

## **Безопасный ядерный реактор с внешним генератором нейтронов на базе ускорителя протонов на средние энергии**

А.А. Глазков, А.Н. Диденко, А.Д. Коляскин

*Московский государственный инженерно-физический институт, Россия*

Возможность повторения чернобыльской аварии и опасность несанкционированного распространения оружейного плутония активизировали проведение в различных лабораториях исследований по созданию безопасных атомных электростанций. В появившемся в научной печати последних лет большом количестве публикаций [1-17] обсуждается, по сути дела, одна концептуальная схема, состоящая из подкритического ядерного реактора, объединенного с мощным генератором нейтронов.

Рабочий режим реактора осуществляется за счет дополнительных нейтронов, вырабатываемых генератором и вводимых в активную зону реактора. Безопасность эксплуатации энергетической системы обусловлена малой инерционностью генератора. Это дает возможность оперативного контроля за суммарным потоком нейтронов в реакторе, а при необходимости и создание за короткое по сравнению с традиционными методами время дефицита нейтронов. Наличие внешнего источника нейтронов способствует также более полному выгоранию топлива и увеличению периода его загрузки.

Как известно, в настоящее время плутоний начинает вовлекаться в топливный цикл ядерных реакторов, и этот процесс будет наращиваться. Неизбежным следствием этого в первой половине следующего столетия станет интенсивное накопление трансплутониевых радионуклидов, высокотоксичных и трудно сжигаемых в современных критических реакторах. Использование подкритической электроядерной установки для решения этой проблемы имеет такие преимущества, которые трудно переоценить.

Основным отличием рассматриваемых авторами гибридных схем являются разные типы нейтронных генераторов. Однако в подавляющем большинстве работ обсуждаются генераторы, основными составляющими которых являются высокочастотный резонансный ускоритель протонов на энергию 1 ГэВ и мишень, расположенная в активной зоне ядерного реактора или в непосредственной близости от нее. Выбор протонов в качестве ускоряемых частиц обусловлен сравнительно малой наводимой активностью, вызываемой попаданием частиц на стенки элементов канала транспортировки пучка, хотя и эти потери должны быть минимизированы.

Количество требуемых дополнительных нейтронов  $N_g$ , вводимых в активную зону в единицу времени, в зависимости от мощности реактора и величины коэффициента размножения нейтронов может составлять  $(1-10) \cdot 10^{18}$  н/с. Так как получение такого количества нейтронов потребует определенных энергозатрат, то в конечном итоге платой за безопасность будет некоторое снижение коэффициента полезного действия атомной станции. Поэтому минимизация эксплуатационной энергоемкости нейтронного генератора становится принципиальной задачей.

Выражение для  $N_g$  имеет вид

$$N_g = P_r N_f (1-k)/(W_o k_r k), \quad (1)$$

где  $P_r$  – электрическая мощность реактора,  $N_f$  – число нейтронов, рождающихся в одном акте деления ( $N_f \approx 2,4$ ),  $W_o$  – энергия, выделяющаяся в одном акте деления,  $k_r$  – коэффициент преобразования тепловой мощности реактора в электрическую,  $k$  – коэффициент размножения нейтронов.

Ток пучка на мишени  $I$  при условии, что все рождающиеся на мишени нейтроны участвуют в ядерных реакциях, определяется из соотношения

$$I = e N_g / N_t(E), \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $N_t$  – выход нейтронов из мишени, зависящий от материала мишени и энергии бомбардирующих частиц  $E$ .

Выход нейтронов из мишени является важным параметром для нейтронного генератора, так как он определяет токовую нагрузку ускорителя и в значительной мере его энергоёмкость. Выход  $N_t$  желательно иметь как можно большим. Мощность пучка  $P \sim P_r / N_{norm}$  ( $N_{norm} = N_t / E$ ) минимальна, если энергия протонов соответствует максимуму кривой  $N_{norm}(E)$ , который для мишеней с большим выходом расположен в районе 1 ГэВ (см., например, [18]). Там же достигает максимума и отношение  $G_1 = P_r / P$ .

При выборе энергии ускоренных частиц предлагается рассмотреть поведение энергетического выигрыша  $G(E) = P_r / P_{acc}$ , ( $P_{acc} = P / k_{acc}$  – мощность высокочастотного питания ускорителя). Выражение для коэффициента полезного действия ускорителя  $k_{acc}$  имеет известный вид [19]:

$$(k_{acc})^{-1} = 1 + g / (2IR_{sh} T^2 \cos^2(\varphi)), \quad (3)$$

где  $g$  – темп ускорения,  $R_{sh}$  – усредненное шунтовое сопротивление резонаторов,  $T$  – эффективность ускоряющих зазоров,  $\varphi$  – фаза синхронной частицы.

На рис.1 представлены зависимости  $G(E)$  для реакторов различных мощностей  $P_r$  (кривые 1-5) и  $G_1(E)$  (кривая 6), при следующих исходных данных: материал мишени – свинец,  $k=0.98$ ,  $R_{sh}=80$  МОм/м и  $g=2$  МэВ/м,  $T=0.7$ ,  $\varphi=-45^\circ$  и не зависят от  $E$ .

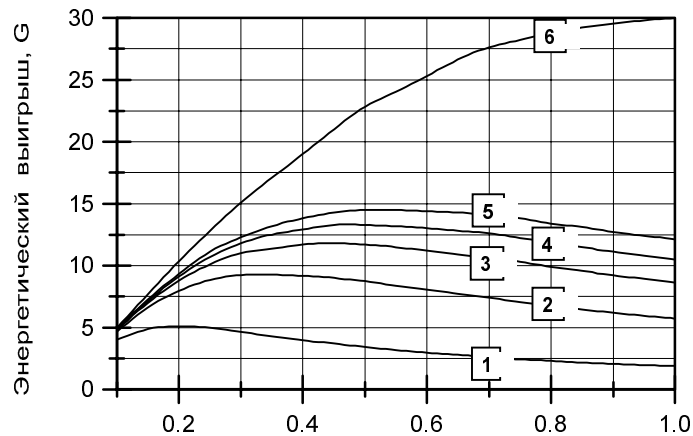


Рис.1  $G$  для различных  $P_r$ , ГВт:  
(1)-0.10;(2)-0.35;(3)-0.60;(4)-0.80;(5)-1.0;(6)- $G_1$

Функция  $G_1$  не зависит от  $P_r$ , и ее график с точностью до постоянного множителя повторяет кривую  $N_{\text{norm}}(E)$ . В максимуме  $G_1(E)$  достигает приблизительно 30. Наличие максимумов на кривых 1-5, причем смещенных в область энергий, меньших 1 ГэВ, объясняется конкурирующим характером поведения функций  $N_i(E)$  и  $k_{\text{acc}}(I)$ . Кривую  $G_1(E)$  можно рассматривать как предельную, к которой стремятся кривые  $G(E)$  с увеличением  $P_r$ . Для мощностей  $P_r=0,1-1,0$  ГВт оптимальные значения  $G_{\text{opt}}$  и  $E_{\text{opt}}$  лежат в диапазонах 4,9–14,5 и 0,18–0,5 ГэВ соответственно. Средний ток пучка составляет 50–90 мА, а КПД ускорителя – 55-65%.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Во-первых, реализация гибридной схемы АЭС энергетически выгоднее для реакторов с большей мощностью.
- Во-вторых, даже для случая  $P_r=1$  ГВт требуемая энергия ускоренного пучка составляет 0.5 ГэВ, что в два раза меньше обычно рассматриваемой.

### Список литературы

1. Petrov Yu.V. a New Concert of Nuclear Fission Reactor Safety. Препринт ЛИЯФ АН СССР, №144, Л., 1991.
2. Carminati F., Klipisch R. Revol J.P.e.a. An Energy Amplifier and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particule Beam Accelerator. Preprint CERN/AT/93-47(ET), 1993.
3. Rubbia C., Mandrillion P., Fietier N. A High Intensity. Accelerator for Driving the Energy Amplifier for Nuclear Energy Production.Proceedings of the 1994 International Linac Conference, August 21-26, 1994, Tsucuba, japan, p.270-272.4. Ado Yu.M., Kryuchkov V.P., Lebedev V.N. Power Production by Atomic Power-Station Based jn High Intensings of the 1994 International Linac Conference, August 21-26, 1994, Tsucuba, Japan, p. 267-269.
5. Адо Ю.М., Крючков В.П., Лебедев В.Н. Энергетический подкритический реактор с подсветкой пучком ускоренных протонов. Атомная энергия6 1994, т.77, вып.4, с.300-308.
6. Казарицкий В.Д., Благоволин П.П., Младов В.Р. Подход к тепловому реактору, работающему от ускорителя и потребности в улучшении ядерных данных. Препринт ИТЭФ, 32-94, Москва 1994.
7. Басов Н.Г., Субботин В.И., Феокистов Л.П. Ядерный реактор с лазерным термоядерным источником нейтронов. Вестник РАН, №10, т.63, 1993, с.878-884.
8. Колесов В.Ф., Штарев С.К., Хоружий В.Х, Житник А.К. Эффективность электроядерного устройства с бланкетом на расплавленных солях и нептуниевой размножающей мишенью. Атомная энергия, 1995, т.79, вып.1, с.40-45.
9. Алексеев П.И., Игнатъев В.В., Коляскин О.Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. Атомная энергия, 1995, т.79, вып.4, с.327-337.
10. Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier.Preprint CERN/AT/ 95-44(ET), 1995.
11. Fietier N., Mandrillion P. A Three-Stage Cyclotron for Driving the Energy Amplifier. Preprint CERN/AT/95-44(ET)0,1995.

12. Fernandez R., Mandrillion P., Rubbia C. and Rubio J.A. A Preliminary Estimate of the Economic Impact of the Energy Amplifier. Preprint GERN/AT/96-01(EET0, 1996.
13. Stavisky Yu. Ya. Subcritical Nuclear Reactors Driven with High-Current Proton Accelerators. Preprint INR-0901/95, Москва.
14. Глазков А.А., Диденко А.Н., Коляскин А.Д. и др. Концепция безопасной АС с подкритическим реактором и ускорителем протонов на энергию 100 МэВ. Проблемы безопасности ядерно-энергетических установок, 9-й семинар по проблемам физики реакторов. Москва, "Волга", 4-8 сентября 1995, т.2, с.211-213.
15. Глазков А.А., Диденко А.Н., Коляскин А.Д. и др. Оценка параметров безопасной АЭС с подкритическим реактором и нейтронным генератором на базе ускорителя протонов на энергию 100 МэВ. Препринт ГНЦ РФ-ФЭИ-2463, Обнинск-1995.
16. Glazkov A.A., Didenko A.N., Koljaskin A.D. e.a. Conception of Secure Atomic Energy Plant with Subcritical Reactor and 100 MeV Proton Accelerator. European Accelerator Conf. (EPAC96), Abstracts.
17. Туманян А.Р., Худавердян А.Г. Подкритичный реактор средней мощности, управляемый ускорителем. Атомная энергия, 1995, т.79, вып.1.
18. Дементьев А.В., Соболевский Н.М., Ставиский Ю.Я. Выход нейтронов из протяженной свинцовой мишени под действием протонов с энергией от 0.1 до 100 ГэВ. Препринт ИЯИ 0879/95, Москва.
19. Линейные ускорители ионов. Т.2. Основные системы. под редакцией Б.П. Мурина, Москва. Атомиздат. 1978.