

УДК 539.17

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ДЛЯ ОДНОРЕАКТОРНОЙ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ

С.А. БЗНУНИ, В.М. ЖАМКОЧЯН, А.Г. ХУДАВЕРДЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 25 ноября 2002 г.)

Исследованы геометрические компоновки реакторов типа ВВЭР, обеспечивающие повышение среднего значения нейтронного потока в подкритических режимах. Показано, что использование цилиндрического кадмиевого экрана необходимого радиуса приводит к существенному увеличению предельной выделяемой мощности при достаточных уровнях подкритичности и стандартных конструктивных элементах активной зоны.

В работах [1-4] рассматривались однореакторные подкритические электроядерные системы на основе современных энергетических реакторов. Было, в частности, показано, что существует принципиальная возможность создания достаточно экономичной подкритической атомной станции с использованием реакторных блоков типа ВВЭР, при их минимальной реконструкции. В то же время, при уровне подкритичности, обеспечивающем безопасный режим работы станции ($k_{эф} = 0,98$ [5]), такие системы не позволяли выводить реакторные блоки на мощность, соответствующую их исходному номинальному режиму. Так, максимальные электрические мощности электроядерных систем на основе реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при $k_{эф} = 0,98$ составляли соответственно лишь 252 и 459 МВт, с возможностью их роста для реакторов с уменьшенным радиусом активных зон [2,4].

Предложенные далее в работах [6-11] двухреакторные подкритические комплексы обладали рядом уникальных характеристик (по экономичности, выделяемой мощности и уровню подкритичности), достигнутых за счет применения реактора-бустера на быстрых нейтронах. Очевидно, однако, что подобное усложнение конструкции электроядерной системы не всегда может оказаться оправданным, особенно, если учесть прогресс в проектировании сильноточных ускорителей [12]. В принципе, при достаточных уровнях подкритичности и выделяемой мощности, увеличение доли энергии, потребляемой ускорительным блоком, с долей процента [6,7] до нескольких процентов от энергии, вырабатываемой реактором, может оказаться вполне приемлемым, если это достигается в простой однореакторной схеме.

Целью данной работы был анализ возможностей электроядерных сис-

тем, включающих реконструированные реакторы типа ВВЭР, без использования промежуточных реакторов-бустеров. Следует отметить, что выбор именно этого типа реакторов обусловлен результатами работ [2,4]. В частности, для реакторов типа MSBR-1000 нет необходимости в какой-либо дополнительной доработке при использовании в однореакторной схеме ввиду весьма высоких выходных данных систем на их основе [2,4]. С другой стороны, согласно тем же результатам, тяжеловодные реакторы типа CANDU наименее приспособлены для работы в подкритическом режиме и, по-видимому, могут использоваться в электроядерных системах лишь совместно с быстрыми бустерами [6,7,11]. Что касается реакторов типа ВВЭР, то они занимают некоторое промежуточное положение и, как показано ниже, при определенной реконструкции допускают существенное улучшение выходных данных в режиме работы с ускорителями.

На рис.1 представлена схема однореакторной подкритической установки, управляемой протонным ускорителем.

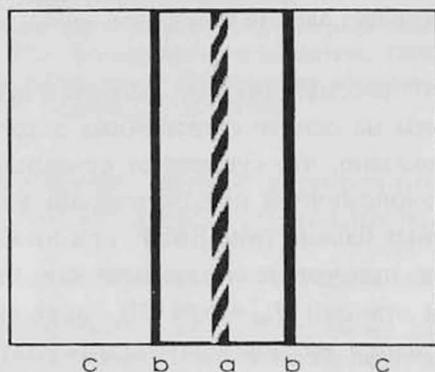


Рис.1. Схема однореакторной подкритической установки.
a – пассивная мишень, *b* – кадмиевый экран, *с* – активная зона реактора.

Пассивная мишень *a* (природный уран) бомбардируется пучком протонов из ускорителя и является источником внешних нейтронов для активной зоны *с* водо-водяного реактора, работающего в подкритическом режиме. Цилиндрический кадмиевый экран *b* введен в схему для улучшения формы распределения нейтронного потока в зоне *с* при заданном значении коэффициента размножения k_{eff} (см. [4]). Объем пространства между *a* и *b* функционально не является частью активной зоны, это может быть воздушный или какой-либо иной зазор с элементами системы охлаждения мишени и т. п.

В эффективном одногрупповом приближении стационарное уравнение диффузии нейтронов для активной зоны *с* имеет вид

$$\Delta\Phi + \frac{k_{\infty} - 1}{M^2} \Phi = 0, \quad (1)$$

где Φ – скалярный поток нейтронов, k_{∞} и M^2 – коэффициент размножения и площадь миграции нейтронов для данной среды.

Граничное условие на внешней поверхности кадмиевого экрана записывается в виде

$$j = [\Phi/4 - \frac{D}{2} \partial\Phi/\partial r]_{r=r_0}, \quad (2)$$

где j – плотность потока быстрых нейтронов, излучаемых поверхностью экрана в направлении активной зоны, D – коэффициент диффузии для среды активной зоны, r_0 – внешний радиус экрана. Условие (2), справедливое в приближении Фика, учитывает прозрачность кадмиевого экрана для быстрых нейтронов, выбиваемых из мишени, и его “черноту” для тепловых нейтронов из зоны s .

Максимальная электрическая мощность подкритического реактора может быть определена из условия

$$\Phi(r) \leq \Phi_{\max}(0), \quad (3)$$

где $\Phi_{\max}(0)$ – максимальный поток нейтронов при работе того же реактора в номинальном критическом режиме.

Другой стандартной характеристикой, используемой для оценки эффективности работы электроядерной системы, является коэффициент усиления энергии (или коэффициент выигрыша),

$$G = W_{el} / W_{acc}, \quad (4)$$

где W_{el} – электрическая мощность, вырабатываемая системой, W_{acc} – мощность, потребляемая ускорительным блоком.

Если, как и в [2-4], принять, что распределение по вертикальной координате для плотности потока j имеет вид, близкий к $j = j_0 \cos(\pi z/H)$ (H – экстраполированная высота активной зоны), то математически задача определения параметров подкритических режимов рассматриваемой установки становится практически эквивалентной задаче [2]. Единственное отличие заключается в том, что величина r_0 в данной задаче соответствует радиусу кадмиевого экрана, который может существенно превосходить радиус мишени. По этой причине мы опускаем дальнейшие выражения для скалярного потока Φ и коэффициента усиления G (см. выражения (3)-(9) работы [2]).

Как уже указывалось, основным недостатком подкритических систем на основе водо-водяных реакторов является недостаточный коэффициент выделяемой мощности, обусловленный (при приемлемых значениях k_{eff}) резко спадающей формой распределения нейтронного потока [2,4]. Если иметь в виду изменение геометрической конфигурации активной зоны, то относительное выравнивание поля нейтронного потока при заданной подкритич-

ности может быть достигнуто как за счет уменьшения эффективного радиуса R активной зоны, так и за счет увеличения радиуса кадмиевого экрана r_0 при неизменных внешних размерах зоны. Первый из указанных способов вкратце обсуждался в [2,4]. Напомним, что одновременно он предполагал сохранение исходной суммарной массы M_a активного изотопа в реакторе, т.е. увеличение среднего обогащения ρ .

В данной работе эффект уменьшения R рассчитывался для подкритического реактора на базе ВВЭР-1000 при фиксированном $r_0=10$ см и $k_{eff}=0,98$. Энергия ускоренных протонов здесь и ниже принималась равной $T_p=960$ МэВ, с выходом нейтронов из урановой мишени $n=38$ нейтрон/протон [13] при КПД ускорительного блока 1/3.

Отметим, что в работах [8-11] для тех же целей предполагалось использование мишени из свинцово-висмутовой эвтектики, обеспечивающей ряд технических и эксплуатационных преимуществ [8]. В то же время величина n для такой мишени существенно ниже [14], чем для урановой мишени, что заметно уменьшает коэффициент выигрыша G и увеличивает ток ускорителя. Для систем с быстрым бустером [8-11] это не имеет принципиального значения ввиду их исключительно высокой экономичности, однако для рассматриваемых систем целесообразность применения таких мишеней не представляется очевидной.

Что касается энергии ускоренных протонов, то, с учетом $n=17,3$ нейтрон/протон при $T_p=470$ МэВ [13], она может быть уменьшена вдвое без значительных потерь в коэффициентах усиления ($G(470 \text{ МэВ})/G(960 \text{ МэВ}) \approx 0,93$). Однако необходимые токи ускорителя возрастают при этом более, чем вдвое: $I(470 \text{ МэВ})/I(960 \text{ МэВ}) \approx 2,2$. Выбор конкретного значения T_p не является принципиальным для расчетов данной работы и, очевидно, должен учитывать экономическую и техническую стороны проблемы при проектировании ускорительного блока.

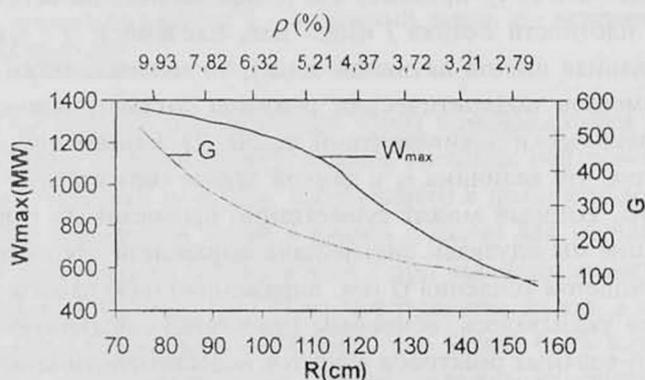


Рис.2. Максимальные электрические мощности W_{max} и коэффициенты усиления энергии G для подкритических систем на основе ВВЭР-1000 в зависимости от эффективного радиуса активной зоны R и среднего обогащения ρ при $k_{eff}=0,98$.

На рис.2 представлены полученные результаты для максимальной электрической мощности системы W_{\max} и коэффициента усиления энергии G в зависимости от эффективного радиуса R и связанного с ним среднего обогащения ρ (при $M_u = \text{const}$).

Напомним, что радиус активной зоны стандартного ВВЭР-1000 – 156 см. Формально, с уменьшением R выходные данные системы непрерывно улучшаются. Так, уже при $R = 120$ см ($\rho = 4,37\%$) $W_{\max} = 972$ МВт, $I_{\max} = 2,05$ МА, $G = 165,9$, что, в принципе, позволяет рассматривать данную систему как вполне эффективную и безопасную. Следует, однако, учесть ряд проблем, связанных с возможной реализацией таких комплексов. Увеличение среднего обогащения и уменьшение R , фактически, означает не реконструкцию стандартного ВВЭР, а переход к существенно новой конструкции реакторного блока, с увеличенным удельным энерговыделением в объеме активной зоны. Весь вопрос в том, насколько это окажется технически и экономически целесообразным на начальном этапе внедрения подкритических систем. (Заметим также, что ограничение (3), используемое для определения W_{\max} , соответствует неизменным конструктивным характеристикам элементов активной зоны и в данном случае может, вообще говоря, не выполняться. Поэтому приведенные на рис.2 значения для W_{\max} носят условный характер. Мощность конструктивно нового реактора может быть не связана с данным ограничением).

Очевидно далее, что, если при уменьшении эффективного радиуса R использовать стандартные ТВС ВВЭР-1000 со средним обогащением $\rho_0 = 2,57\%$ [15], то при аналогичных токе ускорителя и потоке нейтронов выделяемая мощность и коэффициент выигрыша будут в ρ_0/ρ раз меньше по сравнению с данными рис.2.

Рассмотрим теперь вторую схему изменения геометрии активной зоны. Фиксируем радиус R на его конструктивной отметке и сделаем переменным радиус r_0 кадмиевого экрана. При этом целесообразно задать интересующие нас значения $k_{\text{эф}}$ и затем определять величины r_0 , обеспечивающие требуемую подкритичность при прочих неизменных параметрах активной зоны. В этом случае распределение нейтронного потока при $r > r_0$ не будет отличаться от аналогичного распределения в обычном критическом режиме, с точностью до нормировочного множителя, определяемого из условия (3).

На рис.3 приведена кривая, описывающая указанную зависимость r_0 от $k_{\text{эф}}$, совместно с кривой, определяющей максимальную электрическую мощность реактора на базе ВВЭР-1000.

Видно, что с помощью кадмиевого экрана необходимого радиуса, с использованием стандартных ТВС, оказывается возможным повысить мощность системы практически до номинального значения при $k_{\text{эф}} = 0,98$ и до приемлемых значений при меньших значениях $k_{\text{эф}}$.

Результаты расчетов для коэффициентов усиления энергии и максимальных токов ускорителя в рассмотренной системе представлены на рис.4.

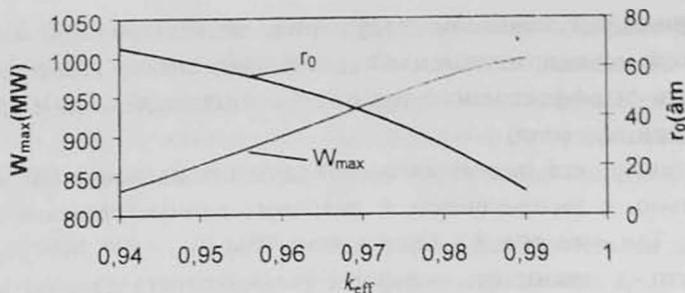


Рис.3. Радиусы кадмиевого экрана r_0 и максимальные электрические мощности W_{max} в зависимости от k_{eff} для подкритических систем на основе ВВЭР-1000.

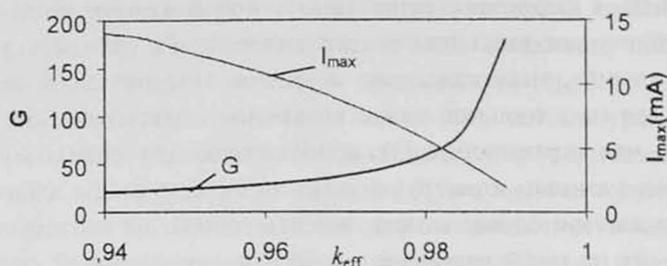


Рис.4. Токи ускорителя в максимальном режиме I_{max} и коэффициенты усиления энергии G для подкритических систем рис.3.

При сравнении с данными [2,4] для ВВЭР-1000 с минимальным r_0 можно прийти к выводу о некотором ухудшении данных характеристик. Однако это ухудшение не столь значительно и, на наш взгляд, вполне допустимо, если учесть принципиальное преимущество рассмотренной системы в максимальной выделяемой мощности. Так, при $k_{eff} = 0,98$ коэффициент усиления G для новой системы составляет 59,3, т.е. на питание ускорителя должно уходить менее 1,7% вырабатываемой реактором мощности 972 МВт. При $k_{eff} = 0,96$ эта цифра возрастает всего лишь вдвое, что также может оказаться приемлемым с учетом $W_{max} \approx 900$ МВт (см. рис.3) и роста безопасности системы.

Аналогичные закономерности обнаруживаются и для подкритических реакторов на базе ВВЭР-440. Здесь, например, значение $k_{eff} = 0,98$ достигается при радиусе кадмиевого экрана $r_0 = 21,3$ см, обеспечивающего при тех же условиях предельную электрическую мощность $W_{max} = 432$ МВт при токе ускорителя $I_{max} = 2,26$ мА и коэффициенте усиления $G = 66,3$.

В целом, как следует из приведенных результатов, использование простого элемента конструкции – кадмиевого экрана необходимого радиуса позволяет устранить наиболее существенные недостатки одnoreакторных подкритических систем на основе ВВЭР при незначительном ухудшении экономичности и сохранении всех остальных преимуществ. На наш взгляд, такие системы могут быть реализованы в ближайшем будущем, с учетом того

факта, что постройка протонных ускорителей с требуемыми параметрами не должна вызвать серьезных проблем [12]. Очевидно также, что дальнейшее уточнение результатов данной работы в многогрупповом подходе с Монте-Карло моделированием нейтронных потоков [8-11] не приведет к качественной переоценке представленных выводов. (В качестве довода можно сослаться на принципиальное согласие предварительных данных [6,7] с результатами точных расчетов [8-11]).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Р.Туманян, А.Г.Худавердян. Изв. НАН Армении, Физика, 29, 58 (1994), Атомная энергия, 79, 748 (1995).
2. В.М.Жамкочян, А.Г.Худавердян. Изв. НАН Армении, Физика, 33, 31 (1998).
3. В.М.Жамкочян, А.Г.Худавердян. Изв. НАН Армении, Физика, 33, 141 (1998).
4. A.G.Khudaverdyan, V.M.Zhamkochyan. Preprint ICTP TC/IR/98/1, 1998.
5. П.Н.Алексеев и др. Препринт ИАЭ-5857/2, 1995. S.S.Abalin et al. AIP Conf. Proc. 346. Las-Vegas, July 1994, p.527.
6. С.А.Бзнуни, В.М.Жамкочян, В.Р.Назарян, А.Г.Худавердян. Изв. НАН Армении, Физика, 35, 90 (2000).
7. С.А.Бзнуни, В.М.Жамкочян, А.Г.Худавердян. Атомная энергия, 88, 316 (2000).
8. С.А.Бзнуни и др. Препринт ОИЯИ P2-2001-124, 2001.
9. С.А.Бзнуни и др. Атомная энергия, 92, 344 (2002).
10. С.А.Бзнуни и др. Препринт ОИЯИ P2-2002-105, 2002.
11. S.A.Bznuni et al. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2, 21 (2002).
12. H.Klein. Proc. of the 1994 Intern. Linac Conf., 21-26 Aug. 1994. Tsukuba, Japan, v.1, p.322. A.R.Tumanyan et al. Nucl. Inst. and Meth., 482, 1 (2002).
13. Ю.М.Адо и др. Атомная энергия, 77, 300 (1994).
14. Ф.П.Денисов, В.Н.Мехедов. Ядерные реакции при высоких энергиях. М., Атомиздат, 1972.
15. Б.А.Дементьев. Ядерные энергетические реакторы. М., Энергоатомиздат, 1990.

ՄԻԱՌԵԱԿՏՈՐՈՎ ԷԼԵԿՏՐՈՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԿՏԻՎ ԳՈՏՈՒ
ՕՊՏԻՄԱԼ ԴԱՍԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ս.Ա. ԲԶՆՈՒՆԻ, Վ.Մ. ԺԱՄԿՈՉՅԱՆ, Ա.Ղ. ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ

Հետազոտված են ՎՎԷՆ տիպի ռեակտորների երկրաչափական կառուցվածքները, որոնց միջոցով ապահովվում է նեյտրոնային միջին հոսքի աճ ենթակրիտիկական ռեժիմների դեպքում: Ցույց է տրված, որ համապատասխան շառավղով զլանածև կադմից կլանիչի օգտագործումը բերում է ռեակտորի հզորության զգալի աճի բավական խոր ենթակրիտիկական ռեժիմների դեպքում:

CHOOSING OF OPTIMAL CONFIGURATION OF THE ACTIVE CORE FOR A ONE-REACTOR ELECTRONUCLEAR SYSTEM

S.A. BZNUNI, V.M. ZHAMKOCHYAN, A.H. KHUDAVERDYAN

Geometrical configurations of VVER-type reactors are investigated which provide the increment of the neutron flux mean value in subcritical regimes. It is shown that the use of the cadmium screen of necessary radius leads to the essential increase in the maximum extracted power at sufficient subcriticality level and standard constructive elements of the active core.