

Снижение воздействия внешних магнитных полей на работу газонаполненной нейтронной трубки

© И.М. Мамедов,^{1,2} С.П. Масленников,^{1,2} А.А. Солодовников,³ А.Ю. Пресняков¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
127055 Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
115409 Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
117303 Москва, Россия
e-mail: schildkrote5552@yandex.ru

Поступило в Редакцию 8 августа 2023 г.

В окончательной редакции 7 августа 2024 г.

Принято к публикации 16 августа 2024 г.

Представлены результаты исследований режимов работы ионных источников Пеннинга в составе малогабаритных газонаполненных нейтронных трубок в условиях воздействия внешних магнитных полей, возникающих в процессе эксплуатации каротажной аппаратуры за счет собственной намагниченности обсадных колонн. По результатам исследований показано, что наибольший негативный эффект на работу нейтронных генераторов оказывает поперечно направленное внешнее магнитное поле. На основании полученных данных предложены варианты построения экранированной магнитной системы нейтронной трубки, учитывающие конструктивные особенности элементов генератора и прочного корпуса аппаратуры геофизических исследований скважин. Измерения зависимостей амплитуды и задержки импульса от давления для экранированных ионных источников Пеннинга подтвердили их эффективность для повышения стабильности работы нейтронных генераторов.

Ключевые слова: ионный источник Пеннинга, газонаполненная нейтронная трубка, импульсный нейтронный генератор, геофизическая аппаратура.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58857.138-24

Введение

Малогабаритные газонаполненные нейтронные трубки (ГНТ) находят широкое применение в импульсных нейтронных генераторах (ИНГ), составляющих основу аппаратуры геофизических исследований, неразрушающего контроля, ядерной медицины и др. [1]. В качестве источников ускоряемых ионов изотопов водорода в нейтронных трубках этого класса часто используются ионные источники Пеннинга (ИИП), которые отличаются простотой своего конструктивного исполнения и обладают широким диапазоном регулировки рабочих параметров. Режимы горения разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях зависят от состава и давления газа, геометрических параметров и напряжения на электродной системе разрядной ячейки, напряженности магнитного поля и его пространственного распределения [2]. Несмотря на длительную историю исследований и практического применения аппаратуры с ИИП [3–19], до настоящего времени не была разработана единая физическая модель, которая позволяла бы описать весь комплекс процессов генерации разряда Пеннинга и формирования ионных потоков. Этим определяется актуальность проведения экспериментальных исследований и решения вопросов по оптимизации режимов работы ИИП в реальных условиях эксплуатации нейтронной аппаратуры, так как

от этого зависят ее стабильность и ресурсные характеристики.

Для геофизических исследований нефтяных скважин с обсадной колонной методом спектрометрического импульсного нейтронного гамма-каротажа во ВНИИА им. Н.Л. Духова разработана и серийно выпускается аппаратура на основе ГНТ [20,21]. По результатам проведенных исследований было показано, что одной из частых причин нарушения стабильной работы нейтронного генератора является воздействие внешнего магнитного поля. Источниками магнитных полей в скважине, напряженность которых может достигать сотни гаусс, являются намагниченность обсадной колонны и аномалии магнитных полей в соединительных муфтах [22,23].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований режимов работы ИИП в условиях воздействия внешних магнитных полей, позволившие разработать экранированные магнитные системы ГНТ с учетом конструктивных особенностей блока излучателя ИНГ для применения в составе геофизической аппаратуры.

1. Постановка проблемы и методы эксперимента

Исследования разрядных ячеек Пеннинга, используемых в аппаратуре различных областей применения,

позволили выявить несколько режимов и мод горения разряда [2–3,24–27]. Реализация каждой из этих мод зависит от геометрических параметров электродной системы, состава и давления рабочего газа, пространственного распределения и напряженности магнитного поля, режимов работы системы питания. По результатам работ, представленных в [2–3], были выделены следующие моды разряда: таунсендовский режим; режим слабого магнитного поля; режим сильного магнитного поля; переходной режим; режим высокого давления и режим тлеющего разряда. В работе [27] предложено разделение режимов разряда на три характерные типа: высоковольтный разряд низкого давления ($P \leq 10^{-4}$ Торр); переходная форма разряда в среднем диапазоне давлений ($P \sim 10^4 \cdot 10^{-3}$ Торр); тлеющий отражательный разряд в области повышенных давлений ($P \gg 10^{-3}$ Торр). Границы указанных диапазонов давлений не являются фиксированными и зависят от напряженности магнитного поля, напряжения на аноде и геометрических параметров разрядной ячейки.

Переход разряда из одной моды в другую сопровождается изменениями условий инициирования разряда, распределения плотности пространственного заряда и потенциала в межэлектродном промежутке, тока и напряжения горения разряда. Применительно к ИИП в зависимости от реализованной моды разряда изменяются эффективность извлечения ионных потоков, их амплитудные характеристики и время задержки зажигания разряда.

В работах [2,3,24–26] обобщены результаты исследований разряда Пеннинга для вакуумметров и ионных насосов, которые показывают, что зависимости разрядного тока от индукции магнитного поля имеют сложный и немонокотонный вид. В области слабых магнитных полей увеличение индукции поля сопровождается практически линейным ростом тока разряда. При превышении индукции поля некоторого порогового значения рост тока прекращается, и начинает происходить его спад с выходом на некий установившийся уровень. В области сильных магнитных полей ток разряда слабо зависит от индукции поля.

В работах [28–30] для ИИП малогабаритных нейтронных трубок было продемонстрировано существенное влияние конфигурации магнитного поля, наложенного на разрядную ячейку Пеннинга, на режимы горения разряда и на амплитудно-временные характеристики (АВХ) формируемых ионных потоков. По результатам выполненных исследований было предложено использовать в ИИП неоднородное распределение магнитного поля, при котором аксиальная составляющая индукции магнитного поля на длине ячейки линейно падает на 10–15% в направлении вытягивающего электрода.

В работах [31–33] представлены экспериментальные зависимости разрядного и вытягиваемого токов от напряженности магнитного поля для различных типов ИИП, применяемых в ГНТ. Следует отметить, что условия для получения максимальных значений разрядного

и вытягиваемого токов выполнялись при различных напряженностях магнитного поля. В этой связи решение вопросов о повышении эффективности работы ИИП необходимо проводить с учетом перераспределения токов, рабочих напряжений и мощности энергопотребления устройства.

Объектом исследований, результат которых приведен в настоящей работе, является малогабаритные ГНТ, предназначенные для применения в каротажной аппаратуре. ГНТ представляет собой миниатюрный линейный ускоритель ионов дейтерия, транспортируемых на нейтронно-образующую мишень. Все элементы трубки — ионный источник, ионно-оптическая система, мишенный узел — собраны в едином герметичном корпусе. ИИП состоит из расположенных на одной оси цилиндрического анода и двух дисковых катодов, которые помещены в аксиальное магнитное поле. Ускоряющий электрод и нейтрон-образующая мишень, находящиеся под высоким отрицательным потенциалом, гальванически развязаны от ИИП с помощью высоковольтного изолятора. В работах [22–23,28] приведено подробное описание исследуемых ИИП и ГНТ.

2. Экспериментальное оборудование и методика измерений

Опытные образцы ГНТ через откачной штенгель подключались к вакуумной системе экспериментального стенда, который оснащен набором датчиков для OnLine-измерения импульсных напряжений на аноде ионного источника, импульсных токов в анодной, катодной ветви ИИ, напряжения смещения и вытягиваемого импульсного тока на мишени [28,29,34]. Предельное остаточное давление составляло $1 \cdot 10^{-6}$ Торр. Наполнение объема ГНТ рабочим газом (дейтерий) и регулировка его давления в диапазоне 0.1–10 мТорр осуществлялась с помощью встроенного геттера (хранилища рабочего газа). Для создания аксиально-симметричного магнитного поля различной величины и конфигурации в ИИП применялась цилиндрическая токовая катушка или сборки из нескольких кольцевых магнитов. За счет смещения токовой катушки вдоль оси системы моделировались условия зажигания разряда в магнитных полях с неоднородным распределением [28,29]. Параметры импульсов на анод в импульсно-периодическом режиме питания были следующими. Частота следования импульсов питающего напряжения выбиралась или $f = 600$ Hz при длительностях импульсов $t_{vp} = 200 \mu s$, или $f = 10$ kHz при импульсах с длительностью $t_{vp} = 30 \mu s$. Амплитуда напряжения на аноде (U_a) регулировалась от 1.5 до 3.0 kV.

При проведении экспериментов, в которых исследуемая ГНТ не погружалась в трансформаторное масло, ускоряющее напряжение, приложенное к мишенному электроду трубки, составляло $U_{ex} = -20$ kV. В работах [9,19] на основе проведенных исследований режимов работы импульсных нейтронных генераторов была продемонстрирована прямая связь между формой токового

импульса на мишени и формой нейтронной вспышки. В работе [35] для исследуемого в настоящей работе типа ГНТ была показана линейная зависимость между вытягиваемым током из ПИИ и нейтронным потоком (в том числе при различных уровнях ускоряющего напряжения). Также в работах [36,37,38] независимыми методами показано, что для данной геометрии ГНТ и при ускоряющих напряжениях $U_{ex} \geq 20$ кВ практически весь экстрагируемый из ПИИ ионный пучок попадал на мишень. В работе [39] по результатам прямых измерений профиля пучка на мишени, находившейся под отрицательным потенциалом, было показано, что для геометрии ионно-оптической системы, которая используется в исследуемой в настоящей работе ГНТ, не было выявлено эффектов, приводивших к увеличению диаметра пятна при увеличении ускоряющего напряжения свыше 20 кВ.

3. Результаты и обсуждения

В ходе проведенного цикла экспериментов с использованием нескольких образцов нейтронных трубок были определены зависимости разрядного и вытягиваемого токов от давления в условиях импульсного режима питания ионных источников. Исследования выполнены при различных параметрах магнитной системы ионных источников. Изменениям подвергались не только значения индукции магнитного поля (созданного постоянными магнитами) в ионном источнике, но и структура распределения (конфигурация) магнитного поля.

3.1. Влияние внешних магнитных полей на работу ГНТ

В работах [28–31] приведены результаты исследований по выявлению оптимальной конфигурации магнитного поля в ИИП ГНТ, при которой достигаются наименьшие времена зажигания разряда при максимальных значениях коэффициента экстракции — отношения вытягиваемого из ИИП ионного тока к току разряда. Опыт практического применения нейтронных генераторов указывает на актуальность изучения влияния внешних источников магнитных полей на режимы работы ИИП, входящих в состав малогабаритных ГНТ.

Это послужило отправной точкой для дополнительных исследований с целью повышения стабильности работы нейтронных трубок в условиях воздействия внешних магнитных полей, создаваемых намагниченными элементами скважины или внешними предметами, оказавшимися вблизи нейтронного генератора. Поставленные задачи решались исходя из предположения о воздействии на аппаратуру асимметричного бокового внешнего магнитного поля с напряженностью около 100 Г, что соответствует реальным режимам проведения исследования скважин [22].

Опытные образцы исследованных ГНТ размещались в корпусах блока трубки (БТ) и блока излучателя (БИ) реальных импульсных нейтронных генераторов. На

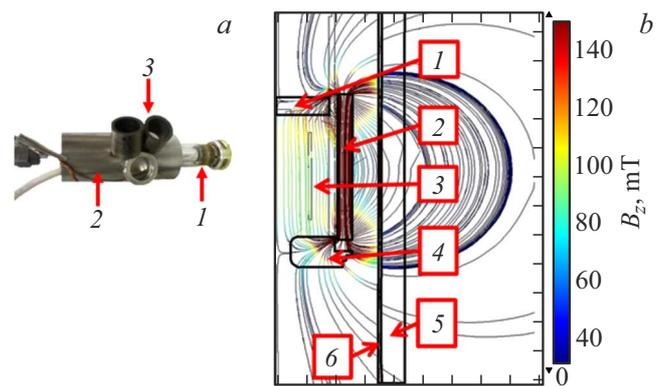


Рис. 1. *a* — фотография ГНТ (1) с корпусом, имитирующим БТ и БИ (2), а также внешними „паразитными“ магнитами (3); *b* — распределение магнитного поля в ИНГ около ГНТ (расчеты в среде Comsol Multiphysics), 1 — катод ИИП (ковар), 2 — постоянные магниты, 3 — анод ИИП (нержавеющая сталь), 4 — антикатод ИИП (ковар), 5 — БИ (нержавеющая сталь), 6 — БТ (сталь AISI 1008).

рис. 1 представлена картина распределения собственных магнитных полей в области ионного источника, полученная по результатам моделирования в среде Comsol Multiphysics. При расчетах использовались параметры магнитов, которые применяются в реально действующей аппаратуре и соответствуют условиям ее эксплуатации по температурной стабильности, воздействию нейтронных потоков, габаритам и др.

Представленные данные наглядно отражают структуру магнитного поля и его однородность внутри ИИП, траектория линий магнитного поля позволяет определять отношение продольной и поперечной составляющих магнитного поля, что оказывает определяющее влияние на режимы работы нейтронной трубки [29]. В процессе дальнейших экспериментальных исследований проводились контрольные измерения распределения аксиальной составляющей магнитного поля на оси ИИП с помощью датчиков Холла, вводимых в разрядную ячейку через отверстие в антикатоде.

Проведено несколько серий экспериментов при различных вариантах размещения внешних „возмущающих“ магнитов относительно ИИП. В исследовании применялись магнитные сборки из материала NdFeB с размерами $30 \times 20 \times 25$ мм, имевшими индукцию магнитного поля на их торцевой поверхности ~ 0.4 Т. Эти сборки обеспечивали создание внешнего магнитного поля в области ИИП, аналогичного условиям работы аппаратуры при исследованиях скважин [22].

Ниже приведены результаты исследований режимов зажигания и характеристик разряда Пеннинга для четырех вариантов размещения внешних магнитов вблизи ионного источника (рис. 2). Варианты I и II соответствуют условиям, когда внешний магнит располагался в центральной части ИИП для создания внешнего магнитного поля противоположно направленного и сонаправленного с полем внутри ИИ. Варианты III и IV — внешний

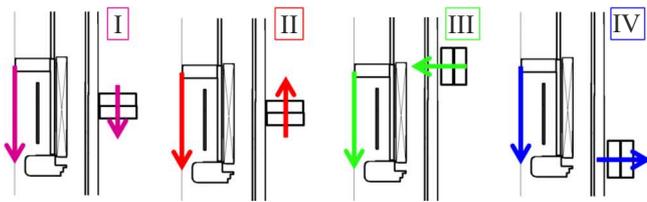


Рис. 2. Варианты размещения внешних магнитов вблизи ионного источника.

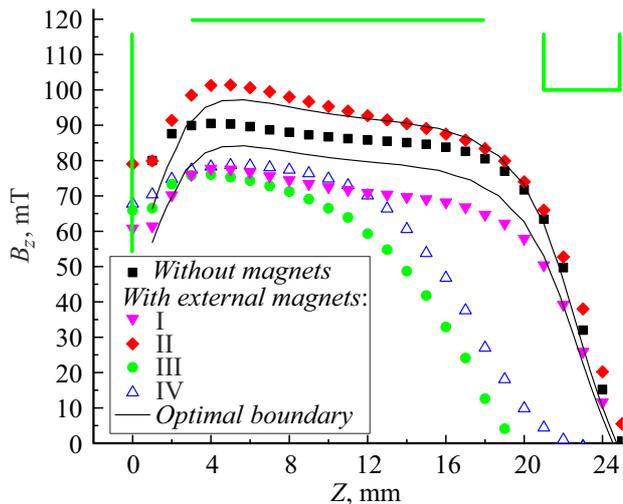


Рис. 3. Распределения магнитного поля внутри ИИП ГНТ при наличии внешних магнитов. Обозначения цветов аналогичны рис. 2.

магнит расположен в области катода и антикатода для создания поперечно направленного внешнего магнитного поля.

На рис. 3 представлены зависимости $B_z(z)$, полученные по результатам измерений индукции магнитного поля вдоль оси ИИП (отдельные точки), формируемого собственной магнитной системой без внешних возмущающих воздействий, а также при различных вариантах расположения внешних магнитов. Сплошными линиями обозначен диапазон наиболее оптимального распределения магнитного поля в разрядной ячейке, обеспечивающего стабильный режим работы ИИП.

Представленные данные наглядно демонстрируют, что в зависимости от направления намагниченности внешнего источника магнитное поле может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону. При поперечном направлении внешнего поля происходит деформация распределения $B_z(z)$.

На рис. 4 и 5 представлены результаты экспериментов по измерению зависимостей амплитудных параметров разрядного и вытягиваемого тока, а также времени задержки и нарастания импульсов разрядного тока от давления рабочего газа в ИИП при различном магнитном окружении нейтронной трубки: без внешних источников и для четырех различных положений внешнего магнита.

Зависимости амплитудных значений тока разряда I_d и вытягиваемого тока I_{ex} от давления (рис. 4) были исследованы в диапазоне давлений $P = 0.3–15$ мТорр, в котором происходило устойчивое зажигание разряда.

На рис. 5 показаны зависимости времени задержки зажигания разряда t_{delay} и времени нарастания фронта разрядного тока t_{front} от давления. Как видно из рис. 4 и 5, при наличии внешних магнитов происходило снижение амплитуды разрядного тока на 30–35% с одновременным увеличением задержки зажигания разряда на 2–4 μ s (с $t_{delay} \approx 6 \mu$ s до $\approx 8–10 \mu$ s). Для условий эксперимента с поперечным направлением внешнего поля в области катода, при котором в диапазоне давлений меньше 4 мТорр зажигания разряда не происходило, зафиксировано практически четырехкратное снижение амплитуды разрядного тока, а задержка зажигания разряда превысила 15 μ s.

Полученные результаты показывают, что корпус каротажного прибора, изготовленный из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т, не позволяет подавить влияние намагниченных материалов, находящихся в непосредственной близости от излучателя ИНГ. Поле внешних магнитов нарушает структуру поля в ИИП (рис. 4), что может приводить к срыву его работы. Причем наибольший отрицательный эффект от воздействия внешнего магнитного поля, приводящий к существенному ухудшению работы ИИП, наблюдается при направлении внешнего магнитного поля в области катода, поперечном к оси ИИП. Как видно из рис. 4 и 5 (для варианта внешнего воздействия III), зажигание разряда происходило при повышенных давлениях ($P \geq 4$ мТорр), амплитуды токов уменьшились более чем в два раза.

На рис. 6 представлены формы импульсов разрядного и вытягиваемого токов в ИИП для варианта его работы без возмущающих магнитных воздействий, а также при различных положениях внешнего магнита. Параметры работы системы питания оставались неизменными: $U_a = 2$ кВ, $t_{vp} = 30 \mu$ s, $f = 10$ кГц. Измерения характеристик разряда проведены при двух значениях давления рабочего газа в разрядной ячейке: $P = 4$ мТорр (рис. 6, а) и $P = 8$ мТорр (рис. 6, б). Полученные данные наглядно показывают, что в исследованном варианте исполнения ионного источника (без магнитного экранирования) при любом положении внешнего магнита нарушаются условия зажигания разряда. Происходят изменения формы импульсных токов, их амплитудных параметров, а также времени задержки зажигания разряда.

Для импульсных ионных токов, регистрируемых на мишени, снижается их амплитуда и значительно увеличивается время, затрачиваемое на формирование потока ионов. Это является признаком нарушения режимов генерации нейтронных потоков. Наиболее сильное влияние на условия работы ионного источника было зафиксировано для случая внешнего магнитного воздействия в области катода при поперечном направ-

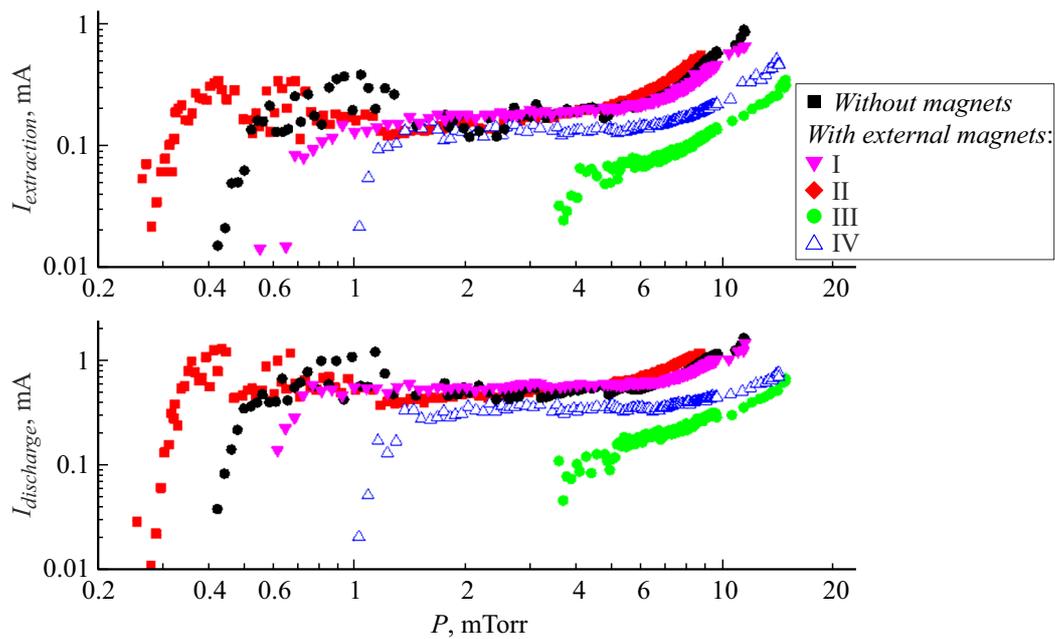


Рис. 4. Зависимость тока разряда I_d и вытягиваемого тока I_{ex} от давления при отсутствии и наличие внешнего магнитного поля.

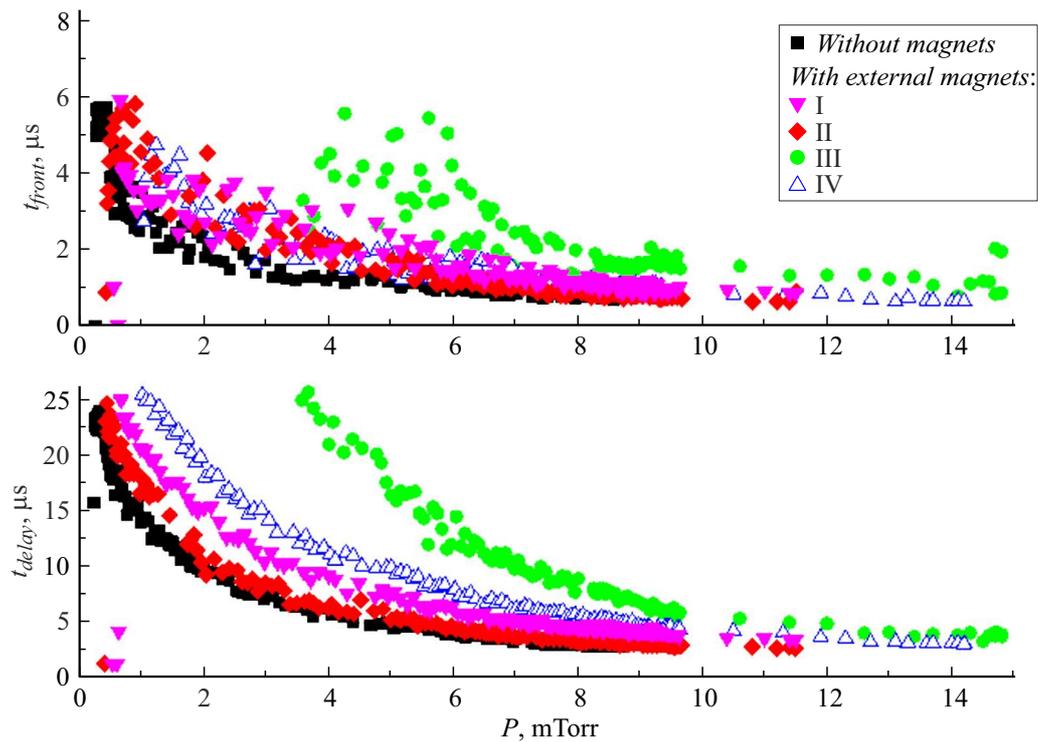


Рис. 5. Зависимость времени задержки t_{delay} и времени нарастания фронта t_{front} от давления при отсутствии и наличие внешнего магнитного поля.

лении вектора индукции. В частности, при давлении $P = 4$ mTorr ионный импульс на мишени возникает с задержкой около $25 \mu s$, амплитуда импульсного тока снижается практически в $\sim 3-4$ раза по сравнению с невозмущенными условиями работы ионного источника.

3.2. Экранированные магнитные системы ИИП

Для снижения влияния внешних источников магнитного поля на режимы работы нейтронной трубки могут использоваться дополнительные магнитные экраны, охватывающие ИИП. Ввиду малых внешних габаритных

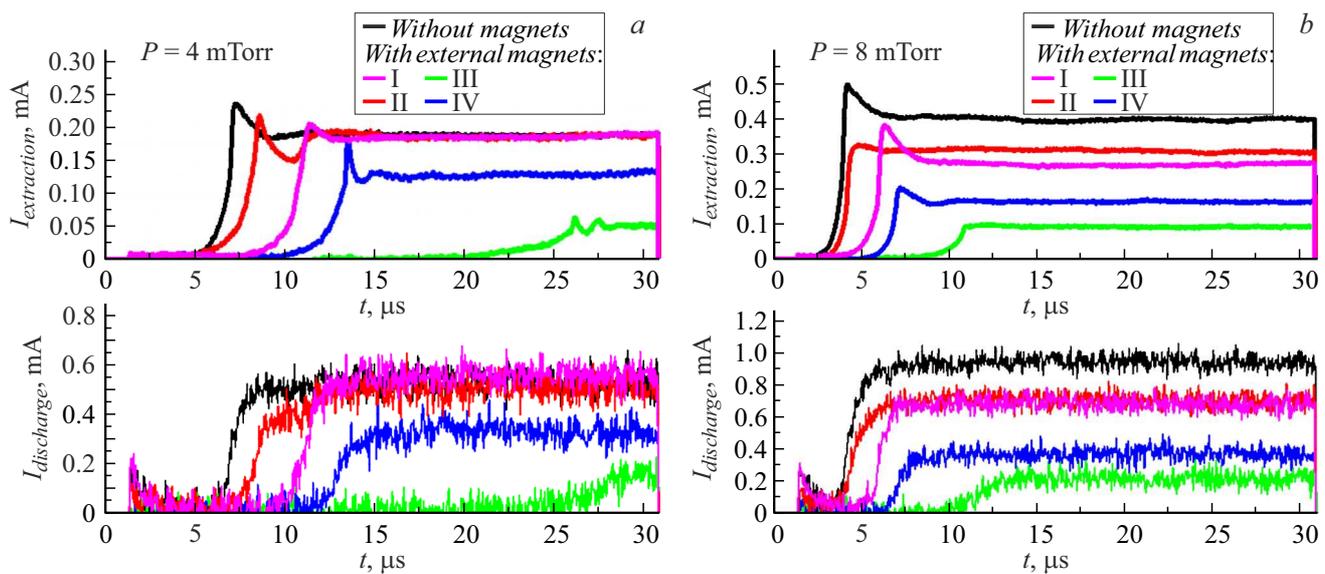


Рис. 6. Характерные осциллограммы тока разряда и вытягиваемого тока при различных давлениях рабочего газа при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля, P : a — 4, b — 8 мТорр.

размеров аппаратуры для геофизических исследований, экранирующие элементы располагаются в непосредственной близости от магнитной системы нейтронной трубки (допустимый зазор составляет около 3 мм) и соответственно влияют на распределение магнитных полей в ионном источнике [22,23,28]. В этой связи при разработке магнитных систем ионных источников необходимо учитывать подобное влияние экранов и вносить соответствующие изменения в параметры магнитной системы (геометрию, структуры, используемые магнитные материалы).

В проведенных исследованиях были использованы два варианта исполнения экранировки ионного источника от влияния внешних магнитных полей. В первом случае в качестве экранирующего элемента использовался внешний корпус каротажного прибора, который изготавливался из конструкционной стали марки 30ХГСА (30ChGSA, 14331). Толщина стенки корпуса составляет 3 мм при внешнем диаметре 43 мм. Во втором варианте экранирующей системы ионного источника использовался экран из электротехнической стали 10864 (03-ВД, (steel 1008)) с толщиной стенки 2 мм (внешний диаметр экрана 40 мм). Следует отметить, что практическое внедрение предложенных вариантов магнитного экранирования ИИП с сохранением ресурсных характеристик создаваемой аппаратуры требует материаловедческой проработки вопроса выбора сталей, обладающих заданными магнитными и прочностными свойствами, а также стойкими к воздействию внешней агрессивной среды в скважине.

Моделирование распределения магнитных полей в экранированных ионных источниках было проведено в среде Comsol Multiphysics. По результатам проведенных расчетов и экспериментальных измерений распре-

деления магнитного поля внутри ИИП из различных вариантов магнитной системы выбраны две конфигурации: в первой из них использовалось пять постоянных магнитов $K30 \times 20 \times 25$ ($B_{z0} = 90$ мТ), 2 мм немагнитный зазор на антикатоде, два корректирующих коваровых кольца и корпус БТ из 30ХГСА. Вторая конфигурация содержала четыре постоянных магнита $30 \times 20.5 \times 25$ мм ($B_{z0} = 90$ мТ), 1 мм немагнитного зазора на антикатоде, два корректирующих коваровых кольца, стандартный блок БТ с дополнительным магнитным экраном из электротехнической стали (ЭС) и блоком излучателя (БИ) увеличенного размера.

Как видно из графиков $I_d(P)$, $I_{ex}(P)$ (рис. 7, a — для первой конфигурации, рис. 7, b — для второй конфигурации), практически нет отличий амплитуд вытягиваемого и разрядного токов в рабочем диапазоне давлений (3–7 мТорр) вне зависимости от внешней магнитной обстановки. При повышенных давлениях $P > 10$ мТорр амплитуда разрядного тока может отличаться на 400–500 μ А, при этом амплитуда вытягиваемого тока различается на 30–50 μ А. Зависимости времени задержки от давления отличаются в среднем на 0.5–1 μ с (при наличии или отсутствии внешних магнитов), причем при увеличении давления разброс времени задержки уменьшатся до 0.5 μ с. Внешние магнитные возмущения с поперечным направлением намагниченности оказывают наибольший отрицательный эффект поперечного поля у катода и антикатада (рис. 2, варианты III и IV).

На рис. 8 представлены примеры осциллограмм тока разряда и вытягиваемого тока при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля для двух экранированных магнитных систем ИИП. Как видно из графиков, магнитная экранировка создает условия для стабильной

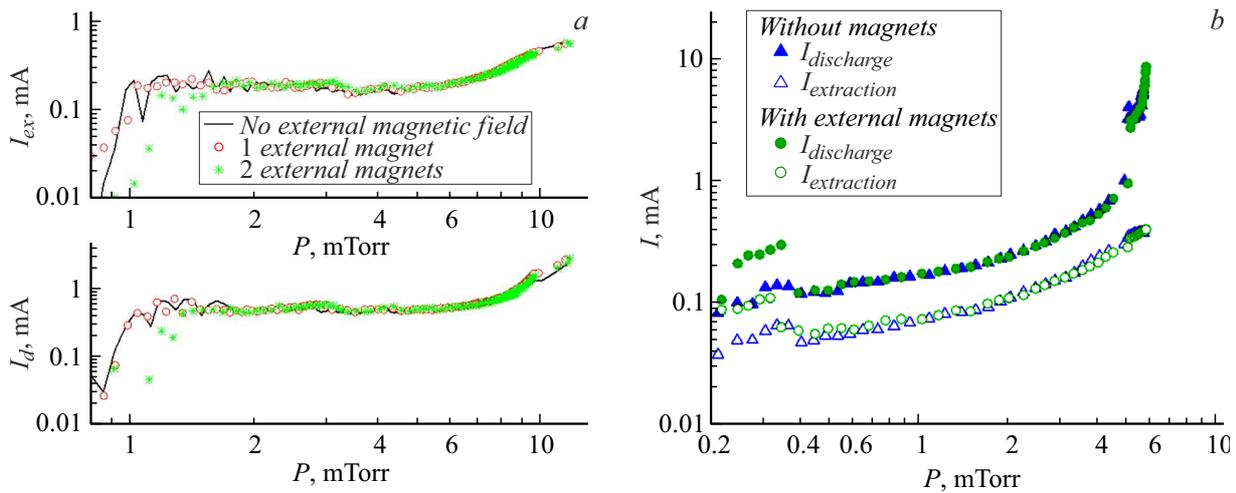


Рис. 7. *a* — магнитная конфигурация № 1; зависимость тока разряда I_d и вытягиваемого тока I_{ex} от давления при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля, $f = 10$ kHz, $t_{pulse} = 30 \mu s$. *b* — магнитная конфигурация № 2; зависимости экстрагируемого тока I_{ex} и тока разряда I_d от давления в ГНТ при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля, $f = 600$ Hz, $t_{pulse} = 200 \mu s$.

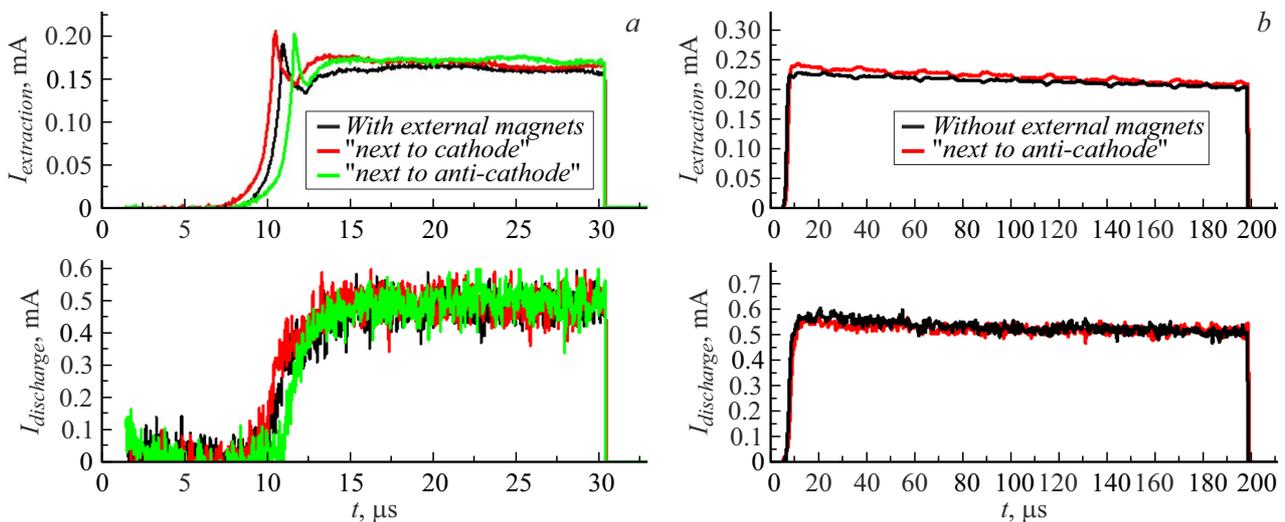


Рис. 8. Примеры осциллограмм тока разряда и вытягиваемого тока при отсутствии и наличии внешнего магнитного поля. *a* — конфигурация № 1, $f = 10$ kHz, $t_{pulse} = 30 \mu s$, *b* — конфигурация № 2, $f = 600$ Hz, $t_{pulse} = 200 \mu s$.

работы ИИП в широком диапазоне временных характеристик системы импульсного питания ионного источника (частота следования и длительности импульсов напряжения).

Заключение

Проведенные исследования позволили изучить зависимости амплитудных параметров и времени задержки формирования разряда Пеннинга от величины и конфигурации магнитного поля в ИИП. На основании полученных данных определены параметры рекомендуемой конфигурации магнитного поля в ИИП ГНТ. По результатам исследований режимов работы ионных источников в составе нейтронных генераторов с внешним прочным

корпусом, изготовленным из нержавеющей стали марки 12X18H10T, было показано, что наибольший негативный эффект оказывает внешнее магнитное поле с поперечным направлением намагничивания. Для обеспечения стабильной работы ионного источника в условиях внешнего магнитного воздействия и имеющихся габаритных ограничениях аппаратуры предложено два варианта исполнения магнитной системы ГНТ: с использованием в качестве экрана прочного корпуса нейтронного генератора из конструкционной легированной стали и с дополнительным экраном из электротехнической стали.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Valkovic. *14 MeV Neutrons. Physics and Applications* (CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, NY., 2016)
- [2] E.B. Hooper. *A Review of Reflex and Penning Discharges, in Advances in Electronics and Electron Physics* (Academic Press, NY., 1969), v. 27, p. 295-343.
- [3] F.M. Penning, J.H.A. Moubis. *Physica*, **IV** (11), 71 (1937).
- [4] X. Zhou, J. Lu, Y. Liu, X. Ouyang. *Nuclear Inst. and Methods in Phys. Research*, **A 987**, 164836 (2021). DOI: 10.1016/j.nima.2020.164836
- [5] X. Zhou, Y. En, J. Lu, Y. Liu, K. Li, Zh. Lei, Zh. Wang, X. Ouyang. *Instrum. Experimental Techniq.*, **63** (4), 595 (2020). DOI: 10.1134/S002044122004020X;
- [6] W. Liu, M. Li, K. Gao, D. Gu. *Nuclear Instrum. Methods in Phys. Research*, **A768**, 120 (2014). DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.052
- [7] A. Fathi, S.A.H. Fegghi, S.M. Sadati, E. Ebrahimibabbi. *Nuclear Instrum. Methods in Phys. Research*, **A 850**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.nima.2017.01.028
- [8] N.V. Mamedov, A.S. Rohmanenkov, V.I. Zverev, S.P. Maslennikov, A.A. Solodovnikov, A.A. Uzvolok, D.I. Yurkov. *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 123310 (2019). DOI: 10.1063/1.5127921
- [9] F.K. Chen. *J. Appl. Phys.*, **56**, 3191 (1984).
- [10] A. Zhang, D. Li, L. Xu, Z. Xiong, J. Zhang, H. Peng, Q. Luo. *Phys. Rev. Accelerators and Beams*, **25**, 103501 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.25.103501
- [11] S. Lei, Q. Mu-Yang, X. Kun-Xiang, Li Ming. *Acta Phys. Sinica*, **62** (17), 175205 (2013). DOI: 10.7498/aps.62.175205
- [12] D.S. Stepanov, A.P. Skripnik, E.Ya. Shkolnikov. *Atomic Energy*, **128** (5), 318 (2020). DOI: 10.1007/s10512-020-00694-4
- [13] E. Burns, G. Bischoff. *AIP Conf. Proc.*, **392**, 1207 (1997). DOI: 10.1063/1.52633
- [14] P. Bach, H. Bernardet, V. Stenger. *Operation and life of SODITRON Neutron Tube for Industrial Analysis*, in J.L. Duggan, I.L. Morgan (Eds.). *Application of Accelerators in Research and Industry* (AIP Press, NY., 1997), p. 905–908.
- [15] M. Mahjour-Shafiei, H. Noori, A.H. Ranjbar. *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 113502 (2011). DOI: 10.1063/1.3658201
- [16] B.K. Das, A. Shyam. *Rev. Scientific Instrum.*, **79**, 123305 (2008). DOI: 10.1063/1.3054268
- [17] A. Sy, Q. Ji, A. Persaud, O. Waldmann, T. Schenkel. *Rev. Scientific Instrum.*, **83**, 02B309 (2012). DOI: 10.1063/1.3670744
- [18] М.С. Лобов, И.М. Мамедов, Н.В. Мамедов, А.Ю. Пресняков, В.И. Зверев, Д.И. Юрков. *ЖТФ*, **93** (6), 777 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.06.55602.16-23
- [19] A.D. Liberman, F.K. Chen. *Proc. SPIE*, **2339**, 188 (1995).
- [20] Ю.Н. Бармаков, Е.П. Боголюбов, В.В. Миллер, Ю.Г. Полканов, В.И. Рьжков, И.А. Титов. *Каротажник*, **10–11**, 175 (2006).
- [21] Д.И. Юрков, Е.П. Боголюбов, В.В. Миллер, С.И. Копылов, Г.Г. Яценко, Ф.Х. Еникеева, Л.А. Магадова, З.Р. Давлетов, В.Ю. Солохин, А.Ф. Шаймардаров. *Каротажник*, **9**, 77 (2013).
- [22] Р.С. Рачков, А.Ю. Пресняков, Д.И. Юрков. *Атомная энергия*, **126** (6), 334 (2019).
- [23] Р.С. Рачков, А.Ю. Пресняков. *Ядерная физика и инжиниринг*, **7** (2), 162 (2016).
- [24] Г.В. Смирницкая, Нгуен Хыу Ти. *Вестник МГУ*, **1**, 3 (1969).
- [25] Э.М. Рейхрудель, Г.В. Смирницкая, Г.А. Егизарян. *ЖТФ*, **43**, 130 (1973).
- [26] Э.М. Рейхрудель, Г.В. Смирницкая, Нгуен Хыу Ти. *ЖТФ*, **39**, 1052 (1969).
- [27] Ю.Е. Крейндел. *Плазменные источники электронов* (Атомиздат, М., 1977), с. 144.
- [28] N.V. Mamedov, S.P. Maslennikov, A.A. Solodovnikov, D.I. Yurkov. *Plasma Phys. Reports*, **46** (2), 217 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20020063
- [29] N.V. Mamedov, A.V. Gubarev, V.I. Zverev, S.P. Maslennikov, A.A. Solodovnikov, A.A. Uzvolok, D.I. Yurkov. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**, 025001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/ab6758
- [30] С.П. Масленников, И.М. Мамедов. *Атомная энергия*, **133** (1), 50 (2022).
- [31] N.V. Mamedov, A.S. Rohmanenkov, A.A. Solodovnikov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2064**, Art.N. 012039 (2021). DOI: 10/1088/1742-6596/2064/1/012039
- [32] A.V. Sy. *Advanced Penning-Type Source Development and Passive Beam Focusing Techniques for an Associated Particle Imaging Neutron Generator with Enhanced Spatial Resolution* (Diss. California, 2013)
- [33] Е.Т. Кучеренко, В.А. Саенко. *ЖТФ*, **37** (1), 112 (1967).
- [34] Н.В. Мамедов, С.П. Масленников, Ю.К. Пресняков, А.А. Солодовников, Д.И. Юрков. *ЖТФ*, **89** (9), 1367 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48062.34-19 [N.V. Mamedov, S.P. Maslennikov, Yu.K. Presnyakov, A.A. Solodovnikov, D.I. Yurkov. *Tech. Phys.*, **64** (9), 1290 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219090081]
- [35] Н.В. Мамедов, А.С. Рохманенков, И.А. Каншин, С.П. Масленников, М.С. Лобов, А.А. Солодовников. *Mater. Technol. Design*, **5** (4(14)), 42 (2023). DOI: 10.54708/26587572_2023_541442
- [36] N. Mamedov, D. Prokhorovich, I. Kanshin, A. Solodovnikov, D. Kolodko, I. Sorokin. *AIP Conf. Proceed.*, **2011**, 080006 (2018). DOI: 10.1063/1.5053361
- [37] А.Н. Долгов, В.Г. Марков, А.А. Окулов, Д.Е. Прохорович, А.Г. Садилкин, Д.И. Юрков, И.В. Визгалов, В.И. Рашиков, Н.В. Мамедов, Д.В. Колодко. *Успехи прикладной физики*, **2** (3), 267 (2014).
- [38] I.A. Kanshin, A.A. Solodovnikov. *Instrum. Experimental Techniq.*, **63** (3), 315 (2020). DOI: 10.1134/S0020441220030112
- [39] N. Mamedov, D. Prokhorovich, D. Yurkov, I. Kanshin, A. Solodovnikov, D. Kolodko, I. Sorokin. *Instrum. Experimental Techniq.*, **61**, 530 (2018). DOI: 10.1134/S0020441218030223