

УДК 621.039.522+621.384.6

КАСКАДНЫЙ ПОДКРИТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е., Мостовой В.И., Меньшиков Л.И.,
Прусаков В.Н., Пономарев-Степной Н.Н.,
Субботин С.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Аленицкий Ю.Г., Красных А.К.,
Сомов Л.Н. (ОИЯН)*

В настоящее время у специалистов не возникает сомнений в возможности надежного захоронения радиоактивных отходов ядерной энергетики с периодами полураспада ядер $T_{1/2} \sim 30$ лет, таких, как ^{137}Cs и ^{90}Sr . Однако значительно сложнее доказать безопасность захоронения более долгоживущих радиационно токсичных ядер, например, ^{129}I ($T_{1/2} \sim 1,5 \cdot 10^7$ лет), ^{237}Np ($T_{1/2} \sim 2 \cdot 10^6$ лет). В этом заключается причина того, что специалисты вновь и вновь возвращаются к идее трансмутации таких ядер в короткоживущие. В дальнейшем эта проблема будет обостряться, поскольку количество наработанных отходов в мировой ядерной энергетике еще далеко от равновесного. Очевидно также, что до тех пор, пока не будут проведены сравнительные исследования этих подходов, невозможно сделать окончательный выбор наилучшего из них или взаимовыгодности их сочетания.

Имеется множество технологических и экономических ограничений, которые не позволяют сжечь все отходы ядерной энергетики, не подлежащие захоронению, в стандартных реакторах с твродтопливной активной зоной. Поэтому при переходе к замкнутому топливному циклу необходимо иметь новый тип реактора: реактор, главные свойства которого заключаются во «всеядности», возможности гибкого управления нуклидным составом и повышенной безопасности. Наличие такого реактора придаст замкнутому топливному циклу необходимую эффективность и гибкость.

С нашей точки зрения одним из таких реакторов является подкритический жидко-солесвой, подпитываемый внешним нейтронным источником [1—10]. Его положительными качествами являются возможность поддержания низкого количества осколков деления в активной зоне, что позволяет существенно снизить остаточное тепловыделение, а также теплосъема за счет естественной циркуляции расплавленной соли, большой отрицательный температурный коэффициент реактивности. Эти и другие качества реактора исключают аварии, связанные с нарушением теплоотвода.

Мотивы рассмотрения подкритического реактора понятны: при достаточной подкритичности исключаются реактивные аварии, после отключения внешнего источника нейтронов реактор останавливается через $\sim 10^{-3}$ с, т.е. внешний источник является дополнительным безынерционным средством управления. В качестве внешнего источника нейтронов предлагаются системы, основанные на магнитном удержании плазмы (токамаки) [11, 12], лазерном термоядерном синтезе [13], мюонном катализе [14, 15], газодинамических плазменных ловушках [16] и т.д. В настоящее время активно обсуждается возможность применения в качестве таких источников протонных ускорителей на энергию ~ 1 ГэВ [17—19].

Целями настоящей работы, продолжающей ранее начатые исследования [6—10], являются:

выбор оптимальной схемы безопасного подкритического реактора, которая позволит добиться высокого размножения нейтронов при условии исключения реактивно-

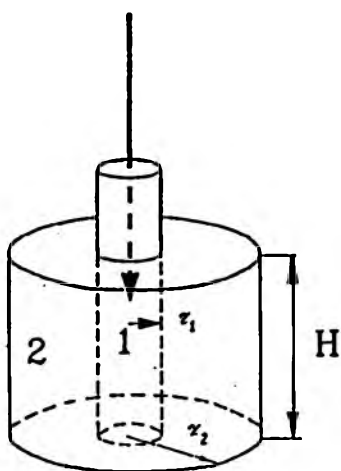
стных аварий, существенно снизить интенсивность внешнего нейтронного источника и тем самым избавиться от основных недостатков традиционной схемы с пучком протонов — «гигантизма» и дороговизны;

изучение возможности применения ускорителей в качестве внешнего источника нейтронов;

оценка целесообразности введения подкритических реакторов в структуру топливного цикла ядерной энергетики.

Вопрос о разумном уровне подкритичности, при котором исключаются реактивные аварии, требует специального исследования.

В жидкосольевых реакторах с непрерывным контролем нуклидного состава, фактически не требующих по этой причине начального запаса реактивности, подкритичность в принципе может быть снижена до минимальных значений $\sim \beta$ [7, 8], где β — эффективная доля запаздывающих нейтронов. Однако при столь малой подкритичности ввиду неопределенности сечений реакций и концентрации нуклидов в значительной степени исчезает разница между подкритическим и критическим жидкосольевым реактором: в том и другом случае ядерная безопасность гарантируется лишь большим отрицательным температурным коэффициентом реактивности. Внешний источник нейтронов выполняет в этом случае лишь одну упомянутую ранее функцию безынерционной альтернативной стержням СУЗ системы управления реактором.



Р и с. 1. Принципиальная схема каскадного жидкосольевого реактора

В выбранной нами схеме реактор еще более безопасен и состоит из двух активных зон (рис. 1). Пучок заряженных частиц входит во внутреннюю активную зону с высокоэнергетическим спектром нейтронов, в которой помимо топлива растворены также ядра поглотителя тепловых нейтронов, например, самария или гадолиния. Созданные пучком первичные нейтроны размножаются во внутренней активной зоне (один первичный нейтрон порождает в ней $n_1 \sim 25-50$ нейтронов деления). Из внутренней активной зоны нейтроны попадают во внешнюю с тепловым спектром, где происходит основная часть делений ($\sim 95\%$, $n_2 \sim n_1$). Тепловые нейтроны из внешней активной зоны, попадая во внутреннюю активную зону, поглощаются самарием. Тем самым «выключается» обратная связь по тепловым нейтронам между активными зонами, что является необходимым условием каскадной схемы. Далее такой реактор будем называть каскадным ЖСР (КЖСР). В случае разрушения разделяющей активные зоны стенки произойдет перемешивание самария

по внешней зоне, поэтому КЖСР станет более подкритическим. Это и некоторые другие обстоятельства придают ему свойства внутренней присущей безопасности.

Каскадная схема позволяет на двух по отдельности глубоко подкритических связанных активных зонах ($k_1 \sim 1-1/n_1 \sim k_2 \sim 0,94-0,98$) получить высокое размножение нейтронов ($n \sim n_1 n_2 \sim 1500$), что дает возможность применить для подпитки КЖСР линейные резонансные электронные ускорители. При использовании такой схемы подкритического реактора энергетическая «цена» первичного нейтрона внешнего источника нейтронов становится второстепенным фактором. Такой реактор характеризуется повышенной безопасностью и приобретает свойства универсальности, поскольку может выполнять одновременно функции производства энергии, воспроизводства топлива (для U—Th-цикла) и трансмутации Np, Am, Cm, других актиноидов и некоторых продуктов деления.

Требования к безопасному реактору. Проектируя безопасные и экономичные реакторы, следует позаботиться и о безопасности всего топливного цикла. Для этого должны быть выполнены следующие условия:

добыча урана сведена к минимуму за счет использования определенной доли быстрых реакторов в системе ядерной энергетики и замыкания благодаря этому топливного цикла;

система ядерной энергетики дополнена реакторами, в которых реализуется возможность гибкого управления нуклидным составом;

в таких реакторах на основе простых и недорогостоящих систем и процедур сведены к минимуму вероятности теплофизических и реактивных аварий;

свежее топливо на основе простой технологии готовится на АЭС, куда необходимо доставлять только исходный материал;

непосредственно на территории АЭС осуществляется замкнутый топливный цикл, в котором достигается фактически полное выгорание ядерного топлива. Таким образом, на АЭС ввозится только природное топливное сырье, прошедшее предварительную обработку на химическом заводе, а также остатки переработки твердого топлива тепловых и быстрых реакторов, химическое сырье и реагенты, необходимые для замкнутого топливного цикла. С АЭС ничего не вывозится, кроме стабильных нуклидов и низкоактивных отходов на окончательное захоронение;

радиоактивные отходы АЭС состоят из сравнительно короткоживущих осколков деления ($T_{1/2} \sim 30$ лет), которые за обозримое время (~ 300 лет) распадаются в хранилище, расположенном на достаточной глубине на территории АЭС;

в качестве базового в будущей ядерной энергетике разумно выбрать реактор, способный работать на U—Th топливе, который дает в 10 раз меньший выход Pu, Np, Am, Cm и некоторых продуктов деления по сравнению с циклом U—Pu.

Свойства ЖСР. Жидкосоловые ЯЭУ имеют две главные особенности по сравнению с твердотопливными реакторами: возможность непрерывной регенерации ядерного топлива и использование жидкого топлива на основе фторидов, выполняющего одновременно функцию теплоносителя. Непрерывная регенерация ядерного топлива позволяет, во-первых, свести к минимуму начальный запас реактивности за счет вывода продуктов деления, сильно поглощающих нейтроны, и подпитки свежим топливом. Благодаря выведению из топлива ксенона нет проблемы иодной ямы, характерной для твердотопливных реакторов. Во-вторых, снижается в несколько раз содержание продуктов деления в активной зоне и соответственно мощность остаточного тепловыделения по сравнению с системой без непрерывной переработки.

Жидкое фторидное топливо — теплоноситель обуславливает специфические свойства такого реактора:

тепло от топлива к теплоносителю промежуточного контура передается вне активной зоны, и разрушение поверхности раздела между топливом и теплоносителем не приводит к серьезным нарушениям режима работы активной зоны и изменению реактивности;

совмещение функций топлива и теплоносителя в принципе исключает комплекс проблем, которые возникают в твердотопливных реакторах при авариях с потерей теплоносителя;

тепловое расширение жидкого топлива обеспечивает большой отрицательный мгновенный температурный коэффициент реактивности (около $-8 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$), что в основном определяет высокую устойчивость и саморегулирование в стационарном режиме;

химическое взаимодействие жидкосолового топлива с промежуточным теплоносителем, воздухом и водой не сопровождается значительным выделением тепла в результате экзотермических реакций и образованием газообразного водорода в процессе аварии;

радиационные повреждения топлива, характерные для твердотопливных реакторов, исключаются, поскольку понятие термонапряжений в жидкости просто лишено смысла, а радиационная стойкость расплавов фторидов высока (в 10^5 раз выше, чем у воды);

использование жидкого теплоносителя с низким давлением насыщенных паров (~ 10 Па) определяет низкое давление в реакторном контуре (~ 1 МПа);

актиноиды и большая часть продуктов деления образуют химические соединения, растворимые в топливной соли, и в случае аварии с разрушением активной зоны остаются в топливе, что облегчает локализацию радиоактивных продуктов. Благородные металлы (Ru, Te, Nb) в процессе работы реактора выводятся из топливной соли. Относительный выход этих радионуклидов при аварии составляет 0,1—3,4% накопленной активности к моменту аварии. Изотопы Zr, Cs, Sr, Ba, La и Ce почти полностью остаются в топливной соли, и их относительный выход составляет от 0,05 до 2,5%. Благородные газы фактически полностью выводятся из топливной соли в процессе работы до момента аварии. Относительный выход ^{131}I и ^{133}I составляет 27 и 40% наработанного к моменту аварии количества, они представляют повышенную опасность по сравнению с рассмотренными нуклидами;

низкая концентрация ~ 1 —5 мол. доли, % молекул MF_n (M — атомы U, Pu, Np, Am, Cm; $n = 3, 4$) в топливной композиции и большой недогрев до температуры насыщения (запас более 600°C) обуславливают значительную емкость теплового резервуара активной зоны и замедленное протекание переходных процессов, что важно в случае аварии в системе охлаждения реакторного контура;

теплофизические свойства жидкого топлива позволяют организовать эффективный теплоотвод с помощью естественной циркуляции при аварийных и даже номинальных режимах работы реактора (например, при интенсификации естественной циркуляции газлифтом);

основной механизм расхолаживания при плановой и аварийной остановке — это слив под действием гравитации жидкого топлива в дренажные баки, где гарантирована подкритичность и пассивный отвод остаточного тепловыделения; такой способ остановки реактора исключает химическое и другое нежелательное взаимодействие компонентов в активной зоне при аварийных ситуациях.

Таким образом, качественный анализ показывает, что ЖСР обладает свойствами внутренне присущей безопасности, заложенными самой природой. Благодаря этим свойствам реактивностные и теплофизические аварии становятся маловероятными. Для полного исключения реактивностных аварий реактор должен работать в глубоко подкритическом режиме. Необходимая подкритичность зависит от типа реактора. Например, в водо-водяном реакторе на твердом топливе состав топлива регулируется не чаще одного раза в год. По этой причине в таком реакторе обязательно имеется большой начальный запас реактивности: $k_{\text{эф}}^0 \approx 1 + 15\beta$, компенсируемый поглотителями. По мере выгорания топлива поглотитель выводится из теплоносителя, поглощающие стержни извлекаются и благодаря этому в течение года в реакторе поддерживается критический режим. Если такой реактор перевести в подкритический режим работы, то запас подкритичности должен быть не менее запаса реактивности на один интервал работы между перегрузками, так как для того чтобы реактор не смог по случайной причине стать критическим, в любой момент времени должно выполняться требование $1 - k_{\text{эф}} \geq 15\beta$. Следовательно, для такого реактора потребуется чрезвычайно интенсивный нейтронный источник.

В случае ЖСР благодаря непрерывному регулированию состава топлива требуется меньший запас реактивности. Анализ [5] показывает, что в ЖСР за короткое время реактивность не может случайным образом увеличиться более чем на 0,5%. Отсюда следует, что с учетом неопределенности сечений реакций и концентрации нуклидов должно быть выполнено условие $k_{\text{эф}} < 0,99$. Ниже будет рассматриваться более сильное условие

$$k_{\text{эф}} < 0,98. \quad (1)$$

Согласно известным правилам ядерной безопасности при условии (1) реактор является по существу хранилищем топлива и не требует аварийной системы стержней управления и защиты. При условии (1) становится возможным применить для подпитки КЖСР электронные ускорители. Если КЖСР подпитывать циклотроном током ~ 10 мА, то коэффициент размножения нейтронов может быть снижен до $\sim 0,95$.

Каскадный подкритический ЖСР (КЖСР). Далее в качестве внешнего источника нейтронов рассматриваются протонные и электронные ускорители.

Средняя мощность пучка заряженных частиц, необходимая для подпитки подкритического реактора тепловой мощностью W_p ,

$$P_b = W_p C_n / E_f N_f; \quad (2)$$

$$N_f = 1/\nu(1 - k_{эф}), \quad (3)$$

где N_f — число делений, индуцируемых первичным нейтроном источника в реакторе; ν , $E_f = 200$ МэВ — выход нейтронов и энергии при одном делении соответственно; C_n — затраты энергии пучка, необходимые для создания одного первичного нейтрона (цена нейтрона).

Рассмотрим наиболее простую схему ввода пучка, когда он направляется непосредственно в жидкую соль [4]. Тогда для протонов энергией $E_p = 1000$ МэВ

$$C_n = 50 \text{ МэВ}. \quad (4)$$

В случае ввода электронного пучка в расплавленную соль, где по схеме $e \rightarrow \gamma \rightarrow n$ рождаются фотоядерные нейтроны (рис. 2),

$$C_n = 1300 \text{ МэВ}. \quad (5)$$

Из уравнений (2)–(5) следует, что при

$$k_{эф} = 0,98, \quad (6)$$

$\nu = 2,5$, $W_p = 2250$ МВт мощность протонного пучка должна составлять 30, электронного пучка — 730 МВт. Видно, что мощность даже протонного пучка чрезвычайно велика. Достигнутая к настоящему времени мощность протонных пучков примерно в 50 раз ниже необходимой. В связи с этим становятся актуальными исследования, в которых изучается возможное снижение мощности пучка заряженных частиц. Очевидный путь — это снизить подкритичность реактора. Так, можно рассмотреть ЖСР с $k_{эф} = 1 - \beta \approx 0,997$ [7, 8], тогда мощность пучка, питающего реактор, могла бы быть снижена до приемлемого уровня. Однако столь малая подкритичность недостаточна для исключения реактивных аварий, хотя приемлема для управления реактором.

Принцип, позволяющий снизить мощность источника нейтронов без уменьшения подкритичности, известен [20] — он состоит в каскадном размножении нейтронов в системе двух связанных реакторов с подавленной обратной связью между ними. Одна возможность подавления обратной связи основана на пороговом характере сечения деления ядер ^{237}Np [21]. Ниже рассмотрена другая возможность, обладающая некоторыми преимуществами. Впрочем, окончательный выбор наилучшей схемы подавления обратной связи может быть сделан только при дальнейших исследованиях и зависит от типа и назначения реактора.

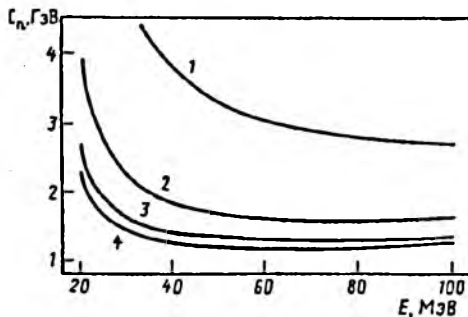


Рис. 2. Энергия пучка электронов, затрачиваемая на рождение одного фотоядерного нейтрона в жидкой соли: 1—4 — содержание плутония в соли $\text{LiF} + \text{BeF}_2$ 1, 4, 10 и 20 мол. доли, % соответственно

Напомним идею каскадной схемы реактора. Пусть внутри реактора 1 рождается первичный нейтрон, который порождает n_1 нейтронов. Пусть w_{12} — вероятность попадания нейтрона из реактора 1 в реактор 2. Предположим также, что вероятность перехода нейтронов в обратном направлении пренебрежимо мала:

$$w_{21} \approx 0 \text{ (реально } w_{12} \gg w_{21}). \quad (7)$$

Наконец, пусть каждый нейтрон, перешедший в реактор 2, порождает там n_2 нейтронов. Тогда полное число нейтронов, возникающих от одного первичного, $n = w_{12}n_1n_2$. Если вероятность w_{12} достаточно велика ($w_{12} \geq 0,1$), то при сравнительно небольших значениях n_1 и n_2 (т.е. на глубоко подкритических связанных реакторах) можно добиться больших значений n . Таким образом, связанные реакторы позволяют увеличить умножение нейтронов при одновременном повышении ядерной безопасности размножающей системы [20, 21]. Важно придать такой системе свойства внутренней присущей безопасности. Для этого необходимо, чтобы при всех мыслимых авариях система в целом становилась бы еще более подкритичной. Этого можно добиться следующим образом (см. рис. 1).

Имеются два коаксиальных цилиндрических ЖСР. По существу это два бака с жидкой топливной солью, вставленные один в другой. Пучок входит в реактор 1 и генерирует в нем первичные нейтроны. Концентрация делящихся ядер в этом реакторе велика, а его радиус r_1 мал (меньше длины замедления нейтронов), чтобы w_{12} была достаточно велика. Энергетический спектр нейтронов в этом реакторе быстрый или промежуточный: $E_m \geq 100$ эВ, где E_m — медианная энергия нейтронов. В отличие от реактора 1 реактор 2 является тепловым: $E_m \sim 0,1$ эВ.

Чтобы обеспечить условие (7), в реакторе 1 растворено достаточно большое (количественные критерии приведены в работе [10]) количество ядер, поглощающих резонансные и тепловые нейтроны (например, лантаноидов GdF_4 , SmF_4). Сечения поглощения нейтронов на этих ядрах в данной области чрезвычайно велики ($\sigma_{nr} \sim 10^4$ б) и быстро спадают с ростом энергии нейтронов. Таким образом, нейтроны реактора 1 фактически не поглощаются этими ядрами, а нейтроны, попадающие из реактора 2 в реактор 1, сильно поглощаются, чем обеспечивается условие (7).

Внутренняя безопасность гарантируется двумя свойствами: поглотитель не выпадет в осадок в условиях работы реактора, реактор остановится, если стенка бака 1 разрушится. Действительно, экспериментально доказано [1, 3], что молекулы фторидов актиноидов MF_4 радиационно устойчивы. Химические свойства лантаноидов и актиноидов тождественны. Отсюда следует первое свойство. Соль, находящаяся в реакторе 1, является поглотителем нейтронов реактора 2, поэтому при разрушении стенки бака 1 система становится более подкритической, откуда следует второе свойство.

В работе [10] на основе двухгруппового приближения спектра нейтронов показано, что типичный размер реактора 1 таков: $r_1 \sim 0,15$ м — радиус, $H \sim 4$ м — высота; радиус и высота реактора 2 — ~ 4 м. При этом число делений, вызываемых первичным нейтроном, появляющимся в реакторе 1,

$$N_f \approx 0,24 / \Delta k_1 \Delta k_2, \quad (8)$$

где Δk_1 , Δk_2 — эффективная подкритичность. Проанализируем сначала КЖСР с электрическим пучком — КЖСР (эл.). Из уравнений (2), (5) и (8) следует, что при $W_r = 2250$ МВт и $P_b = 25$ МВт должно быть $N_f = 580$, что достигается при условии

$$\Delta k_1 \Delta k_2 = 4,3 \cdot 10^{-4}. \quad (9)$$

Например, возможны случаи $\Delta k_1 \approx \Delta k_2 \approx 0,02$ либо $\Delta k_1 \approx 0,043$, $\Delta k_2 \approx 0,01$.

В работе [10] показано, что отношение тепловых мощностей реакторов $W_1/W_2 \approx 0,04$. Следовательно, при $W_r = W_1 + W_2 = 2250$ МВт $W_1 \approx 90$ МВт.

При $r_1 \sim 0,15$ м объем «бака» реактора 1 $V_1 \sim 0,2$ м³, поэтому энергонапряженность в нем составит $q_v \sim 500$ МВт/м³, что типично для ЖСР [1, 3]. Если вместо одного бака реактора 1 взять пять одинаковых и каждый «освещать» пучком электронов, то в каждом баке $q_v \sim 100$ МВт/м³, что совпадает с энергонапряженностью активной зоны протекта жидкосольевого USR [1, 3]. Аналогичным образом оцениваются характеристики КЖСР с протонным пучком — КЖСР (пр.).

Итак, можно представить два типа КЖСР, удовлетворяющих условию (9), что соответствует уровню подкритичности (6): КЖСР малой мощности — $W_r = 200$ МВт (эл.), P_b равно 0,2 и 5 МВт в случае протонного и электронного ускорителя соответственно; КЖСР большой мощности — $W_r = 1000$ МВт (эл.), P_b равно 1 и 25 МВт в случае протонного и пяти электронных ускорителей мощностью по 5 МВт соответственно. В первом случае в реактор 2 вставлен один бак реактора 1, во втором — пять при подпитке электронами и один — при подпитке протонами.

В качестве протонного ускорителя наиболее выгоден изохронный циклотрон. Согласно условию (2) при $N_f \sim 500$ $P_b \sim 1$ МВт. Такая низкая мощность пучка оказывается даже невыгодной, поскольку высокий к.п.д. циклотрона достигается при 10 МВт. Отсюда следует вывод, что для КЖСР (пр.) наиболее выгоден режим $P_b \sim 10$ МВт, $\Delta k_1 \sim \Delta k_2 \sim 0,06$, что по безопасности соответствует подкритическому реактору простой схемы с коэффициентом размножения $\sim 0,95$. Такой циклотрон потребляет от сети ~ 13 МВт, или 1,3% электрической мощности реактора.

Особенности протонных и электронных линейных ускорителей, подпитывающих подкритический ЖСР. Из-за существенного различия массы электрона и протона частота возбуждаемых в резонаторах протонного ускорителя электромагнитных колебаний существенно ниже, чем у электронного. У протонных ускорителей темп набора энергии eU/λ (здесь e — заряд протона; U — напряжение на ускоряющем зазоре; λ — длина волны возбуждаемых электромагнитных колебаний) существенно ниже, чем в электронных. По этим причинам длина, габариты источников питания ускоряющих волноводов и соответственно стоимость намного превосходят характерные для электронных ускорителей. При оптимальной по цене нейтрона энергии протонов 1 ГэВ длина ускорителя протонов составляет 1 км, что значительно превышает характерный размер реактора. Факт существенной непропорциональности составных узлов комплекса, состоящего из ускорителя и реактора, вызывает естественное желание искать другие решения.

При разработке протонных линейных ускорителей большой интенсивности возникают проблемы, связанные с потерей частиц в процессе ускорения. По оценкам [22—24] эти потери не должны превышать 10^{-8} А/м, чтобы обеспечить допустимый уровень активации ускорителя, его приемлемый период эксплуатации и разумные эксплуатационные расходы. Согласно данным [23] при среднем токе протонного пучка 100 мА реально достижимый коэффициент потерь составляет 1 мкА/м, что в 100 раз выше допустимого. Снижение потерь до указанного уровня — трудно реализуемая в настоящее время задача, на решение которой уйдет долгое время и большие средства. Оценки, основанные на данных работы [25], показывают, что из-за накопления радиационных дефектов «время жизни» меди в ускорителе будет небольшим (10—15 лет). Потерянные при ускорении протоны производят реакции глубокого расщепления ядер меди, поэтому возникает значительная и медленно уменьшающаяся (за $T_{1/2} \sim 10$ лет) активация ускорителя. С увеличением тока пучка потери протонов возрастут. Следовательно, для протонного линейного ускорителя потребуются дорогостоящая защита от излучения и увеличение расходов на эксплуатацию.

Все изложенное было принято во внимание при сравнении параметров протонных и электронных линейных ускорителей, подпитывающих жидкосольевой реактор тепловой мощностью 2250 МВт (см. таблицу). Основные данные об электронных ускорителях взяты из работы [22] и результатов расчетов [10].

Основные характеристики протонных и электронных ускорителей

Характеристика	Частица		
	p	p	e
Энергия, МэВ	1000	800	50—100
Длина, м	1000	Циклотрон	30—50
Стоимость, млн дол.	1000	100—200	20
Мощность пучка, МВт	1	1	25
	29 для ЖСР		
Потребляемая мощность электрического питания, МВт и % мощности реактора	21 (2,1%) 49 (4,9%)	4 (0,4%)	50 (5%)
Тепловые потери, МВт	20	3	25
Наведенная активность через 10 сут после остановки, Ки/м	0,2 6		10^{-5}
Время жизни ускорителя, год	~50 20	~50	~50
Наличие ускорителя	Есть Нет	Есть близкие по параметрам	В стадии проектирования
Затраты на ремонт за 30 лет, млн дол.	Малы 400	Малы	Малы

Для случая протонного линейного ускорителя анализируются два типа реакторов: КЖСР с $N_f = 580$, $\Delta k_1 \Delta k_2 = 4,3 \cdot 10^{-4}$ (верхние цифры) и ЖСР с $k_{эф} = 0,98$ (подкритический реактор простой схемы), т.е. с такой же подкритичностью, как КЖСР в случае $\Delta k_1 \sim \Delta k_2 \sim 0,02$ (нижние цифры).

Как видно из таблицы, КЖСР можно подпитывать ускорителем типа LANSCE. В случае ЖСР требуется гораздо более мощный ускоритель с током протонов ~30 мА. Проблемы, связанные с созданием таких ускорителей, обсуждаются давно [11, 23].

Система из пяти электронных резонансных линейных ускорителей, подпитывающих КЖСР указанной мощности, имеет значительные преимущества перед линейными протонными, основными из которых являются дешевизна, простота, надежность, компактность. Отсюда следует нетривиальный вывод — цена первичного нейтрона не является в действительности существенным параметром. В случае электронных ускорителей нет проблемы, связанной с потерями частиц в процессе ускорения, а также других, присущих протонным линейным ускорителям (экологических, эксплуатационных, ремонтных и др.). Благодаря использованию пяти ускорителей их можно ремонтировать без остановки КЖСР.

Ближайшим аналогом подобного ускорителя мог бы быть проект [26], который принят к разработке в 1989 г. в Японии фирмой PNC. Цель проекта — создание электронного линака с непрерывным током, предназначенного для трансмутации отходов АЭС. Проект включает в себя поэтапное создание электронного ускорителя на энергию 100 МэВ и током 1 А в непрерывном режиме. В проекте предусмотрены следующие основные этапы: создание технологической базы и линейного ускорителя на 10 МэВ с непрерывным током 100 мА; инженерная проработка и доведение параметров линака до энергии 100 МэВ с непрерывным током 100 мА; исследование выхода линака на номинальные параметры: 100 МэВ, 1 А.

Ввод пучка электронов мощностью 5 МВт в жидкую соль не составит трудности. Электрон энергией 100 МэВ тормозится в жидкой соли на длине ~20 см (радиационная

длина), оставляя здесь $\sim 15\%$ энергии на ионизационные потери. При сечении пучка $\sim 100 \text{ см}^2$ энергонапряженность в поверхностном слое составит $\sim 250 \text{ МВт/м}^3$, что приемлемо. При необходимости тепловыделение в слой можно уменьшить в 10 раз, если сканировать пучок по поверхности соли, как это делалось на ускорителе «Факел» [27], или же расфокусировать пучок электронов. Оставшиеся 85% энергии электрона уносятся тормозные фотоны, проникающие в соль на большую глубину ($\sim 1,5 \text{ м}$).

Циклотрон для подпитки КЖСР. Рассмотрим состояние дел с разработкой изохронных циклотронов с жесткой фокусировкой [28]. Мощность пучка в таких ускорителях составляет десятки мегаватт при плотности заряда 10^{10} см^{-3} . В этом случае напряженность электрического поля на поверхности пучка составляет $\sim 0,5 \text{ МВ/м}$, что приводит к значительным силам, расталкивающим частицы в пучке. Компенсировать их можно, применяя сильную фокусировку пучка путем значительного увеличения вариации магнитного поля. Предельный средний ток в циклических установках с жесткой фокусировкой согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям составляет $200\text{—}300 \text{ мА}$. Таким образом, возможность создания циклотронов током до $\sim 10 \text{ мА}$ не вызывает сомнений.

Особого рассмотрения требует уменьшение доли потерь до $10^{-4}\text{—}10^{-5}$ при выводе пучка из камеры ускорителя. В 1963 г. в качестве одного из вариантов решения этой проблемы было предложено создание специального циклотрона [29], в котором соседние орбиты разделены по радиусу на такое расстояние, что между ними можно поставить обычную отклоняющую выводную систему. Такое разделение орбит достигалось увеличением набора энергии за оборот до $30\text{—}60 \text{ МэВ}$ и соответственно существенным увеличением высокочастотной мощности ускорителя до $40\text{—}60 \text{ МВт}$, в связи с чем разработка проекта прекратилась.

В настоящее время в мире работает один циклотронный комплекс, по параметрам близкий к требуемым, — это циклотрон PSI (Швейцария) на энергию протонов 590 МэВ [30]. Ускоритель построен в начале 70-х годов и представляет собой два секторных циклотрона. Основной ускоритель создан на основе восьмисекторного магнита и четырехрезонаторной ускоряющей системы. При токе пучка $1\text{—}1,5 \text{ мА}$ потери на выводе составляют $3 \cdot 10^{-4}$.

В ЛЯП ОИЯИ много лет ведутся работы по созданию сильноточных протонных циклотронов с разделенными секторами. Основным результатом работ можно считать вывод об отсутствии принципиальных ограничений для создания на основе циклотрона с разделенными секторами ускорительного комплекса с энергией протонов до 800 МэВ и током до $1\text{—}10 \text{ мА}$ [31]. В качестве инжектора можно использовать линейный ускоритель на 50 МэВ или четырехсекторный циклотрон с жесткой фокусировкой.

В начале 80-х годов была принята программа разработки проекта сильноточного ускорителя, в результате чего был подготовлен проект суперциклотрона, основные параметры которого следующие:

Энергия ускоренных протонов, МэВ . . .	800
Ток ускоренных протонов, мА . . .	10—30
Энергия инжектируемых протонов, МэВ . . .	50
Частота колебаний, отн. ед.:	
по вертикали . . .	1,45—1,35
радиальных . . .	1,12—1,95
Радиус инжекции, см . . .	244
Среднее поле на радиусе инжекции, Т . . .	0,402
Конечный радиус, см . . .	651
Среднее поле на конечном радиусе, Т . . .	0,723
Набор энергии на оборот, МэВ . . .	2
Частота, МГц:	
обращения ионов . . .	6,13
ускоряющего напряжения . . .	49,04
Число ускоряющих резонаторов . . .	4

Напряжение на резонаторе, кВ . . .	500
Высокочастотная мощность, МВт . . .	9—27
Число секторов . . .	8
Диаметр магнита по ядру, м . . .	2
Высота магнита, см . . .	700
Мощность, МВт:	
питания магнита . . .	2
ВЧ-потерь в резонаторах . . .	1
пучка . . .	8—24
Доля потерь при выводе пучка . . .	10^{-5}

Ускоряющая система суперциклотрона состоит из четырех резонаторов, аналогичных PSI, которые обеспечивают ускоряющее напряжение на зазоре до 500 кВ. Исследована возможность возбуждения высокочастотного резонатора с помощью нескольких петель связи.

В ЛЯП ОИЯИ создана модель двухсекторных магнитов в масштабе 1:5 и сформировано требуемое магнитное поле с точностью лучше чем 0,4%. На основе расчетов показано, что, используя дополнительные магниты, в зоне вывода можно создать такие условия, при которых равновесная орбита ускоренного пучка отделяется от предыдущей на 3—4 см и при этом не возбуждаются некогерентные колебания. Таким образом, в экспериментально полученном поле показана возможность почти 100%-ного вывода пучка из камеры ускорителя. Этот вывод подтвержден экспериментально на построенной в ОИЯИ электронной модели секторного циклотрона.

На современном уровне развития ускорительной техники считается целесообразным использовать циклотроны при токе пучка ускоренных протонов до десятков мА. При токе протонов 100 мА линейный способ ускорения становится более экономичным, но при этом также придется уменьшать потери пучка в процессе ускорения.

Анализируя многолетний опыт работы ускорителя PSI, других секторных циклотронов, фазотрона ЛЯП ОИЯИ, можно отметить, что эти установки имеют высокую надежность, высокий коэффициент использования и для их обслуживания требуется небольшой штат. При многолетней работе требуется ревизия, ремонт и замена электротехнического и высокочастотного оборудования. Итак, наиболее подходящими для КЖСР являются резонансные линейные электронные ускорители или изохронные циклотроны. Для окончательного выбора наиболее выгодного типа ускорителя необходима дальнейшая теоретическая и экспериментальная проработка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н. и др. Ядерные реакторы повышенной безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Robertson R. Conceptual Design Study of a Single-Fluid Molten-Salt Breeder Reactor. ORNL-4541, 1971.
3. Новиков В.М., Игнатьев В.В., Федулов В.И., Черединых В.Н. Жидкосольные реакторы: перспективы и проблемы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Furukawa K. Design study of small molten salt fission power station suitable for coupling with accelerator molten salt breeder. — In: Proc. ICENES-4. Madrid: World Sci. Publ. Co, 1987, p. 235—243.
5. Mays G. MSR Program Semiannual Progress Report. ORNL/TM-5759, 1978.
6. Максимычев А.В., Меньшиков Л.И., Осадчий А.И. и др. О возможности применения электронных ускорителей для выжигания радиоактивных отходов АЭС: Препринт ИАЭ-5575/14, 1992.
7. Alekseev P.N., Ignat'ev V.V., Kolyaskin O.E. et al. Possibility of Transmutation of Radioactive Wastes from Nuclear Reactors in Subcritical Molten-Salt Reactor with Photonuclear Neutron Source based on Electron Accelerator: Preprint IAE-5764/4, 1994.
8. Krasnykh A.K., Men'shikov L.I., Popov Yu. P. et al. SCANUR: a subcritical reactor with electron linacs for transmutation of nuclear wastes. — In: Proc. Particle Accelerator Conf. PAC-93, Washington, USA, May 17—20, 1993.
9. Alekseev P.N., Ignat'ev V.V., Kolyaskin O.E. et al. Conception of electron beam-driven subcritical molten-salt ultimate safety reactor. — In: Proc. Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications. Las Vegas, USA, July 25—29, 1994.

10. Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е. и др. Концепция жидкосолевого подкритического реактора повышенной безопасности: Препринт ИАЭ-5857/2, 1995.
11. Nuclear Technologies in Sustainable Energy Systems. Eds. G. Bacur and A. Macdonald. Berlin—New York: Springer-Verlag, 1983.
12. Барнет К., Харрисон М. Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. М.: Энергоатомиздат, 1987.
13. Басов Н.Г., Субботин В.И., Феокистов Л.П. Ядерный реактор повышенной безопасности с источником нейтронов на основе импульсного термоядерного синтеза. — Вестник РАН, 1993, т. 63, вып. 10, с. 878—891.
14. Герштейн С.С., Петров Ю.В., Попомарев Л.И. Мюонный катализ и ядерный бриддинг. — Успехи физ. наук, 1990, т. 160, вып. 8, с. 1—46.
15. Меньшиков Л.И., Сомов Л.Н. Современное состояние мюонного катализа ядерных реакций синтеза. — Там же, с. 47—103.
16. Рютов Д.Д. Открытые ловушки. — Там же, 1988, т. 154, вып. 4, с. 565—614.
17. Alekseev P.N., Ignat'ev V.V., Kolyaskin O.E. et al. Conception of Electron Beam-Driven Subcritical Molten-Salt Ultimate Safety Reactor. — In: Proc. Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications. Las Vegas, USA, July 25—29, 1994.
18. Bowman C.D., Arthur E.D., Lisowski P.W. et al. Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation Using an Accelerator-Driven Intense Thermal Neutron Source: Preprint LA-UP-91-2601, 1991.
19. Garimati F., Rubbia C. Energy Amplifier. CERN/AT/93-47(ET), Geneva, 1993.
20. Avery R. Coupled reactors. — In: Proc. 2-nd UN Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, 1958, v. 12, p. 182—199.
21. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Импульсный источник нейтронов с вентильной схемой. — Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, № 4, с. 10—25.
22. Linear Accelerators. Eds. P. Lapostolle, A. Septier. Amsterdam, 1970.
23. Капчинский И.М. Сильноточные ускорители протонов. — Успехи физ. наук, 1980, т. 132, вып. 4, с. 639—671.
24. Farkas Z. The Roles of Frequency and Aperture in Linac Accelerator Design: Preprint SIAC-PUB-4722, 1988.
25. Лаврухина А.Л. Глубокое расщепление ядер меди протонами с энергией 680 МэВ. — Атомная энергия, 1957, т. 2, вып. 4, с. 345—352.
26. Sato A. The project of high current electron accelerator. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991, p. 533—536.
27. Алексеев Н.И., Кикнадзе Г.И., Коляскин О.Е. и др. Импульсный источник медленных нейтронов электронного ускорителя «Факел»: Препринт ИАЭ-4512/14, 1987.
28. Proc. of the 13-th Intern. Conf. on Cyclotrons and their Applications. List of Cyclotrons. Vancouver, 1992, p. 771—773.
29. Martin J.A. The separated orbit cyclotron. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1966, v. 13, p. 288—293.
30. Stambach Th. Experience with the high current operation of the PSI cyclotron. — In: Proc. of the 13-th Intern. Conf. on Cycl. and their Applications, Vancouver, 1992, p. 28.
31. Джелепов В.П. Эффект расширения орбит на циклотроне: Препринт ОИЯИ 39-9066, 1975.

Поступила в Редакцию 31.05.95

УДК 621.039.58

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС «ПАКШ»

Симонов К.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Немеш И. (АЭС «Пакш»)

На АЭС «Пакш» работают четыре энергоблока с ВВЭР-440 (проект В-213). Каждый реактор имеет номинальную тепловую мощность 1375 МВт и при проектных условиях эксплуатации обеспечивает электрическую мощность энергоблока 440 МВт. В активной зоне по гексагональной решетке размещается 349 шестигранных ТВС, 37 из них — топливные подвески механических органов регулирования.

В 1990—1994 гг. специалистами РНЦ «Курчатовский ин-т» и АЭС «Пакш» выполнен комплекс научно-технических разработок, которые использованы при лицензировании в надзорных органах Венгрии перевода АЭС на 4-годовичную кампанию топлива с повышенным выгоранием, а также легли в основу технических решений об