

УДК 621.384.6.038.628

ГЕНЕРАТОРЫ НЕЙТРОНОВ С ВЫНЕСЕННОЙ МИШЕНЬЮ НА УДАЛЕННОМ ТОРЦЕ ИОНОПРОВОДА НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

Сыромуков С.В., Боголюбов Е.П., Юрков Д.И. (ФГУП «ВНИИА», г. Москва)
e-mail: vniia@vniia.ru

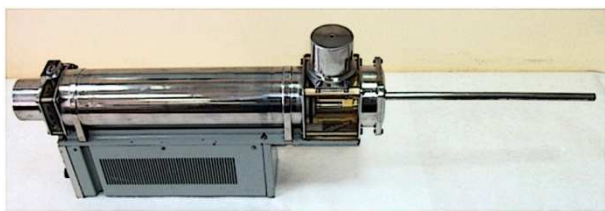
Еще на ранних этапах создания первых образцов генераторов нейтронов как одного из уникальных инструментов исследований в области нейтронной физики встал вопрос о разработке конструкции, которая имела бы вынесенную за пределы его основного объема нейтронообразующую мишень, а ее диаметр при этом был минимальным. Такая конструкция с мишенью на торце трубчатого ионопровода позволяет ее вводить в объект облучения. Благодаря малому диаметру ионопровода можно минимизировать возмущающее воздействие конструктивных элементов генератора на объект, в том числе на реактивность. При использовании таких генераторов в качестве источника моноэнергетических нейтронов сводится к минимуму появление вторичных нейтронов и γ -излучения самого генератора, энергетический спектр генерируемых нейтронов при этом имеет незначительные отличия от моноэнергетического спектра. Для некоторых исследовательских задач эта особенность нейтронных генераторов является важным преимуществом по сравнению с изотопными источниками. Еще одним их преимуществом является возможность максимально приблизить излучающую мишень генератора к облучаемому объекту или ввести внутрь через специальный канал.

В числе актуальных задач, для которых требовались генераторы с вынесенной мишенью, была задача создания компактных ЯЭУ. В 1960-е гг. актуальной была задача обеспечения космических спутников электрической энергией. Радикальное решение этой проблемы представлялось в компактных ядерных реакторах, размещаемых на борту космических аппаратов. Для отработки конструкции таких реакторов был необходим импульсный генератор нейтронов с относительно небольшим потоком 10^6 — 10^7 с⁻¹, способный генерировать нейтроны непосредственно в активной зоне, предпочтительно в ее центре. Для транспортировки нейтронов в эту область в крышке реактора и самой зоне предусматривался специальный канал, в который можно было вставить ионопро-

вод генератора и, создавая начальный поток быстрых нейтронов, исследовать кинетику реакторного устройства.

Такие генераторы начали разрабатывать в ФГУП «ВНИИА» в середине 1960-х гг. Из-за разнообразия типов и размеров проектируемых реакторных устройств ставилась задача создания линейки исследовательских генераторов с диаметром ионопровода в диапазоне 8—25 мм и длиной выноса мишени в диапазоне 100—300 мм. Сложность генераторов такого типа состоит в необходимости создания в нейтронной трубке особых условий для снижения потерь ионов на их увеличенном пути следования к мишени. С этой целью изначально был сделан выбор в пользу вакуумной нейтронной трубки, внутренняя среда которой дает возможность пропускать ускоренные ионы с меньшими потерями по сравнению с газонаполненной трубкой. В качестве источника ионов дейтерия для такой трубки был выбран источник с дуговым разрядом, способный инициировать плазму с высоким содержанием атомарных ионов дейтерия (до 70%), которые вносят основной вклад в образование нейтронов.

Другая проблема состоит в том, что для транспортировки ионов к мишени требуется сформировать в ускоряющем промежутке узкий пучок, направив его строго по центру входного отверстия ионопровода. В ионопроводе происходит расфокусировка пучка под действием объемного заряда. Если не принять дополнительных мер, то значительная часть ионов попадет на внутреннюю стенку ионопровода и не долетит до мишени. Следствием таких потерь ионов является снижение выхода нейтронов или, другими словами, низкий к.п.д. генератора. Тем не менее с помощью специальных мер для стягивания пучка к центру эту проблему в значительной степени удалось решить. В результате исследований и разработок был создан базовый ряд генераторов данного типа, который сыграл важную роль в создании малогабаритных реакторов различного применения, в том числе космического назначения.



Р и с. 1. Генератор нейтронов ТГИ94

Один из таких генераторов показан на рис. 1. Генератор имеет относительно небольшой выход нейтронов $2 \cdot 10^5$ за импульс и допускает работу на частоте до 10 Гц. Нейтронообразующая тритиевая мишень, располагаемая на торце ионопровода длиной 250 мм, имеет диаметр ~ 8 мм. С помощью таких генераторов был проведен большой объем исследований, в том числе в космической области. В 1969—1988 гг. в космос были выведены 33 спутника радиолокационной разведки с ЯЭУ.

В настоящее время актуальными являются проекты освоения дальнего космоса, в первую очередь Луны и Марса. Космические аппараты должны быть обеспечены мощными и компактными источниками энергии. Другой альтернативы, кроме энергетических ядерных реакторов следующего поколения, пока не просматривается. Для разработки таких источников энергии потребуются новые эффективные инструменты исследований, среди которых генераторы нейтронов могут занять достойное место.

Другим направлением использования генераторов нейтронов с вынесенной мишенью является лучевая терапия онкологических больных. В зависимости от вида и состояния опухоли для лечения целесообразно применять те или иные виды излучения. В частности, плотноионизирующее излучение, к наиболее доступному из которых относятся нейтроны, обладает высокой эффективностью воздействия на опухоли, резистентные к электронному и γ -излучению. В некоторых случаях для максимального повреждения клеток новообразования при минимальном воздействии на здоровые ткани используют внутриполостную брахитерапию. Этот метод дает возможность подвести источник нейтронов непосредственно к очагу опухоли, уменьшив радиационное воздействие на здоровые ткани. Брахитерапия самостоятельно или в сочетании с дистанционной терапией используется для лечения рака прямой кишки, шейки матки, влагалища, предстательной железы, опухолей ротовой полости.

Для эффективного лечения при брахитерапии источник должен иметь поток нейтронов $\sim 10^9$ с $^{-1}$. Это будет обеспечивать мощность поглощенной дозы 0,1—0,3 Гр/мин. Единственным источником нейтронов, применяемым в брахитерапии, является ^{252}Cf . Его использование в медицинских учреждениях создает сложности в связи с непрерывным характером излучения. Тем не менее до недавнего времени в брахитерапии использовался шланговый аппарат АНЕТ-В с калифорниевым источником нейтронов [1].

Перспективным источником для внутрисполостной брахитерапии может стать генератор быстрых нейтронов с запаянной трубкой, разработанный в ФГУП «ВНИИА». Нейтронная трубка для такого генератора имеет тонкий игольчатый ионопровод-аппликатор, на конце которого размещается излучающая нейтроны мишень. Аппликатор через катетер вводится в естественные полости организма таким образом, чтобы обеспечить непосредственный контакт мишени с опухолью. Важным преимуществом терапевтической установки с генератором по сравнению с изотопным источником является возможность выключения генератора после сеанса облучения. В выключенном состоянии он не излучает нейтроны. Использование управляемого источника нейтронов делает установку доступной для многих медицинских радиологических центров. Наиболее перспективным представляется использование разрабатываемого генератора для лечения таких новообразований, где внутрисполостная брахитерапия с калифорниевым источником оказалась достаточно эффективной: рака прямой кишки, рака шейки и тела матки, опухолей ротовой полости [2]. Во время сеанса облучения катетер необходимо ввести в полость организма и зафиксировать относительно установки и тела пациента. В некоторых случаях аппликатор с расположенной на его конце нейтронной мишенью будет перемещаться относительно катетера (вдоль опухоли).

Для этого был создан экспериментальный образец генератора НГ-20 на базе газонаполненной нейтронной трубки ГНТ1-МД [3]. Ее ионопровод представляет собой тонкую стальную трубку диаметром 10, длиной 150 мм. На торце ионопровода размещается мишень, излучающая нейтроны. Размеры ионопровода определяются размерами съемного катетера. Для обеспечения

комфортного лечения пациентов диаметр катетера не должен быть больше 20—25 мм. Длина катетера должна обеспечивать лечение новообразований в естественных полостях человеческого организма. Нейтронная трубка ГНТ1-МД рассчитана на напряжение 150 кВ, ток 100 мкА. Эти параметры обеспечивают поток быстрых нейтронов энергией 14,1 МэВ до 10^9 с^{-1} .

Создание запаянной трубки с игольчатым аппликатором стало основной сложностью разработки. Как отмечалось, главной проблемой для такого типа нейтронных трубок была расфокусировка пучка при движении ионов в узком длинном канале ионопровода. При выбранных длине и диаметре ионопровода 150 и 10 мм соответственно, а также ожидаемом диаметре пучка 2 мм его расходимость в аппликаторе не должна превышать 1° . При этом диаметр пучка на мишени должен составлять $\sim 3 \text{ мм}$. Поэтому необходимо было обеспечить почти идеальную параллельность пучка относительно оптической оси трубки, включая ионопровод. Сложность фокусировки пучка в пределах рабочей поверхности мишени заключалась и в том, что ионы, пройдя ускоряющую линзу, движутся в ионопроводе и на своем пути взаимодействуют с молекулами газа (дейтерия и трития). Снижение потерь ионов при транспортировке к мишени достигалось посредством:

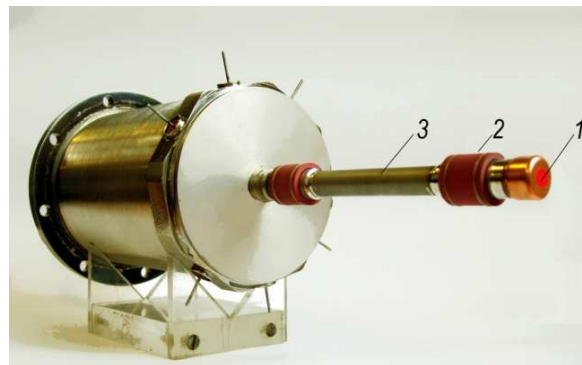
- уменьшения рабочего давления в трубке за счет использования источника Пеннинга с термокатоном;

- максимального сокращения длины пробега ионов вне ионопровода;

- применения трехэлектродной линзы для эффективного формирования пучка ионов на входе в ионопровод;

- оптимизации параметров питания ионно-оптической системы трубки.

Для исследований была изготовлена экспериментальная трубка ГНТ1-ЭМД (рис. 2). Ее особенность заключалась в разделении ионопровода трубчатыми изоляторами на три участка по пути движения ионов. Измерение токовых характеристик отдельно на мишени и стенке аппликатора позволяло контролировать потери ионов при движении к мишени. Экспериментальные трубки насыщались дейтерием. Нейтроны образуются в реакции $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$. Отсутствие трития позволяло осуществлять их разборку в процессе исследований, оптимизировать



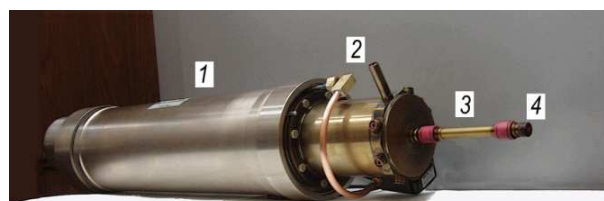
Р и с. 2. Экспериментальная трубка ГНТ1-ЭМД: 1 — нейтронная мишень; 2 — проходной изолятор; 3 — аппликатор (ионопровод)

ионно-оптическую систему, добиваясь максимальной центровки ионного пучка.

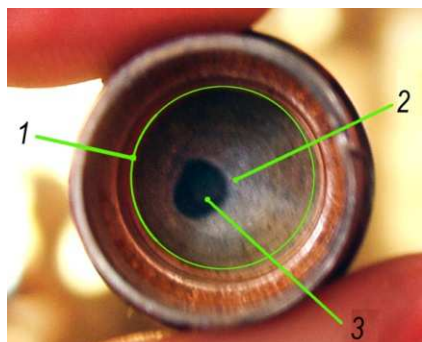
В запаянных газонаполненных трубках мишень создается методом набивки ионами дейтерия и трития тонкого слоя титана 2—6 мкм, напыленного на массивную медную подложку. Мишени таких трубок в процессе работы непрерывно обогащаются газом, что позволяет им длительное время $\sim 1000 \text{ ч}$ сохранять поток на одном стабильном уровне. При этом необходимым условием такой работы является ограничение максимальной температуры мишени не выше $200\text{—}250^\circ\text{C}$.

На базе экспериментальной трубки был разработан генератор нейтронов НГ-20 (рис. 3). Испытания экспериментальной DD-трубки в составе генератора НГ-20 показали соответствие выхода нейтронов энергией 2,5 МэВ ожидаемому потоку для данного типа ядерной реакции. В частности, при ускоряющем напряжении 120 кВ поток составил $8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ при токе трубки 97 мкА. Достигнутый на генераторе поток с DD-трубкой свидетельствует о том, что при тех же параметрах при ее замене на трубку с тритиевой мишенью нейтронный поток составит около 10^9 с^{-1} .

После наработки около 50 ч на потоке около 10^7 с^{-1} DD-трубка была разобрана для изучения критических элементов, важных с точки зрения



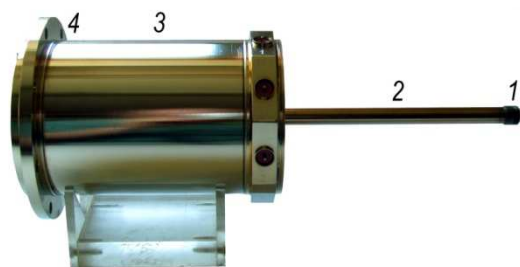
Р и с. 3. Излучатель нейтронов генератора НГ-20 с экспериментальной трубкой ГНТ1-ЭМД: 1 — корпус излучателя; 2 — нейтронная трубка; 3 — аппликатор; 4 — мишень



Р и с. 4. Внутренняя поверхность мишени DD-трубки после испытаний в составе НГ-20: 1 — диаметр активной части мишени; 2 — центр мишени; 3 — след пучка ионов

требуемого ресурса при последующей работе генератора по назначению. Одним из таких элементов является мишень, которая подвергается интенсивной ионной бомбардировке сфокусированным пучком. Внешний вид внутренней поверхности мишени свидетельствует о том, что в конструкции трубки удалось достигнуть необходимой фокусировки ионного пучка (рис. 4). Диаметр пучка составляет 3 мм. Пучок находится в области активной части мишени и смещен относительно ее центра на 2 мм [4].

Решение проблемы транспортировки пучка ионов для трубок с вынесенной мишенью, подтвержденное в ходе исследований экспериментальных образцов, позволило приступить к следующему этапу — созданию генератора для брахитерапии. Был изготовлен вариант трубки ГНТ1-МД без проходных изоляторов со смешевым наполнением дейтерием и тритием резервуара газа источника ионов (рис. 5). Такой состав газа в трубке позволяет получать нейтроны энергией ~ 14 МэВ в результате ДТ-реакции. Главное преимущество такой трубки прежде всего в том, что достигаемый поток почти в 100 раз выше, чем генераторов с DD-трубками.



Р и с. 5. Трубка ГНТ1-МД: 1 — мишень диаметром 10 мм; 2 — ионопровод-аппликатор длиной 150 мм; 3 — корпус; 4 — фланец



Р и с. 6. Испытания генератора нейтронов НГ-20: 1 — излучатель нейтронов; 2 — трубка ГНТ1-МД; 3 — трансформаторное масло; 4 — аппликатор; 5 — мишень; 6 — блок питания

Испытания генератора НГ-20 с ДТ-трубкой были проведены в геометрии, показанной на рис. 6. При ускоряющем напряжении 140 кВ и токе трубки 100 мкА поток нейтронов составляет 10^9 с $^{-1}$. Тепловая мощность, выделяемая на мишени, может достигать 14 Вт. Это приводит к нагреванию мишени. Во время испытаний тепловая энергия от мишени отводилась через трансформаторное масло, в которое мишень была погружена. При использовании НГ-20 в составе терапевтической установки тепло от мишени будет отводиться через специальный катетер с каналами охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыб А.Ф., Ульяненко С.Е., Мардынский Ю.С. и др. Нейтроны в лечении злокачественных новообразований. Научно-методическое пособие. Обнинск, МРНЦ РАМН, 2003. 110 с.
2. Труфанов Г.Е., Асатуриян М.А. Лучевая терапия. М.: Гэотар-Медиа, 2010, т. 2. 208 с.
3. Боголюбов Е.П., Сыромуков С.В., Юрков Д.И. Нейтронные генераторы ВНИИА для ядерной медицины. — В сб.: Межд. научно-техн. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». М., ВНИИА, 2012, с. 52—55.
4. Боголюбов Е.П., Сыромуков С.В. Запаянные ускорительные нейтронные трубки ВНИИА для лучевой терапии. — В сб.: Научно-техн. конф. «Вакуумная наука и техника». Сочи, 2008, с. 155—160.

Поступила в Редакцию 9.04.24