

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.387

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПЕННИНГА

© 2023 г. С. П. Масленников^а *, И. М. Мамедов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шос., 31, Москва, 115409 Российская Федерация

*E-mail: spmaslennikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.05.2022 г.

После доработки 05.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Рассмотрены режимы работы импульсных ионных источников Пеннинга при воздействии внешних магнитных полей, соответствующих условиям эксплуатации аппаратуры геофизических исследований скважин. Представлены результаты исследований зависимости амплитудно-временных характеристик ионных источников от величины и конфигурации магнитного поля. На основании полученных данных предложены варианты построения магнитных систем нейтронных трубок, обеспечивающие повышение стабильности работы нейтронных генераторов.

DOI: 10.31857/S0033849423050133, EDN: UHZSXJ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Среди широкого многообразия областей применения разряда Пеннинга отдельное место занимают малогабаритные импульсные нейтронные генераторы для геофизической аппаратуры [1–3]. Режимы горения и амплитудно-временные характеристики разряда в скрещенных электрических и магнитных полях изменяются в зависимости от геометрии электродной системы, параметров системы импульсного питания, распределения магнитного поля, состава и давления рабочего газа, внешних возмущающих воздействий [4–9]. Практика эксплуатации каротажной аппаратуры показывает, что одной из возможных причин нарушения стабильности работы нейтронных генераторов являются внешние магнитные воздействия. Локальные намагниченности обсадных колонн скважин и аномалии магнитных полей в соединительных муфтах способны создавать магнитные поля с напряженностью в сотни эрстед [10].

Несмотря на длительную историю эффективного применения разряда Пеннинга в установках различного назначения, до настоящего времени не создано апробированной модели для описания режимов горения разряда во всех диапазонах рабочих параметров, реализуемых при разных условиях эксплуатации создаваемой аппаратуры. Разработка новых типов приборов требует, как правило, проведения экспериментальных исследований характеристик ионных источников и поиск тех-

нических решений для повышения эффективности и стабильности их работы.

Цель данной работы – исследовать влияние внешних магнитных полей на амплитудно-временные характеристики малогабаритных ионных источников Пеннинга, применяемых в аппаратуре геофизических исследований скважин.

2. СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проведены на стенде, позволявшем воспроизводить режимы работы нейтронных трубок в условиях эксплуатации каротажных приборов. Система измерительных преобразователей стенда (рис. 1) обеспечивала регистрацию импульсных напряжений и токов на электродах нейтронных трубок с ионными источниками (ИИ) на основе разрядных ячеек Пеннинга.

Импульсный блок питания (ИБП), построенный на основе составных полупроводниковых ключей [11, 12], обеспечивал генерацию импульсов анодного напряжения с амплитудой до $U_a = 3$ кВ в диапазоне частот следования $F = 1...10$ кГц. Временные параметры переключения схемы – длительность и частота следования импульсов напряжения – определялись задающим генератором (ЗГ). В проведенном цикле исследований зарядное напряжение накопителя энергии ИБП ($C1 = 1$ мкФ) регулировалось в диапазоне $U_{a0} = 1...3$ кВ. Регистрацию импульсов анодного напряжения U_a

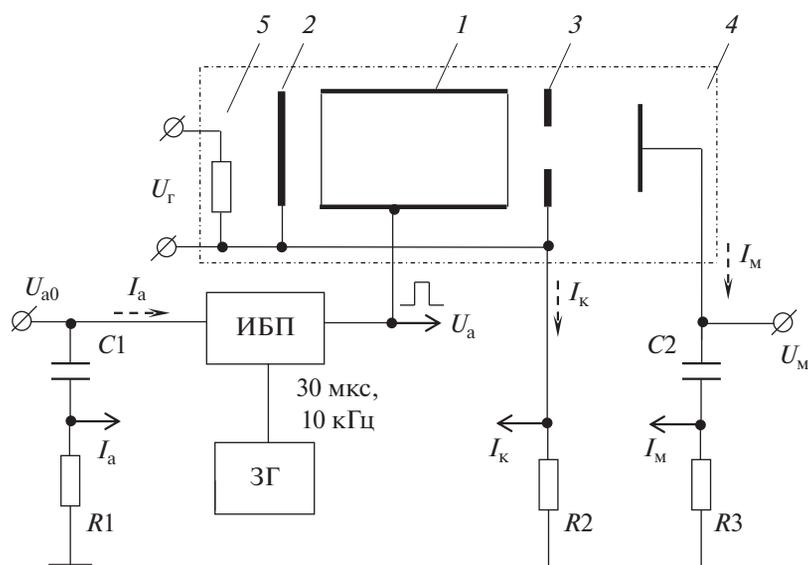


Рис. 1. Структура экспериментальной схемы: 1 — анод; 2 — катод; 3 — антикатод; 4 — мишень; 5 — нагреватель геттера.

проводили с помощью делителя Tektronix P6015A, подключенного к выходу ИБП.

Для измерения параметров импульсов анодного I_a и катодного I_k токов были использованы резистивные шунты $R1$ и $R2$ с защитными диодами, ограничившие кратковременные броски напряжения в моменты переключения системы питания. Номинальные сопротивления шунтов подбирали в процессе проведения экспериментов в диапазоне $10^2 \dots 10^3$ Ом. Для измерения импульсов ионных токов на мишени I_m использовали резистивный шунт $R3 = 1$ кОм, установленный в шине заземления дополнительного емкостного накопителя энергии $C2 = 2$ нФ.

Для формирования аксиально-симметричного магнитного поля (различной величины и конфигурации) в ИИ применяли комбинированную

магнитную систему, созданную на основе кольцевых магнитов и токовых катушек. Условия работы ИИ в неоднородных магнитных полях моделировали при осевом смещении элементов магнитной системы относительно положения разрядной ячейки [8, 9]. Нейтронные трубки подключали к системе вакуумирования и газонаполнения стэнда через откачные штенгели. Для отпаянных нейтронных трубок наполнение газом (дейтерий) осуществляли с помощью встроенного геттера, мощность нагрева которого регулировали при изменении приложенного к нему напряжения U_g [8, 9, 13]. Исследования проведены в диапазоне давления $0.1 \dots 10$ мТорр. В работах [10, 14–16] приведено подробное описание исследуемых типов нейтронных трубок и используемых в них ионных источников.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований продемонстрировали, что определяющее влияние на условия генерации разряда Пеннинга оказывает давление газа. На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов тока на мишени трубки при различных давлениях газа в ИИ, полученные при следующих рабочих параметрах системы питания: длительность импульсов анодного напряжения $t_{и} = 30$ мкс, амплитуда импульсов $U_a = 2$ кВ, частота импульсов $F = 10$ кГц.

При давлениях около $P \approx 1$ мТорр наблюдалось нестабильное формирование разряда: задержка зажигания, измерявшаяся по времени запаздывания токового импульса разряда от фронта импульса анодного напряжения, достигала $t_3 = 20 \dots 25$ мкс. В области давлений $P = 3 \dots 4$ мТорр обеспечивалась

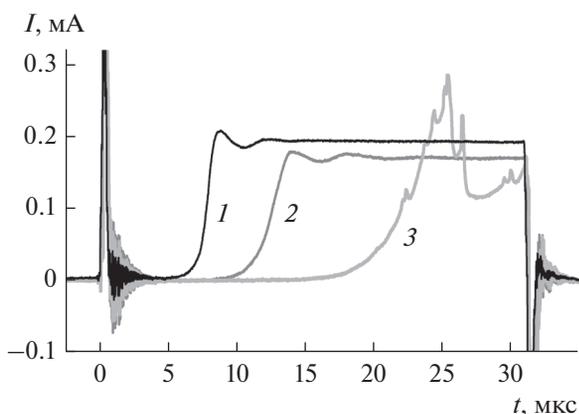


Рис. 2. Импульсы тока на мишени при различных давлениях газа: $P = 1$ (кривая 1), 3...4 (2) и 6 мТорр (3).

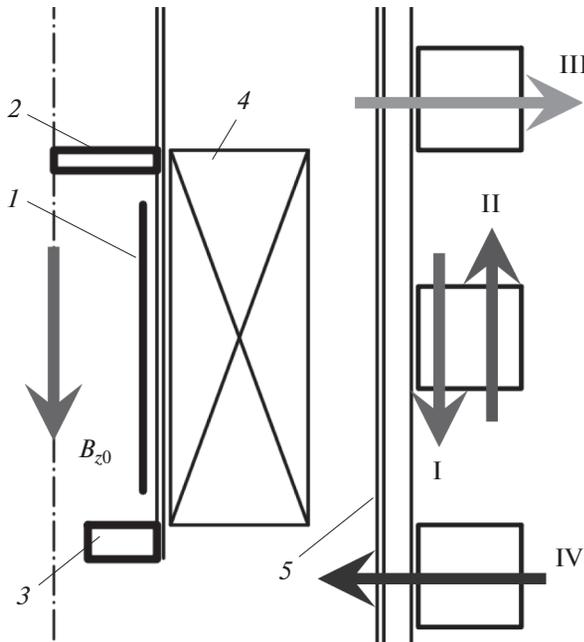


Рис. 3. Варианты размещения внешних магнитов I...IV: 1 – анод; 2 – катод; 3 – антикатод; 4 – магниты ионного источника; 5 – корпус генератора.

хорошая повторяемость амплитудных и временных параметров тока разряда, на импульсах вытягиваемого тока формировалась характерная плоская вершина, длительность задержки зажигания разряда составляла около $t_3 = 10$ мкс. При давлении газа около $P = 6$ мТорр задержка зажигания сокращалась до $t_3 = 5...8$ мкс. Для условий работы ИИ при $P > 10$ мТорр выявлено формирование высокочастотных пульсаций на вершинах импульсов тока, которые указывали на возбуждение неустойчивостей горения разряда [9, 10].

На рис. 3 представлены апробированные в эксперименте варианты I–IV расположения внешних магнитов вблизи корпуса нейтронного генератора (толщина стенки корпуса $s = 3$ мм, сталь 12X18H10T). Варианты I и II соответствуют условиям, когда намагниченность внешнего магнита была одинаково либо противоположно направленной относительно вектора индукции собственного поля B_{z0} на оси ИИ. Для вариантов III и IV внешние магниты создавали радиально направленное внешнее магнитное поле.

На рис. 4 представлены зависимости $B_z(z)$ на оси ИИ, полученные по результатам измерений индукции поля (отдельные точки), формируемого собственной магнитной системой без внешних возмущающих воздействий B_{z0} , а также при различных вариантах расположения внешних магнитов (I–IV). Сплошными линиями обозначен диапазон распределения магнитного поля, характеризовавшийся наиболее стабильным режимом

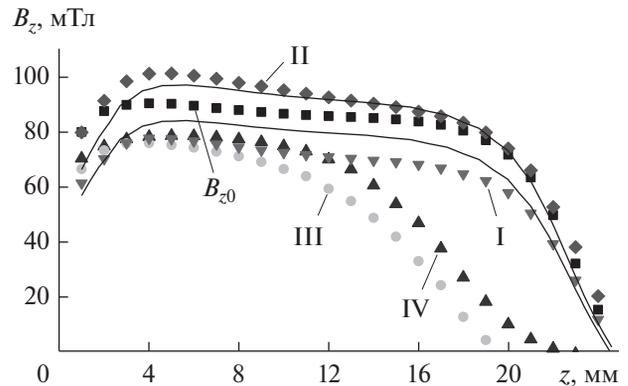


Рис. 4. Распределения магнитного поля в ионном источнике без внешних возмущающих воздействий B_{z0} и при различных магнитных воздействиях: варианты I...IV; сплошные линии – см. пояснения в тексте.

работы ИИ [8, 9]. Из представленных данных четко видно, что для рассмотренной структуры магнитной системы внешние источники приводили к существенному изменению распределения магнитных полей $B_z(z)$ в разрядной ячейке ИИ.

На рис. 5а и 5б показаны экспериментальные зависимости амплитуды тока разряда I_a и задержки его зажигания t_3 от давления газа при различном магнитном окружении нейтронной трубки. Полученные результаты наглядно продемонстрировали, что магнитные источники, размещенные вблизи корпуса каротажного прибора, нарушали режимы работы ИИ. Наличие внешних магнитов приводило к изменению амплитудных характеристик разрядных токов, сужению диапазона устойчивого горения разряда, возрастанию задержки его зажигания. Наиболее выраженный эффект от внешнего поля наблюдался при его поперечном направлении и воздействии на ИИ в области катода. В этих условиях зажигание разряда наблюдалось при давлениях газа более $P > 4$ мТорр, при этом фиксировалось кратное снижение амплитуды разрядного тока.

На рис. 6 представлены формы импульсов разрядного тока в ИИ в условиях его работы без возмущающих воздействий B_{z0} и при различных положениях внешнего магнита (варианты I–IV, см. рис. 3). Измерения проведены при следующих режимах работы ИИ: $U_a = 2$ кВ, $t_{и} = 30$ мкс, $F = 10$ кГц, $P = 4$ мТорр. Под влиянием внешнего поля увеличивалось время задержки зажигания разряда (от 7 до 30 мкс), изменялась форма и амплитуда токовых импульсов. Наиболее нестабильное иницирование разряда происходило при магнитном воздействии в области катода. По сравнению с невозмущенными условиями работы ИИ амплитуда импульсного тока разряда снижалась в ~ 3 –4 раза, задержка его зажигания достигала 30 мкс.

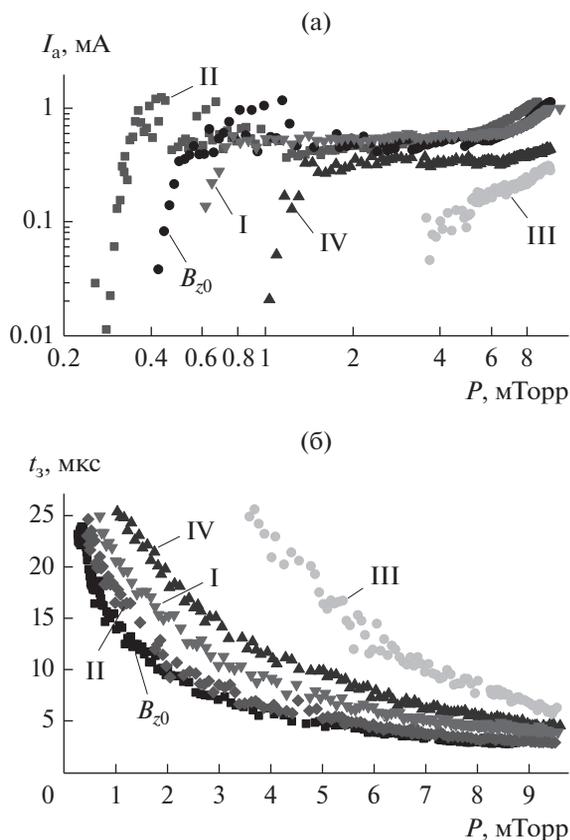


Рис. 5. Зависимости тока разряда (а) и времени задержки разряда (б) от давления без внешних возмущающих воздействий B_{z0} и при различных внешних магнитных воздействиях (варианты I...IV).

Полученные результаты показывают, что корпус нейтронного генератора, изготовленный из стали 12Х18Н10Т (после нагартовки корпус приобретает магнитные свойства), не предотвращает негативного влияния намагниченных элементов, находящихся в непосредственной близости от нейтронного генератора.

Для снижения внешнего магнитного воздействия на режимы работы ИИ требуется применение дополнительных экранов. Ввиду малых габаритных размеров каротажной аппаратуры экранирующие элементы, располагаясь в непосредственной близости от магнитной системы нейтронной трубки, оказывают собственное влияние на распределение магнитных полей в ИИ. Это требует коррекции параметров систем, используемых для формирования магнитного поля малогабаритных нейтронных трубок.

По результатам исследований были разработаны и успешно апробированы и испытаны варианты экранированных магнитных систем нейтронных трубок, обеспечивавшие повышение стабильности работы нейтронных генераторов в условиях воздействия внешних магнитных полей при карота-

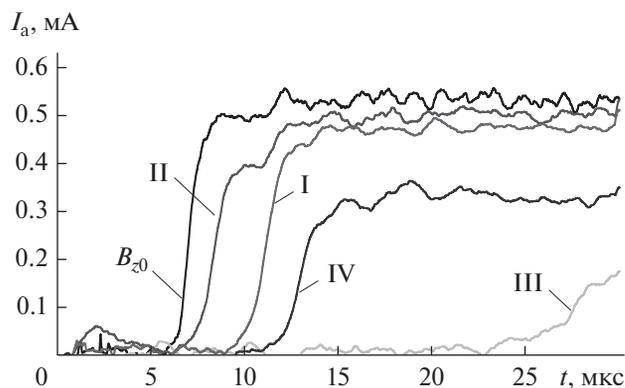


Рис. 6. Импульсы тока разряда без внешних возмущающих воздействий B_{z0} и при внешнем магнитном воздействии (варианты I...IV).

же скважин. В качестве экранирующего элемента может быть использован корпус нейтронного генератора, изготовленный из стали 30ХГСА. В качестве альтернативного варианта магнитной системы ИИ может рассматриваться система с дополнительным цилиндрическим экраном из стали 10864 (03-ВД) с толщиной стенки $s_3 = 2$ мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования работы ионных источников Пеннинга проведены в условиях, соответствующих эксплуатационным режимам импульсных нейтронных генераторов в составе геофизической аппаратуры. В ходе проведенного цикла экспериментов с разными типами нейтронных трубок были определены зависимости разрядного и вытягиваемого токов от давления газа в условиях импульсного питания ионных источников. Исследования режимов горения разряда Пеннинга выполнены при различных параметрах магнитных систем: в ходе экспериментов изменялись как напряженность, так и общая структура распределения магнитного поля в ионных источниках. Проведенные исследования позволили изучить влияние величины и конфигурации магнитного поля в ионном источнике на амплитудно-временные параметры разряда. На основании полученных данных определены диапазоны напряженности магнитного поля, обеспечивающие условия для стабильного зажигания разряда Пеннинга, предложены и апробированы варианты экранированных магнитных систем ионных источников.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Миллер В.В. и др. // Каротажник. 2006. № 10–11 (151–152). С. 174.

2. Юрков Д.И., Боголюбов Е.П., Миллер В.В. и др. // Каротажник. 2013. № 9(231). С. 77.
3. Valkovic V. 14 MeV Neutrons. Physics and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2016.
4. Zhou X., Lu J., Liu Y., Ouyang X. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2021. V. 987. Article No. 164836. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164836>
5. Liu W., Li M., Gao K., Gu D. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2014. V. 768. P. 120. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.052>
6. Hooper E.B. // Adv. Electronics and Electron Phys. 1970. V. 27. P. 295. [https://doi.org/10.1016/S0065-2539\(08\)60040-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2539(08)60040-2)
7. Chen F.K. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. № 11. P. 3191. <https://doi.org/10.1063/1.333882>
8. Мамедов Н.В., Масленников С.П., Солодовников А.А., Юрков Д.И. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 2. С. 172. <https://doi.org/10.31857/S0367292120020067>
9. Mamedov N.V., Gubarev A.V., Zverev V.I. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. № 2. Article No. 025001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab6758>
10. Рачков Р.С., Пресняков А.Ю., Юрков Д.И. // Атомная энергия. 2019. Т. 126. № 6. С. 334.
11. Масленников С.П., Серебрякова А.С. // РЭ. 2018. Т. 63. № 1. С. 80. <https://doi.org/10.7868/S0033849417010119>
12. Комаров Д.А., Масленников С.П. // РЭ. 2019. Т. 64. № 1. С. 77. <https://doi.org/10.1134/S0033849419010091>
13. Мамедов Н.В., Масленников С.П., Пресняков Ю.К. и др. // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 9. С. 1367. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.09.48062.34-19>
14. Мамедов Н.В., Щитов Н.Н., Колодко Д.В. и др. // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 8. С. 1164. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.08.46304.2396>
15. Масленников С.П., Мамедов И.М. // РЭ. 2022. Т. 67. № 7. С. 722. <https://doi.org/10.31857/S0033849422070117>
16. Mamedov N.V., Rohmanenkov A.S., Solodovnikov A.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2064. Article No. 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012039>