

Т а б л и ц а 2. Оценка результатов лечения больной А.

Параметр	$-z = -27,5$ мм		$z_0 = -7,5$ мм		$+z = 12,5$ мм	
	До	После	До	После	До	После
$S, \text{см}^2$	28,4		57,4		55,3	
$K_S, \text{г/см}$	25,45	22,31	55,85	47,5	50,52	41,43
$K_S/S, \text{г/см}^3$	0,9	0,78	0,97	0,83	0,92	0,75
M_S	1,16		1,18		1,23	
$L, \text{см}$	5,5		8,18		8,3	
$K_L, \text{г/см}^2$	4,62	4,04	7,28	7,09	7,59	6,01
$K_L/L, \text{г/см}^3$	0,83	0,75	0,9	0,86	0,9	0,73
M_L	1,1		1,05		1,24	

выраженная динамика опухоли. В табл. 3 приведены количественные характеристики и оценки результатов лечения для нескольких клинических случаев для трех параллельных уровней получения изображений на уровне $-z, 0, +z$.

Заключение. Предложенный клинически доступный количественный метод позволяет оценить динамику опухоли по размеру и физической плотности при адаптивной лучевой терапии онкологических больных для любых случаев визуализации опухолевых границ. При положительной динамике в опухоли интегральный показатель принимает значение больше единицы ($M_{\text{инт}} > 1$), при отрицательной — меньше или равно единице ($M_{\text{инт}} \leq 1$). Технология применяется в клинической практике при комплексном лечении больных.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (договор № 02.а03.21.0005).

Т а б л и ц а 3. Оценка результатов лечения нескольких больных

Номер пациента, локализация, наличие динамики	$-z, \text{мм}$	$0, \text{мм}$	$+z, \text{мм}$
	Индекс поражения M_L		
Больная А., рак легкого, наличие динамики	1,1	1,05	1,24
Больной Б., рак прямой кишки, отсутствие динамики	1	1,01	1,01
Больной М., рак поджелудочной железы, отсутствие динамики	1,01	1	1,01
Больная К., рак средней доли правого легкого, наличие положительной динамики	1,8	2,02	1,96
Больная Л., липосаркома правой подвздошной области, отсутствие динамики	1,032	0,872	0,9
Больной Р., саркома мягких тканей правого бедра, отсутствие динамики	1	0,91	1,1
Больная Е., рак средней доли правого легкого, наличие положительной динамики	1,99	2,05	1,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставицкий Р.В. Аспекты клинической дозиметрии. М.: МНПИ, 2000. 388 с.
2. Лебеденко И.М. Количественные критерии оценки изменения опухолевой и нормальной тканей в процессе лечения по рентгеновским изображениям. Дис. на соискание ученой степени докт. биол. наук. М., 2005.
3. Контроль качества в лучевой терапии и лучевой диагностике. Сб. нормативных документов. Минск: Полипринт, 2009. 271 с.
4. Acceptance Tests. Imaging Performance of Computed Tomography X-Ray Equipment. Part 3—5. IEC, Geneva, Switzerland, 2004.

Поступила в Редакцию 16.10.18

УДК 621.384.6.038.628

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК D—D- И D—T-ТРУБОК ГЕНЕРАТОРОВ НЕЙТРОНОВ С СОРБИРОВАННЫМИ И НАБИВНЫМИ МИШЕНЯМИ

Сыромуков С.В. (ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва)
e-mail: vnii4@vniia.ru

Генераторы с запаянными трубками являются удобными управляемыми источниками быстрых нейтронов [1, 2]. В таких устройствах основные физические процессы, приводящие к образованию нейтронов, протекают в объеме компактного электровакуумного прибора — запаянной трубке. Трубка включает источник

ионов, систему ускорения, твердотельную мишень, геттер изотопов водорода. Мишень представляет собой тонкую пленку гидрида. К трубке прикладывается ускоряющее напряжение. Нейтроны образуются в мишени в результате реакций $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$ или $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$. В вакуумных трубках роль геттера играет катод источни-

Типы запаянных нейтронных трубок

Тип трубки	Насыщение геттера	Состав пучка ионов	Первичное насыщение мишени	Рабочее насыщение мишени	Основные реакции получения нейтронов
D—D	Дейтерий	d^+, d_2^+	—	Дейтерий	${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$
D—T с мишенью: сорбированной набивной	Дейтерий Дейтерий и тритий	d^+, d_2^+ $d^+, t^+, d_2^+, dt^+, t_2^+$	Тритий Отсутствует	Тритий Тритий и дейтерий	${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ ${}^2\text{H}(t, n){}^4\text{He}$

ка ионов, насыщаемый дейтерием при их изготовлении. Дейтерий выделяется в объем трубки в процессе искрового пробоя между электродами [3]. В вакуумных трубках обычно используются сорбированные мишени, насыщаемые тритием или дейтерием заранее. В газонаполненных трубках применяют регулируемые геттеры [4]. При нагревании геттера дейтерий и тритий выделяются в объем трубки. Мишень насыщается дейтерием и тритием из пучка ионов в процессе работы. Это позволяет поддерживать оптимальную концентрацию изотопов водорода в мишени и обеспечивает стабильный поток нейтронов.

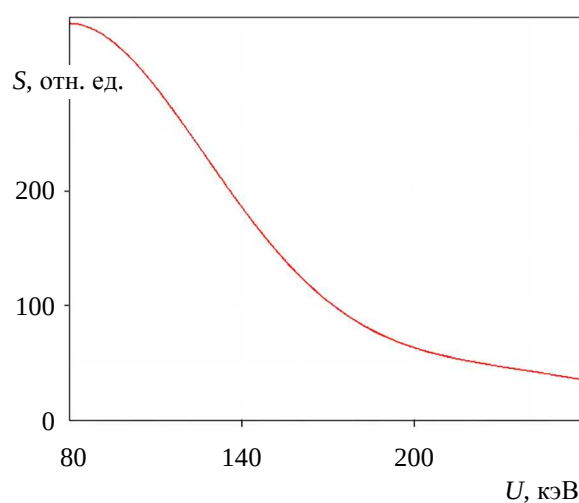
В зависимости от насыщения геттера и мишени можно выделить три основных типа запаянных трубок (см. таблицу). Путем замены в генераторе трубки одного типа на трубку другого типа можно изменять поток и нейтронный спектр. При этом не требуется изменять конструкцию самого генератора нейтронов.

Генераторы используются в различных технологических процессах и научных исследованиях. В зависимости от решаемой задачи могут применяться D—T- или D—D-генераторы. Например, для обнаружения взрывчатых веществ используются как импульсные D—T-генераторы, так и D—D-генераторы постоянного потока [1, 5]. В термоядерных исследованиях также используются D—D- и D—T-генераторы [6]. Для снижения радиационной нагрузки на персонал при отработке технологических процессов и подготовке экспериментов с генераторами нейтронов часто используют D—D-трубки. После отладочных процедур D—D-трубку заменяют D—T-трубкой. Во всех этих случаях один и тот же генератор может эксплуатироваться с трубками различного типа. Для сравнения результатов необходимо рассчитать коэффициенты, определяющие изменение потока при замене

трубок. В этом случае можно нормировать результаты на поток для каждого вида трубок.

Настоящая статья посвящена сравнению трубок разных типов по потоку нейтронов. Характеристики трубок сравнивали на основе расчетов потока нейтронов, учитывалось влияние на поток ускоряющего напряжения, атомно-молекулярного состава пучка ионов, вещества мишени, стехиометрии гидридов и изотопного состава геттера [7].

D—T- и D—D-трубки. Рассмотрим вариант замены в генераторе D—D-трубки на D—T-трубку. Принято считать, что поток нейтронов увеличится в этом случае примерно в 100 раз. Однако эта оценка является приблизительной и основана только на общих представлениях об отношении сечений реакций ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$. Используя выражения для сечений, вычислим их отношение для рабочего диапазона ускоряющего напряжения генераторов [7, 8]. Как видно на рис. 1, отношение изменяется в широких пределах при изменении энергии дейтронов. Оно быстро снижается с ростом энергии дейтронов выше 100 кэВ. Соответственно отно-



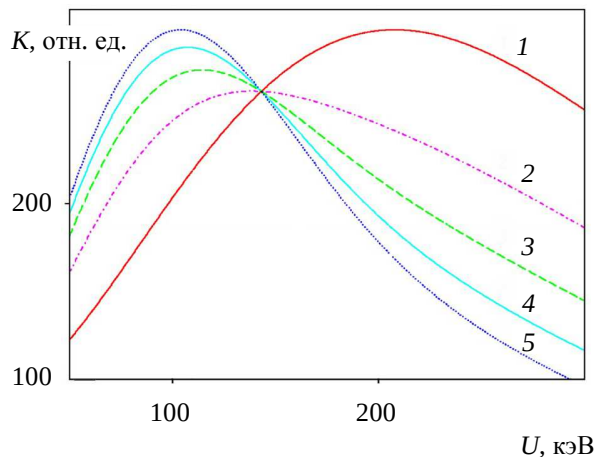
Р и с. 1. Зависимость отношения сечений реакций ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ от энергии дейтронов

шение потоков D—T- и D—D-трубок зависит от ускоряющего напряжения.

Кроме ускоряющего напряжения, на поток влияет состав пучка ионов. Работа трубок с сорбированными мишенями основана на бомбардировке ускоренными ионами дейтерия насыщенной дейтерием или тритием мишени. В пучке содержатся ионы d^+ , d_2^+ . В состав молекулярного иона входят два дейтрона, энергия каждого из которых составляет половину энергии первичного иона. Более сложной является ситуация для D—T-трубки с набивной мишенью. В этом случае в пучке, бомбардирующем мишень, содержатся ионы d^+ , t^+ , d_2^+ , dt^+ , t_2^+ . Нейтроны образуются в результате реакций ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$, ${}^2\text{H}(t, n){}^4\text{He}$. При вычислении потока нейтронов необходимо суммировать вклад каждого типа ионов. При этом энергия каждого молекулярного иона делится между атомами в соответствии с их массой. Таким образом, отношение выходов, кроме ускоряющего напряжения, должно зависеть от атомно-молекулярного и изотопного состава пучка источника ионов, используемого в трубке. И, наконец, отношение потоков будет зависеть от вещества мишени.

Характерное пересечение кривых зависимости отношения выхода D—T/D—D-нейтронов сорбированных и набивных мишеней является следствием резонансного характера сечения реакции ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$. Для трубок с сорбированными мишенями отношение выходов находится в диапазоне 100—300, что соответствует отношению сечений реакций ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$. Характер кривых также соответствует зависимости отношений сечений с учетом того, что максимумы кривых, относящихся к разным атомно-молекулярным составам пучка, при увеличении молекулярного компонента сдвигаются вправо (рис. 2). В нейтронных трубках обычно используются источники Пеннинга с высоким содержанием молекулярных ионов в пучке [9]. Для таких трубок отношение будет максимальным после точки пересечения кривых и минимальным до нее.

При замене сорбированной мишени на набивную D—T-поток уменьшится, D—D-поток останется на прежнем уровне [7]. При замене D—T-трубки с набивной мишенью на D—D-трубку выход нейтронов уменьшится в 50—100 раз. Отношение будет зависеть от ускоряющего напряжения и атомно-молекулярного со-

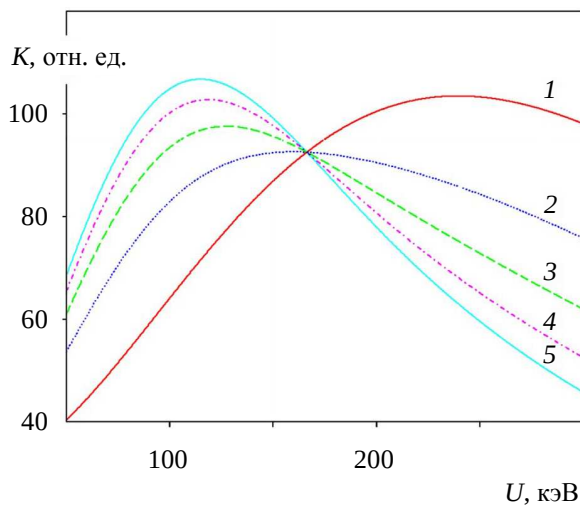


Р и с. 2. Зависимость от ускоряющего напряжения отношения выхода нейтронов из D—T- и D—D-трубок с сорбированными мишенями при содержании атомарного компонента в пучке ионов 0 (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 0,75 (4), 1 (5)

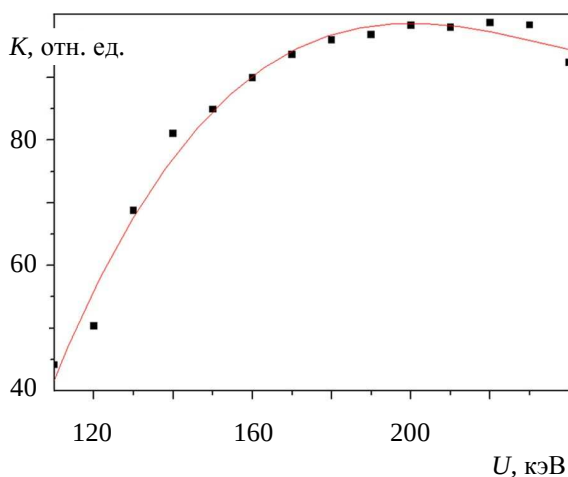
става пучка ионов. При напряжении выше точки пересечения кривых на рис. 3 отношение максимально для молекулярных пучков ионов.

Для каротажных трубок с источниками Пеннинга, работающих при напряжении 80—100 кВ, для оценки отношений выходов можно использовать число 70. Для трубок, работающих при напряжениях более 150 кВ, корректным будет число 90.

Сравнение расчетной кривой и экспериментальных данных на рис. 3, 4 показывает, что источник ионов трубки ГНТ1-100 имеет преимущественно молекулярный пучок [10]. Отклонение от расчетных значений в низкоэнергетической области объясняется малой концентрацией трития в поверхностном слое мишени.



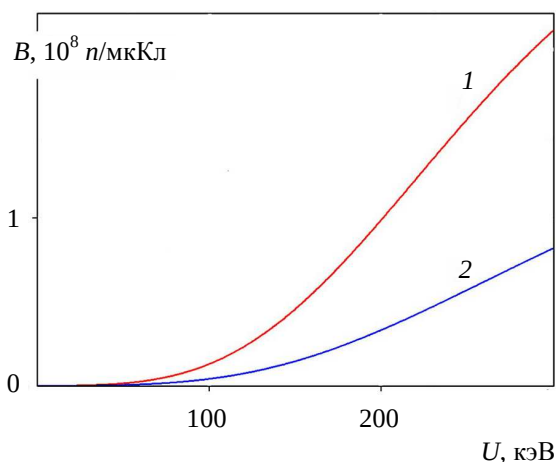
Р и с. 3. Зависимость от ускоряющего напряжения отношения выхода нейтронов из D—T- и D—D-трубок с набивными мишенями при содержании атомарного компонента в пучке ионов 0 (1), 0,25 (2), 0,5 (3), 0,75 (4), 1 (5)



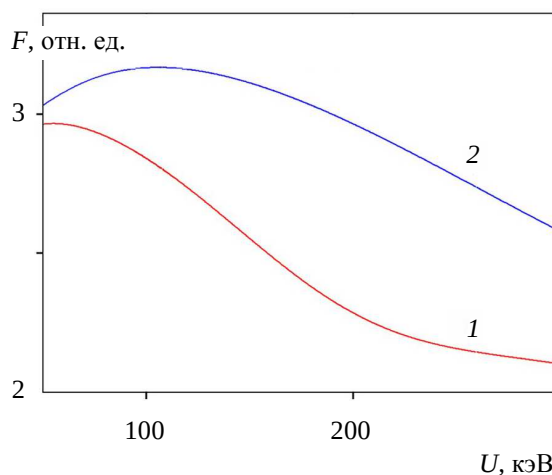
Р и с. 4. Зависимость отношения выхода нейтронов из D—T- и D—D-трубок ГНТ1-100 с набивной мишенью

Этот обедненный слой уменьшает эффективную энергию ионов в мишени. Его влияние снижается с ростом ускоряющего напряжения [11].

D—T-трубки с сорбированными и набивными мишенями. Сорбированная мишень насыщается тритием. Для получения нейтронов в этом случае используют пучок ионов дейтерия. Набивная мишень насыщается дейтерием и тритием в пропорции, в которой эти изотопы находятся в геттере трубки. В такой же пропорции изотопы находятся в пучке ионов. Как видно на рис. 5, выход нейтронов из набивных мишеней более чем в 2 раза уступает выходу из сорбированных мишеней [7, 8]. Число атомов водорода в гидриде мишени на один атом металла, или атомное отношение N составляет 1,5. Расчеты на рис. 5, 6 показаны для случая насыщения геттера дейтерием и тритием в равной



Р и с. 5. Зависимость выхода нейтронов из D—T-трубок с сорбированной (1) и набивной титановой мишенью (2) от ускоряющего напряжения для молекулярных пучков ионов



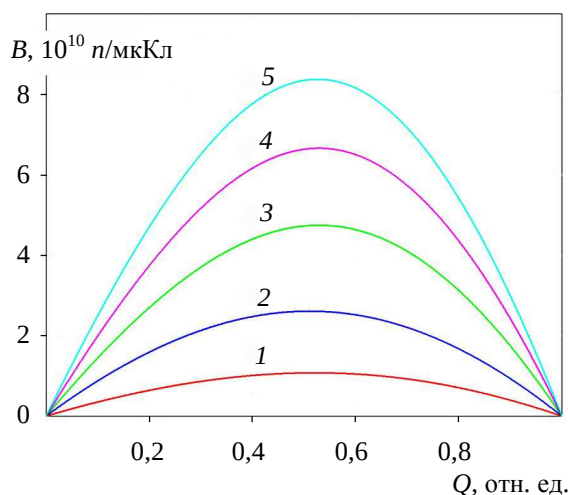
Р и с. 6. Отношение выхода нейтронов из D—T-трубок с сорбированной и набивной титановой мишенью для атомарного (1) и молекулярного пучка ионов (2)

пропорции. На рис. 6 видно, что различие между сорбированными и набивными мишенями максимально для трубок с молекулярным пучком ионов. В этом случае сорбированные мишени обеспечивают почти трехкратный рост выхода нейтронов по сравнению с набивными. Особенно велико различие в диапазоне напряжения 100—200 кВ. Для трубок с атомарными пучками это различие менее существенно.

При определении отношения потоков необходимо учитывать и распад трития. Через 4 года после изготовления трубки распадется примерно 20% трития. Это приведет к изменению относительной концентрации изотопов в геттере. Отклонение концентрации от оптимального значения ведет к уменьшению потока нейтронов. Поэтому при сравнении трубок разных типов необходимо учитывать также время их изготовления. Результаты, показанные на рис. 7, относятся к 50%-ному содержанию атомарного компонента в пучке ионов.

Следует отметить, что трубки с сорбированными мишенями, обеспечивая больший поток, уступают трубкам с набивными мишенями по сроку службы. Причина этого заключается в быстром вытеснении трития из мишени дейтронами пучка. Если ресурс сорбированной мишени T определяется временем, при котором половина атомов трития будет замещена атомами дейтерия, то можно записать

$$N \frac{\pi R^2 \Delta p}{2\mu} N_A = 2 \frac{I}{e} T,$$



Р и с. 7. Зависимость выхода нейтронов из набивной титановой мишени от относительной концентрации дейтерия в геттере при ускоряющем напряжении 100 (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300 кВ (5)

где N — число атомов водорода на один атом металла, или атомное отношение; R , Δ , ρ , μ — радиус, толщина, плотность, атомная масса мишени соответственно; N_A — число Авогадро; I — ток ионов; e — заряд электрона.

Для получения потока 10^{10} с^{-1} из сорбированной мишени требуется ток 100 мкА при напряжении 200 кВ [8]. Если толщина титанового слоя равна 2 мкм, радиус 1 см, $N = 2$, в трубке используется источник молекулярных ионов, то ресурс сорбированной мишени составит 15 ч. Генераторы с набивными мишенями и таким же потоком имеют существенно больший ресурс. Например, ресурс генератора НГ-14 с потоком $2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ составляет 1000 ч.

Заключение. Полученные результаты позволяют оценивать изменение потока нейтронов при замене в генераторе запаянных трубок разных типов. Это особенно актуально при замене D—T-трубок D—D-трубками.

При замене D—T-трубки с сорбированной мишенью на D—D-трубку поток в зависимости от ускоряющего напряжения и атомно-молекулярного состава пучка ионов уменьшится в 100—300 раз. Если первоначально использовалась D—T-трубка с набивной мишенью, то изменение составит 50—100 раз.

При замене D—T-трубки с сорбированной мишенью на трубку с набивной мишенью и пре-

имущественно молекулярным пучком ионов поток уменьшится приблизительно в 3 раза. При сравнении D—T-трубок необходимо учитывать время их изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кириянов Г.И.** Генераторы быстрых нейтронов. Исследования, разработки, применения. М.: Аспект Пресс, 2016. 320 с.
2. **Valkovic V.** 14 MeV Neutrons Physics and Applications. LLC CRC Press is an Imprint of Taylor & Francis Group, an Informa Business, 2016. 475 p.
3. **Бессарабский Ю.Г., Битулев А.А., Бобылев В.Т. и др.** Импульсные нейтронные генераторы на вакуумных нейтронных трубках. — В сб.: Межд. научно-технич. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». М., 2004, с. 72—76.
4. **Сыромуков С.В.** Регулирование давления в газонаполненных запаянных трубках генераторов нейтронов. — В сб.: Научно-технич. конф. «Вакуумная наука и техника». Феодосия, 2008, с. 211—213.
5. **Градусов А.Н., Бескrestнов А.Ю., Ольшанский Ю.И. и др.** Использование нейтронного генератора НГ-14 для разработки установок обнаружения взрывчатых веществ. — В сб.: Межд. научно-технич. конф. «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». М., 2012, с. 518—524.
6. **Борисов А.А., Дерябина Н.А., Марковский Д.В.** Калибровка нейтронных мониторов мгновенной мощности ИТЭР. Отклики мониторов на модели реальных источников DT-, DD- и Cf-нейтронов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с. 44—56.
7. **Сыромуков С.В.** Влияние атомно-молекулярного и изотопного состава пучка ионов на выход нейтронов из набивных мишеней запаянных трубок. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 6, с. 329—334.
8. **Сыромуков С.В.** Расчет выхода нейтронов из газонаполненных запаянных нейтронных трубок. — Ядерная физика и инжиниринг, 2013, № 1, с. 62—69.
9. **Sy A., Ji Q., Persaud A. e.a.** Novel methods for improvement of a Penning ion source for neutron generator applications. — Rev. Sci. Instrum., 2012, v. 83, p. 02B309.
10. **Сыромуков С.В., Добров Р.В., Степнов В.В. и др.** Генератор нейтронов НГ-24 для ядерной медицины и термоядерных исследований. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1, с. 58—60.
11. **Воробьев С.П., Кириянов Г.И., Сыромуков С.В. и др.** Результаты исследования набивных мишеней генераторов нейтронов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Радиационная техника, 1988, вып. 1(26), с. 24—28.

Поступила в Редакцию 18.04.19