

УДК 621.3.038.628

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ НГ-12И ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Воронин Г.Г., Морозов А.В., Свиньин М.П., Солнышков Д.А.

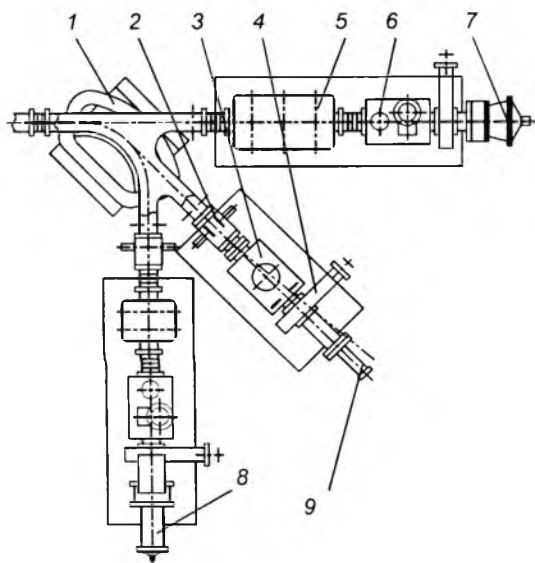
(ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова),

Кирюшкин С.В., Магда Э.П., Мокичев Г.В., Сауков А.И., Семков А.Л.

(РФЯЦ — ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина)

Генератор нейтронов НГ-12И, представляющий собой ускоритель ионов дейтерия с ускоряющим напряжением 200 кВ и током пучка атомарных ионов на мишени 10 мА, разработан и изготовлен НИИЭФА им. Д.В. Ефремова и с 1995 г. используется в РФЯЦ — ВНИИТФ в качестве источника нейтронов энергией ~ 14 МэВ (D—T) и $\sim 2,5$ МэВ (D—D) для исследования ядерно-физических характеристик конструкционных материалов и нейтронно-активационных измерений.

Первоначальный вариант ускорителя предполагал использование одного канала транспортировки пучка, который сепарировался электромагнитом, установленным под углом 45° после ускорительной трубки, и фокусировался на вращающейся титанотригетивной мишени диаметром 230 мм с помощью дублета электромагнитных квадрупольных линз [1]. В 1996 г. на генераторе начались научно-исследовательские работы в области нейтронной терапии, а также программа работ по исследованию неоднородной радиационной защиты термоядерных реакторов, что потребовало существенных изменений в количестве и конфигурации каналов транспортировки ускоренного пучка и установки дополнительных мишенных устройств.



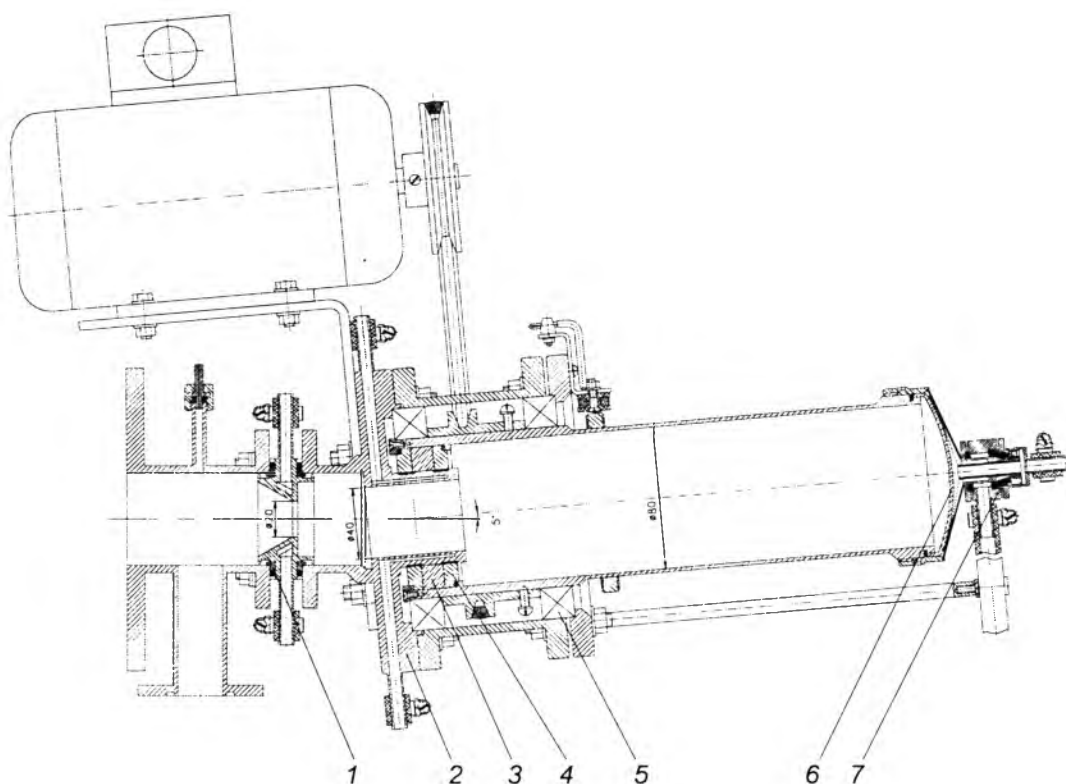
Р и с. 1. Структурная схема ионопровода генератора нейтронов НГ-12И: 1 — анализирующий магнит; 2 — отклоняющая система; 3 — вакуумная камера с «нарезающей» диафрагмой; 4 — вакуумный затвор; 5 — триплет квадрупольных линз; 6 — прерыватель пучка; 7—9 — мишенное устройство

Масс-сепаратор с углом поворота 45° был заменен электромагнитом, установленным под углом 90° , с двойной фокусировкой, после которого были сформированы три канала транспортировки пучка: первый (0°) для проведения нейтронной терапии злокачественных новообразований, второй (45°) для постановки времяпролетной методики измерения нейтронных спектров и третий (90°) для работ по исследованию защиты термоядерных реакторов и проведения других исследовательских работ. Общий вид каналов транспортировки пучка с мишенными устройствами показан на рис. 1.

В третьем канале транспортировки пучок атомарных ионов после масс-сепаратора фокусируется на вращающейся мишени диаметром 90 мм дублетом электромагнитных квадруполь-

ных линз. Для генератора было разработано мишенное устройство (рис. 2), в котором вакуумно-плотное соединение вращающегося узла и неподвижного корпуса осуществляется с помощью жидкости, удерживаемой в зазоре между валом и неподвижным цилиндром сильным магнитным полем. Мишень вращается с частотой до 1000 об./мин и охлаждается водой, протекающей в зазоре между подложкой и экраном. При токе пучка 10 мА выход нейтронов составляет $(0,9—1,1)10^{12} \text{ с}^{-1}$ в зависимости от качества мишени.

Основными элементами системы импульсного режима являются отклоняющая система, генератор отклоняющих импульсов, токоприемник с диафрагмой и мишень. Ионопровод сконструирован таким образом, что прямой пучок ионов попадает на токоприемник, охлаждаемый водой. На отклоняющие пластины, установленные на высоковольтных керамических изоляторах в блоке отклоняющей системы, подаются импульсы напряжения амплитудой 5 кВ, длительностью 20 нс, частотой 100 кГц. Отклоненный пучок проходит через диафрагму токоприемника и попадает на мишень. Титанотригидриевая мишень диаметром 23 мм установлена в охлаждаемом водой мишенном устройстве, конструкция которого согласована с облучаемыми образцами. В настоящее время в основном завершена экспериментальная отработка импульсного режима: проведена юстировка тракта, отлажен аппаратный комплекс, сняты калибровочные спектры с образцом сферической формы из алюминия. Длительность полученного нейтронного импульса, измеренная на полувысоте пика γ -излучения, составляет 20 нс. Начаты работы по проведе-



Р и с. 2. Мишенное устройство: 1 — диафрагма; 2 — фланец; 3 — магнит; 4 — магнитопровод; 5 — узел вращения; 6 — мишень; 7 — узел охлаждения

нию сравнительных измерений спектров образцов конструкционных материалов с ранее полученными. Проводится модернизация системы для повышения ее основных параметров.

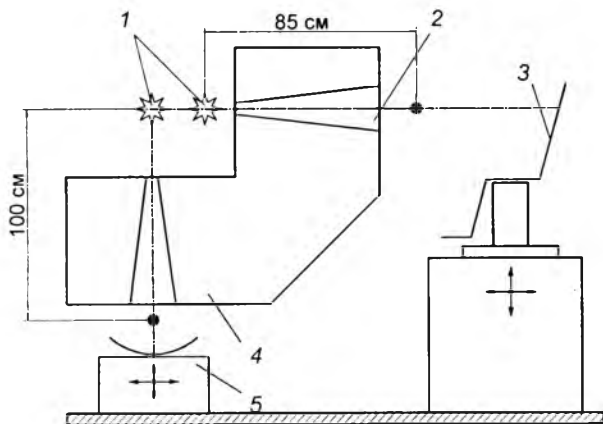
Исследовательские работы в области нейтронной терапии начались в 1996 г. В медицинском канале вращающаяся с частотой 500 об./мин мишень диаметром 230 мм облучалась пучками D_1^+ , D_2^+ , D_3^+ , которые разделены в пространстве с помощью дополнительного масс-сепаратора, установленного непосредственно перед мишенью. Это позволяло использовать весь пучок, полученный из ускорителя, при сохранении высокого срока службы мишени. При ускоряющем напряжении 220 кВ и токе пучка 15 мА был получен выход нейтронов $1,4 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ [2]. Вместе с тем из-за трудностей в изготовлении мишеней большого диаметра в настоящее время работы проводятся с мишенями диаметром 90 мм, что существенно ограничивает возможности установки.

Научно-методическое сопровождение работ по нейтронной терапии осуществляется специалистами Челябинского областного онкологического диспансера. В 1996—1998 гг. проводились работы по исследованию характеристик нейтронных полей, формируемых в процедурном боксе сменными коллиматорами различных размеров. Размеры нейтронных полей задавали специалисты диспансера, по результатам исследований были изготовлены 10 коллимирующих вставок, формирующих нейтронное поле квадратной и прямоугольной формы различных размеров [3]. Схема процедурного бокса представлена на рис. 3.

В 1996 г. совместно со специалистами Уральского научно-практического центра радиационной терапии была проведена серия радиобиологических экспериментов по определению относительной биологической эффективности (ОБЭ) нейтронов в процедурном боксе. В качестве биологического объекта использовались мыши, т.е. ОБЭ определялась на организменном уровне.

В 1999 г. на комплексе нейтронной терапии начались клинические испытания. К настоящему времени было проведено лечение более 200 человек с локализацией опухоли в области головы и шеи. План и схему лечения разрабатывали специалисты диспансера, исходя из эксплуатационных возможностей нейтронного генератора. Время одного облучения около 30 мин, доза $\sim 0,3$ Гр, число облучений на одного пациента восемь (по два облучения в день). Суммарная доза по нейтронам составила 2,4 Гр, доза по изозффекту (с учетом ОБЭ) — 14,4 Гр.

В настоящее время пропускная способность комплекса составляет 50 человек в год, что обусловлено низкой производительностью участка по изготовлению мишеней, а также недостаточно высоким потоком нейтронов. Потребность же в этом



Р и с. 3. Схема процедурного бокса: 1 — положение источников нейтронов; 2 — сменные коллимирующие вставки; 3 — кресло пациента; 4 — комбинированная защита (сталь—полиэтилен); 5 — кровать пациента

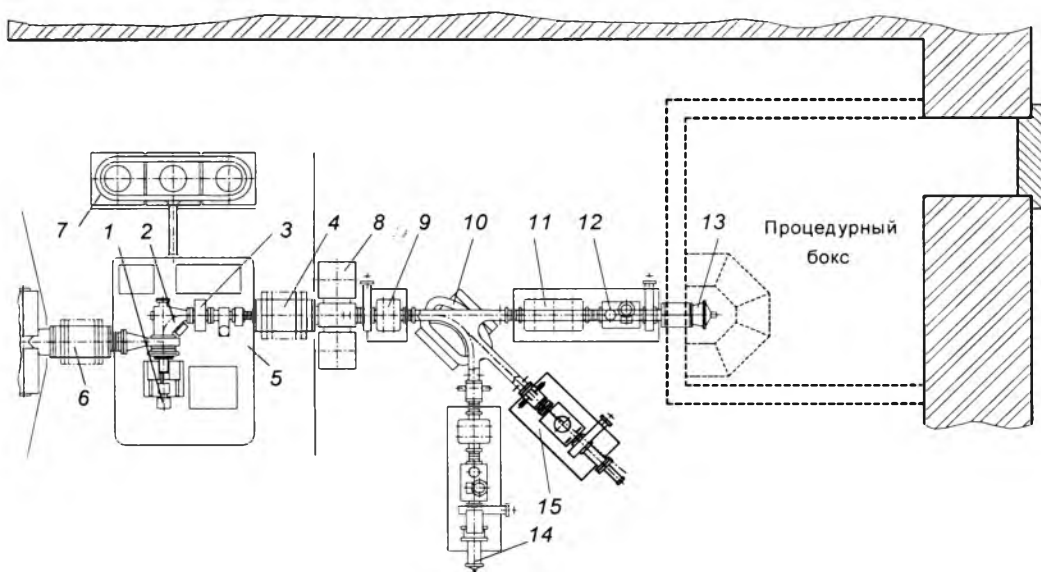
виде лечения существенно превышает возможности комплекса. В связи с этим для увеличения пропускной способности комплекса и расширения диапазона схем облучения в 2001 г. началась модернизация комплекса, основной целью которой является увеличение тока пучка ионов на мишени, что позволит увеличить мощность дозы и соответственно уменьшить время процедуры, а также значительное повышение срока службы мишеней, улучшение эксплуатационных характеристик установки и прежде всего повышение надежности работы.

После завершения модернизации генератор нейтронов должен обеспечить следующие технические параметры:

Число каналов транспортировки атомарного ионного пучка . . .	3 (0°, 45°, 90°)
Энергия ускоренных ионов, кэВ . . .	≥ 250
Нестабильность ускоряющего напряжения, % . . .	≤ 1
Диаметр пучка на мишени, мм . . .	≤ 25
Ток пучка ионов на мишени медицинского канала, мА . . .	До 30
Ток пучка ионов на мишени импульсного канала, мА . . .	До 15
Ток пучка ионов на мишени канала для физических экспериментов, мА . . .	До 20

Принципиальная схема модернизированного генератора нейтронов НГ-12И приведена на рис. 4.

Для модернизированного генератора разработан новый инжектор ионов, в котором в отличие от ранее разработанных масс-сепарация ионного пучка проводится до ускорительной трубки с помощью электромагнитного масс-анализатора, установленного в высоковольтном электроде. В инжекторе используется

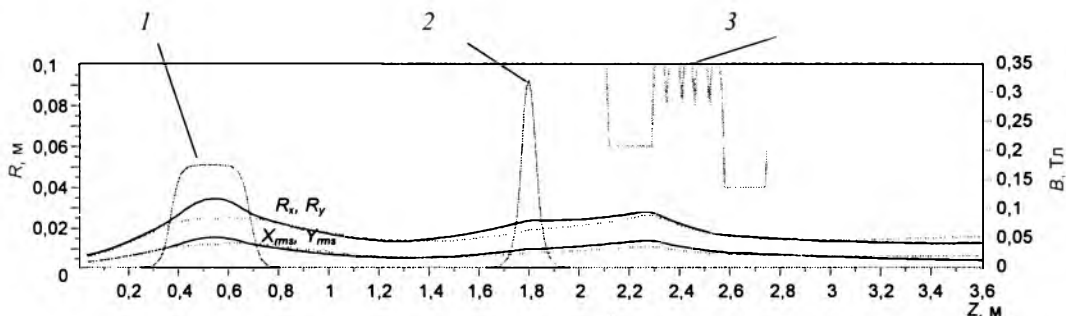


Р и с. 4. Генератор нейтронов НГ-12И: 1 — магнетрон; 2, 10 — анализирующий магнит; 3 — электромагнитная линза; 4 — ускорительная трубка; 5 — высоковольтный электрод; 6 — трубка дифференциальной откачки; 7 — блок разделительных трансформаторов; 8 — вакуумная камера; 9 — электромагнитная квадрупольная линза; 11 — триплет квадрупольных линз; 12 — прерыватель пучка; 13, 14 — мишенное устройство; 15 — импульсная система

ЭЦР-источник ионов с многоапертурной системой отбора ионов, который должен обеспечивать пучок ионов дейтерия током до 50 мА [4]. Замена источника связана с тем, что в отличие от дуоплазматрона в источниках данного типа отсутствует термокатод, замена которого обычно вызывает значительные перерывы в работе генератора, поскольку связана с вскрытием вакуумного объема, кроме того, наличие даже микротечи в газоразрядной камере дуоплазматрона или тракте газоснабжения приводит к неустойчивой работе источника. Помимо высокой надежности работы микроволновые источники ионов характеризуются тем, что позволяют получать пучки ионов с высокими оптическими характеристиками при токе в десятки мА, что особенно важно при сепарации пучка до ускорительной трубки. Пространственно-угловые характеристики пучка на входе в ускорительную трубку регулируются с помощью электромагнита с двойной фокусировкой и электромагнитной линзой. Параметры оптических элементов инжектора определяли по результатам сквозного траекторного анализа системы от источника до выхода из ускорителя. При интегрировании уравнений движения использовали приосевые разложения электрических и магнитных полей до пятого порядка включительно. Собственные поля пучка рассчитывали методом крупных частиц на основе их парного взаимодействия. Процессы зарядовой нейтрализации пучка моделировали изменением эффективного заряда крупных частиц. В качестве примера на рис. 5 приведены огибающие пучка для трех различных значений угла входа пучка. При проведении расчетов варьировали степень компенсации объемного заряда, подбирали оптическую силу линзы и ее расположение. Показано, что выбранная ионно-оптическая система позволяет получить на выходе ускорителя пучок ионов дейтерия током до 30 мА и энергией до 250 кэВ с параметрами, необходимыми для дальнейшей транспортировки к мишени.

Газ, поступающий из ионного источника, откачивается через трубку дифференциальной откачки.

Ускоренный до энергии 250 кэВ пучок атомарных ионов дейтерия током до 30 мА с помощью раздаточного электромагнита может подаваться по трем каналам транспортировки к различным мишенным устройствам. Пучок фокусируется на мишени электромагнитными квадрупольными линзами. Перед 90°-ным раздаточным магнитом планируется установка дополнительного дублета электромагнитных квадрупольных линз. На канале нейтронной терапии используется мишенное устройство с мишенью диаметром 230 мм, разработка технологии производства которых также проводится в настоящее время.



Р и с. 5. Полные и среднеквадратичные огибающие пучка в плоскостях XZ и YZ : 1 — электромагнит 90°; 2 — фокусирующая линза; 3 — ускорительная трубка

Электроэнергия для систем питания ионного источника и других устройств инжектора подается через три разделительных трансформатора, установленных рядом с высоковольтным электродом. Разработаны системы стабилизированного питания источника ионов, высоковольтных источников, источников питания электромагнитов и линз, которые работают на частоте около 20 кГц, что существенно снижает габариты источников питания и позволяет добиться более высокой стабильности параметров. Управление системами, расположенными под высоким напряжением, а также получение информации осуществляется через оптоволоконные линии связи.

К настоящему времени в НИИЭФА разработано и изготовлено оборудование, необходимое для модернизации генератора нейтронов, и проводится экспериментальная отработка систем на испытательном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Voronin G.G., Ivanov A.S., Svinin M.P. Research and applied neutron generators. — In: Proc. of the 2-nd European Particle Accelerators Conference EPAC-90, France, 1990, v. 2, p. 1827—1830.
2. Воронин Г.Г., Морозов А.В., Свинин М.П. — Тезисы докл. 9-го Всерос. сов. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 1998, с. 71.
3. Кандиев Я.З., Лукин А.В., Самойлова Л.Ю., Серова Е.В. — Там же, с. 77.
4. Voronin G., Solnyshkov D., Solnyshkov A., Svinin M. — Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B, 2000, v. 161—163, p. 1118—1122.

Рефераты статей

УДК 621.039.573

Колесов В.Ф., Хоружий В.Х. Кинетика аperiodических каскадных бустеров в аспекте их быстродействия и безопасности. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 2, с. 99—109.

Приведены результаты выполненных с помощью программы Монте-Карло расчетов простых сферически-симметричных систем, моделирующих аperiodический бустер. Расчеты преследовали цель наглядной демонстрации особенностей кинетики каскадных реакторных систем и возможностей, привносимых использованием принципа каскадности в аperiodическом бустере в аспекте повышения безопасности и улучшения временных параметров импульсов. Имелась в виду также цель определения материалов замедлителя, наиболее перспективных с точки зрения оптимизации параметров бустера. Показано, что при одинаковых полных числах делений нейтронные импульсы в каскадном бустере в сравнении с односекционным генерируются в условиях существенно более глубокой подкритичности и имеют во много раз меньшую длительность. Наиболее высокие параметры импульса получены в каскадных бустерах с замедлителями нейтронов из вольфрама, свинца и молибдена. Рис. 4. табл. 4, список лит. 20 назв.

УДК 621.039.33

Сигал Е.М. Проектный КИУМ как показатель эффективности использования установленной мощности АЭС. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 2, с. 109—114.

Анализируется «проектный» КИУМ для энергоблоков АЭС различного типа. Показано, что этот показатель не коррелируется с действующим регламентом обслуживания энергоблоков. не учитывает вероятности неплановых снижений мощности вследствие возможных отказов оборудования, а также современных условий работы АЭС в ЕЭС России. Рис. 1, табл. 3, список лит. 5 назв.

УДК 621.039.58

Тарасенко В.М. Соблюдение на АЭС принципа независимости при работе систем безопасности от энергосистемы. — Атомная энергия, 2003, т. 94, вып. 2, с. 114—120.

Цель статьи — показать, что при работе систем безопасности АЭС от энергосистемы принцип независимости, являющийся одним из основных при их проектировании, не соблюдается, а энергосистема, особенно если она дефицитная, не может гарантировать требуемое качество