

УДК 537.5:530.182

## К ПРОБЛЕМЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ЯДЕРНО-ФОТОЯДЕРНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Дубас Л.Г.

*Национальный исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва,  
e-mail: sudarih@gmail.com*

Целесообразно представлена предполагаемая концепция ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка (УСЭП) для реализации фотоядерного реакторного каскада. Обобщается практический опыт моделирования, произведенный исследователями. Теоретически комплекс фотоядерного реакторного каскада с последующим бустерным каскадом установки позволит получать в режиме усиления и генерирования мгновенных нейтронов приемлемый максимальный нейтронный выход в случае одиночного фотоядерного импульса. Предполагается, что использование конструктивно выделенного инжектора УСЭП в режиме повторяющихся импульсов с дополнительной системой магнитной фокусировки электронов с эллиптическим поперечным сечением пучка позволяет оптимизировать режим работы фотоядерного реактора с целью существенного увеличения промышленной безопасности работы предполагаемого энергетического ядерного реактора. Приводятся численные результаты для целесообразной эллиптической формы цилиндрического ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка на выходе электронного инжектора и системы магнитной фокусировки, работающих в режиме повторяющихся импульсов, в зависимости от величины тока электронов и относительной ширины кольца в поперечном сечении электронного пучка. Результаты предлагаются в цилиндрическом приближении квазиламинарной, ультрарелятивистской модели сильноточного электронного пучка. Статья предназначена для специалистов по моделированию пучков заряженных частиц, используемых в ядерной технике.

**Ключевые слова:** каскадный реактор, многокаскадное усиление, фотоядерные нейтроны, электронный ускоритель, электронный инжектор

## TO A PROBLEM OF THE COMBINED NUCLEAR-PHOTONUCLEAR COMPLEX POWER PLANT

Dubas L.G.

*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, e-mail: sudarih@gmail.com*

The prospective expedient concept ultrarelativistic highcurrent electron beam (UHEB) for implementation photonuclear reactor cascade is presented. The practical experience of modeling yielded by researchers is extended. Theoretically the complex of a photonuclear reactor cascade with the subsequent buster reactor cascade of installation will allow to gain in a mode of amplification and generating of the instantaneous neutrons a comprehensible peak neutron yield in case of a single photonuclear impulse. It is supposed that use of constructively gated out injector of UHEB in a regime of repeating pulses with additional system of magnetic focusing of electrons with an elliptic cross-section of a beam allows to optimize a photonuclear reactor operating mode, and it essentially increases industrial safety of work of a prospective power nuclear reactor. Numerical results for the expedient elliptic form cylindrical ultrarelativistic highcurrent electron beam on an exit of an electron injector and system of the magnetic focusing, repeating pulses working in a regime, depending on a strength of electron current and relative width of a ring in a cross-section of an electron beam are resulted. Results are offered in cylindrical approach of the quasilaminar, ultrarelativistic model highcurrent electron beam. The article is intended for experts in modeling of beams of the charged particles used in the nuclear engineering

**Keywords:** the cascade reactor, a multicascade amplification, photonuclear neutrons, the electronic accelerator, electronic injector

Исследование научно-физических аспектов ядерных реакторов, связанных в нейтронном отношении, является интенсивно развивающимся направлением в современной физике [1]. Определенный интерес относится к так называемым бустерным системам типа подкритический реактор, работающий в режиме повторяющихся импульсов под контролем управляющего ускорителя частиц.

Ускорители заряженных частиц – это перспективная область взаимодействия с атомной наукой и техникой, где реакторные устройства каскадного типа могут найти достаточно широкое применение. При этом предполагается, что для уменьшения требований к параметрам внешнего источника нейтронов и для обеспечения высокого безопасного уровня работы

комбинированного реактора желательно использовать многокаскадное устройство с расходящейся волной ядерных делений, распространяющейся по каскадному реактору.

Цель данного исследования заключается в представлении об основных параметрах ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка (УСЭП) для фотоядерного реактора в предполагаемом комплексном комбинированном энергетическом реакторе в предположении некоторой конструкции подкритической активной зоны бустерного импульсного реактора. Для применения ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка предполагаются основные технические усовершенствования при модернизации фотоядерного каскадного

реактора. Планируются возможные режимы совместной работы бустерного импульсного реактора и безжелезного линейного индукционного ускорителя (БЛИУ) [2, 3]. Предполагаются возможные физико-технические характеристики предлагаемой системы электронный ускоритель + каскадный импульсный реактор, входящей в состав комплекса комбинированного реактора. Представлено достижение устойчивого функционирования двух сложных ядерно-физических установок; ультрарелятивистского линейного индукционного ускорителя электронов и каскадного комплекса комбинированного реактора в усиленном режиме.

Обычно в качестве источников нейтронного излучения для ядерных комплексов комбинированных ядерных энергетических реакторов используются реакторы, обеспечивающие генерацию и контроль повторяемых реакций деления атомных ядер. Эти реакторные устройства являются усилителями фото-ядерных нейтронных вспышек, которые создаются ультрарелятивистскими ускоренными электронами.

В частном случае быстрый реактор самогасящегося типа может иметь активную металлическую зону с большой плотностью потока и малой длительностью импульса нейтронов.

В режиме усилителя нейтронов реактор работает в качестве подкритической системы.

Во временных промежутках между импульсами электронного ускорителя импульсный ядерный реактор (ИЯР) работает в режиме затухающего генератора нейтронов с компенсацией избыточной реактивности. Причём временной режим спада импульса ядерных делений определяется некоторой величиной постоянной времени этого подсубкритического режима.

Предполагается, что использование концепции каскадных реакторных устройств позволяет перейти к такому подсубкритическому режиму работы энергетического ядерного реактора, который существенно увеличивает промышленную безопасность работы предлагаемого ядерного реактора.

Аналогичная система ЛИУ-30 + БР-1М апробирована в составе комплекса «Пульсар», состоящего из ядерно-физических установок во ВНИИЭФ [1, с. 11], где предлагается использование реактора БР-1М в качестве бустера в комплексе с электронным ускорителем ЛИУ-30. При этом ядерно-фотоядерные реакции могут произвести примерно  $\sim 1,4 \cdot 10^{16}$  нейтронов при полуширине длительности импульса 25 мкс, в режиме усиления и генерирования мгновенных нейтронов в случае одиночного фотоядерного импульса. Причём работа бустерного

реактора в режиме усилителя фотоядерных нейтронов происходит с коэффициентом умножения реакторной системы 2570 с приемлемой небольшой итоговой длительностью импульса ядерных делений.

Главные особенности экспериментальной конструкции активной зоны бустера БР-1М состоят в том, что все топливные элементы состоят из сплава молибдена (с массовой долей в сплаве до 10%) и обогащенного урана (с массовой долей изотопа U-235 в обогащенном уране до 90%). В этом случае значительно уменьшаются фазовые превращения в металлическом сплаве и увеличивается минимальное трансформационное время в сплаве для исходной фазы.

Причем масса топлива равна 176 кг. Активная зона имеет форму полого цилиндра. Размеры топлива равны следующим величинам: высота 26,6 см; внешний диаметр 26,8 см; диаметр осевой полости 11,6 см. Активная зона состоит из 4 блоков: верхнего, нижнего, регулирующего и импульсного. Топливные элементы в блоках заключены в чехлы из нержавеющей стали, которые заполнены гелием.

Активная зона бустера БР-1М в верхнем и нижнем блоках разделена на 4 ряда коаксиальных, свободно подвешенных, незакрепленных колец. При этом 2 ряда по 5 топливных элементов – в верхнем блоке. Причем ряд из 5 и ряд из 2 топливных элементов – в нижнем блоке.

Механические напряжения, обусловленные тепловым ударом, уменьшаются при таком расположении топливных элементов.

Для увеличения нейтронного выхода резонансных фотоядерных реакций, с целью возможного проектирования комбинированной ядерной электростанции, целесообразно увеличить энергетику системы. Например, нужно увеличить максимальную энергию ускоренных электронов до  $\sim 70$  МэВ и длительность импульса времени до  $\sim 0,07$  мкс при токе до  $\sim 100$  кА с частотой следования от  $\sim 0,02$  Гц для предполагаемого ультрарелятивистского линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-70.

В конструктивном результате в ускорителе целесообразно выделить инжектор, использующий эллипсоидальный эмиттер электронов, с ускорением энергии электронов до  $\sim 7$  МэВ и с последующей системой импульсной магнитной фокусировки ультрарелятивистского высокоэнергетического электронного пучка (УСЭП), работающих в режиме повторяющихся импульсов.

Причем желательно возможное модельное обоснование многокаскадного усиления нейтронов, например, с эффективным применением модели нейтронной кинетики,

с использованием решения задач численно-го моделирования для процессов нестационарного переноса нейтронов в реакторных установках каскадного типа.

По аналогии с [1, с. 11] этот ядерно-физический комплекс фотоядерного реакторного каскада с последующим бустерным каскадом установки теоретически позволит получать в режиме усиления и генерирования мгновенных нейтронов приемлемый максимальный нейтронный выход в случае одиночного фотоядерного импульса.

При этом максимально возможное значение эффективной энергетической мощности бустерного реактора в частотном квазистационарном режиме не должно превышать  $\leq 50$  кВт. Выбор возможных частот для работы реактора в режиме квазистационарных повторяющихся импульсов должен быть равен  $\sim N \cdot 0,02$  Гц (где  $N \leq 50$  – натуральное число) в синхронном соотношении с фотоядерным периодическим облучением. Различные значения частот для возможных разных режимов работы бустера должны определяться практически.

Для опытных испытаний инжектора ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка эллиптического сечения в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» возможно использование установки «Стенд-300»,

в предположении необходимой модернизации в ускорительной модификации.

Для уменьшения влияния собственного магнитного поля на формирование электронного потока в инжекторе эллиптического электронного пучка целесообразно использовать эллипсоидальный эмиттер электронов.

Рассмотрим приближенную ультрарелятивистскую квазиламинарную модель электронного потока [4]. В качестве приближенного примера выпишем уравнения для распределения продольной компоненты векторного электромагнитного потенциала для электрически токового цилиндра эллиптического кольцевого сечения.

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial^2 y^2} = -j; j = \frac{j_z}{1356A}, \quad (1)$$

где  $j_z$  – продольная компонента плотности электрического тока;

$A_z$  – продольная компонента электромагнитного потенциала;

$x, y$  – поперечные декартовы координаты.

Здесь скорость электрона нормирована на скорость света в вакууме, при этом электромагнитный потенциал нормирован на напряжение покоя свободного электрона и представлен в безразмерном виде. Рассмотрим преобразование уравнения (1) к координатам эллиптического цилиндра [5].

$$\begin{cases} x = c \cdot chu \cdot \cos v \\ y = c \cdot shu \cdot \sin v \end{cases} \frac{\partial^2 A_z}{\partial^2 u^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial^2 v^2} = -j_0; j_z = \frac{j_0 \cdot 1356A}{c^2 (sh^2 u + \sin^2 v)}; c = \text{const}, \quad (2)$$

где  $u, v$  – радиальная и угловая эллиптические координаты.

Рассмотрим решение однородное по угловой эллиптической координате.

$$A_z = -\frac{1}{4} j_0 a^2 = -1; J = 8,52 kA \cdot j_0 \cdot a, \quad (3)$$

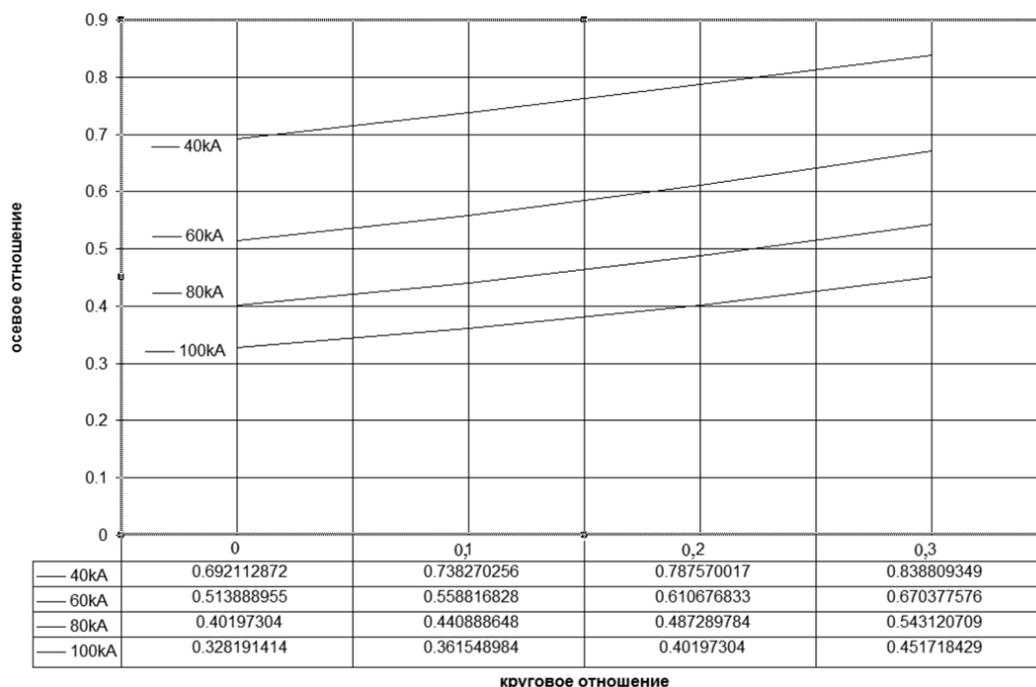
где  $(a + b)$ ,  $b$  – эллиптические внешний и внутренний радиусы частного трубчатого потока,  $j_0$  – плотность тока в эллиптических координатах,  $J$  – электрический ток.

В соответствии с моделью ультрарелятивистского электронного потока (2) систематическая девиация энергии ускоренных электронов определяется изменением вели-

чины продольной компоненты векторного потенциала, которую из соображений практической целесообразности следует ограничить некоторой величиной равной, например, напряжению покоя для свободного электрона в рассматриваемом частном решении (3). Это ограничение позволяет определить отношение малой к большой оси эллиптического поперечного кольцевого сечения с током до  $J = 100$  кА. Для простоты ограничимся приближением для частного варианта отношения малого радиуса к большому радиусу кольца в поперечном сечении малой полуоси эллипса равного нулю в эллиптических координатах, предполагая возможность получения приближенной величины.

$$\frac{b}{(a+b)} = 0; \frac{x_0}{y_0} = th(a+b); \frac{x_0}{y_0} \approx \begin{cases} 0,69211; J = 40, \\ 0,51389; J = 60, \\ 0,40197; J = 80, \\ 0,32819; J = 100. \end{cases} \quad (4)$$

Указанные величины соответствуют частному случаю сплошного пучка.



*Зависимость осевого отношения радиусов эллиптического поперечного сечения от кругового отношения радиусов цилиндрического пучка и таблица результатов расчета сплюснутости эллипса поперечного сечения для разных величин тока*

На рисунке приведены графики зависимости осевого отношения радиусов эллиптического поперечного сечения от кругового отношения радиусов цилиндрического пучка для разных величин тока на основе встроенной таблицы значений.

Следует заметить, что в соответствии с результатами, изложенными на рисунке, по мере увеличения тока и уменьшения кругового отношения радиусов кольца в сечении цилиндрического пучка эллипс цилиндрического пучка становится более сплюснутым в поперечном сечении пучка.

В частном случае сплошного пучка существуют некоторые сингулярности для плотности тока (2) в двух точках фокусов эллипса поперечного сечения. Поэтому режим сплошного эллиптического потока должен отсутствовать в практическом использовании.

Предполагается, что комбинированный ядерно-фотоядерный комплексный генератор нейтронов может использовать оптимизацию системы фокусировки для электронного пучка.

Предположим гипотетически, что оптимизация фотоядерной микровспышки с использованием оптимизации системы магнитной фокусировки для электронного пучка позволяет приблизиться к приемлемому прикладному решению комбини-

рованного процесса ядерно-фотоядерной комплексной ядерной реакции для электростанции.

Глобальное электрическое соединение между локальными промышленными сетями для электростанций позволяет понижать неопределенность электропитания, связанную с суточными колебаниями потребления энергии.

Предположим, что соответствующую глобальную линию передачи электроэнергии можно рассматривать как некоторую передачу электроэнергии на пониженной частоте между обычными промышленными сетями электропитания.

Пусть, например, результат унификации пониженной частоты для переданной энергии переменного тока принимает некоторый целесообразный выбор равный 10 Гц.

Гипотетически, для генерации мощности на этой пониженной частоте могут быть использованы комбинированные ядерно-фотоядерные комплексные электростанции.

### Заключение

Во ВНИИЭФ апробирован ускоритель ЛИУ-30 для реализации фотоядерного реакторного каскада. При теоретическом обобщении результатов получают возможные рекомендации с целью усовершенствования прототипа ускорителя

ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка (УСЭП), предназначенного для фотоядерного реакторного каскада. При этом фотоядерный реактор связан с каскадным бустерным ядерным реактором. Предполагаемые рекомендации приводят к увеличению энергии ускоренных электронов и увеличению длительности импульса электронного пучка. В предполагаемом инжекторе ультрарелятивистского сильноточного электронного пучка целесообразно использовать пучок электронов с эллиптическим поперечным сечением, эмитируемый с эллипсоидального эмиттера электронов.

### Список литературы

1. Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции. Т. 1 / Под ред. С.В. Воронцова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2016. 446 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://book.sarov.ru/product/reaktor-v1-2015/> (дата обращения: 20.02.2019).
2. Винтизенко И.И. Линейные индукционные ускорители. М.: Физматлит, 2016. 304 с.
3. Винтизенко И.И. Линейные индукционные ускорители для релятивистских СВЧ приборов. М.: Физматлит, 2012. 408 с.
4. Дубас Л.Г. Доускорение релятивистского электронного потока. // Журнал Технической физики. 1989. Т. 59. № 12. С. 123–126 [Электронный ресурс]. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/31029> (дата обращения: 20.02.2019).
5. Weisstein Eric W. Elliptic Cylindrical Coordinates. A Wolfram Web Resource [Электронный ресурс]. URL: <http://mathworld.wolfram.com/EllipticCylindricalCoordinates.html> (дата обращения: 20.02.2019).