

УДК 539.17

ГАЗООХЛАЖДАЕМЫЙ КАСКАДНЫЙ РЕАКТОР В ПОДКРИТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В.М. ЖАМКОЧЯН, С.В. ЖАМКОЧЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 24 марта 2005 г.)

Исследована каскадная электроядерная энергетическая система, включающая газоохлаждаемые реактор-бустер на быстрых нейтронах и основной реактор на тепловых нейтронах. Определены выходные характеристики системы, которые оказываются достаточно высокими в широком интервале глубин подкритичности бустера. Показано, что для оптимальных подкритических режимов системы давление газового теплоносителя может быть практически одинаковым для всех ступеней каскада.

Исследование управляемых ускорителями подкритических каскадных реакторов является перспективным направлением в решении актуальных задач ядерной энергетики: повышения уровня безопасности и трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов. Согласно результатам [1-3], применение каскадной схемы позволяет снизить на порядок ток протонного ускорителя по сравнению с аналогичными однореакторными установками [4], при уровне отрицательной реактивности, обеспечивающем безопасную работу энергетического комплекса.

Напомним, что в работах [1-3] было проведено детальное исследование двухреакторных электроядерных систем, включавших основной энергетический реактор на тепловых нейтронах и промежуточный реактор-бустер на быстрых нейтронах. В качестве основного блока выбирались серийные реакторы ВВЭР-1000 и CANDU, а также жидкосолевой графитный бридер типа MSBR-1000. В бустерном блоке во всех случаях предполагалось использование гексагональных ТВС реактора БН-350, причем теплосъем с них должен был осуществляться с помощью жидкой эвтектики свинец-висмут [2,3].

Данная работа посвящена предварительным расчетам для другой перспективной подкритической системы – каскада быстрый бустер – тепловой реактор с единой системой газового охлаждения.

В качестве реактора на тепловых нейтронах был выбран высокотемпературный газоохлаждаемый графитовый реактор HTGR-1160 [5] со стержневыми твэлами и давлением теплоносителя-гелия 5,1 МПа. Высокая температура теплоносителя на выходе (741°C) позволила достигнуть в тепловой установке КПД около 39%. Другое преимущество этого реактора – низкая утечка радиоактивности и высокая безопасность, связанная с

использованием корпуса из предварительно напряженного железобетона. Отметим также, что использование однофазного теплоносителя, в принципе, исключает возможность ряда аварийных ситуаций, связанных с изменением фазового состояния теплоносителя (как, например, в ВВЭР). По мнению экспертов, ввиду этих качеств реакторы данного типа могут в перспективе оказаться наиболее пригодными для энергообеспечения густонаселенных местностей.

Использование в описываемой каскадной установке газоохлаждаемого быстрого бустера, на первый взгляд, может показаться не вполне оправданным ввиду меньшего уровня безопасности, свойственного таким реакторам (по сравнению с HTGR). Так, с учетом высокой энергонапряженности в рабочем режиме, давление гелиевого теплоносителя в быстрых реакторах должно быть существенно выше, чем в HTGR (более 10 МПа), что увеличивает вероятность аварии с потерей теплоносителя. Для быстрого реактора с его небольшой теплоемкостью активной зоны это, в худшем случае, может повлечь за собой расплавление активной зоны со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Однако, при использовании подобного реактора в подкритических режимах в качестве первой ступени каскада ситуация меняется кардинальным образом. Во-первых, как будет показано ниже, нейтронный поток в активной зоне быстрого реактора, необходимый для его эффективной работы в качестве бустера, оказывается в несколько раз меньшим, чем при работе в номинальном критическом режиме. Очевидно, это должно привести к пропорционально меньшей энергонапряженности и, соответственно, при той же скорости продувки позволит уменьшить давление гелия до величин, характерных для HTGR – второй ступени каскада. Во-вторых, если для электроядерной системы выбирается режим гарантированной подкритичности, то аварии с неконтролируемой критической массой (с расплавлением активной зоны) становятся принципиально невозможными.

В настоящей работе для расчетов были использованы проектные данные опытно-промышленной установки с газоохлаждаемым реактором на быстрых нейтронах БГР-300 [5] (тепловая мощность – 810 МВт, давление гелия в номинальном критическом режиме – 16 МПа). Предполагалось, что активная зона бустера состоит из стержневых твэлов БГР-300 с длиной, равной высоте активной зоны HTGR-1160 (топливо – $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$).

Общая схема каскадной подкритической установки представлена на рис.1.

Реактор на тепловых нейтронах типа HTGR (*c*) конструктивно является внешним по отношению к описанному выше бустерному блоку (*b*) и отделен от него кадмиевым экраном-вентилем (*d*) для исключения проникновения тепловых нейтронов в активную зону бустера. Пучок протонов из ускорителя бомбардирует расположенную вдоль оси бустера мишень из неактивного материала (*a*), которая испускает вторичные нейтроны в зону бустера. Все боковые поверхности на рис.1 – коаксиальные цилиндрические.

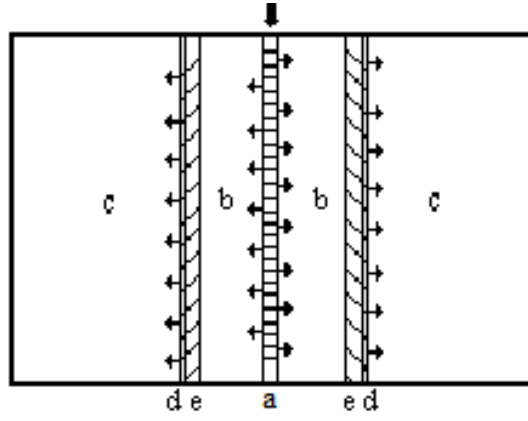


Рис.1. Схема газохлаждаемой двухреакторной подкритической системы.

Очевидно, что при наличии кадмиевого экрана-клапана d в зоне b будут присутствовать лишь быстрые нейтроны, а в зоне c – в основном, тепловые. Это дает основание ограничиться для оценочных расчетов одnogрупповым приближением в отдельности для быстрых и тепловых нейтронов соответственно в зонах b и c .

В качестве первого шага представляет интерес проследить за эффективностью работы бустера в зависимости от радиуса R_b его активной зоны.

С учетом данных [5] для геометрического параметра БГР-300, при высоте активной зоны b , равной высоте зоны c (630 см), для критического радиуса зоны b можно найти значение $R_b^{\text{crit}} = 61,3$ см.

При радиусах $R_b < R_b^{\text{crit}}$ (при неизменном материальном параметре) бустер будет подкритическим, причем глубина его подкритичности $\Delta k^{(b)} = 1 - k_{\text{eff}}^{(b)}$ должна возрастать с уменьшением R_b . При всех значениях R_b необходим также учет дополнительной отрицательной реактивности, вносимой “пассивной” мишенью a .

Решение одnogруппового уравнения диффузии нейтронов для подкритических режимов быстрого реактора b определяется выражением [1]

$$\Phi^{(b)}(r, z) = \frac{j_0}{D^{(b)} \alpha_b} \left[\frac{J_0(\alpha_b r) - \frac{J_0(\alpha_b R'_b)}{N_0(\alpha_b R'_b)} N_0(\alpha_b r)}{J_1(\alpha_b r_a) - \frac{J_0(\alpha_b R'_b)}{N_0(\alpha_b R'_b)} N_1(\alpha_b r_a)} \right] \cos\left(\frac{\pi z}{H'_b}\right), \quad (1)$$

где $\Phi^{(b)}(r, z)$ – скалярный поток нейтронов (начало цилиндрической системы координат выбрано посередине оси мишени),

$$a_b^2 = \frac{k_{\infty}^{(b)} - 1}{M_b^2} - \left(\frac{\pi}{H'_b}\right)^2 \geq 0, \quad (2)$$

$J_0(x)$, $J_1(x)$, $N_0(x)$, $N_1(x)$ – функции Бесселя нулевого и первого порядков, R'_b и H'_b – экстраполированные радиус и высота зоны b , r_a – радиус мишени, $k^{(b)}$ и M_b – коэффициент размножения и длина миграции нейтронов для данной среды, $D^{(b)}$ – одnogрупповой коэффициент диффузии для быстрых нейтронов.

При выводе (1) предполагалось, что распределение по вертикальной координате для плотности потока нейтронов, испускаемых поверхностью мишени, имеет вид, близкий к $j = j_0 \cos(\pi z / H'_b)$.

В пренебрежении отражением назад быстрых нейтронов, покинувших зону b , плотность потока быстрых нейтронов в направлении “наружу” на боковой поверхности зоны b ($r = R_b$) равна результирующей плотности потока:

$$j_b = - \left[D^{(b)} \frac{\partial \Phi^{(b)}}{\partial r} \right]_{r=R_b}. \quad (3)$$

В качестве величины, определяющей эффективность работы бустера, можно принять отношение G_b полного числа быстрых нейтронов, излучаемых в единицу времени боковой поверхностью зоны b , к аналогичному числу нейтронов, излучаемых мишенью. Если ввести стандартный коэффициент усиления энергии (или коэффициент выигрыша) G_t , равный отношению выходной электрической мощности второй ступени каскада – теплового реактора к мощности, потребляемой ускорителем, то величину G_b можно рассматривать как долю G_t , обусловленную наличием бустера.

Как следует из (1) и (3),

$$G_b = j_b R_b / j r_a = \frac{R_b}{r_a} \left[\frac{J_1(\alpha_b R_b) - \frac{J_0(\alpha_b R'_b)}{N_0(\alpha_b R'_b)} N_1(\alpha_b R_b)}{J_1(\alpha_b r_a) - \frac{J_0(\alpha_b R'_b)}{N_0(\alpha_b R'_b)} N_1(\alpha_b r_a)} \right]. \quad (4)$$

В расчетах использовались одnogрупповые параметры для быстрых реакторов, приведенные в [6] ($M_b^2=300$ см² и $D_b=1,6$ см). Как и в [1], радиус r_a мишени принимался равным 8,5 см.

На рис.2 представлена найденная зависимость коэффициента усиления потока нейтронов G_b от выбранной величины эффективного коэффициента размножения $k_{\text{eff}}^{(b)}$. (Предполагалось, что зона b содержит твэлы типа БГР-300.)

Как следует из приведенных результатов, при глубине подкритичности 0,03 ($k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,97$), обеспечивающей полную безопасность ядерных реакторов [7], величина G_b равна примерно 15. То есть именно во столько раз должен будет возрасти при наличии бустера коэффициент усиления энергии G_t по сравнению с аналогичным коэффициентом для одnoreакторных систем с кадмиевым экраном [8].

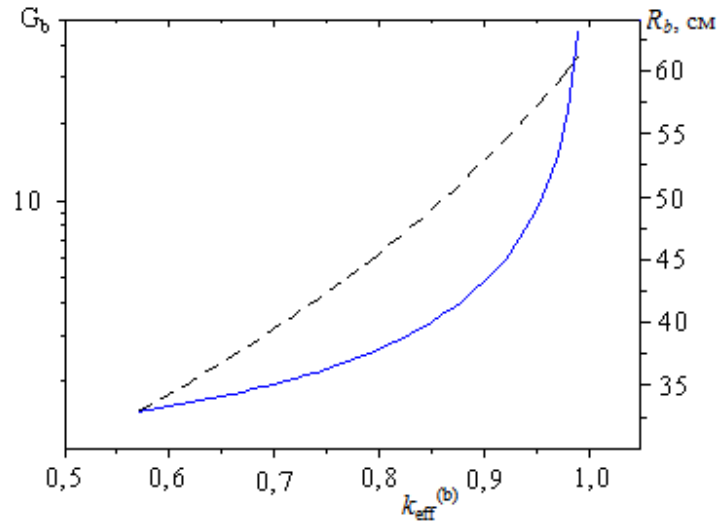


Рис.2. Зависимости коэффициента усиления потока нейтронов G_b (сплошная линия) и радиуса зоны b (пунктирная линия) от эффективного коэффициента размножения $k_{\text{eff}}^{(b)}$ в зоне бустера.

Следует также обратить внимание на эффективность работы описанного бустера и при существенно больших глубинах подкритичности. Так, согласно рис.2, удвоение коэффициента G_T может быть достигнуто уже при $\Delta k^{(b)} \approx 0,3$, т.е. при глубинах подкритичности, при которых бустер трудно назвать полноценным ядерным реактором. (В этих условиях для совокупности блоков a и b больше подошел бы термин “активная мишень”.) В целом, согласно результатам рис.2, выбор режима гарантированной подкритичности для бустера на основе БГР-300, при условии его высокой эффективности, не должен представлять проблем.

Подкритические режимы второй ступени каскада – реактора типа HTGR могут быть исследованы по той же схеме, что и реакторы типа ВВЭР с кадмиевым экраном [8]. То есть мы предполагаем, что материальный параметр и внешний радиус зоны c сохранены такими же, как у реактора HTGR-1160, а заданная глубина подкритичности обеспечивается кадмиевым экраном-вентилем (d) необходимого радиуса. Детали соответствующего одногруппового приближения приведены в [4,8]. Как и в [8], предельная электрическая мощность теплового реактора в подкритическом режиме W_{max} определялась из условия

$$\Phi^{(c)}(r,z) \leq \Phi_{\text{max}}^{(0)}, \quad (5)$$

где $\Phi_{\text{max}}^{(0)}$ – максимальный поток нейтронов при работе аналогичного реактора в номинальном критическом режиме с электрической мощностью W_0 .

На рис.3 приведена зависимость отношения W_{max}/W_0 от эффективного коэффициента размножения $k_{\text{eff}}^{(c)}$ для зоны c .

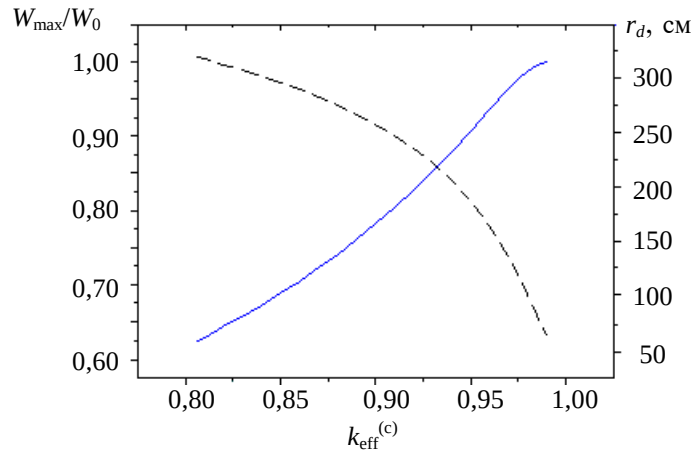


Рис.3. Зависимости отношения W_{max}/W_0 (сплошная линия) и радиуса кадмиевого экрана r_d (пунктирная линия) от эффективного коэффициента размножения $k_{\text{eff}}^{(c)}$ в зоне теплового реактора.

Видно, что задание необходимой глубины подкритичности выбранным методом (т.е. при неизменном материальном параметре активной зоны HTGR) позволяет получать мощности W_{max} , составляющие более 90% номинальной мощности W_0 , вплоть до значений $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,95$. Причина этого эффекта заключается в смещении максимума в распределении нейтронного потока на расстояние r_d от оси активной зоны, при выполнении равенства $\Phi^{(c)}(d, z) = \Phi_{\text{max}}^{(0)}$.

Расчеты коэффициентов усиления энергии G_T и токов ускорителя в максимальном режиме I_{max} при разных глубинах подкритичности блоков b и c проводились по методике, приведенной в работах [4,8].

Отметим, что в используемой схеме, при сохранении материальных параметров HTGR-1160 и БГР-300 и относительно небольших глубинах подкритичности бустера, оказывается невозможным достижение величины $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,98$, при которой система в целом еще может считаться вполне безопасной [5]. Так, величина $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,98$ соответствует радиусу кадмиевого экрана $r_d = 51,7$ см, что превосходит радиус бустера лишь в случае $k_{\text{eff}}^{(b)} < 0,87$ (см. рис.2,3). Кроме того, необходим еще учет толщины экрана d и толщины корпуса e , обеспечивающего изоляцию блоков b и c . В то же время, уже при $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,975$ и $k_{\text{eff}}^{(b)} \leq k_{\text{eff}}^{(c)}$ размеры всех блоков на рис.1 оказываются совместимыми. Ввиду этого максимальное значение $k_{\text{eff}}^{(c)}$ в основной части расчетов принималось равным 0,975, а режим работы с $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,98$ оценивался лишь для случая $k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,7$ (см. ниже).

В табл.1-3 приведены результаты расчетов для величин G_T и I_{max} при энергии ускоренных протонов $T_p = 960$ МэВ. Предполагалось, что мишень a изготовлена из обедненного урана, для которого выход нейтронов при $T_p = 960$ МэВ принимался равным $\eta = 38$ нейтрон/протон [9]. (Для мишени другого типа, например, из свинцово-висмутовой эвтектики, результаты для G_T будут пропорциональны усредненной величине η , с учетом элементного состава мишени).

Табл.1

Коэффициенты усиления энергии G_T и токи ускорителя $I_{\max}$ при $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,96$.

$k_{\text{eff}}^{(b)}$	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
G_T	100,8	81,4	68,4	59,2	52,3	46,9	42,6
$I_{\max}, \text{mA}$	3,7	4,6	5,5	6,4	7,2	8,0	8,8

Табл.2

Коэффициенты усиления энергии G_T и токи ускорителя $I_{\max}$ при $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,97$.

$k_{\text{eff}}^{(b)}$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
G_T	181,9	137,6	111,1	99,4	80,8	71,4	64,0	58,1
$I_{\max}, \text{mA}$	2,1	2,8	3,5	3,9	4,8	5,4	6,1	6,7

Табл.3

Коэффициенты усиления энергии G_T и токи ускорителя $I_{\max}$ при $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,975$.

$k_{\text{eff}}^{(b)}$	0,975	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90
G_T	272,0	227,6	172,2	139,0	116,9	101,1	89,3	80,1	72,8
$I_{\max}, \text{mA}$	1,4	1,7	2,3	2,8	3,4	3,9	4,4	4,9	5,4

В табл.1-3 приведены лишь данные для случаев $k_{\text{eff}}^{(b)} \leq k_{\text{eff}}^{(c)}$ (очевидно, что активная зона быстрого реактора, как зона “большого риска”, должна работать при глубинах подкритичности не меньших, чем зона теплового реактора).

Из представленных результатов можно сделать вывод о весьма высоких характеристиках рассмотренной подкритической системы как по коэффициенту усиления энергии, так и по токам протонного ускорителя. Сравнение с аналогичными данными [1,2] для каскадных систем с бустером, состоящим из ТВС БН-350, показывает, что по указанным параметрам данная система не существенно уступает системам на основе реакторов типа ВВЭР, обладая в то же время всеми преимуществами реакторов типа HTGR. Особо следует отметить, что расчетные величины $I_{\max}$ технически достижимы на современном уровне ускорительной техники [10].

Важной характеристикой режимов работы бустера является максимальный поток нейтронов $\Phi^{(b)}_{\max}$ в его активной зоне. Данная величина определяет максимальное удельное энерговыделение в объеме бустера, т.е. его энергонапряженность. С другой стороны, как было отмечено выше, уменьшение энергонапряженности по сравнению с ее номинальным значением для реактора БГР-300 позволяет уменьшить в пропорциональное число раз статическое давление теплоносителя – гелия.

В использовавшемся приближении величина $\Phi^{(b)}_{\max}$ определялась с помощью одnogрупповых распределений для нейтронных потоков в зонах b и c , с учетом условий (3) и (5). При оценке необходимого давления гелия принималось, что максимальный поток нейтронов в критическом режиме БГР-300 составляет $10 \cdot 10^{15}$ нейтрон/см²сек, т.е. равен

аналогичной величине для реакторов типа БН [6].

На рис.4 представлены зависимости максимального потока $\Phi^{(b)}_{\max}$ и соответствующего давления гелиевого теплоносителя P в активной зоне бустера от величин $k_{\text{eff}}^{(b)}$ при разных значениях $k_{\text{eff}}^{(c)}$.

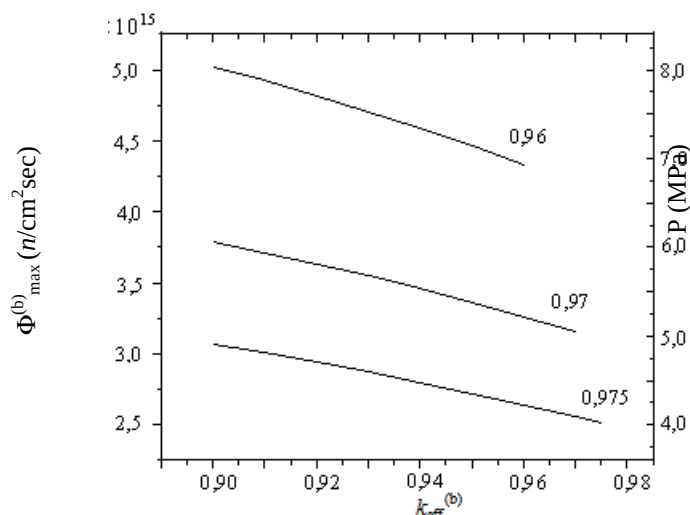


Рис.4. Максимальный поток нейтронов $\Phi^{(b)}_{\max}$ и давление гелиевого теплоносителя P в активной зоне быстрого бустера в зависимости от величины $k_{\text{eff}}^{(b)}$ при разных значениях $k_{\text{eff}}^{(c)}$.

Как следует из кривых рис.4, значения P всегда оказываются значительно ниже давления, необходимого для работы БГР-300 в номинальном режиме (16 МПа), а при $k_{\text{eff}}^{(c)} \geq 0,97$ — на уровне и даже ниже давления гелия в зоне НТГР (5,1 МПа).

Таким образом, основная проблема быстрых газоохлаждаемых реакторов, связанная с высоким давлением теплоносителя, существенно упрощается в случае использования БГР в качестве бустера для НТГР. Оказывается возможной единая для всего каскада система отвода тепла, с разными скоростями продувки гелия для отдельных блоков. Кроме того, близость давлений в зонах b и c позволяет ограничиться небольшой толщиной корпуса e , со сведением к минимуму потерь быстрых нейтронов (что, очевидно, недостижимо для связки БН-ВВЭР [1,2]).

В заключение рассмотрим характеристики системы при больших глубинах подкритичности бустера $\Delta k^{(b)}$. Исследование подобных режимов представляет интерес с точки зрения обеспечения максимальной безопасности подкритической системы, т.е. ее гарантированной подкритичности при любых теоретически возможных нештатных ситуациях. (В тепловом блоке c в этом случае более целесообразным было бы использование шаровых твэлов [5], что позволило бы достичь минимального запаса реактивности при непрерывной работе реактора).

В табл.4 представлены расчетные данные для каскадной системы БГР-НТГР при $k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,7$. В данном случае радиус бустерной зоны составляет

40,5 см (рис.2), и оказывается возможным вариант системы с $k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,98$ при $L_0 = 51,7$ см.

Табл.4

Основные параметры каскадной системы при $k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,7$ и $T_p = 960$ МэВ.

$k_{\text{eff}}^{(c)}$	0,98	0,975	0,97
G_T	37,9	29,3	23,4
I_{max} , мА	10,2	13,2	16,6
$\Phi^{(b)}_{\text{max}}$, н/см ² сек	$2,76 \cdot 10^{15}$	$3,73 \cdot 10^{15}$	$4,62 \cdot 10^{15}$
P_b , МПа	4,4	6,0	7,4

Отметим, что при использовании шаровых твэлов в режиме непрерывной перегрузки топлива в блоке с величина $k_{\text{eff}}^{(c)} = 0,98$ вполне может отвечать требованию гарантированной подкритичности системы (как и, очевидно, $k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,7$). В этом случае, при работе в максимальном режиме, электрическая мощность HTGR составит 1145 МВт (см. рис.3), из которых лишь 30 МВт будет расходоваться на питание ускорительного блока. Ясно, что с точки зрения экономичности, с учетом высокого КПД тепловой установки HTGR, такая система вполне приемлема. Единственная проблема здесь может быть связана с относительно высоким током протонного ускорителя – 10,2 мА (вместо, например, $I_{\text{max}} = 1,4$ мА при $k_{\text{eff}}^{(c)} = k_{\text{eff}}^{(b)} = 0,975$), однако это неизбежная цена за обеспечение максимальной безопасности электроядерной системы.

Авторы выражают благодарность С.А.Бзнуни за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.А.Бзнуни, В.М.Жамкочян, А.Г.Худавердян. Атомная энергия, **88**, 316 (2000).
2. С.А.Бзнуни, В.С.Барашенков, В.М.Жамкочян и др. Атомная энергия, **92**, 344 (2002).
3. С.А. Бзнуни, В.С. Барашенков, В.М. Жамкочян и др. ЭЧАЯ, № 4, 498 (2003).
4. A.G. Khudaverdyan, V.M. Zhamkochyan. Choosing the optimal parameters of subcritical reactors driven by accelerators. Preprint ICTP IC/IR/98/1 (1998).
5. Б.А. Дементьев. Ядерные энергетические реакторы. М., Энергоатомиздат, 1990.
6. А.Уолтер, А.Рейнольдс. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. М., Энергоатомиздат, 1986.
7. H.Daniel, Yu.V.Petrov. Nucl. Instr. and Meth., **A373**, 131 (1996).
8. С.А.Бзнуни, В.М.Жамкочян, А.Г.Худавердян. Изв. НАН Армении, Физика, **38**, 335 (2003).
9. Ю.М.Адо и др. Атомная энергия, **38**, 300 (1994).
10. H.Klein. Proc. of the Intern. Linac Conf., 21-26 Aug. 1994. Tsukuba, Japan, v.1, p.322.

ԳԱԶԱՍԱՌԵՅՎՈՂ ԿԱՄԿԱՂԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏՈՐ ԵՆԹԱԿՐԻՏԻԿԱԿԱՆ ՌԵԺԻՄԻՄ

Վ.Մ. ԺԱՄԿՈՉՅԱՆ, Ս.Վ. ԺԱՄԿՈՉՅԱՆ

Հետազոտված է գազահովացուցիչ բուստեր-ռեակտոր արագ նեյտրոնների վրա և հիմնական ռեակտոր ջերմային նեյտրոնների վրա ներառող կասկադային էլեկտրամիջուկային էներգիական համակարգը: Որոշված են համակարգի էլքային բնութագրերը, որոնք ստացվում են բավականին բարձր՝ բուստերի ենթակրիտիկության խորությունների լայն ինտերվալում: Ցույց է տրված, որ համակարգի օպտիմալ ենթակրիտիկական ռեժիմների համար գազային ջերմակրիչի ճնշումը կարող է լինել գրեթե հավասար կասկադի բոլոր աստիճանների համար:

GAS-COOLED CASCADE REACTOR IN SUBCRITICAL REGIME

V.M. ZHAMKOCHYAN, S.V. ZHAMKOCHYAN

A cascade electronuclear system including a gas-cooled booster reactor on fast neutrons and main reactor on thermal neutrons is studied. The system output characteristics are determined which find out to be sufficiently high in a wide region of the booster subcriticality levels. It is shown that for optimal subcritical regimes of the system the pressure of the gas coolant may be practically equal for all cascade stages.