

О выборе типа ускорителя для управления энергетическим подкритическим реактором

М.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, Ю.А. Свистунов, А.П. Строкач
*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В.Ефремова, Санкт-Петербург, Россия*

Исследование подкритических реакторов с внешней нейтронной подсветкой сделает безопасными и более эффективными АЭС, а также бортовые энергетические установки, работающие на ядерном топливе. Важной проблемой является также уменьшение отходов плутония. В нескольких работах предлагалось использовать для получения нейтронных потоков ускорители заряженных частиц как линейные, так и циклотроны [1, 2, 3]. В настоящем сообщении рассматриваются возможности производства нейтронов на различных мишенях пучками ускоренных электронов, протонов и дейтронов и оценивается эффективность и экономичность использования различных типов ускорителей заряженных частиц в качестве усилителей энергии. Тип ускорителя и его конструктивные особенности определяются мощностью энергетической установки, требованиями к ее компактности, механической прочности, стационарности или мобильности.

Требования к параметрам пучка

Концепция использования ускорителя для управления подкритическим реактором в последнее время вызывает значительный интерес. В основном предлагаются схемы, требующие создания мощных ускорителей [1,2,3] с мощностью выведенного пучка несколько десятков МВт, которая необходима для управления реактором с тепловой мощностью порядка 2000 МВт. Однако есть предложения и по снижению мощности пучка. В работе [4] предлагается использовать небольшой бустер в центре большого мощного реактора. Оба реактора подкритичные: первый вследствие малых размеров и большой утечке нейтронов на поверхности, а второй вследствие коэффициента размножения $k > 1$. Использование бустера позволяет снизить мощность пучка до 5 МВт при тепловой мощности станции 2 ГВт. В указанных выше работах, кроме [2], в качестве ускорителя-драйвера предлагается использовать циклотрон. В работе [2] мощный электронный линейный ускоритель с рециркуляцией пучка был предложен для трансмутации ядерных отходов, но подобную схему можно было бы использовать в качестве ускорителя-драйвера. На наш взгляд, предпочтительным является использовать в качестве драйвера линейный ускоритель ионов. В линейном ускорителе легче получить гораздо большие средние токи, чем в циклотроне — лучше качество самого пучка; нет проблемы вывода пучка из ускорителя и радиационную обстановку легче контролировать. Возможности различных пучков частиц по производству нейтронов на различных мишенях можно видеть из табл. 1.

Из таблицы видно, что мощность электронного пучка для производства одинакового количества нейтронов должна быть примерно на порядок выше, чем ионного пучка, а выигрыш от замены протонного ускорителя на дейтонный будет меньше, чем сложности при создании и эксплуатации ускорителя дейтронов. В качестве примера рассмотрим схему линейного ускорителя протонов в качестве усилителя энергии для реактора, работающего на высокообогащенном уране-235. С ростом энергии падающего пучка возрастает количество нейтронов, производимых одной ускоренной

частицей на мишенях полного поглощения, и компромисс между конечной энергией падающих частиц и средним током в пучке определяется габаритами ускорителя, с одной стороны, и способностью ускоряющей структуры пропустить без потерь средний ток, позволяющий получить требуемую мощность в пучке, с другой.

Таблица 1: Потоки нейтронов при бомбардировке урановой и бериллиевой мишени электронами, протонами и дейтонами.

			Энергия ускоренных частиц, МэВ						
			25		50		75		100
Поток $n_0^1, n/c$	тип частицы	A	ток уск.,мА	A	ток уск.,мА	A	ток уск.,мА	A	ток уск.,мА
10^{13}	e	U	0.2	U	0.06	U	0.04	U	0.03
10^{13}	p	Be	0.1	U	0.006	U	0.003	U	0.002
10^{13}	d	Be	0.08	U	0.004	U	0.0025	U	0.0015
10^{14}	e	U	2	U	0.6	U	0.4	U	0.3
10^{14}	p	Be	1	U	0.06	U	0.03	U	0.02
10^{14}	d	Be	0.8	U	0.04	U	0.025	U	0.015
10^{15}	e	U	20	U	6	U	4	U	3
10^{15}	p	Be	10	U	0.6	U	0.3	U	0.2
10^{15}	d	Be	8	U	0.4	U	0.25	U	0.15
10^{16}	e	U	200	U	60	U	40	U	30
10^{16}	p	Be	100	U	6	U	3	U	2
10^{16}	d	Be	80	U	4	U	2.5	U	1.5

Для реактора с тепловой мощностью 200-300 МВт максимально разумной выходной энергией драйвера будет энергия частиц 80-100 МэВ. При энергии 100 МэВ коэффициент конверсии нейтрон-протон составляет 1.02 n/d и 0.92 n/d. Суммарная плотность потока нейтронов внешнего источника, при которой обеспечивается нормальная работа такого реактора, должна быть не менее 10^{14} нейтронов/сек·см², т.е. средний ток ускорителя протонов будет 5 мА.

Выбор режима работы ускорителя

Предпочтение отдается линейному высокочастотному ускорителю протонов с рабочей частотой 433 МГц. В линейном ускорителе сравнительно просто получить средний ток 5 мА, благоприятную радиационную обстановку, нет проблемы ввода-вывода пучка и его доставки в рабочую зону реактора. Выбор частоты 433 МГц определяет относительно малые размеры ускорителя, если для ускорения использовать Н-резонаторы, работающие на Н(TE)-виде колебаний. В качестве начальной части ускорителя (НЧУ) используется резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), позволяющий осуществить 100%-ый захват частиц в ускорение; для ускорения от 2 до 10 МэВ — резонатор с трубками дрейфа и поперечными держателями, использующий переменную фазовую фокусировку [5], имеющий наилучший шунт-импеданс среди известных типов структур в этом диапазоне энергий; для ускорения от 10 до 100 МэВ используется модификация структуры с поперечными держателями и дополнительной фокусировкой магнитным полем, которое создается линзами на постоянных магнитах, расположенных внутри некоторых трубок дрейфа.

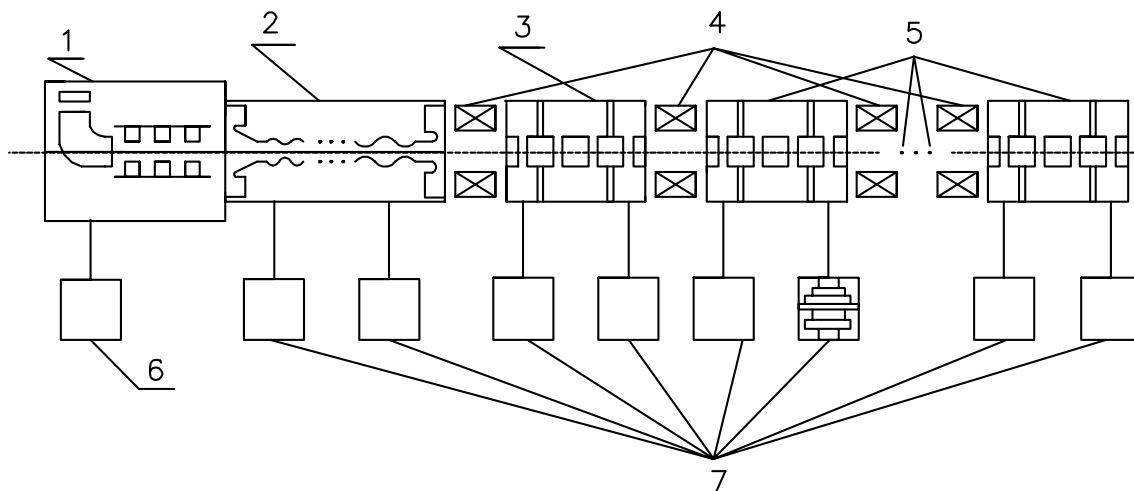


Рис. 1: Схема основных узлов ускорителя-драйвера с выходной энергией протонов 100 МэВ: 1 — инжектор в системе доускорения; 2 — НЧУ — резонатор с ПОКФ; 3 — резонатор с переменнo-фазовой фокусировкой; 4 — магнитные линзы; 5 — ОЧУ — 9 резонаторов; 6 — система питания инжектора; 7 — каналы системы ВЧ-питания с эндотроном в качестве выходного каскада усилительной мишени.

В качестве усилителя мощности окончного каскада в системе ВЧ-питания ускорителя можно использовать прибор типа эндотрон с рабочей частотой (433 ± 5) МГц. Имеется усилитель мощности “Киви” с параметрами:

выходная импульсная мощность	500 кВт;
скважность	66;
длительность импульса	150 мксек.

Конструкция эндотрона предусматривает объединение в одном прочном вакуумном керамическом корпусе автономных входной и выходной контурных систем взаимодействия с электронным потоком. Внутри вакуумного объема резонаторные системы подключаются непосредственно к электродам лампы с сеточным управлением. Благодаря этому снижается энергия, накапливаемая в схеме, полностью используется активная часть лампы, исключается воздействие на спаи керамики с металлом больших ВЧ-напряжений и токов, и в результате значительно уменьшаются общие объемы каскада, а также достигается широкая полоса рабочих частот. Таким образом, в приборах этого типа создаются идеальные условия для триода в рабочей полосе частот.

На основе конструкции двухкаскадного эндотрона “Киви” принципиально возможно достижение следующих параметров усилителя с большой средней мощностью:

импульсная мощность на выходе	350-400 кВт;
средняя мощность	40 кВт;
длительность импульса	600 мксек;
рабочая полоса частот	15 МГц.

Эти параметры достигаются с помощью модернизации эндотрона “Киви”. При этом каждый из резонаторов ускорительного тракта будет возбуждаться двумя эндотронами.

Заключение

Предварительные расчеты показывают, что создание сравнительно компактного ускорителя-драйвера на основе протонного линака с выходной энергией 100 МэВ вполне возможно на современном уровне развития технологии ускорителей. Энергопотребление установки с учетом КПД эндотронов и модуляторов, потребностей системы инжекции, вакуумной системы и вспомогательного оборудования составит около 1 МВт средней мощности, вес около 20 тонн, линейные размеры $30 \times 2 \times 2$ м³.

Литература

1. Ю.М.Адо, В.Н.Крючков, В.Н.Лебедев. Атомная энергия, т.77, вып.4, октябрь 1994, с.300.
2. G.I.Batskikh, B.V.Bekhtev, V.A.Boiko, V.V.Jeljan, A.V.Metshenko. Preprint of Moscow Radiotechnical Institute. Moscow, 1990.
3. C.Rubbia, S.Buono, E.Gonzalez, Y.Kadi and J.A.Rubio. Preprint CERN/AT/95-53(ET) Geneva, 1995.
4. H. Daniel, Yu.V. Petrov. Feasibility Study of an Subcritical Fission Reason Driver by the Low Power Accelerator. Preprint 1989. Gatchina, 1994.
5. S.A.Minaev, Yu.A.Svistynov, S.A.Silaev. Modeling and testing of APF Caviti RF Field. Proceedings of Second International Workshop: BDO-95, July 4-8,1995, St.Peterburg, Russia, p.132.
6. Yu.V.Afanasiev et al. Advances at NPK LUTS 433 MHz Compact Ion Linac. Proceedings of the 18 International Linac Conference. Geneva. 1996. (to be published) Abstract of Paper, p.86.