплуатации топливных элементов. Они предполагают работу твэлов в условиях постоянных или медленно меняющихся во времени тепловых и радиационных нагрузок, поэтому естественным является требование продолжительной и надежной работы ускорителя с непрерывным во времени пучком. Этому условию не отвечает вариант использования в качестве драйвера «теплого» ускорителя, т.е. ускорителя, ускоряющая структура которого работает при температурах, близких к комнатной. Высокочастотные источники такого ускорителя работают в импульсном

режиме, частота следования импульсов мощных клистронов не превышают 150 Гц, а длительность импульса находится в интервале 1 ... 10 мкс. Это означает, что нейтронообразующая мишень и твэлы подвергаются воздействию импульсного потока нейтронов и тепловыделения, превосходящих более чем в 10^4 раз среднее значение этих факторов. Данные по эксплуатации этих элементов установки в указанных условиях отсутствуют, результаты воздействия такого пучка на механические и физические свойства не изучены. Возможно, что исследование воздействия указанного фактора на эти свойства может стать предметом исследования на будущей установке, но в таком случае «теплый» ускоритель должен обеспечивать как непрерывный, так и импульсный характер воздействия пучка, что принципиально невозможно. По нашему мнению, линейный ускоритель на основе сверхпроводящих ускоряющих структур в настоящее время наиболее отвечает требованиям, предъявляемым к драйверу экспериментальной установки.

Рассмотрим вариант использования сверхпроводящего линейного ускорителя разрабатываемого в ННЦ ХФТИ ускорительного комплекса «SALO» [10] в качестве драйвера подкритической сборки.

Расположение установки

Наиболее пригодным для размещения рециркулятора является помещение мишенного зала существующего в ННЦ ХФТИ комплекса линейного ускорителя ЛУ-2000. При использовании линейного ускорителя для работы с подкритической сборкой возможны три направления канала вывода пучка на мишень: $N1$, $N2$ и $N3$ (рис. 1).

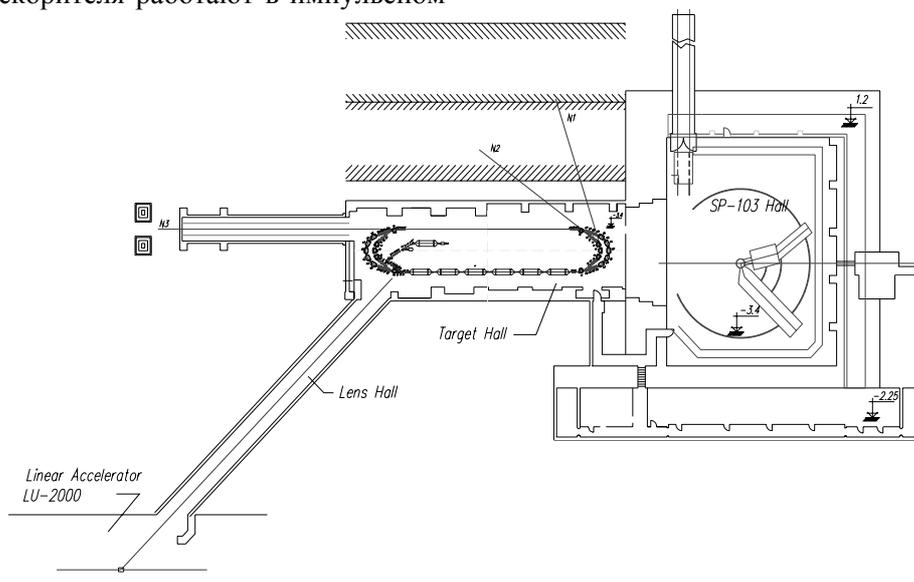


Рис. 1. Экспериментальные помещения на выходе ЛУ-2000.

В конце любого из этих направлений имеется возможность построить здание [9, 10], в котором должны размещаться система формирования пучка на мишени, мишень с подкритической сборкой, отражателем, а также вспомогательное оборудование, необходимое для обеспечения работы установки, и экспериментальные каналы для использования нейтронных потоков в различных областях исследований. Ближайшее расстояние этого здания от жилой зоны превышает 480 м.

В режиме работы с подкритической сборкой будут использоваться высокочастотный инжектор, система формирования инжекционного пучка, ускоряющая система и система формирования пучка в канал транспортировки.

Система инжекции пучка

Для работы в качестве драйвера для подкритической сборки предусматривается установка сильноточного инжектора, аналогичного описанному в [11], и обеспечивающего следующие параметры пучка: номинальная энергия 9,5 МэВ; средний ток 1 мА; режим работы непрерывный, частота посылок – 1 и 13 МГц; поперечный нормализованный эмиттанс $\epsilon_{x,y} = 2,5 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Инжектор представляет собой фотопушку со сверхпроводящей ускоряющей системой на основе ускоряющей структуры TESLA. На рис. 2 показана магнито-оптическая система канала инжекции электронного пучка в ускоряющую секцию.

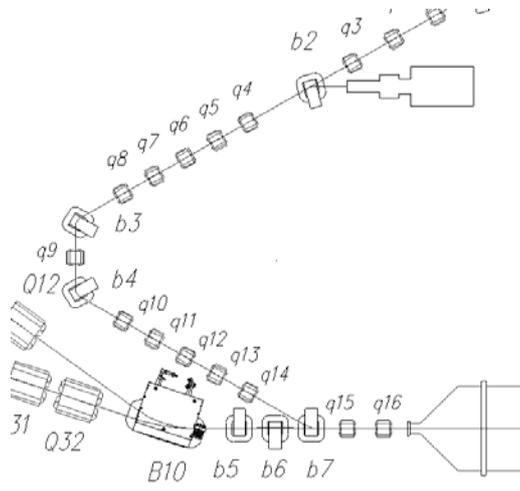


Рис. 2. Магнито-оптическая система тракта инжекции.

Магниты $b2, b3, b4, b7$ и квадрупольные линзы $q4 - q16$ обеспечивают проводку пучка от инжектора до входа в ускоряющую систему, где он получает прирост энергии $\Delta W = 120 \text{ МэВ}$. Линзы $q4 - q14$ обеспечивают необходимые поперечные размеры пучка, хроматичность и изохронность прямолинейного промежутка, где расположена

ускоряющая система. Линзы $q15 - q18$ (см. также рис. 4) обеспечивают проводку пучка с указанным выше поперечным эмиттансом через ускоряющую структуру и фокусируют его на входе в магнит $B1$. На рис. 3 показаны поперечные размеры пучка на тракте инжекции.

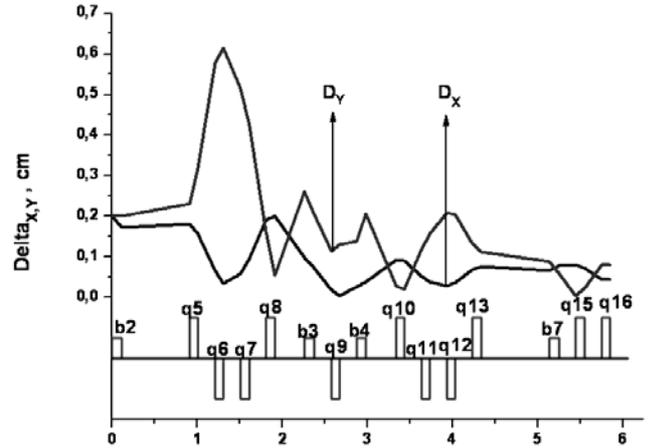


Рис. 3. Размеры пучка на тракте инжекции.

Наиболее пригодными для реализации нашего проекта параметрами обладает сверхпроводящая ускоряющая структура TESLA, разработанная в DESY [10]. Отработана технология массового производства секций, несколько методик обработок поверхности секций, которые позволяют получать в структуре ускоряющий градиент до 35 МВ/м при работе в непрерывном режиме [10]. В реально работающих установках с несколькими секциями в непрерывном режиме получен средний ток 1 мА, что существенно расширяет возможности использования рециркулятора. Характеристики секций стабильны во времени. Разработаны и изготовлены несколько типов криомодулей для различного числа секций. Нами выбран модуль для двух секций, который производится малыми сериями фирмой ACCEL. Такой модуль позволяет получить прирост энергии 20 МэВ для среднего тока 1 мА. В линейном ускорителе ускорительного комплекса «SALO» будет использоваться шесть таких модулей. Таким образом, максимальная энергия пучка на выходе ускорителя будет близка к 130 МэВ.

Для транспортировки пучка на мишень будут использоваться магнитные элементы первой арки рециркулятора (см. рис. 4). Три 36°-ных магнита $B1, B2, B3$, характеристики которых приведены в работе [10], поворачивают пучок на 108° и направляют пучок в канал $N1$. Расположенные между магнитами $B1, B2$ квадрупольные линзы $Q1 - Q3$ обеспечивают ахроматичность пучкового тракта до входа в магнит $BV1$ (см. рис. 7).

Магниты $B4$ и $B5$ используются в каналах $N2$ и $N3$. На рис. 5 показаны поперечные размеры

электронного пучка на участке от входа в ускоряющую секцию до выхода из магнита $B3$.

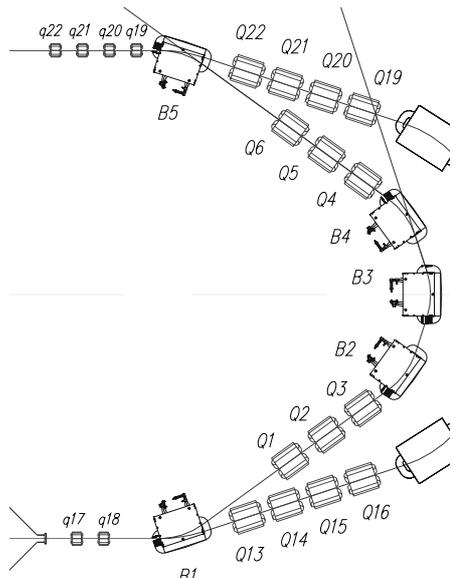


Рис. 4. Магнито-оптическая структура первой арки.

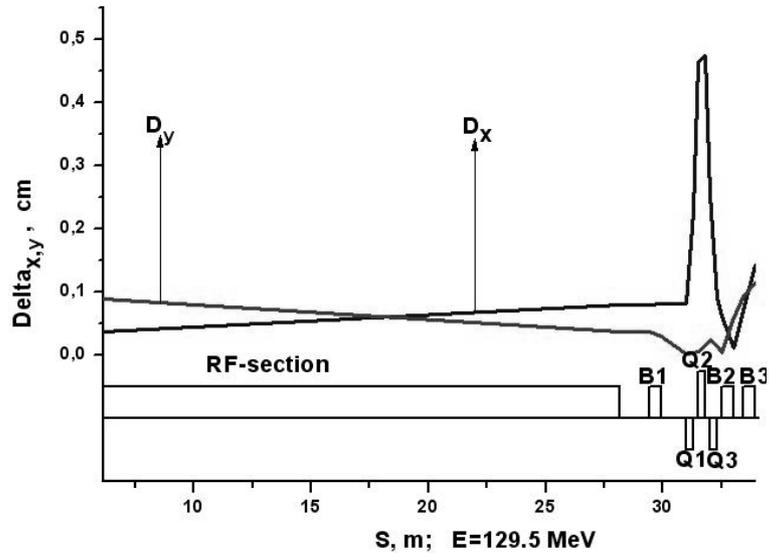


Рис. 5. Поперечные размеры пучка на тракте транспортировки от входа в ускоряющую секцию до выхода из рециркулятора.

Возможные каналы транспортировки $N1$, $N2$, $N3$ пучка на подкритическую сборку показаны на рис. 1. Поскольку эти каналы, кроме длины, не имеют принципиальных различий, достаточно рассмотреть транспортировку пучка по одному из них, например по каналу $N1$.

магнита $BV1$ на расстояние ~ 58 м со следующими параметрами: максимальный горизонтальный размер $\leq 1,7$ см, максимальный вертикальный размер $\leq 0,25$ см. На рис. 6 показаны вертикальная и горизонтальная огибающие пучка на тракте транспортировки.

Два квадрупольных триплета ($N1Q1 - N1Q6$) обеспечивают проводку пучка от магнита $B3$ до

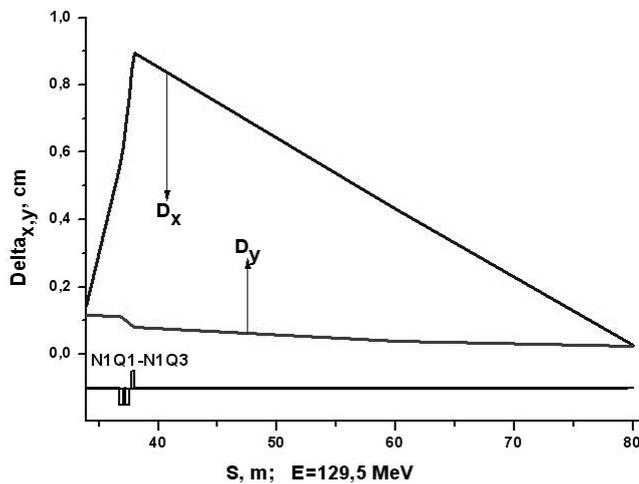


Рис. 6. Поперечные размеры пучка на тракте транспортировки от выхода из рециркулятора до входа в триплет $N1Q4-6$.

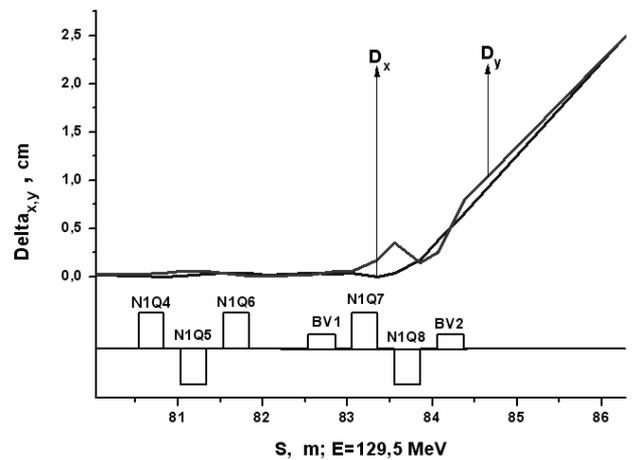


Рис. 7. Размеры пучка на оконечном участке тракта транспортировки пучка на мишень.

Два 45° -ных магнита $BV1$, $BV2$ (см. рис. 7) поворачивают пучок на 90° в вертикальной плоскости. При этом сечение пучка на входе в первый поворачивающий магнит минимально и близко к круглому, что обеспечивает минимальную вертикальную апертуру поворачивающих магнитов.

Затем пучок электронов мощностью ~ 130 кВт необходимо провести на нейтронообразующую мишень, расположенную на расстоянии 1,9 м от края магнита $BV2$ (расстояние определяется размерами емкости, в которой предполагается монтировать подкритическую сборку). При этом

размеры пучка на мишени должны быть такими, чтобы не допустить перегрева мишени и одновременно минимизировать потери пучка на стенках электропровода. При диаметре мишени 6 см диаметр пучка на ней должен быть ~ 5 см. В этом случае потери пучка на стенках вакуумной камеры не превысят 1 %.

Результаты численного моделирования прохождения пучка через магниты *BV1* и *BV2* показали, что при обеспечении требуемых размеров пучка на мишени с помощью только двух триплетов *NIQ1 - NIQ6* размер пучка в *BV1* магните составляет ~ 4 см, что требует вертикальной апертуры магнитов не менее 5 см. Использование в *BV*-магнитах краевой фокусировки позволяет уменьшить вертикальную апертуру, однако при этом утрачивается возможность регулировки размеров пучка на мишени. В связи с этим наиболее целесообразно, на наш взгляд, регулировать размеры пучка на мишени с помощью двух линз *NIQ7* и *NIQ8*, расположенных между магнитами *BV1* и *BV2*. В этом случае промежуток за магнитом *BV2* является неахроматическим. При $\Delta E/E \cong 10^{-4}$, как это имеет место в нашем случае, вклад энергетического разброса в размеры пучка на мишени не превышает ~ 1 мм. На рис. 7 приведены поперечные размеры пучка при прохождении участка канала транспортировки от линзы *NIQ4* до нейтронообразующей мишени. Данные кривые и соответствующая им магнито-оптическая структура являются типичными для всех предполагаемых каналов.

Расчеты нейтронно-физические характеристики подкритической сборки

На основе предполагаемых параметров электронных пучков рециркулятора «SALO» можно расчетными методами прогнозировать нейтронно-физические характеристики подкритических сборок, использующих этот ускоритель в качестве драйвера. Ввиду высокой частоты следования импульсов и непрерывного режима работы рециркулятора, обеспечиваемых его сверхпроводящими системами, в первом приближении мы будем рассматривать пучок как квазинепрерывный и изучим стационарный режим работы подкритической сборки при постоянной интенсивности внешнего источника нейтронов. В расчетах мы примем номинальные значения энергии электронного пучка 100 МэВ и мощности 100 кВт.

В настоящее время в ННЦ ХФТИ рассматриваются несколько вариантов конструкции управляемых электронными ускорителями подкритических сборок с эффективным коэффициентом размножения нейтронов $k_{eff} = 0,95 \dots 0,98$ [9]. Они представляют собой гетерогенные системы с водным замедлителем и предполагают использование низкообогащенного урана в качестве топливного материала. Также изучаются различные варианты конструкции и материалов нейтронообразующих мишеней (конвертеров): вольфрам, уран, свинец.

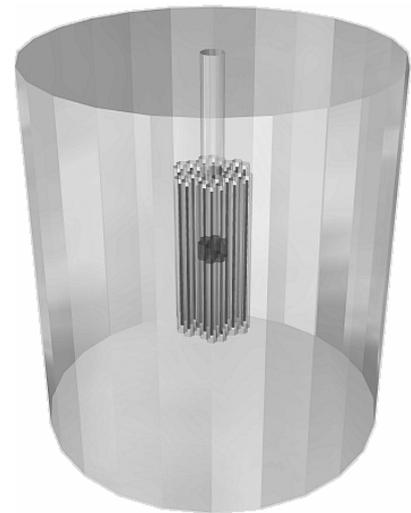
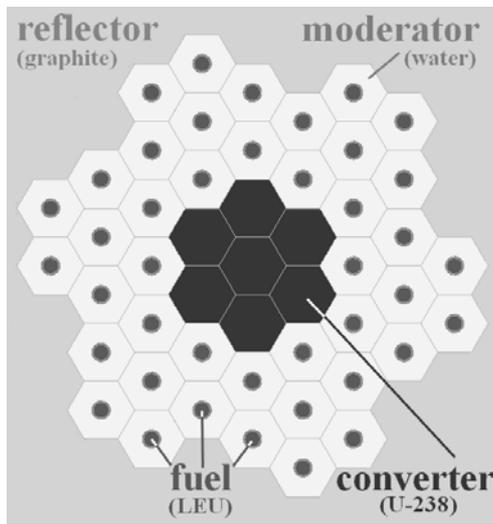


Рис. 8. Конструкция модельной подкритической сборки. Поперечное сечение сборки на уровне конвертера (*a* – компьютерная модель для программы *KENO-VI*) и общий вид сборки с каналом подвода электронного пучка (*б* – VRML-представление компьютерной модели для программы *RaT 3.0*).

Мы рассмотрим приведенную на рис. 8 несколько упрощенную модель одного из характерных вариантов конструкции сборки на основе

модифицированных топливных элементов реактора типа ВВЭР-1000 [12]. Сборка состоит из 42 цилиндрических топливных элементов ($\varnothing 0,772 \times$

× 45 см) в циркониевых оболочках толщиной 0,74 мм, плотностью 6,506 г/см³ и температурой 400 К. Топливные элементы содержат UO₂ (10,96 г/см³, 600 К) с обогащением 19,8 % по ²³⁵U. Они размещены в гексагональной решетке с шагом 2,8 см и окружены легководным замедлителем (¹H₂O, 0,9982 г/см³, 320 К). Графитовый (⁶C, 2,3 г/см³, 300 К) цилиндрический отражатель сборки (Ø 100 × 110 см) содержит коаксиальный (Ø 6,466 × 33 см) вакуумированный канал под-

вода электронного пучка, на конце которого расположена облучаемая нейтронообразующая мишень длиной 5 см, состоящая из семи плотно упакованных с шагом 2,8 см шестигранников из обедненного урана (²³⁸U, 19,1 г/см³, 400 К).

Для расчета k_{eff} системы и пространственных распределений плотности потока нейтронов $\Phi(\mathbf{r})$ в сборке нами применены методы Монте-Карло-моделирования транспорта излучения в трехмерных геометриях в рамках двух подходов (рис. 9).

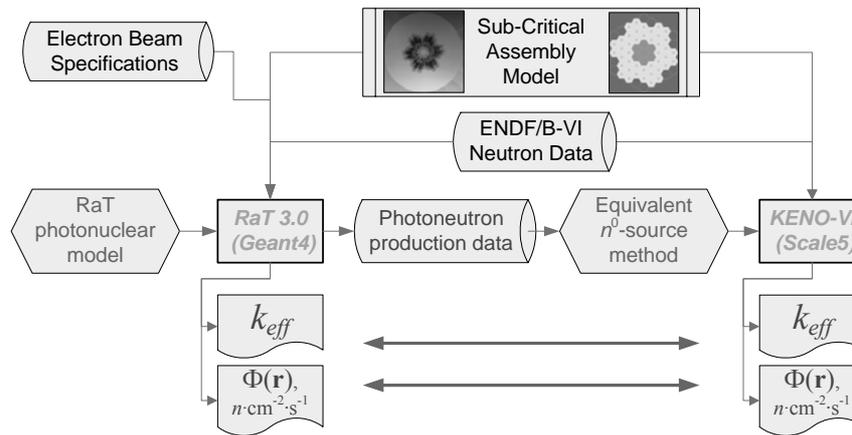


Рис. 9 Схема компьютерного эксперимента.

Первый из них состоит в использовании разработанного в ННЦ ХФТИ функционального аналога пакета MCNPX [13] – программы RaT [14], основанной на свободно распространяемых объектно-ориентированных библиотеках Geant4 Toolkit [15].

Программа RaT 3.0 обеспечивает совместное моделирование электрон-фотонных и адронных взаимодействий в гетерогенных средах. Транспорт нейтронов с энергиями свыше 10⁻⁵ эВ моделируется с учетом температурно-зависящих доплеровских сдвигов сечений на основе библиотек оцененных нейтронных данных G4NDL 3.8, включающей данные ENDF/B-VI, BROND, JENDL и др. Особенности упругого и неупругого рассеяния тепловых нейтронов на связанных атомах легких модераторов (H₂O, D₂O, CH₂, Be, BeO, графит, ZrH) учитываются программой в рамках S(α, β)-рассмотрения, основанного на данных ENDF/B-VI Release 8. Для расчетов критичности систем RaT 3.0 реализует алгоритмы анализа распределений нейтронов деления по поколениям и два метода статического расчета k_{eff} – аналоговый, основанный на экспоненциальной аппроксимации кривых заселенности поколений, и оптимизированный итерационный алгоритм, аналогичный режиму KCODE пакета MCNP. Фоторождение нейтронов в реакциях (γ , xn) и (γ , fis), индуцированных электрон-

фотонными ливнями в конвертере, моделируется в рамках специально разработанной фотоядерной модели RaT 3.0, сочетающей предравновесную и модифицированную нами равновесную испарительно-делительную модели фотоядерных реакций, верифицированные по оцененным данным библиотеки фотоядерных данных МАГАТЭ и литературным данным расчетов пакетом MCNPX. Электроядерные реакции моделируются на базе стандартно применяемой в Geant4 модели хирально инвариантного фазового пространства (Chiral Invariant Phase Space, CHIPS).

Второй подход основан на применении программы KENO-VI, одного из модулей поддерживаемого ORNL (США) коммерческого пакета SCALE5 – стандартного средства расчетного анализа систем с делящимися материалами, сертифицированного органами ядерного регулирования. Применительно к расчету управляемых ускорителями подкритических систем стандартные возможности программы KENO-VI исчерпываются наличием средств прецизионного расчета статической критичности системы (k_{eff}) [12]. KENO-VI не содержит средств моделирования электромагнитных процессов и фотоядерных реакций. Более того, встроенные алгоритмы программы вообще не поддерживают расчеты с внешними источниками нейтронов, каковыми являются фотонейтроны из конвертера подкритической сборки.

Указанные ограничения преодолены с помощью реализации предложенного нами в работах [12, 16] приближенного метода эквивалентного источника нейтронов для программы *KENO-VI*. Метод заключается в формировании задания для программы, в котором конвертер сборки заменяется топливной кассетой той же геометрии. Топливо в кассете обогащается по ^{235}U так, чтобы общее количество дополнительного ^{235}U обеспечило искусственную критичность системы, а его пространственное распределение – рассчитанное программой *RaT* распределение плотности рождения нейтронов. Нами показано, что искомые распределения нейтронного поля $\Phi(\mathbf{r})$ в подкритической ($k_{\text{eff}} < 1$) сборке однозначно связаны с рассчитываемой *KENO-VI* собственной функцией $\Psi(\mathbf{r})$ такой критической ($k_{\text{eff}} = 1$) псевдосисте-

мы. Метод также позволяет по выходным файлам *KENO-VI* рассчитать мощность сборки.

На рис. 10 представлены рассчитанные программой *RaT 3.0* исходные данные для применения метода эквивалентного источника – парциальные выходы фотонейтронов и полные (с учетом реакций (n, xn) и (n, fis)) выходы нейтронов из конвертера, а также энергетические спектры рождения фотонейтронов. Полное производство фотонейтронов в мишени при энергии пучка 100 МэВ составило $0,0608 \text{ n/e}^-$, что для номинальной мощности 100 кВт дает интенсивность источника $\approx 3,8 \cdot 10^{14} \text{ n/s}$. Энергетические спектры близки по форме к спектру деления, что служит обоснованием метода эквивалентного источника.

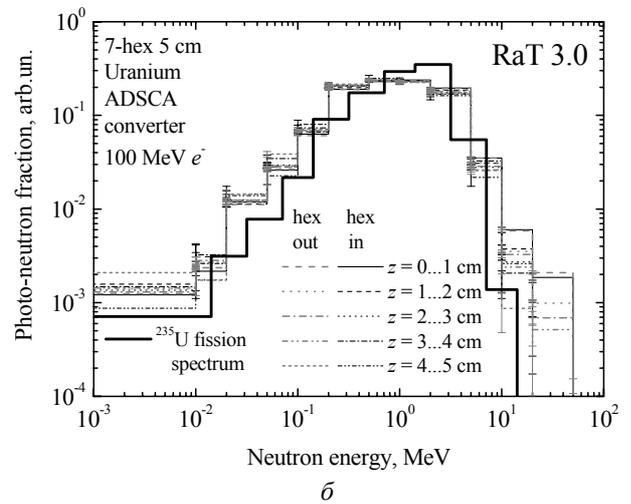
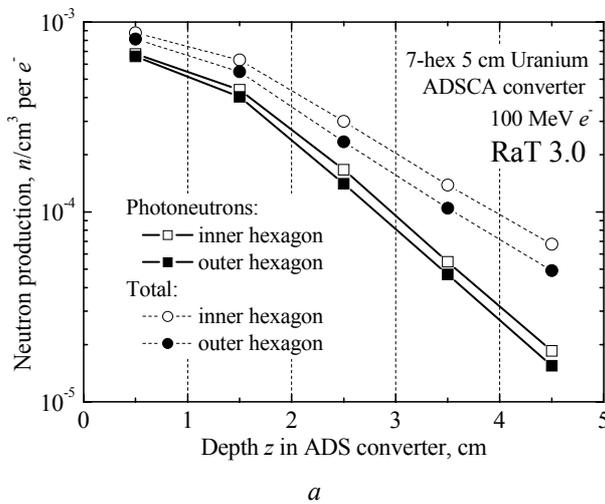


Рис. 10. Рассчитанные программой *RaT 3.0* пространственные распределения рождения фотонейтронов и полного производства нейтронов в конвертере сборки (а) и соответствующие энергетические спектры фотонейтронов в сравнении со стандартным спектром деления ^{235}U (б).

Результаты применения метода эквивалентного источника приведены на рис. 11. Как видно, метод позволяет с хорошей точностью воспроиз-

вести данные независимого моделирования фоторождения нейтронов в конвертере.

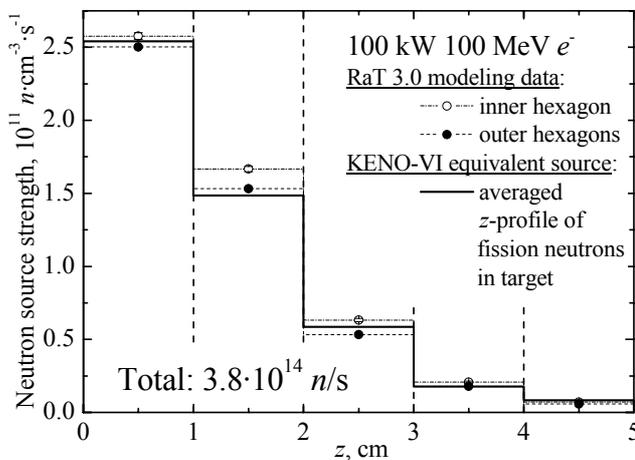


Рис. 11. Интенсивности источника фотонейтронов по данным моделирования *RaT 3.0* и в модели эквивалентного источника программы *KENO-VI*.

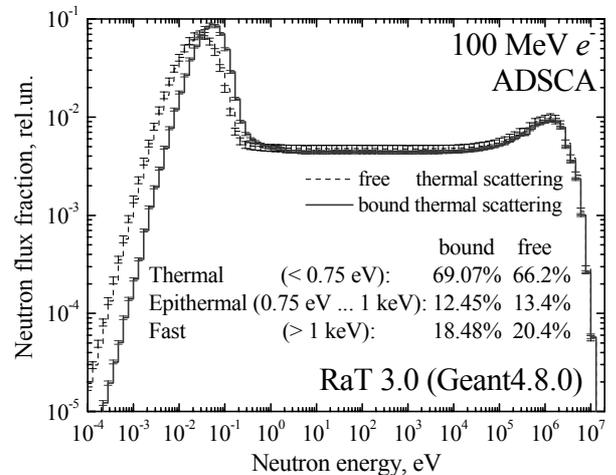


Рис. 12. Спектры нейтронов в сборке, рассчитанные *RaT 3.0* в моделях свободного и связанного рассеяния нейтронов в замедлителе и отражателе.

Различия в спектрах также оказываются не существенными, поскольку согласно результатам моделирования *RaT* (рис. 12) в подкритической сборке доминируют замедленные тепловые нейтроны.

Рассчитанный по стандартной методике программы *KENO-VI* эффективный коэффициент размножения нейтронов в сборке составил $k_{eff} = 0,980 \pm 0,001$. Ввиду доминирования тепловых нейтронов в спектре сборки это значение существенно определяется особенностями рассеяния тепловых нейтронов в легких материалах замедлителя и отражателя. Это подтверждено независимым расчетом k_{eff} программой *RaT 3.0*: при отсутствии учета эффектов рассеяния на связанных атомах этих материалов $k_{eff} = 0,997$, тогда как их учет приводит к значению $k_{eff} = 0,977 \pm 0,001$, весьма близкому к результату расчета *KENO-VI*.

Расчет *KENO-VI* методом эквивалентного источника дает значение полной мощности сборки в 326 кВт (т.е. коэффициент усиления мощности составляет 3,26). Это с точностью $\approx 3\%$ согласуется со значением 336 кВт, рассчитанным на основе промоделированных *RaT 3.0* пространственных распределений энерговыделения в подкритической сборке (рис. 13).

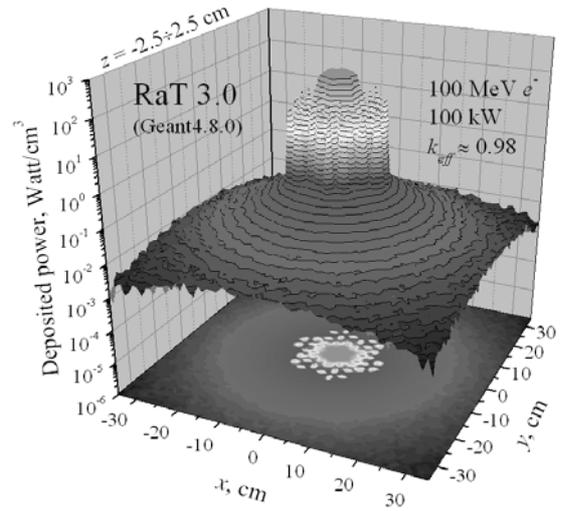


Рис. 13. Распределение плотности энерговыделения на уровне конвертера подкритической сборки.

С помощью программы *RaT 3.0* нами рассчитаны трехмерные пространственные распределения плотности потока нейтронов в стационарном режиме работы подкритической сборки (рис. 14). Как видно из рис. 15, результаты этого расчета хорошо согласуются с результатами расчета методом эквивалентного источника для стандартной программы *KENO-VI* пакета *SCALE5*.

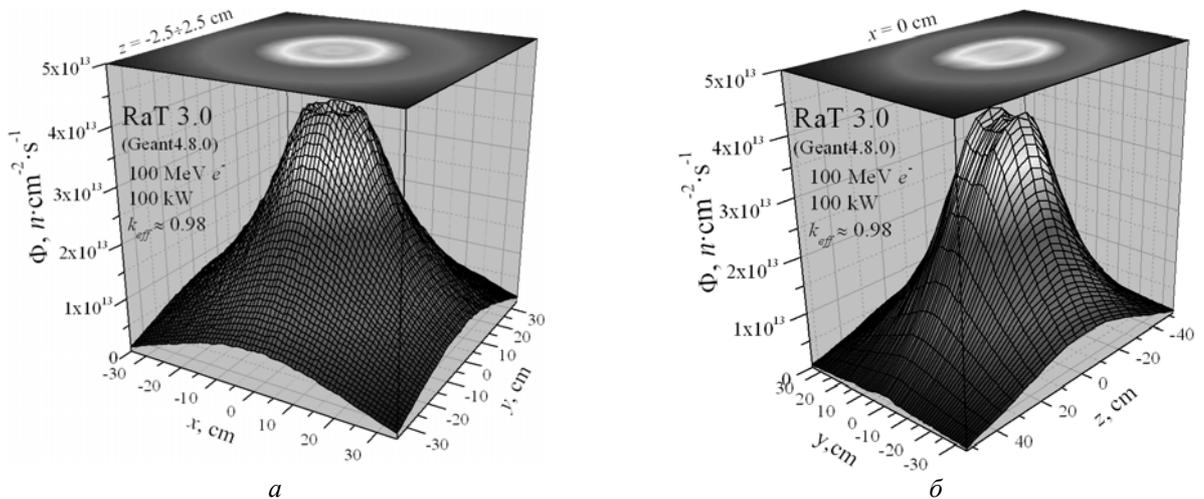


Рис. 14. Распределения плотности потока нейтронов в поперечном сечении подкритической сборки на уровне конвертера (а) и в плоскости, содержащей ось сборки (б).

Выводы

1. Рассмотренный в работе линейный ускоритель электронов со сверхпроводящими ускоряющими структурами позволяет получить квазинепрерывный электронный пучок с энергией 100 ... 130 МэВ и средней мощностью пучка на мишени 100 кВт. Вместе с использованием нейтронообразующей мишени из обедненного урана такая установка позволяет получить эффектив-

ный драйвер для подкритической сборки с полным потоком $3,8 \cdot 10^{14}$ фотонейтрон/с.

2. Расчеты, выполненные двумя независимыми методами, показывают, что для типичной конструкции подкритической сборки такие параметры драйвера обеспечивают характерные плотности нейтронных потоков $4 \cdot 10^{13}$ н/(см² · с) в активной зоне и $1 \cdot 10^{13}$ н/(см² · с) в графитовом отражателе сборки при коэффициенте усиления мощности около 3,3.

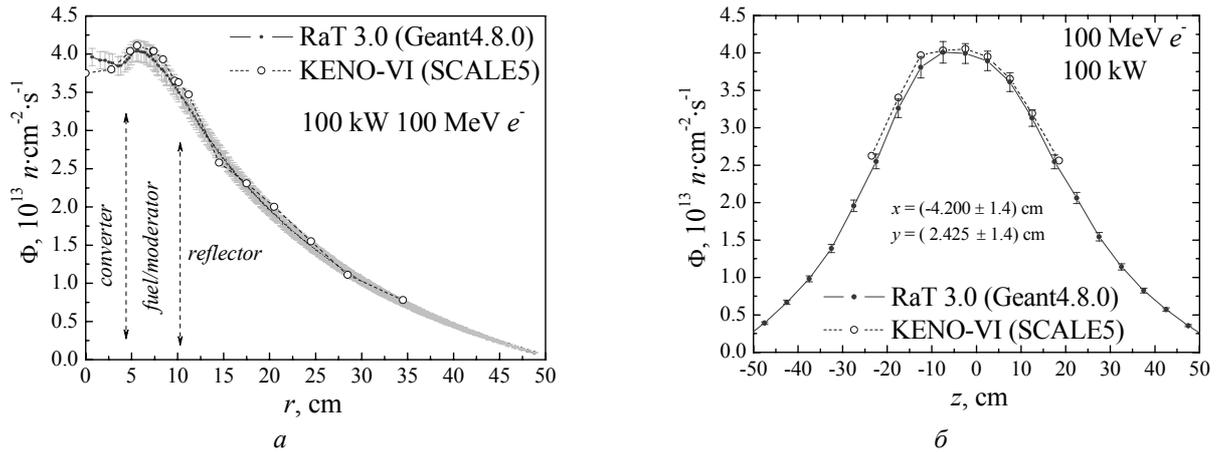


Рис. 15. Распределения плотности потока нейтронов в подкритической сборке, рассчитанные *RaT 3.0* и методом эквивалентного источника для программы *KENO-VI*: *a* – радиальное в плоскости на уровне конвертера, *б* – продольное на внутреннем кольце решетки топливных элементов.

3. Дополнительным преимуществом предложенной конструкции драйвера является непрерывный режим работы ускорителя (частота повторения 13 МГц), что позволяет смягчить усло-

вия функционирования нейтронообразующей мишени и других элементов конструкции подкритической сборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.energoatom.kiev.ua/ua/about_nngc/nngc
2. *Carminati F., Klapisch R., Revol J.P. et al.* An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator. - Geneva, 1993. - 72 p. (CERN/AT/93-47 (ET)).
3. *Roche C., Rubbia C.* Some preliminary Considerations on the Economical Issue of the Energy Amplifier. CERN/AT/95-45 (ET).
4. *Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 (ET).
5. *Аксенов В.Л.* Нейтронная физика на пороге 21 века // ЭЧАЯ. - 2000. - Т. 31, вып. 6. - С. 1303 - 1342.
6. *Лазарев Н.В., Козодоев А.М.* Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электроядерных установок // Атомная энергия. - 2000. - Т. 89, № 6. - С. 440 - 454.
7. <https://www.sns.gov/aboutsns/aboutsns.htm>
8. *Ridikas D., Safa H., Giacri M.-L.* Conceptual Study Of Neutron Irradiator Driven By Electron Accelerator // 7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product P&T (NEA/OCDE), Jeju, Korea, 14 - 16 Oct. 2002.
9. Матеріали українсько-американського семінару "Установка з підкритичною збіркою, керована прискорювачем часток". Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility". Україна, Харків, 24 - 25 лют. 2005 р. / Під ред. А. М. Довбні. - Харків: ННЦ ХФТІ, 2005. - 246 с.
10. *Arkatov Yu.M., Dovbnya A.N., Glamazdin A.V. et al.* "SALO" PROJECT. Kharkiv: NSC KIPT, 2005. - 104 с.
11. *Teichert J., Buetting H., Evtushenko P. et al.* A Superconducting Photo Injector with 3+1/2-cell Cavity for the ELBE Linac // Proc. of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland. - P. 333 - 335.
12. *Gann V.V., Dovbnya A.N.* Computer Modeling of Design for Neutron Source Subcritical Assembly // Proc. of Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Kharkiv, Feb. 24 - 25, 2005. - P. 33 - 37.
13. *Hendricks J.S., McKinney G.W., Waters L.S. et al.* MCNPX, Version 2.5E // LANL Report LA-UR-04-0569. Los Alamos, NM, Feb. 2004.
14. *Дюльдя С.В., Братченко М.И., Скоробогатов М.А.* RaT - многоцелевая программа моделирования дозиметрических величин методом Монте-Карло // Тез. докл. IV конф. по физ. высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 27 февраля - 3 марта 2006 г. - С. 80.
15. *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al.* Geant4 - a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2003. - Vol. 22, No. 3. - P. 250 - 303.
16. *Ганн В.В., Дюльдя С.В., Братченко М.И.* Моделирование нейтронных полей в управляемой ускорителем электронов подкритической сборке // Тез. докл. IV конф. по физ. высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 27 февраля - 3 марта 2006 г. - С. 55.

НАДПРОВІДНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПІДКРИТИЧНОЮ ЗБІРКОЮ

**М. І. Братченко, В. В. Ганн, І. С. Гук, А. М. Довбня, С. В. Дюльдя,
С. Г. Кононенко, Ф. А. Пєєв, О. С. Тарасенко, М. van der Wiel, J. I. M. Botman**

Розглядається можливість використання надпровідного лінійного прискорювача електронів як драйвера для створення прототипу майбутніх ядерних енергетичних установок із керованими підкритичними збірками. Прискорювач буде працювати в безперервному режимі з максимальною частотою повторення імпульсів 13 МГц. Максимальна енергія електронів у пучку становить 130 МеВ, середній струм – біля 1 мА. Для одного з можливих варіантів підкритичної збірки за допомогою програми *SCALE5* (ORNL, США) та розробленої в ННЦ ХФТІ на базі пакета *Geant4* програми *RaT 3.0* розраховано нейтронні поля, які утворюються в нейтроностворюючій мішені, активній зоні та рефлекторі збірки при енергії електронів 100 МеВ.

SUPERCONDUCTIVE ELECTRON ACCELERATOR FOR SUB-CRITICAL ASSEMBLY OPERATION

**M. I. Bratchenko, V. V. Gann, I. S. Guk, A. N. Dovbnya, S. V. Dyuldyia,
S. G. Kononenko, F. A. Peev, A. S. Tarasenko, M. van der Wiel, J. I. M. Botman**

The possibility of the application of superconducting electron linear accelerator as a driver for the prototype of future accelerator-driven nuclear power plants with sub-critical assemblies is considered. The linac will operate in continuous-wave mode with maximal pulse repetition rate of 13 MHz. The maximal electron beam energy will be 130 MeV with average current 1 mA. For selected design of sub-critical assembly the neutron fluxes inside the neutron production target, core and reflector have been calculated by means of the ORNL *SCALE5* code, as well as using the *Geant4*-based *RaT 3.0* code developed in NSC KIPT.

Поступила в редакцію 23.06.06,
после доработки – 20.06.07.