

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.534.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ
С МАГНИТНО-ИЗОЛИРОВАННЫМ РАЗРЯДОМ

© 2021 г. С. П. Масленников^{1,*}, П. Г. Васильева¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

*e-mail: sptaslennikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2022 г.

Проведено экспериментальное исследование режимов работы ионных источников с магнитно-изолированным разрядом в условиях пакетно-импульсного питания. Ионные источники с магнитно-изолированным разрядом широко используются в портативных импульсных нейтронных генераторах в составе аппаратуры для геофизического исследования скважин. Эффективность и результативность применения каротажного оборудования во многом определяются амплитудно-временными характеристиками нейтронных потоков, которые зависят от параметров магнитного поля, импульсов анодного напряжения, состава и давления газа. Послеразрядные процессы в межэлектродном промежутке, происходящие в паузах между импульсами питающего напряжения, влияют на условия повторного зажигания разряда и стабильность характеристик генерируемых нейтронных потоков. Полученные результаты показали, что в начальной части пакета импульсов происходили пропуски срабатывания ионного источника, при этом их число увеличивалось при уменьшении разрядного тока. Импульсы ионных потоков при первых срабатываниях ячейки имели меньшую длительность по причине затягивания процессов формирования разряда.

Ключевые слова: электрический разряд, источник ионов, магнитно-изолированный разряд, нейтронный генератор, геофизическое исследование скважин

DOI: 10.56304/S2304487X21060055

1. ВВЕДЕНИЕ

Геофизические методы исследования скважин, базирующиеся на ядерно-физических методах анализа состава горных пород, используются для изучения геологического строения недр, выявления и оценки запасов углеводородного сырья по скважинным разрезам, использования промышленно-геофизической информации при проектировании, контроле и анализе разработки месторождений нефти и газа и технического состояния скважин. Широкое распространение получил радиоактивный каротаж, основанный на эффекте взаимодействия импульсных потоков нейтронов с горной породой.

Практика применения показала эффективность и надежность работы нейтронных генераторов, построенных на основе ионных источников с магнитно-изолированным разрядом с интегрально холодными электродами (ионные источники Пеннинга). В малогабаритных источниках этого типа продольное магнитное поле формируется постоянными магнитами, расположенными на одной оси с цилиндрическим анодом и дисковыми

ми катодами. Разряд зажигается в скрещенных магнитном и электрических полях, что повышает интенсивность ионизационных процессов за счет осциллирующего движения электронов.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований амплитудно-временных характеристик ионных источников в условиях пакетно-импульсного управления, применяемого в аппаратуре геофизического исследования скважин.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Импульсные нейтронные методы каротажа эффективно используются как в скважинах с обсадной колонной, так и на открытых стволах, благодаря высокой проникающей способности нейтронов и вторичного гамма-излучения. Среди различных применяемых на практике наиболее информативностью обладает спектрометрический импульсный нейтронный гамма-каротаж, который позволяет определять плотность пород и содержание химических элементов, находящихся

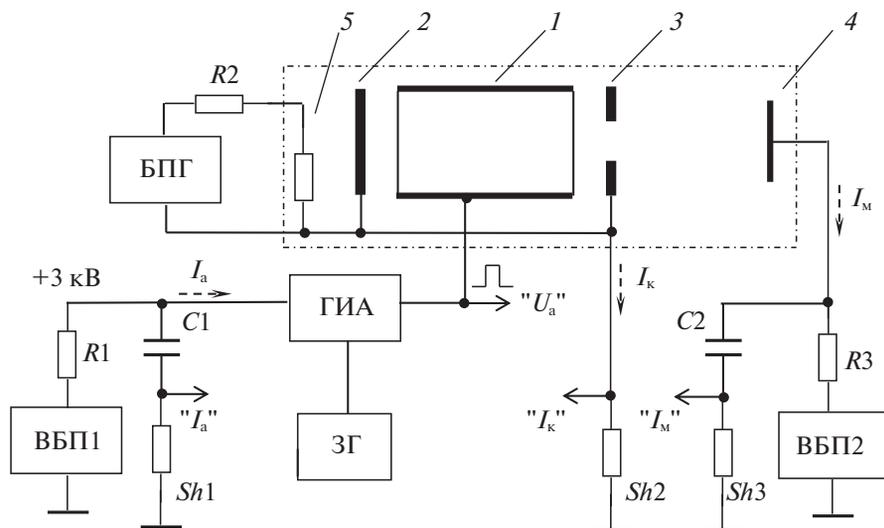


Рис. 1. Структура стенда: 1 – анод; 2 – катод; 3 – антикатод; 4 – мишень; 5 – нагреватель геттера.

в породе и флюиде скважины [1, 2]. При его применении порода облучается импульсными потоками нейтронов. Измерение параметров гамма-излучения неупругого рассеяния и радиационного захвата проводится в нескольких временных окнах [3]. Пакетно-импульсный режим работы аппаратуры позволяет дополнительно регистрировать фоновый спектр естественных потоков излучения и гамма-излучения наведенной активности. Анализ полученных гамма-спектров позволяет определять относительное содержание в породе составляющих ее элементов, пористость и литологический состав горных пород [4, 5].

Для эффективной работы аппаратуры спектрометрического нейтронного гамма-каротажа требуется обеспечить условия для стабильной генерации нейтронных потоков, обладающих короткими фронтами и жесткой синхронизацией относительно импульсов управления.

3. СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование режимов работы ионных источников было проведено на экспериментальном стенде, позволяющем воспроизводить условия пакетно-импульсного управления, близкие к реальным условиям эксплуатации в аппаратуре геофизического исследования скважин. Стенд оснащен системой контрольных датчиков для измерения импульсных напряжений и токов на электродах ионных источников.

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда для исследований режимов работы ионных источников в макетных образцах нейтронных трубок.

Генератор импульсов анодного напряжения (ГИА) построен на основе составных коммутато-

ров [6, 7] и формирует импульсы напряжения положительной полярности амплитудой до 3.0 кВ. Управление последовательным переключением коммутаторов осуществляется одноканальным задающим генератором (ЗГ), который определяет длительность и частоту следования импульсов напряжения на ГИА. Диапазон регулировки частоты повторения импульсов анодного напряжения в проведенном цикле исследований: $F = 1 - 10$ кГц.

Заряд емкостного накопителя энергии $C1$ импульсной цепи питания проводится через резистивную цепочку $R1$. В качестве зарядного устройства используется высоковольтный блок питания ВБП1. Максимальное зарядное напряжение накопителя энергии при проведении исследований режимов работы ионных источников составляет $U_a = 3.0$ кВ. Напряжение на мишень ионного источника подается от высоковольтного блока питания ВБП2. Емкостный накопитель энергии в цепи питания мишени $C2$ заряжается через резистор $R3$.

Регистрация импульсов напряжения на выходе ГИА проводится с помощью высоковольтного делителя Tektronix P6015A. Для измерения параметров импульсных токов в анодной I_a и катодной I_k ветвях ионного источника используются резистивные шунты $Sh1$ и $Sh2$. Номинальные значения сопротивлений резистивных шунтов ($10^2 - 10^3$ Ом) подбираются при настройке оборудования с учетом амплитуд импульсов тока, протекающих на активной фазе разряда в ионном источнике и допустимой длительности выбросов емкостного тока. Импульсный ток заряженных частиц на мишени ионного источника I_m измеряется с помощью резистивного шунта $Sh3$. Накал

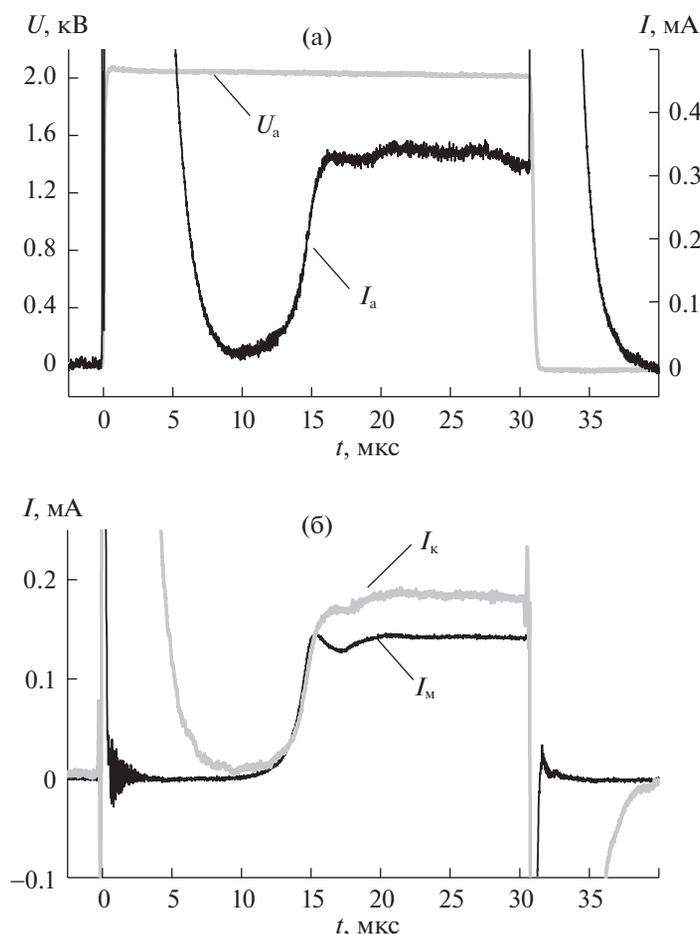


Рис. 2. Осциллограммы импульсов анодного напряжения, анодного тока (а), катодного тока и тока на мишени (б).

накопителя рабочего газа (геттера) в ионном источнике осуществляется от блока питания постоянного тока (БПГ).

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов анодного напряжения U_a и импульсов анодного тока I_a , токов на катоде I_k и мишени I_M .

Сигналы получены для импульсной работы ионного источника в режиме питания: анодное напряжение $U_a = 2$ кВ, длительность импульсов $t_{и} = 30$ мкс, частота повторения импульсов $F = 6$ кГц, напряжение на мишени $U_M = -6$ кВ.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование режимов горения разряда в источнике с магнитно-изолированным разрядом в условиях пакетно-импульсного управления проводилось для следующих режимов работы системы питания: амплитуда импульсов анодного напряжения $U_a = 2$ кВ; длительность импульсов $t_{и} = 30$ мкс; период повторения импульсов $T = 100$ мкс; число импуль-

сов в пакете $N_{п} = 30$; длительность паузы между пакетами $T_{п} = 2$ мс.

На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов тока на мишени при различных давлениях газа в ионном источнике, которые наглядно демонстрируют, что давление газа имеет определяющее влияние на условия генерации разряда. При давлениях $P \approx 1$ мТорр формирование разряда было нестабильным с задержкой зажигания $t_d = 20-25$ мкс (импульс I_{M1}) относительно фронта импульса анодного напряжения.

В диапазоне давлений $P = 3-4$ мТорр обеспечивалась хорошая повторяемость амплитудных и временных параметров тока разряда. На импульсах вытягиваемого тока формировалась четко выраженной плоская вершина (импульс I_{M2}). Длительность задержки зажигания разряда составляла около $t_d = 10$ мкс. При давлении газа до $P = 6$ мТорр задержка уменьшалась до значений $t_d \approx 7$ мкс (импульс I_{M3}).

Для условий работы ИИ при $P > 10$ мТорр было выявлено формирование ВЧ-пульсаций на вер-

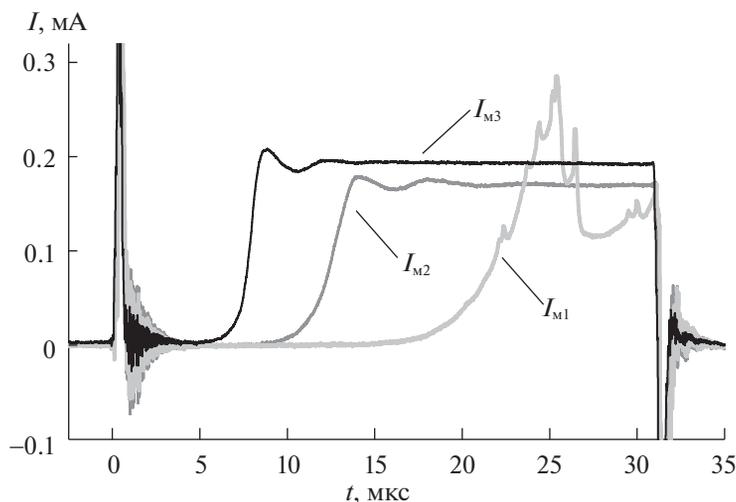


Рис. 3. Импульсы тока на мишени при различном давлении газа.

шинах импульсов тока, что связано с возбуждением неустойчивостей разряда [8, 9].

Скорость восстановления электропрочности межэлектродных промежутков зависит от условий горения предшествующих импульсных разрядов: мощности, длительности, давления и состава газовой среды, конфигурации электродной системы и т.д. Процессы распада плазмы и деионизации газа ускоряются при снижении давления газа в разрядной ячейке и уменьшении амплитуды разрядного тока. Все это затрудняет повторное срабатывание ионного источника при поступлении нового пакета импульсов.

При работе ионного источника с миллисекундными паузами между импульсами напряжения происходит частичное восстановление электропрочности межэлектродного промежутка, что нарушает стабильность работы источника, приводит к увеличению времени задержки зажигания разряда и разбросу этого параметра.

При использовании пакетно-импульсного режима управления повторное включение ионного источника происходит с пропусками срабатываний на первых импульсах напряжения при поступлении новых пакетов импульсов. Число пропущенных разрядных импульсов при неизменных рабочих условиях подвержено значительному статистическому разбросу.

На рис. 4 показаны импульсные сигналы анодного напряжения U_a и тока ионов I_m на мишени ионного источника в начальной части пакета импульсов, где зажигание разряда произошло на третьем импульсе напряжения. Следует отметить, что первый импульс тока на мишени имел меньшую длительность из-за затянутой задержки зажигания разряда.

Полученные данные показали, что при амплитудах тока разряда $I_k = 0.5–0.8$ мА в среднем терялось не более одного импульса. При разрядном токе $I_k \sim 0.2$ мА среднее число пропусков зажигания разряда в пачке увеличилось до пяти импульсов. При этом из тридцати поступивших на ионный источник импульсов зажигание разряда происходило в среднем для 25 случаев, что является значительной потерей предполагаемых срабатываний от их общего числа. При меньших амплитудах разрядного тока ($I_k \sim 0.15$ мА) среднее число пропусков зажигания разряда в пачке достигало десяти импульсов.

Следует отметить, что режим работы ионного источника с амплитудными значениями тока $I_k = 0.2–0.25$ мА близок к реальным условиям эксплуатации нейтронных трубок в геофизической аппаратуре (где недопустимы многочисленные пропуски срабатываний ионного источника). Этим определяется необходимость принятия дополнительных мер для повышения стабильности зажигания разряда.

На рис. 5 представлены гистограммы распределений пачек импульсов по номеру импульса напряжения, на котором происходило первое зажигание разряда, для экспериментальных выборок при токах разряда на катоде: $I_k = 0.2$ мА и $I_k = 0.5$ мА. Объем выборок для представленных гистограмм составлял 80 пакетов импульсов.

Представленные данные указывают на увеличение разброса первого срабатывания ионного источника при снижении тока разряда. Так, например, при амплитуде тока разряда $I_k = 0.5$ мА на первом поступившем импульсе напряжения ячейка срабатывала в 35% случаев, а самый поздний запуск (из зафиксированных в выборке данных) произошел на девятом импульсе в пакете.

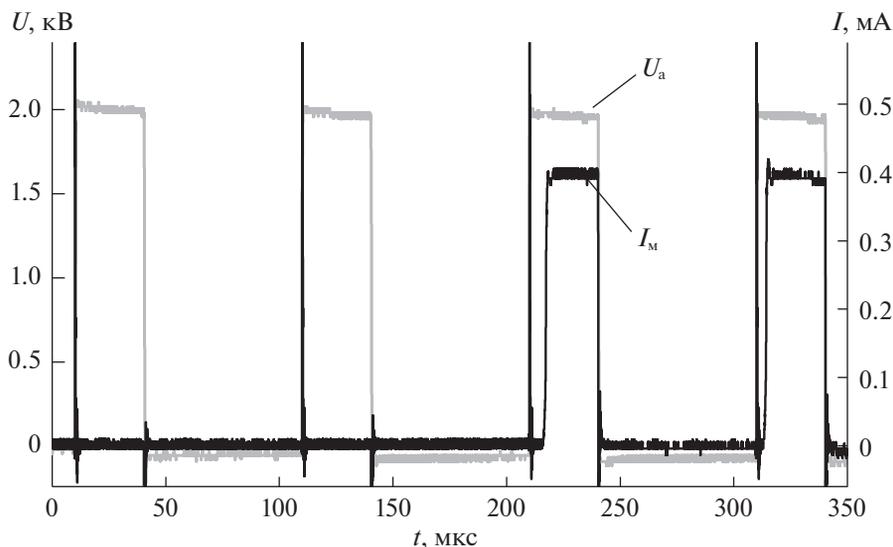


Рис. 4. Импульсы анодного напряжения и тока на мишени в пакетно-импульсном режиме.

В то же время в эксперименте с током разряда $I_k = 0.2$ мА наблюдалось резкое увеличение числа затянутых запусков ионного источника, где на первом импульсе напряжения разряд зажигается с вероятностью 15%. Периодически включение источника происходило на последних импульсах в пакете. При исследованиях режимов работы ионного источника с амплитудами тока разряда менее 0.2 мА регистрировались случаи, когда разряд не инициировался на протяжении всего пакета поступивших импульсов напряжения.

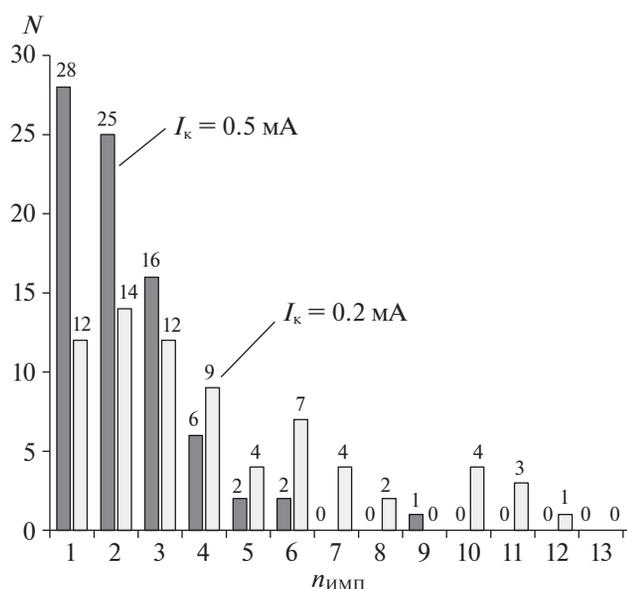


Рис. 5. Гистограммы распределения пакетов импульсов N по номеру импульса $n_{\text{имп}}$ для первого срабатывания ионного источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования амплитудно-временных характеристик магнитно-изолированного разряда в условиях пакетно-импульсного питания и процессов включения ионного источника в зависимости от тока разряда. Результаты показали, что после миллисекундных пауз повторное включение ионного источника происходило с пропусками срабатываний на первых импульсах напряжения. При разрядном токе в диапазоне 0.5–0.8 мА средние потери составляли не более одного импульса в начальной части пакета. При токе $I_k = 0.2$ мА терялось 15–20% импульсов управляющего напряжения. Импульсы ионных потоков, формируемых на первых включениях ионного источника, имели меньшую длительность по сравнению с его последующими срабатываниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Де-Уэйн, Шнорр Р., Адольф Боб. Измерение нефтенасыщенности в обсаженной скважине на месторождении Прадхо-Бей // Нефтегазовое обозрение, 1995. 126. № 2.
2. Baicker J.A., Sayres A., Schladale S., Dudek J. and Stone J.M. Carbon/Oxygen Logging using a pulsed neutron generator and a germani cryosonde // PGT. Geophysics, Inc., Princeton, NJ 08 0, 1985A.
3. Петерсилье В.И., Яценко Г.Г. Методические рекомендации по применению ядерно-физических методов ГИС, включающих углероддиоксидный каротаж, для оценки нефте- и газонасыщенности пород коллекторов в обсаженных скважинах. Москва—Тверь: ВНИГНИ, НПЦ “Тверьгеофизика”, 2006. 41 с.

4. Боголюбов Е.П., Копылов С.И., Полканов Ю.Г., Титов И.А., Юрков Д.И. Состояние и перспективы развития во ВНИИА аппаратуры радиоактивного каротажа для решения задач нефтегазовой отрасли // Труды межд. научно-практ. конф. (1–4 октября 2013 г., г. Бугульма Республика Татарстан). М.: ВНИИГеосистем, 2013. С. 84–89.
5. Бармаков Ю.Н., Боголюбов Е.П., Миллер В.В. и др. Развитие аппаратно-программных комплексов импульсного нейтронного каротажа во ВНИИА им. Н.Л. Духова. Аппаратурно-методические комплексы для геофизических исследований нефтегазовых и рудных скважин // Научно-технический сборник. М.: ВНИИГеосистем, 2012. С. 53–56.
6. Масленников С.П., Серебрякова А.С. Высоковольтные твердотельные коммутаторы на последовательно соединенных МОП-транзисторах // Вестник НИЯУ “МИФИ”, 2017. Т. 6. № 2. С. 161–166.
7. Maslennikov S.P., Serebryakova A.S. High-Voltage Solid State Switches for Grid Modulators of High-Power Microwave Devices // Journal of Communications Technology and Electronics, 2018. V. 63. № 1. P. 71–74.
<https://doi.org/10.1134/S1064226918010096>
8. Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Presnyakov Yu.K., Solodovnikov A.A., Yurkov D.I. Penning Ion Source Discharge Modes for Pulsed and Continuous Power Supplies // Technical Physics, 2019. V. 64. № 9. P. 1290–1297.
<https://doi.org/10.1134/S1063784219090081>
9. Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Solodovnikov A.A., Yurkov D.I. Effect of the Magnetic Field on the Characteristics of a Pulsed Penning Ion Source // Plasma Physics Reports, 2020. V. 46. Is. 2. P. 217–229.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X20020063>

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2021, vol. 10, no. 6, pp. 481–487

Study of the Operating Regimes of Small-sized Pulsed Ion Sources with a Magnetically Isolated Discharge

S. P. Maslennikov^{a,#} and P. G. Vasilyeva^a

^a National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia
^{#e-mail:} spmaslennikov@mephi.ru

Received January 17, 2022; revised January 18, 2022; accepted January 25, 2022

Abstract—The operating regimes of ion sources with a magnetically isolated discharge under conditions of packet-pulse power are experimentally studied. Ion sources with the magnetically isolated discharge are widely used in portable pulsed neutron generators in equipment for geophysical exploration of wells. The efficiency and performance of the logging equipment is largely determined by the amplitude–time characteristics of neutron fluxes, which depend on the magnetic field, anode voltage pulses, composition, and gas pressure. Post-discharge processes occurring in pauses between supply voltage pulses in the interelectrode gap affect the conditions for the re-ignition of the discharge and the stability of the characteristics of the generated electron flows. The results obtained show that gaps in the operation of the ion source occur in the initial part of the pulse packet. At the same time, their number increases with a decrease in the discharge current. The pulses of ion flows at the first actuations of the cell have a shorter duration due to the prolongation of the discharge formation processes.

Keywords: electric discharge, ion source, magnetically isolated discharge, neutron generator, well logging

DOI: 10.1134/S2304487X21060055

REFERENCES

1. DeWayne, Schnorr R., Adolf Bob. Izmerenie neftenasy'shennosti v obsazhennoj skvazhine na mestorozhdenii Pradkho-Bej [Oil saturation measurement in a cased well in the Prudhoe Bay field]. *Neftegazovae obozrenie*, 1995, 126, no. 2 (in Russian).
2. Baicker J.A., Sayres A., Schladale S., Dudek J. and Stone J.M. Carbon/Oxygen Logging using a pulsed neutron generator and a germanium cryosonde. *PGT. Geophysics, Inc., Princeton*, NJ 08 0, 1985A.
3. Petersilie V.I., Yatsenko G.G. *Metodicheskie rekomendaczii po primeneniyu yaderno-fizicheskikh metodov GIS, vklyuchayushhikh uglerodnokislorodnyj karotazh, dlya ocenki nefte- i gazonasy'shennosti porodkolektorov v obsazhennykh skvazhinakh* [Guidelines for the use of nuclear physics well logging methods, including carbon-oxygen logging, to assess the oil and gas saturation of reservoir rocks in cased wells]. Moscow–Tver,

- VNIGNI, SPC Tvergeofizika Publ., 2006. 41 с. (in Russian)
4. Bogolyubov E.P., Kopylov S.I., Polkanov Yu.G., Titov I.A., Yurkov D.I. Sostoyanie i perspektivy razvitiya vo VNIIA apparatury radioaktivnogo karotazha dlya resheniya zadach neftegazovoj otrasli [Status and development prospects at VNIIA of radioactive logging equipment for solving the problems of the oil and gas industry]. *Trudy mezhd. nauchno-prakt. konf. (1–4 oktyabrya 2013 g., g. Bugul'ma Respublika Tatarstan)*. [Proceedings of int. scientific and practical conference (October 1–4, 2013, Bugulma, Republic of Tatarstan). Moscow, VNIIGeosistem, 2013. pp. 84–89. (in Russian)]
 5. Barmakov Yu.N., Bogolyubov E.P., Miller V.V. et al. *Razvitie apparaturno-programmnykh kompleksov impul'snogo nejtronnogo karotazha vo VNIIA im. N.L. Dukhova. Apparaturno-metodicheskie komplekсы dlya geofizicheskikh issledovaniy neftegazovykh i rudnykh skvazhin. Nauchno-tekhnicheskij sbornik*. [Development of hardware and software systems for pulsed neutron logging at VNIIA named after N.L. Dukhov. Instrumentation and methodological complexes for geophysical studies of oil and gas and ore wells. Scientific and technical collection]. Moscow, VNIIGeosistem Publ., 2012. pp. 53–56. (in Russian)]
 6. Maslennikov S.P., Serebryakova A.S. Vysokovol'tnye tverdotel'nye kommutatory na posledovatel'no soedinnennykh MOP-tranzistorah. [High-voltage solid-state switches based on series-connected MOSFETs]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 161–166. (in Russian)
 7. Maslennikov S.P., Serebryakova A.S. High-Voltage Solid State Switches for Grid Modulators of High-Power Microwave Devices. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 71–74.
<https://doi.org/10.1134/S1064226918010096>
 8. Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Presnyakov Yu.K., Solodovnikov A.A., Yurkov D.I. Penning Ion Source Discharge Modes for Pulsed and Continuous Power Supplies. *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 9, pp. 1290–1297. doi: 10.1134/S1063784219090081.
 9. Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Solodovnikov A.A., Yurkov D.I. Effect of the Magnetic Field on the Characteristics of a Pulsed Penning Ion Source. *Plasma Physics Reports*, 2020, vol. 46, is. 2, pp. 217–229.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X20020063>