

4. Allison J., Amako K., Apostolakis J. e.a. Recent developments in Geant4. — Ibid., 2016, v. 835, p. 186—225.
5. Verbinski V., Burrus W., Love T. e.a. Calibration of an organic scintillator for neutron spectrometry. — Nucl. Instrum. Meth., 1968, v. 65, p. 8—25.
6. Knoll G. Radiation Detection and Measurement. NY: Wiley & Sons, Inc., 1999.
7. Birks J. The Theory and Practice of Scintillation Counting. Oxford: Pergamon Press, 1964.
8. Ryabeva E., Urupa I., Lupar E. e.a. Calibration of EJ-276 plastic scintillator for neutron—gamma pulse shape discrimination experiments. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2021, v. 1010, p. 165495.
9. Ryabeva E., Molodtsev D., Urupa I. e.a. EJ-276 based neutron spectrometer with neutron—gamma pulse shape

discrimination capability. — Ibid., 2022, v. 1034, p. 166791.

10. Савин Д.И., Урупа И.В., Лупарь Е.Э. и др. Спектрометрический стенд на основе стильбена для восстановления энергетического распределения источников быстрых нейтронов. — Атомная энергия, 2022, т. 133, вып. 2, с. 101—105.
11. Quang N., Kim H., Nguyen O. e.a. Measuring and unfolding fast neutron spectra using solution-grown trans-stilbene scintillation detector. — Nucl. Engng Techn., 2023, v. 55, p. 1021—1030.

Поступила в Редакцию 21.06.23

УДК 537.534.2

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ ИОННОГО ИСТОЧНИКА ВАКУУМНОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

Масленников С.П., Мамедов И.М. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

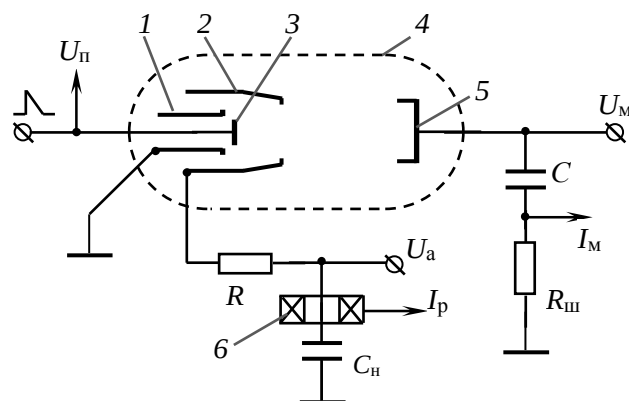
e-mail: spmaslennikov@mephi.ru

Аппаратура на основе импульсных нейтронных генераторов используется в ядерной медицине, элементном анализе вещества, геофизических исследованиях, системах безопасности, устройствах специального назначения. Среди ключевых преимуществ вакуумных нейтронных трубок следует отметить их готовность к работе, малые габариты, простоту конструкции, высокую интенсивность нейтронных потоков. В качестве основы для построения ионных источников в нейтронных трубках этого типа применяют трехэлектродные разрядные ячейки коаксиальной конструкции. Режимы иницирования и горения импульсных дуговых разрядов зависят от геометрии и материалов электродов, амплитудно-временных характеристик разряда, параметров системы импульсного питания. Эксплуатация показывает, что одной из распространенных причин снижения ресурса и нейтронного выхода аппаратуры является нестабильность работы ионных источников.

Несмотря на длительные исследования вакуумного разряда, до настоящего времени не создано модели, позволяющей описать сложные и взаимосвязанные процессы иницирования и горения разряда для широкого диапазона режимов работы создаваемой аппаратуры. Разработка новых типов приборов требует экспериментальных исследований ионных источников и поиска технических решений для повышения их

эффективности и стабильности. В настоящей работе приведены результаты исследования зависимости амплитудно-временных характеристик ионных и нейтронных потоков, формируемых в малогабаритном ионном источнике, от режимов работы системы импульсного питания вакуумной нейтронной трубки.

Схема и методика эксперимента. Исследования проведены на специализированном лабораторном стенде, который позволяет воспроизводить режимы импульсно-периодического питания генераторов нейтронов, эксплуатируемых в составе аппаратуры геофизических исследований скважин. На рис. 1 показана структура схемы для исследований ионных источников в составе отпаянной нейтронной трубки.



Р и с. 1. Структура схемы для исследования ионных источников: 1 — катод; 2 — анод; 3 — поджигающий электрод; 4 — нейтронная трубка; 5 — мишень; 6 — пояс Роговского

Накопитель энергии схемы составлен из импульсных конденсаторов суммарной емкостью $C_n = 20$ нФ. Зарядное напряжение накопителя регулировали в диапазоне $U_a = 2,5\text{—}4$ кВ. Для измерения импульса тока основного разряда I_p между анодом и катодом использовали пояс Роговского. Импульс напряжения на поджигающем электроде регистрировали делителем Tektronix P6015A (США). Максимальная амплитуда импульса поджига составляла $U_n = 5$ кВ, длительность фронта менее 100 нс. Импульсы ионного тока на мишени I_m регистрировали с помощью шунта $R_{ш}$, установленного в шине заземления емкости C . В экспериментах к мишени прикладывали отрицательное напряжение смещения $U_m = 1\text{—}4$ кВ, что обеспечивало условия для извлечения ионов без генерации нейтронов.

Нейтронный выход трубки в условиях подачи на мишень ускоряющего напряжения с амплитудой $U_m \sim 80$ кВ определяли с учетом сечения DT-реакции и амплитудно-временных параметров системы питания генераторов геофизической аппаратуры.

Импульсам ионных потоков, формируемым в искродуговых ионных источниках, свойствен значительный разброс параметров. Отдельные импульсы при срабатывании ионного источника изменяют форму, амплитуду и длительность ионного потока, извлекаемого на мишень. Поэтому для сравнительного анализа эффективности разных схем питания трубки формировали базу экспериментальных результатов с распределением на выборки для статистической обработки.

При работе нейтронной трубки в составе геофизической аппаратуры на ее мишень подаются короткие импульсы ускоряющего напряжения длительностью менее 1 мкс. Этим определяются жесткие требования на согласование временных и мощностных характеристик цепей питания ионного источника и схем формирования ускоряющих импульсов. Их выполнение открывает возможности для повышения эффективности работы нейтронной трубки.

Экспериментальные результаты и их об- суждение. Исследования показали, что характеристики формируемых потоков заряженных частиц в значительной степени зависят от условий пуска и параметров системы питания ионного источника. Искродуговым источникам свойствен эффект самопроизвольного прерывания

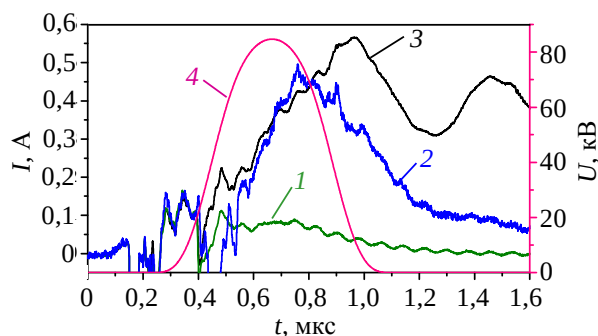
вакуумной дуги при изменении полярности тока [1—3]. Вероятность такого прерывания дуги зависит от скорости изменения тока, геометрических параметров и состояния электродной системы разрядного узла [4].

Прерывание тока разряда негативно влияет на стабильность параметров ионных потоков, так как приводит к резкому изменению динамики вложения энергии в разряд и наработки плазмы. Из-за изменений геометрии и состояния поверхности электродов при эксплуатации ионного источника снижается среднее число колебаний тока разряда, ухудшается стабильность работы, уменьшается нейтронный выход. Напряжение пробоя поджигающего промежутка зависит от параметров тока основного разряда и управляющего импульса, что связано с эрозионным механизмом пуска ионного источника [4]. Этот механизм объединяет процессы металлизации изолятора поджигающего промежутка за счет оседания продуктов распадающейся плазмы и испарения металлизации при повторном пуске ионного источника.

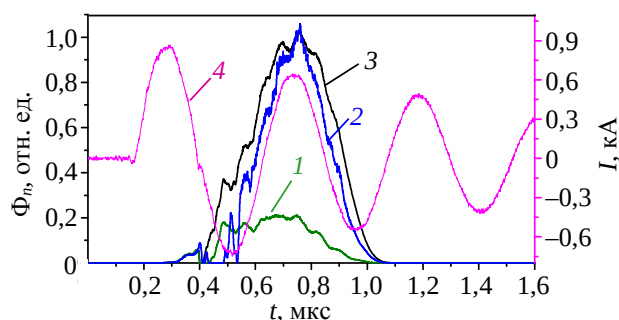
При анализе работы системы питания одним из определяющих параметров является суммарный заряд, проходящий через основной анодно-катодный промежуток за время горения разряда, от которого зависит интенсивность испарения электродов. Увеличение длительности горения разряда и его суммарного заряда ухудшает стабильность и снижает ресурс ионного источника.

При высокой скорости нарастания тока $10^9\text{—}10^{10}$ А/с начальная фаза горения разряда сопровождается плазменными неустойчивостями, которые проявляются в виде наносекундных осцилляций импульсов тока и напряжения и влияют на формирование дуги и ионные потоки, извлекаемые на мишень трубки [4—6].

На рис. 2, 3 показаны импульсы ионного тока, ускоряющего напряжения на мишени, нейтронного излучения и разрядного тока для схемы с прямым подключением емкостного накопителя к аноду ионного источника, которая применяется в системах питания нейтронных генераторов геофизической аппаратуры. Измерения проведены при зарядном напряжении накопителя $U_a = 3$ кВ. Усредненные импульсы ионного тока и нейтронного излучения получены в результате обработки выборок сигналов для режимов срабатывания с разным числом



Р и с. 2. Импульсы ионного тока на одной (1), двух (2), трех и более полу волнах тока (3), импульс ускоряющего напряжения (4)

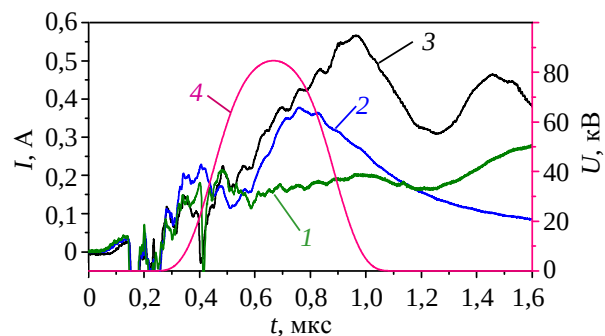


Р и с. 3. Нейтронные импульсы на одной (1), двух (2), трех и более полу волнах тока (3), импульс тока разряда (4)

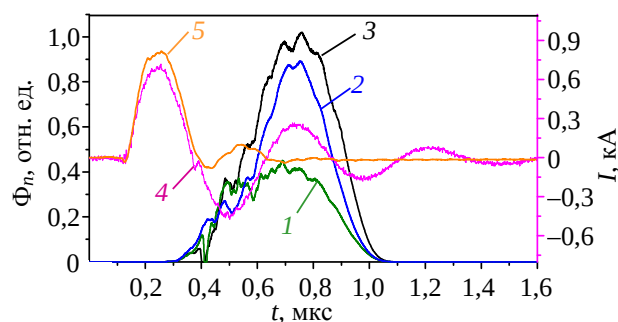
полу волн в импульсе разрядного тока: одна, две, три и более. Амплитуды импульсов нейтронного излучения нормированы на единицу с использованием в качестве опорного потока нейтронов от разряда с числом полу волн тока более трех.

Амплитуда ионных и нейтронных импульсов, сформированных от первой полу волны тока разряда, в 5—6 раз меньше, чем при режимах срабатывания ионного источника с несколькими полу волнами разряда. Это указывает на низкую эффективность работы источника с разрядом, ограниченным одной полу волной тока. Следует отметить, что в интервале действия ускоряющего напряжения импульсы ионного тока, сформированные от разряда с двумя полу волнами и с их большим числом, имели близкие характеристики. При этом создавались условия для нейтронных импульсов с почти одинаковыми формой и амплитудой.

На основе полученных данных были определены требования к временным и энергетическим параметрам системы питания ионного источника, которые позволяют снизить эрозионный износ электродов и увеличить ресурс нейтронной трубки. В качестве модификации схемы питания ионного источника рассмотрены варианты с установкой в разрядный контур по-



Р и с. 4. Импульсы ионного тока в схеме с последовательным сопротивлением (1), RD-цепью (2), прямым подключением накопителя (3), импульс ускоряющего напряжения (4)



Р и с. 5. Нейтронные импульсы в схеме с последовательным сопротивлением (1), RD-цепью (2), прямым подключением накопителя (3), импульсы тока разряда в схеме с последовательным сопротивлением (4), RD-цепью (5)

следовательного сопротивления и использования RD-цепочки, подключаемой антипараллельно накопителю энергии.

На рис. 4, 5 показаны импульсы ионного тока, ускоряющего напряжения, нейтронного потока и разрядных токов для схем с последовательным сопротивлением в разрядном контуре ($R = 0,8 \text{ Ом}$) и с параллельной RD-цепью ($R = 0,5 \text{ Ом}$). Для сравнительного анализа режимов работы приведены импульсы тока ионов и потока нейтронов для схемы с прямым подключением накопителя энергии к аноду ионного источника и режимом горения разряда с тремя полу волнами тока. Измерения проведены при зарядном напряжении накопителя $U_a = 3 \text{ кВ}$.

Эксперименты показали, что установка последовательного сопротивления в разрядном контуре позволила добиться двукратного снижения токовой нагрузки на электродную систему ионного источника при одновременном уменьшении нейтронного выхода примерно в 2,5 раза. Это позволяет рассматривать предложенное исполнение разрядного контура как

предпочтительное для генераторов, допускающих работу при меньшем нейтронном выходе и требующих улучшенные ресурсные показатели.

В схеме с *RD*-цепочкой обеспечивались условия для генерации нейтронных потоков, близких по интенсивности к схеме питания с прямым подключением накопителя к аноду ионного источника. Это определяется тем, что импульсы ионных токов за время действия ускоряющего напряжения для этих двух схем имели близкие форму и амплитуду. Использование схемы с *RD*-цепью позволило снизить тепловую нагрузку на ионный источник и в 3—4 раза уменьшить суммарный заряд, проходящий через анодно-катодный промежуток, при сохранении нейтронного выхода, что способствует увеличению стабильности нейтронной трубки и ее ресурса.

Заключение. Исследования режимов работы ионных источников и измерения амплитудно-временных характеристик формируемых ионных потоков в нейтронных трубках проведены в условиях работы системы питания, близких к эксплуатационным режимам геофизической аппаратуры. Полученные результаты показывают, что начальная фаза зажигания разряда сопровождается развитием неустойчивостей, которые влияют на формирование дуги и ионных потоков. Прерывание тока, свойственное вакуумной дуге, является причиной изменения полной длительности разряда, его мощностных характеристик, что приводит к большому разбросу нейтронного выхода.

На основании полученных данных предложены варианты построения схемы питания вакуумных нейтронных трубок, снижающие токовую нагрузку на электроды разрядной ячейки и

повышающие стабильность работы источника ионов. Предложенные технические решения увеличат ресурс импульсных нейтронных генераторов при сохранении нейтронного потока и одновременном снижении потребляемой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобайн Д., Эккер Г., Фаррелл Д. и др. Вакуумные дуги. Пер. с англ. Под ред. Дж. Лаферти. М.: Мир, 1982. 432 с.
2. Битулев А.А., Кладко С.Г., Масленников С.П. и др. Повышение эффективности источников ионов вакуумных нейтронных трубок. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 5, с. 284—289. // Bitulev A.A., Kladko S.G., Maslennikov S.P. et al. Increasing the Efficiency of Ion Sources of Vacuum Neutron Tubes. — Atomic Energy, 2015, v. 118, № 5, p. 354—359.
3. Кладко С.Г., Масленников С.П., Степанов Д.С. и др. Улучшение эксплуатационных характеристик импульсных нейтронных генераторов. — Там же, с. 282—284. // Kladko S.G., Maslennikov S.P., Stepanov D. S. et al. Performance Improvement of Pulse Neutron Generators. — Ibid., p. 351—353.
4. Крастелев Е.Г., Масленников С.П., Школьников Э.Я. Исследования режимов коммутации малогабаритных управляемых вакуумных разрядников. — Радиотехника и электроника, 2017, т. 62, вып. 2, с. 179—186. // Krastelev E.G., Maslennikov S.P., Shkol'nikov E.Ya. Switching Regimes of Compact Triggered Vacuum Gap. — J. Communications Technology and Electronics, 2017, v. 62, № 2, p. 178—184.
5. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 257 с.
6. Алферов Д.Ф., Воздвиженский В.А., Сидоров В.А. Малогабаритный частотный вакуумный управляемый разрядник РВУ-7. — Приборы и техника эксперимента, 1995, вып. 1, с. 98—108.

Поступила в Редакцию 21.06.23

УДК 621.039+51-73

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ПО АППАРАТУРНЫМ СПЕКТРАМ АЭРОГАММАСПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Гаврилов С.Л., Пименов А.Е., Шведов А.М., Арон Д.В., Дьяков С.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)
e-mail: sham@ibrae.ac.ru

Метод аэрогаммасъемки применяется для радиационных измерений при обследовании территорий большой площади за относительно небольшое время, не подвергая персонал риску

облучения. Аэрогаммасъемка с помощью беспилотных летательных аппаратов использовалась для обследования загрязненных территорий в результате аварии на АЭС «Фукусима-1»