

прибыли АЭС. При оценке экономического эффекта от такой передачи следует иметь в виду, что она в значительной степени осложнена возможностями муниципальных служб и предъявляемыми требованиями к техническому состоянию принимаемых ими на баланс объектов. Зачастую выполнение условий передачи указанных объектов требует затрат на их ремонт, реконструкцию и т.п. Конечно, подготовка объектов социальной сферы, находящихся на балансе АЭС, к их передаче в муниципальную собственность и сама передача возможны и без объединения АЭС в единую компанию, однако следует признать, что возможности объединенной компании для несения затрат, сопровождающих такую передачу, в принципе больше, чем у отдельно работающей АЭС.

Обсуждая необходимость для АЭС снять с себя груз затрат по содержанию тех или иных объектов социальной сферы путем передачи в муниципальную собственность, следует констатировать недостаточную изученность возможной обратной связи между такой передачей и социальной комфортностью персонала станции, имеющей немаловажное значение. Это — тема специального исследования. Пока же отметим, что снижение затрат на содержание социальной сферы и социальное развитие на 30% по сравнению с нынешними даст возможность снизить тариф на электроэнергию на 1,8%, если же удастся снизить указанные затраты на 50%, тариф можно будет уменьшить уже на 3,6%.

Таким образом, самый предварительный анализ свидетельствует о возможности еще до интегрирования АЭС в единую энергогенерирующую компанию, а затем и при ее создании снизить тариф на отпускаемую электроэнергию не менее чем на 15% по сравнению с нынешним средневзвешенным всех отдельно действующих АЭС (с учетом ценовой ставки на услуги эксплуатирующей организации).

Резюмируя изложенное, следует констатировать, что АЭС России далеко еще не исчерпали резерв своей конкурентоспособности, но для его реализации необходимы срочные и кардинальные меры, в том числе по структурному изменению в управлении отраслью.

Поступила в Редакцию 21.07.99

УДК 621.039.5+621.3.038.624

## **РЕАКТОР С ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ МАКЕТА ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ**

*Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Свистунов Ю.А. (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова),  
Кудинович И.В., Петров Э.Л., Струев В.П. (ЦНИИ им. А.Н. Крылова)*

Основным качеством, которым должна обладать ядерная установка независимо от ее назначения (производство энергии, утилизация плутония, трансмутация радионуклидов), является безопасность. Безопасность ядерной установки заключается в защите населения, эксплуатационного персонала и окружающей среды от неприемлемого уровня радиационного воздействия как при нормальной эксплуатации, так и в случае аварии. В соответствии с современной концепцией безопасности [1] перспективные ядерные установки должны обладать свойством самозащищенности, т.е. предотвращать недопустимое развитие аварийных процессов, вызванных отказом оборудования или ошибками эксплуатационного персонала, благодаря своим физическим особенностям, а также за счет пассивных защитных систем. Кроме того, ядерная установка должна обладать устойчивостью к внешним воздействиям, не связанным с ее эксплуатацией.

В связи с повышением требований к безопасности ядерных установок в последние годы усилился интерес к электроядерным установкам, в которых реакция деления ядер осуществляется в подкритическом реакторе, а необходимая плотность нейтронного потока обеспечивается дополнительным источником нейтронов большой интенсивности. Такой мощный источник нейтронов может быть получен при облучении мишеней из разных веществ интенсивным пучком заряженных частиц, ускоренных в ускорителе до энергии в сотни МэВ. В электроядерной установке принципиально исключена возможность тяжелой реактивной аварии с разгоном реактора на мгновенных нейтронах, так как реактор является подкритическим при отсутствии в активной зоне органов системы компенсации реактивности. Выбор подкритичности требует специального анализа, в настоящее время считается, что максимальный эффективный коэффициент размножения ( $K_{эф}$ ) в реакторе электроядерной установки не должен превышать 0,98 [2].

Одним из требований к физическим характеристикам активной зоны является незначительное изменение  $K_{эф}$  при работе реактора, так как его уменьшение приводит к необходимости увеличивать ток заряженных частиц в ускорителе (необходимый ток ускорителя выбирается в соответствии с минимальным  $K_{эф}$ ). Учитывая, что для теплового реактора температурный эффект реактивности и эффект отравления составляют примерно  $-0,06$ , для быстрого от  $-0,03$  до  $-0,01$  [2], в электроядерной установке целесообразно использовать активную зону с высокоэнергетическим спектром нейтронов, для которых диапазон изменения  $K_{эф}$  в процессе эксплуатации составляет 0,95—0,98.

В электроядерной установке с тепловым реактором можно увеличить умножение нейтронов источника за счет использования каскадной схемы активной зоны. Каскадная активная зона [3, 4] состоит из бустерной зоны на быстрых нейтронах, которая окружает мишень, генерирующую нейтроны, и основной внешней активной зоны на тепловых нейтронах. Обратная нейтронная связь между бустерной и основной зоной подавляется за счет размещения материалов, поглощающих тепловые нейтроны, на границе раздела зон или в бустерной зоне. Расчетный анализ умножения внешнего источника в каскадных подкритических размножающих системах [3, 5] показал, что при коэффициенте размножения системы 0,95 ( $K_{эф}$  для каждой из зон меньше 0,95) умножение нейтронов в каскадной системе, предназначенной для трансмутации, в 2—3 раза больше, чем в однозонной системе. Из работы [5] следует, что умножение нейтронов в каскадной системе может быть дополнительно повышено в 2—2,5 раза, если повысить  $K_{эф}$  бустерной зоны с соответствующим уменьшением ее размеров. На основании изложенного можно сделать вывод, что в реакторе электроядерной установки помимо активной зоны с высокоэнергетическим спектром нейтронов целесообразно использовать каскадную активную зону, а использование водо-водяных тепловых реакторов, получивших наибольшее распространение в современной ядерной энергетике, не является оптимальным.

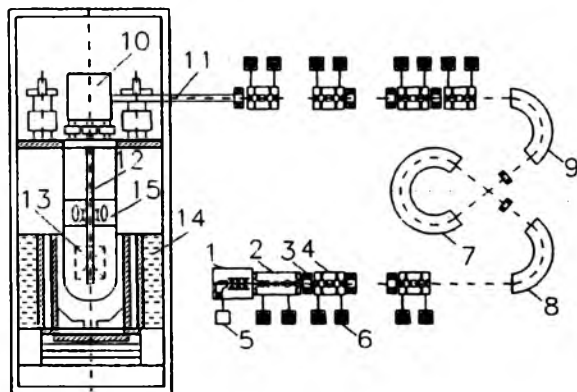
Отсутствие опыта создания электроядерных установок не позволяет в настоящее время однозначно определить оптимальный тип реактора. Для решения этой задачи необходимо проработать проекты с реакторами разного типа и провести их сравнительный анализ. При выборе реактора наряду с физическими соображениями следует учитывать степень отработанности предлагаемых технических решений, исходя из опыта реакторостроения. К числу реакторов, опыт использования которых имеется в ядерной энергетике, относятся газоохлаждаемые, поэтому они могут быть предложены как один из вариантов. Наиболее перспективным теплоносителем для газоохлаждаемых реакторов является гелий. Преимущества и недостатки реакторов, охлаждаемых гелием, хорошо известны. Гелий слабо поглощает нейтроны, благодаря чему в газоохлаждаемых реакторах на быстрых нейтронах улучшается воспроизводство топлива

и снижается изменение реактивности вследствие выгорания топлива. Кроме того, потеря теплоносителя и изменение его плотности незначительно изменяют реактивность активной зоны. Таким образом, слабое изменение реактивности в процессе работы является существенным преимуществом реактора с гелиевым теплоносителем в составе электроядерной установки. К достоинствам гелиевого теплоносителя относятся неактивируемость, что повышает радиационную безопасность, термическая стойкость молекул, позволяющая создать высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) и повысить термодинамическую эффективность установки, химическая инертность, предотвращающая коррозию конструкционных материалов. Недостатками газовых теплоносителей являются ухудшенные по сравнению с жидкостями теплофизические свойства. Это приводит к необходимости повышать давление в первом контуре до 4—7 МПа и затрудняет теплоотвод от активной зоны в случае аварий, приводящих к разгерметизации первого контура и нарушению циркуляции теплоносителя. Однако в ВТГР тепловой мощностью до 200 МВт и малого размера появляется возможность отвода остаточного тепловыделения пассивными средствами (естественная конвенция, теплопроводность, излучение) [1].

Кардинальным решением проблемы защиты ядерных установок от внешних воздействий (падение самолета, воздействие оружия и т.п.) является их размещение в подземном пространстве. В частности, в исследованиях [6] предлагается разместить ВТГР под землей. В настоящее время считается, что размещение ядерной установки под землей на глубине более 50 м в штольне с характерным поперечным сечением 12 м позволяет защитить радиационно опасное оборудование от поражающего воздействия современного оружия [7]. Допустимые размеры подземных помещений налагают габаритные ограничения на оборудование ядерной установки, поэтому для подземной ядерной энергетической установки предполагается использовать транспортные реакторы тепловой мощностью около 200 МВт [7]. Технические решения по созданию компактной одноконтурной атомной газотурбинной установки, изложенные в работе [8], открывают возможности создания компактной активной зоны тепловой мощностью до 600 МВт на базе шарового твэла малого диаметра, ТВС модульной конструкции с твердым замедлителем и радиальной раздачей теплоносителя. При размещении электроядерной установки с ВТГР в подземном пространстве, исходя из габаритных ограничений и требований самозащитенности, целесообразно ограничить ее единичную тепловую мощность 200 МВт. В случае необходимости создания станции большей мощности в подземном пространстве можно разместить несколько электроядерных установок.

Размеры подземных помещений налагают ограничения не только на конструкцию ядерного реактора, но и на параметры ускорителя заряженных частиц. Благодаря специальным компоновочным решениям (рис. 1) линейный ускоритель протонов со средним током  $I_p$  5 мА при энергии ускоренных протонов  $E_p$  200 МэВ может быть размещен в помещении длиной около 15 м и диаметром около 10 м [9]. Тепловая мощность

Р и с. 1. Схема электроядерной установки:  
1 — инжектор и система доускорения; 2 — НЧУ-резонатор с пространственно-однородной фокусировкой; 3 — магнитные линзы; 4 — резонатор с переменнo-фазовой фокусировкой; 5 — система питания инжектора; 6 — каналы системы ВЧ-питания с эндотроном 500 кВт, 433 МГц; 7, 8, 9 — поворотные магниты на 270, 135, 135 °С соответственно; 10 — сплиттер; 11 — ионопровод; 12 — канал подвода пучка с мишенью; 13 — активная зона; 14 — радиационная защита; 15 — реактор



( $N_T$ ), которую можно получить в установке с этим ускорителем и активной зоной некаскадного типа, можно оценить по формуле [2]

$$N_T = \frac{I_p K_{эф} \omega n_0}{\nu(1 - K_{эф})q},$$

где  $\omega$  — энергия, выделяемая при делении одного ядра топлива;  $n_0$  — коэффициент конверсии, т.е. число нейтронов, генерируемых одной ускоренной частицей в мишени;  $\nu$  — среднее число нейтронов на акт деления топлива;  $q$  — заряд ускоренной частицы. Для активной зоны с  $K_{эф}$  0,95 и урановой мишенью ( $n_0 = 5$  при  $E_p = 200$  МэВ [2])  $N_T = 40$  МВт. Можно ожидать, что переход на каскадную активную зону позволит повысить тепловую мощность электроядерной установки до 250 МВт.

Из изложенного следует, что подземная электроядерная установка единичной мощностью 200 МВт на базе подкритического ВТГР с каскадной активной зоной и линейного ускорителя протонов со средним током 5 мА и энергией частиц 200 МэВ соответствует концепции безопасности перспективных ядерных установок: обладает внутренней самозащищенностью и устойчивостью к внешним воздействиям.

Выбор типа ускорителя-драйвера обсуждался в работе [9], и предпочтение было отдано линейному высокочастотному ускорителю протонов. Требования компактности и надежности ускорителя в сочетании с необходимым средним током определяют максимально возможную рабочую частоту в диапазоне 400—450 МГц. Выбор рабочей частоты в этом диапазоне определяет относительно малые размеры ускорителя, если для ускорения использовать  $H$ -резонаторы, работающие на  $H(TE)$ -колебаниях. Для ускорения частиц до 2 МэВ используется резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, позволяющей осуществить почти 100%-ный их захват в ускорение, для ускорения от 2 до 10 МэВ — резонатор с трубками дрейфа и перекрестными держателями, где применяется переменнo-фазовая фокусировка [10], для ускорения от 10 до 200 МэВ возможна модификация структуры с перекрестными держателями с применением дополнительной фокусировки магнитным полем, которое создается линзами на постоянных магнитах, расположенных внутри трубок дрейфа (возможно, не во всех). Импульсный режим работы и размер скважности определяются требованием надежного отвода тепла от ускоряющих резонаторов. Например, в резонаторе начальной части ускорителя длиной 1,5 м для создания напряженности ускоряющего поля 140 кВ/см требуется 300 кВт мощности, что приводит к удельным потерям в стенках 19 Вт/см<sup>2</sup>. Поэтому разумной скважностью будет 10, при которой удельные потери составят около 2 Вт/см<sup>2</sup>. Таким образом, основные параметры ускорителя на рис. 1 следующие:

|                                                                        |         |
|------------------------------------------------------------------------|---------|
| Сорт частиц . . .                                                      | Протоны |
| Рабочая частота, МГц . . .                                             | 425—433 |
| Энергия, МэВ . . .                                                     | 200     |
| Ток в импульсе, мА . . .                                               | 50      |
| Средний ток, мА . . .                                                  | 5       |
| Импульсная мощность усилителя оконечного каскада ВЧ-питания, кВт . . . | 500     |
| Длительность импульса, мкс . . .                                       | 100     |
| Общее число резонаторов . . .                                          | 22      |

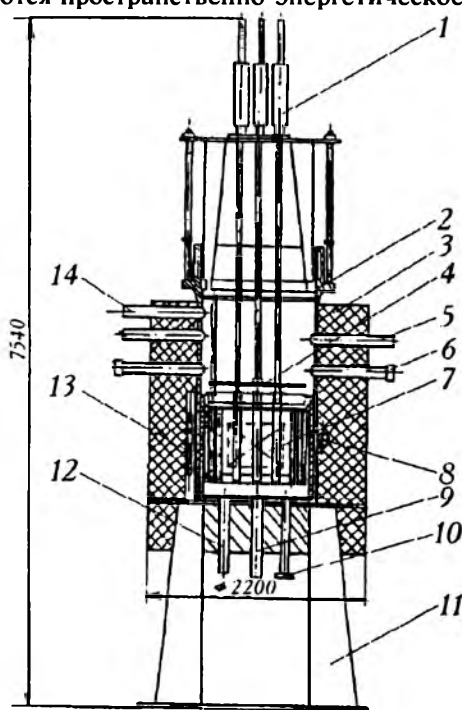
В качестве усилителя мощности оконечного каскада в системе ВЧ-питания резонаторов ускорителя можно использовать прибор типа эндотрона АО «Светлана» или мощные клистроны иностранных фирм. Отметим, что при мощности электроядерной установки 500 МВт для питания двух реакторов мощностью по 250 МВт можно ис-

пользовать один ускоритель со средним током 10 мА и энергией протонов 200 МэВ. В этом случае рабочая частота ВЧ-ускорителя должна быть снижена до 300—350 МГц.

Исходя из современного состояния разработок основных элементов электроядерной установки с газоохлаждаемым реактором и линейным ускорителем протонов, ближайшим этапом этого проекта должно явиться создание действующего физического макета, где может быть продемонстрирована принципиальная возможность создания установки и проведены экспериментальные исследования в обоснование принимаемых научно-технических решений. С помощью физического макета должны быть определены нейтронные поля в активной зоне, установлена связь между параметрами пучка заряженных частиц и нейтронной мощностью установки, оптимизированы структура и состав подкритической активной зоны (в частности, определено умножение нейтронов в каскадной активной зоне), изучена кинетика подкритического реактора с регулируемым внешним источником нейтронов, исследованы нейтронно-физические характеристики активной зоны в аварийных условиях (заполнение активной зоны водой, поступление воздуха в реактор), а также отработаны технические решения по созданию мишени, генерирующей нейтроны под воздействием пучка заряженных частиц (выбор материалов, температурный режим работы). Действующий физический макет электроядерной установки может быть создан на базе критического стенда Г-1 ЦНИИ им. А.Н. Крылова и линейного ускорителя протонов НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Стенд Г-1 (рис. 2, 3) создан для исследования нейтронно-физических характеристик активной зоны ВТГР [11]. На стенде изучаются пространственно-энергетическое распределение потока нейтронов, реактивность активной зоны, температурные эффекты реактивности, эффективность органов системы управления и защиты. В состав стенда Г-1 входят критическая сборка, СУЗ, контрольно-измерительная система, системы управления техническими средствами, сбора и обработки информации, электроснабжения, радиационного контроля, технологические системы, помещения, включающие защитный бокс.

Активная зона набирается из модулей, содержащих шаровые твэлы и твердый замедлитель, и блоков отражателя. До 55 модулей располагаются в узлах правильной треугольной решетки с шагом 66,2 мм. Сборка модуля активной зоны состоит из ТВС и модуля замедлителя. Шаровые твэлы засыпаны в кольцевой зазор между двумя концентрическими трубами (высота активной части ТВС 405 мм). Твэл диаметром 4,2 мм содержит топливный керн из нитрида урана с 90%-ным обогащением по  $^{235}\text{U}$ , покрытый  $^{184}\text{W}$ . ТВС устанавливается в модуле замедлителя, представляющего собой стальную трубу, на которую надеты кольца гидрида циркония ( $\text{ZrH}_{1,85}$ ). При необходимости кольца замедлителя могут быть сняты (активная зона на быстрых нейтронах) или заменены на кольца из другого материала, например, графита. Между модулями могут размещаться до 110 стержней выгорающего поглотителя с наполнителями из оксидов самария, гадолиния или эрбия. В ка-



Р и с. 2. Стенд Г-1: 1 — приводы СУЗ; 2 — корпус; 3 — теплоизоляция; 4 — подвижная плита органов компенсации реактивности; 5 — патрубок системы охлаждения ионизационных камер; 6 — кабели электронагревателей; 7 — активная зона; 8 — пусковой источник нейтронов; 9 — патрубок системы заполнения и дренажа воды; 10 — кабели измерительных датчиков; 11 — опора; 12, 14 — патрубок подвода и отвода гелия соответственно; 13 — ионизационные камеры



Р и с. 3. Критическая сборка стенда Г-1

честве отражателя используется бериллий. На стенде Г-1 предусмотрена возможность проведения исследований с заполнением критической сборки водой. При отсутствии воды активная зона может разогреваться в гелиевой и воздушной среде внутренними нагревателями или за счет прокачки гелия через внешний нагреватель. Максимальная температура ТВС при разогреве в гелиевой среде  $850^{\circ}\text{C}$ , гидрида циркония  $350^{\circ}\text{C}$ .

В физическом макете электроядерной установки мишени, генерирующие нейтроны, могут быть размещены в герметичных чехлах внутри активной зоны, пучок заряженных частиц от ускорителя к мишени подводится через сплиттер и специальный ионопровод. Система электроснабжения стенда Г-1 мощностью 600 кВт позволяет обеспечить ускоритель необходимой электроэнергией. Физический макет установки на базе стенда Г-1 и линейного ускорителя протонов может быть смонтирован в защитном боксе.

В качестве ускорителя для внешнего источника нейтронов в физическом макете установки можно использовать ускоритель УИЛ-2-433, созданный в

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, дополненный резонатором, позволяющим ускорять протоны до конечной энергии 10 МэВ. Установка УИЛ-2-433 включает систему инжекции, ускоряющий резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой с выходной энергией протонов 2 МэВ, систему ВЧ-питания с эндотроном ВМ-105 в качестве усилителя оконечного каскада, вспомогательные блоки.

Система инжекции включает следующие основные элементы:

поверхностно-плазменный источник  $\text{H}^+$  или  $\text{H}^-$  с пеннинговой геометрией разрядной камеры (источник размещен внутри вакуумного объема);

поворотный магнит со сменными полюсными наконечниками, который формирует пучок энергией 15—20 кэВ и устраняет сопутствующие основному пучку компоненты «лишних» частиц, вылетающих из источника;

электростатическую систему фокусировки и доускорения пучка  $\text{H}^+$  или  $\text{H}^-$  до 60 кэВ, состоящую из набора электродов с разным потенциалом.

Металлогидридная система очистки предварительно очищает водород. Магнитное поле газоразрядной камеры формируется полюсами поворотного магнита и равно 0,15 Тл при производстве  $\text{H}^-$ . Основу магнита составляют мелкие блоки из сплава КС-37 (СмСо). Для получения большого тока в источник наряду с водородом добавляется цезий. Вакуумная система инжектора имеет два турбомолекулярных насоса и обеспечивает давление на выходе инжектора  $6,7 \cdot 10^{-5}$  Па. В бесцеиевом режиме возможно получить ток  $\text{H}^+$  и  $\text{H}^-$  15—20 мА и нормализованный эмиттанс пучка в плоскостях  $x\text{х}'$  и  $y\text{у}'$   $2 \cdot 10^{-7}$  и  $10^{-7}$  рад·м соответственно.

Ускоряющая структура представляет собой четырехкамерный резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. Геометрические и физические параметры резонатора таковы:

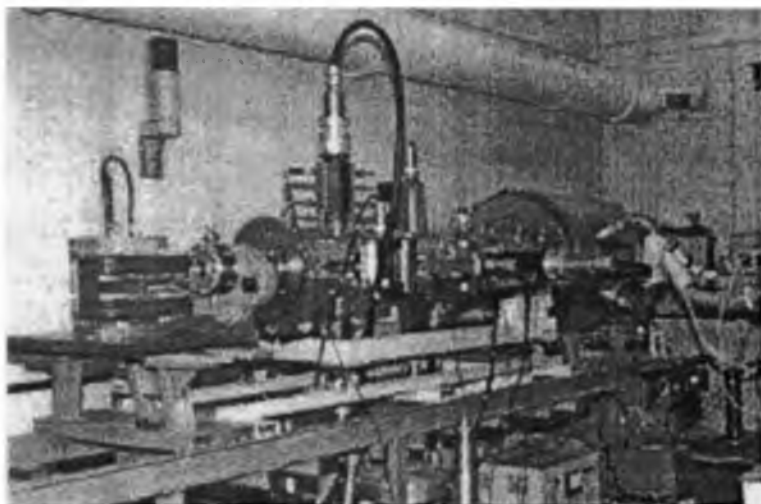
|                                    |                               |
|------------------------------------|-------------------------------|
| Ускоряемые частицы . . .           | $\text{H}^+$ или $\text{H}^-$ |
| Рабочая частота, МГц . . .         | 433                           |
| Энергия ионов на входе, кэВ . . .  | 60                            |
| Энергия ионов на выходе, МэВ . . . | 2                             |

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Число ускоряющих периодов . . .                                                 | 220       |
| Длина электродов, мм . . .                                                      | 1552      |
| Общая длина резонатора, мм . . .                                                | 1590      |
| Ток в импульсе, мА . . .                                                        | До 60     |
| Коэффициент токопрохождения при токе 40 мА, % . . .                             | 87        |
| Напряжение между электродами, кВ . . .                                          | 98        |
| Конечная синхронная фаза, град . . .                                            | 30        |
| Средний радиус ускоряющего канала, мм . . .                                     | 3,5       |
| Минимальный радиус ускоряющего канала, мм . . .                                 | 2         |
| Нормализованный эмиттанс пучка на выходе, рад·м . . .                           | $10^{-6}$ |
| Импульсная ВЧ-мощность, подаваемая в резонатор<br>в отсутствие пучка, кВт . . . | 250       |
| Добротность резонатора (теоретическая) . . .                                    | 8600      |

Система ВЧ-питания содержит следующие основные блоки: задающий генератор, предварительный и оконечный каскады усиления мощности, импульсный источник анодного питания накала, синхронизатор, системы автоматической регулировки амплитуды и автоматической подстройки частоты. В качестве усилителя оконечного каскада используется эндотрон ВМ-105. Его рабочие параметры таковы:

|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| Импульсная мощность на входе, кВт . . .  | 1            |
| Импульсная мощность на выходе, кВт . . . | 500—1200     |
| Длительность импульса, мкс . . .         | 100—24       |
| К.п.д. анодной цепи, % . . .             | 30           |
| Рабочий диапазон частот, МГц . . .       | $433 \pm 15$ |

Система ввода мощности в резонатор обеспечивает подавление паразитных колебаний, оставляя только рабочий квадрупольный тип [12]. Общий вид ускорителя УИЛ-2-433 показан на рис. 4. Большая скважность импульсной системы питания не позволяет использовать этот ускоритель в качестве драйвера для подкритического реактора. Однако в ближайшее время система ВЧ-питания будет заменена. В новой системе ВЧ-питания усилителем оконечного каскада будет эндотрон «Колесо» АО «Светлана», который имеет импульсную мощность 400—500 кВт при скважности 66 и длительности импульса до 150 мкс. Кроме того, разработан резонатор с трубками дрейфа



Р и с. 4. Общий вид ускорителя УИЛ-2-433

и перекрестными держателями для ускорения протонов от 2 до 10,6 МэВ [10]. Этот резонатор дополнит ускоряющую систему, и в нем будет использована переменнo-фа-зовая фокусировка для стабилизации продольного и поперечного движения частиц. Такой ускоритель энергией 10 МэВ со средним током до 0,7 мА может эффективно работать на стенде Г-1 ЦНИИ им. А.Н. Крылова и позволит испытать различные типы мишеней.

Таким образом, есть возможность создания компактной безопасной электроядер-ной энергетической установки мощностью 200 МВт на базе подкритического реактора с газовым теплоносителем и линейного высокочастотного ускорителя протонов. Экс-периментальный стенд для исследования взаимодействия реактора с ускорителем-драйвером может быть создан в ближайшие 3—4 года.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н. и др. Ядерные реакторы повышенной безопасности (анализ концептуальных разработок). М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. Адо Ю.М., Крючков В.П., Лебедев В.Н. Энергетический подкритический реактор с подсветкой пучком ускоренных протонов. — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 4, с. 300—308.
3. Колесов В.Ф., Штарев С.К., Хоружий А.К. и др. Эффективность электроядерного устройства с бланкетом на расплавленных солях и нептуниевой размножающей мишенью. — Там же, 1995, т. 79, вып. 1, с. 40—45.
4. Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. — Там же, вып. 5, с. 327—337.
5. Селиверстов В.В. Умножение нейтронов внешнего источника в каскадных подкритических системах с односторонней обратной связью. — Там же, 1996, т. 81, вып. 5, с. 378—390.
6. Teller E., Ishikawa M., Wood L. e.a. A conceptual-level point design of a high-temperature gas-cooled central power station system. — In: ICENES'96, Obnynsk, 1996.
7. Петров Э.Л., Шалик Г.П., Хазов Б.С. и др. Подземные атомные теплоэлектроцентрали на базе корабельных АЭУ. — Труды Межд. конференции по судостроению (С.-Петербург, секция D), 1994, с. 332—336.
8. Струев В.П. Исследование и экспериментальное обоснование конструкций атомной газотурбинной установки с гелиевым теплоносителем с учетом их газодинамических и гидравлических особенностей. Автореф. дис. на соискание учен. степени доктора физ.-мат. наук, С.-Петербургский государственный университет, 1995.
9. Ворогушин М.Ф., Свистунов Ю.А., Строкач А.П. и др. О возможности создания безопасной транспортнoй атомной энергетической установки на базе электроядерного устройства. — Труды научного семинара памяти В.П. Саранцева, Дубна, 1998, с. 97—102.
10. Struev V.P., Pashin V.M., Petrov E.L. Test facilities of KSR1 nuclear power engineering laboratories for solving nuclear, radiation and environmental problems. — In: Proc. of an ENS Class1 Topical Meeting «Research Facilities for the Future of Nuclear Energy», Brussel, 1996.
11. Minaev S.A., Svistunov Yu.A., Silaev S.A. Modeling and testing of APF cavities RF Field. — In: Proc. of Workshop BDO-95, 1995, St-Petersburg, Russia, p. 132.
12. Vorogushin M.F., Svistunov Yu.A. Key systems of an 433 MHz ion linac for applied purposes. — In: Proc. of Linac 96 Conf., Geneva, 1996, v. 2, p. 866.

Поступила в Редакцию 28.04.99

УДК 621.039.5

#### НОДАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОЛЕЙ НЕЙТРОНОВ В РЕШЕТКАХ С ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

БАТУРИН Д.М. (МИФИ)

В настоящее время наибольшее развитие получили нодальные методы для расчета полей нейтронов в реакторах с прямоугольными элементами загрузки активной зоны. Активная зона ВВЭР, быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем состоит из ТВС с гексагональным поперечным сечением. Таким образом, разработка эффективных методов расчета нейтронных полей в гексагональных решетках является важной с практической точки зрения задачей.