

На правах рукописи

**КУЗНЕЦОВ
АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ**

**Физические процессы в малогабаритных диодах с осциллирующими
дейтронами для генерации нейтронов**

Специальность: **01.04.13** – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

9 НОЯ 2016

Автор:



Москва - 2016

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шиканов Александр Евгеньевич (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, главный специалист по направлению

Свистунов Юрий Александрович (Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова);

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

Лемешко Борис Дмитриевич (Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук

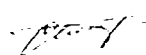
Защита состоится «7» декабря 2016 года в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, в _____, тел. (495) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>

Просим принять участие в работе совета и прислать отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан «31» 10 2016г.

Исполняющий обязанности ученого
секретаря диссертационного совета



Масленников С.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований.

В прикладной ядерной физике в настоящее время имеется ряд важных направлений, для успешного развития которых требуются импульсно-периодические излучатели нейтронов с большим ресурсом работы. Одно из таких направлений возникло в связи с усилением борьбы с терроризмом и распространением наркотиков в восьмидесятих годах прошлого столетия с целью обнаружения взрывчатых веществ, наркотиков и делящихся материалов ядерными методами с использованием реакций неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов. Другие направления связаны с каротажем нефтегазовых скважин, нейтронной радиографией, разработкой методов нейтронно-активационного анализа элементного состава вещества, в частности, горных пород, изделий металлургической промышленности, отработанных ядерных отходов и т.д.

Традиционные импульсные нейтронные генераторы (ИНГ) на базе запаянных ускорительных трубок (УТ) с твердыми мишенями, содержащими нуклиды тяжелого водорода, имеют ограниченный ресурс, определяемый, в основном, сроком службы мишени. Одним из путей преодоления этой проблемы является использование для генерации нейтронов диода с осциллирующими дейтронами и плазменной мишенью. В литературных источниках для обозначения таких диодов часто используются термины инерционно-электростатические ускорители (ИЭУ) или Inertial Electrostatic Confinement Facilities (IEC-F). Данная работа посвящена исследованию таких диодных систем и действующих макетов ИНГ на их основе, работающих в импульсно-периодическом режиме. В этом случае смягчаются требования к электрической прочности для малогабаритных устройств и открываются возможности их использования для радиационного контроля различных объектов импульсными нейтронными методами. Указанные факторы и определяют в основном актуальность диссертационного исследования.

Цель исследований – изучение физических процессов в компактных плазменных системах с пучками осциллирующих дейтронов, ускоренных до

энергии синтеза, и разработка технических решений для их реализации.

Научная новизна заключается:

- в создании расчетной математической модели формирования потоков дейтронов в ИЭУ в приближении однородного электрического поля и непрерывного торможения ионов в плазме с учетом влияния на динамику дейтронов расплывания энергетического спектра и электронной эмиссии с катода;
- в проведении компьютерного эксперимента, моделирующего динамику дейтронов в ИЭУ, с использованием модифицированных стандартных алгоритмов и программ, а также способа расчета эффективной прозрачности оптической системы ИЭУ;
- в разработке технического решения ИЭУ с цилиндрической геометрией на базе полого катода из двух дисков в режиме с предварительной ионизацией, на которое получен патент РФ;
- в получении потоков осциллирующих дейтронов, ускоренных до энергии синтеза, в компактных ИЭУ на основе диодных систем с осевой или коаксиальной геометрией с генераторами импульсных напряжений (ГИН), собранным по схемам высоковольтного импульсного трансформатора (ВИТ) или генератора Аркадьева-Маркса;
- в генерации нейтронных импульсов в подобных ИЭУ на уровне до $2 \cdot 10^5$ н/имп. (мгновенный поток 10^{11} н/с) на реакции $D(d,n)^3\text{He}$;
- в разработке экспериментальных методик исследования макета ИНГ на базе ИЭУ.

Научная и практическая значимость работы состоит в получении информации о физических процессах в малогабаритных ИЭУ с потоками осциллирующих дейтронов, ускоренных до энергии синтеза, технологическое освоение которых повысит эффективность аппаратно-методических комплексов для идентификации скрытых опасных веществ, имитации нейтронных полей термоядерных реакторов, нейтронно-активационного анализа состава вещества, получения короткоживущих изотопов элементов, нейтронной томографии,

тестирования аппаратуры, анализирующей нейтронные вспышки и т.д.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические модели процессов формирования потоков осциллирующих дейтронов в плазменных диодных системах.
2. Теоретические модели генерации нейтронов в малогабаритных ИЭУ.
3. Результаты компьютерного эксперимента, моделирующего процессы образования пучков осциллирующих дейтронов и генерации нейтронов в ИЭУ.
4. Результаты экспериментального исследования действующих макетов ИНГ на базе компактных дейтериевых плазменных систем с осцилляцией потоков дейтронов.

Достоверность результатов подтверждается удовлетворительным совпадением теории и эксперимента, а также повторяемостью результатов экспериментальных исследований.

Личный вклад автора состоит в непосредственном и определяющем участии:

- в разработке схемы генерации нейтронов в диодной системе с осциллирующими дейтронами;
- в разработке математической модели формирования потоков дейтронов и генерации нейтронов в диодной системе с осциллирующими дейтронами;
- в физическом и математическом моделировании формирования ускоренных потоков дейтронов и генерации нейтронов в диодной системе с осциллирующими дейтронами;
- в разработке схемы эксперимента по генерации нейтронов;
- в разработке технического решения ИНГ на базе диода с осциллирующими дейтронами;
- в разработке алгоритмов обработки данных измерения нейтронных потоков.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации докладывались на III и V-VII Всероссийских научных конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах», С-Петербург, 1999 и 2001-2003; XVI Совещании

по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния, Обнинск, 1999; V Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике, Москва, 2000; VIII Международном симпозиуме по радиационной физике, Прага, 2000; Международной конференции «Моделирование динамических систем и исследование условий стабильности», Киев, 2001; Международной конференции по рассеянию нейтронов, Мюнхен, 2001; Научных сессиях НИЯУ МИФИ, Москва, 2001-2005, 2007, 2010, 2012; XII Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов, Томск, 2003; Международных научно-технических конференциях «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе», ВНИИА, Москва, 2004, 2012; XXXV Международной конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2008; XVIII Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Москва, 2011; Международной отраслевой научной конференции АТОМТЕХ- Электрофизика, 2015, НИЯУ МИФИ, Москва.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 35 печатных работ. Основные результаты представлены в работах, содержащихся в списке литературы. 5 статей опубликовано в научных изданиях, включенных ВАК в перечень ведущих рецензируемых журналов [3,4,8,9,11]. Получен патент РФ [12]. Статьи [3,4,8,11] опубликованы в журналах, индексируемых в информационных базах Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит 165 страниц основного текста, 86 рисунков, 7 таблиц и состоит из введения, 4-х глав, заключения и библиографии (140 наименований).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость диссертации, дан обзор возможных применений рассматриваемых ИЭУ для генерации нейтронов.

В главе 1 рассмотрена эволюция представлений об эффективности ИЭУ.

В первом разделе обсуждаются ИЭУ на основе простой электростатической двух потоковой сферически симметричной ловушки, в которой возникают циркулирующие потоки ионов и электронов, а также пространственно-зарядовые образования в виде виртуальных электродов.

Во втором разделе рассмотрены ИЭУ с многощелевыми магнитными ловушками остроугольной геометрии и электростатическим запираем магнитных щелей. Проанализированы результаты исследований, проводимых в ХФТИ и ИАЭ им. И.В.Курчатова, которые подтвердили основные элементы теории этих устройств.

В третьем разделе рассмотрен вакуумный фьюзор, состоящий из вложенных сферических сетчатых электродов и ионных пушек, нацеленных в центр ИЭУ. На реакции $T(d,n)^4He$ в лучшей реализации – с 6-ю ионными пушками и общим током 60 мА, получено 10^{10} н/с.

В четвертом разделе рассмотрен ИНГ с периодически осциллирующей плазменной сферой. Ионы в такой системе увлекаются осциллирующим потенциалом инжектируемых извне электронов и совершают собственные колебания.

В пятом разделе обсуждаются работы, проводимые группой американских ученых (G.H.Miley et al). В них рассмотрены ИНГ с сетчатыми электродами и ионным источником на основе тлеющего разряда. В результате проведенных экспериментов получены потоки до 10^7 н/с в стационарном режиме при давлении до 1 Па, установлены режимы их изменения в зависимости от габаритов устройства и рабочего давления.

В шестом разделе рассмотрен, предложенный автором, импульсный ИЭУ с прозрачной, фокусирующей оптической системой цилиндрической геометрии и предварительной ионизацией плазмы, использующий эффект «полого катода» (см. рис. 1).

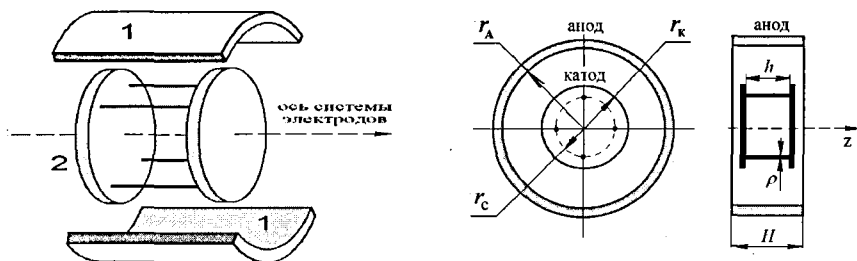


Рис. 1. Схема диодной системы; общий вид (левый рисунок), горизонтальная и вертикальная проекции (правый рисунок)

Поперечные размеры диода составляли 0,1 м, а рабочее давление ~ 1 Па. Диод работал в импульсно-периодическом режиме (амплитуды тока 50 А, напряжения 60 кВ, длительность импульса 2 мкс, частота срабатываний 50 Гц). В эксперименте с ИЭУ по генерации нейтронов на реакции $D(d,n)^3\text{He}$ зафиксирован выход за импульс $2 \cdot 10^5$ нейтронов, мгновенный поток в полный телесный угол – Q , достигает значений $2 \cdot 10^{11}$ н/с, а средний поток – значений 10^7 н/с (в пересчете на ядерную реакцию $T(d,n)^4\text{He}$ – значений $2 \cdot 10^9$ н/с).

В ИЭУ использовались две схемы формирования ускоряющего напряжения на основе ВИТ и генератора Аркадьева-Маркса.

В дальнейшем, в плане усовершенствования были рассмотрены три модификации ИЭУ. В первом варианте катод заземлялся, а высокое положительное напряжение подавалось на анод. Это позволяло убрать соединительные стержни между катодными дисками и регулировать зазор между ними для настройки режима разряда. Во втором варианте для увеличения КПД ускорения дейтронов подавался ток электронов с катода за счет магнитной изоляции межэлектродного зазора. Третий вариант предполагал использование анода с острями направленными в сторону катода, для повышения эффективности предварительной ионизации.

В разделе третьем также проведена оценка влияния торможения дейтронов на эмиссию нейтронов на основании расчета спектра пучка. Каждый цикл колебаний дейтрона считался независимым событием, а переходы с уровня на

уровень – связанными с диссипативными процессами. Если вероятность перехода иона с уровня энергии ε_i на уровень ε_j в единицу времени – γ_{ij} , из условия равенства в стационарном процессе скорости прихода дейтронов на уровень и их ухода для энергетического спектра пучка дейтронов $n(\varepsilon)$ получим:

$$\sum_{j>i} n(\varepsilon_j) \gamma_{ij} = n(\varepsilon_i) \left(\sum_{j<i} \gamma_{ij} + \gamma_t(\varepsilon_i) \right), \quad (1)$$

где $\gamma_t(\varepsilon_i)$ – частота столкновений дейтронов с энергией ε_i с катодом.

В предположении, что потеря энергии дейтроном за i -тое колебание $\omega(\varepsilon_i)$ мала по сравнению с его энергией ε_i , а частота переходов с уровня обратно пропорциональна времени пребывания дейтрона на нем, для спектра энергии

было получено дифференциальное уравнение:
$$\frac{d\left(\varepsilon^{1/2} \cdot n(\varepsilon)\right)}{d\varepsilon} = \frac{(1-t(\varepsilon)) \cdot \varepsilon^{1/2} \cdot n(\varepsilon)}{\omega(\varepsilon)}.$$

Его решение дает выражение для спектра пучка:

$$n(\varepsilon) = B \cdot \varepsilon^{-1/2} \exp \left(\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} d\varepsilon' \left(\frac{1-t(\varepsilon')}{\omega(\varepsilon')} \right) \right), \quad (2)$$

где $t(\varepsilon)$ – прозрачность катодной полости, $\varepsilon_0 = eU$, где U – напряжение между катодом и анодом, e – заряд электрона,

$$B = \frac{I_b}{e\varepsilon_0} (2r_A - r_c) \sqrt{2m_d} \exp[\xi(1-t)] \xi - \text{нормировочный коэффициент,}$$

где I_b – ток дейтронов во внешней цепи, m_d – масса дейтрона r_A и r_c – радиусы анода и сетки (рис. 1), $\xi = 1/n_0 \sigma_{tr} \Gamma_A$, n_0 – плотность среды, σ_{tr} – эффективное транспортное сечение дейтрона в среде.

С помощью (2) получено среднее значение энергии дейтрона:

$$\langle \varepsilon \rangle = \xi(1-t) \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_0} \exp \left(-\zeta(1-t) \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} - 1 \right) \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} d\varepsilon \cong \frac{1}{3} \varepsilon_0, \text{ где } \varepsilon_c - \text{энергия теплового}$$

(термализованного) дейтрона в катодной полости.

Из этой формулы следует, что уширение энергетического спектра пучка дейтронов приводит к уменьшению эмиссии нейтронов.

В главе 2 представлен расчет энергетического спектра потока дейтронов ИЭУ и эмиссии нейтронов. Рассмотрены два возможных режима генерации нейтронов по каналам «пучок-плазма» и «пучок-пучок». Установлено, что Q растет, с ростом напряжения при снижении разрядного тока. Анализ работы ИЭУ с аксиальным ускорением дейтронов и прозрачным сетчатым катодом показал, что эффект полого катода реализуется в интервале давлений, при которых длина Дебая λ_D лежит в пределах: $\rho < \lambda_D < d_k$, где ρ – диаметр проволоки сетки, а d_k – диаметр апертуры сетки катодной полости. Проволока катодной сетки взаимодействует с плазмой в режиме тонкого зонда, ток ионов из плазмы на катод ограничен, и ионы накапливаются в катодной полости, в результате чего их плотность растет.

Установлено, что в исследуемом макете ИЭУ время возникновения инерционно-электростатического режима $(1 \div 2) \cdot 10^{-7}$ с, время перезарядки и поляризационного торможения, соответственно: $(4 \div 5) \cdot 10^{-4}$ с и $(5 \div 10) \cdot 10^{-3}$ с, а время эмиссии нейтрона в канале «пучок-плазма» $(4 \div 5) \cdot 10^5$ с, что на два порядка меньше времени эмиссии нейтрона в канале «пучок-пучок» при наличии фокусировки дейтронов. Плазма в ИЭУ не равновесна, и в ней идут процессы, направленные на восстановление равновесного состояния: торможение ионов (поляризационное и кулоновское), перезарядка, пространственная диффузия, столкновения частиц с элементами конструкций ИЭУ и тормозное излучение, в результате чего спектр пучка не является монохроматическим.

На основании разработанной модели были получены расчетные выражения для потока нейтронов в каналах «пучок-плазма» и «пучок-пучок»:

– в канале «пучок-плазма»:

$$Q_{bp} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \pi a^2 r_A \xi \cdot \left(\frac{e^2}{2a\epsilon_0} \right) \cdot \left(\frac{I_b}{e} \right) \cdot n_i \cdot \exp \left[-380 \cdot \left(\frac{e^2}{2a\epsilon_0} \right)^{1/2} \right] \cdot \frac{\left(\frac{1}{190} \cdot \left(\frac{2a\epsilon_0}{e^2} \right)^{1/2} + \frac{r_c}{r_A} \right)}{\left((1-i)\xi + 190 \cdot \left(\frac{e^2}{2a\epsilon_0} \right)^{1/2} \right)}$$

– в канале «пучок-пучок»:

$$Q_{nb} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\pi a^2 r_A}{S} \right) \cdot \left(\frac{e^2 m_d}{2a\epsilon_0} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{I_b}{e} \right)^2 \cdot \exp \left(-270 \cdot \left(\frac{e^2}{2a\epsilon_0} \right)^{1/2} \right) \cdot \xi^2 \cdot \frac{\left(\frac{1}{190} \cdot \left(\frac{2a\epsilon_0}{e^2} \right)^{1/2} + \frac{5}{28} \cdot \left(\frac{r_c}{r_A} \right) \right)}{\left((1-t) \cdot \xi + 60 \cdot \left(\frac{e^2}{2a\epsilon_0} \right)^{1/2} \right)^2}$$

Расчет нейтронного потока для значений давления дейтерия ~ 1 Па, ускоряющего напряжения $U \leq 150$ кВ, $t=90\%$, $r_c=3$ см, $r_A=10$ см, температуры плазмы ~ 1 эВ. На рис.2 показаны полученные зависимости потока нейтронов от напряжения для различных значений параметра ξ .

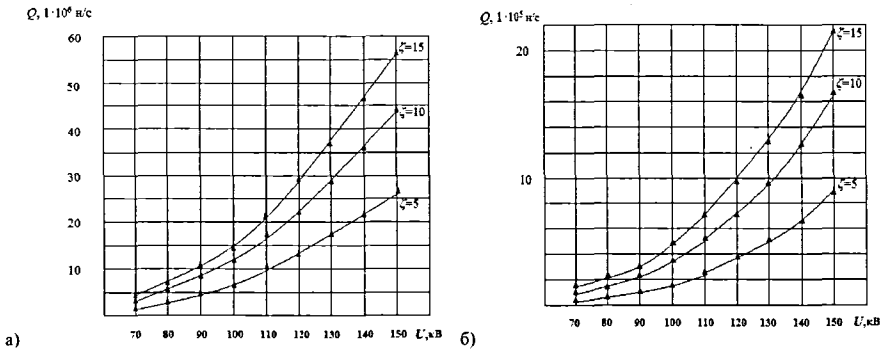


Рис.2. Зависимость потока нейтронов от напряжения и ξ . а) «пучок-плазма», б) «пучок-пучок»

По результатам проведенного компьютерного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- суммарная эмиссия нейтронов растет с увеличением напряжения и при уменьшении расстояния между электродами;
- фокусировка улучшает эмиссию нейтронов в канале «пучок-пучок» в 5–10 раз;
- эмиссия нейтронов в канале «пучок-пучок» растет с уменьшением габаритов системы;
- эмиссия нейтронов в канале «пучок-плазма» может быть увеличена почти 2 порядка при полном подавлении электронного тока;

- в области технически доступных инженерных решений эмиссия нейтронов в канале «пучок-пучок» на два порядка меньше эмиссии в канале «пучок-плазма».

В главе 3 изложены данные компьютерного моделирования электростатических полей и динамики дейтронов в предложенной автором ИЭУ, а также эффективной прозрачности ее катода – t .

Алгоритм приближенного расчета полей в ИЭУ разработан на основе метода эквивалентных зарядов и принципа суперпозиции. При этом потенциал электрического поля представлялся в аналитическом виде, удобном для дальнейшего использования:

$$\varphi(r, \theta, z) \cong a_1 G_1(r, z) + a_2 G_2(r, \theta, z) + a_3 G_3(r, z), \quad (3)$$

(r, θ, z) – цилиндрические координаты.

Первое слагаемое в (3) отвечает за составляющую электрического поля от зарядов на анодном электроде, второе слагаемое соответствует полю от зарядов на стержнях, а третье слагаемое полю от зарядов на дисках (см. рис.1). При этом учитывались корневые характеры зависимости плотности заряда на границах стержней, катодных дисков и анода.

Функции $G_1(r, z)$, $G_2(r, \theta, z)$ и $G_3(r, z)$ имеют следующий вид (рис. 1):

$$G_1(r, z) = \frac{r_A H}{2\pi\epsilon_0} \int_{-1}^1 du (1-u^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(r+r_A)^2 + \left(z - \frac{uH}{2}\right)^2}} K \left[\frac{2\sqrt{rr_A}}{\sqrt{(r+r_A)^2 + \left(z - \frac{uH}{2}\right)^2}} \right],$$

$$G_2(r, \theta, z) = \frac{\rho h}{4\epsilon_0} \int_{-1}^1 du (1-u^2)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=0}^3 \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_C^2 - 2rr_C \cos\left(\theta - \frac{i\pi}{2}\right) + \left(z - \frac{uh}{2}\right)^2}},$$

$$G_3(r, z) = \frac{r_K^2}{\pi\epsilon_0} \int_{-1}^1 du u (1-u^2)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{K \left[\frac{2\sqrt{ur_K r}}{\sqrt{(r+ur_K)^2 + \left(z - h/2\right)^2}} \right]}{\sqrt{(r+ur_K)^2 + \left(z - h/2\right)^2}} + \frac{K \left[\frac{2\sqrt{ur_K r}}{\sqrt{(r+ur_K)^2 + \left(z + h/2\right)^2}} \right]}{\sqrt{(r+ur_K)^2 + \left(z + h/2\right)^2}} \right],$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, $K(x)$ – эллиптический интеграл 1-го рода.

Приближенное интегрирование в этих выражениях с использованием квадратурной формулы Меллера приводит к приближенной аналитической зависимости потенциала от координат после определения неизвестных коэффициентов $a_{1,2,3}$ при решении следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_1 G_1(0, \frac{h}{2}) + a_2 G_2(0, 0, \frac{h}{2}) + a_3 G_3(0, \sqrt{\frac{h^2}{4} + \delta_1^2}) = 0 \\ a_1 G_1(r_C, 0) + a_2 G_2(r_C - \rho, 0, 0) + a_3 G_3(r_C, 0) = 0 \\ a_1 G_1(r_A, \sqrt{\frac{H^2}{4} + \delta_2^2}) + a_2 G_2(r_A, 0, 0) + a_3 G_3(r_A, 0) = U \end{cases},$$

где $\delta_{1,2}$ – подбираемые при отладке программы параметры регуляризации.

Компоненты вектора напряженности электрического поля рассчитывались путем дифференцирования выражения (3):

$$E_r(r, \theta, z) = -\frac{\partial \varphi(r, \theta, z)}{\partial r}, \quad E_\theta(r, \theta, z) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi(r, \theta, z)}{\partial \theta}, \quad E_z(r, \theta, z) = -\frac{\partial \varphi(r, \theta, z)}{\partial z}.$$

Динамика ионов рассчитывалась с помощью системы дифференциальных уравнений Гамильтона–Лоренца, с использованием безразмерных переменных

$$\chi = \sqrt{\frac{m d}{2eU}} V_r, \quad \eta = \frac{r}{r_A}, \quad \xi = \sqrt{\frac{m d}{2eU}} V_\theta, \quad \zeta = \sqrt{\frac{m d}{2eU}} V_z, \quad \nu = \frac{2z}{H}:$$

$$\begin{cases} \frac{d\chi}{d\theta} = \xi + \frac{\eta}{\xi} \frac{r_A}{4U} E_r(\eta, \theta, \nu) \\ \frac{d\eta}{d\theta} = \frac{\eta\chi}{\xi} \\ \frac{d\xi}{d\theta} = \frac{\eta}{\xi} \frac{r_A}{4U} E_\theta(\eta, \theta, \nu) - \chi \\ \frac{d\zeta}{d\theta} = \frac{\eta}{\xi} \frac{r_A}{4U} E_z(\eta, \theta, \nu) \\ \frac{d\nu}{d\theta} = \frac{\eta\zeta}{\xi} \frac{2r_A}{H} \end{cases},$$

где $V_{r,\theta,z}$ – проекции вектора скорости, e – элементарный электрический заряд и начальными условиями: $\chi(\theta_0) = k_1$, $\xi(\theta_0) = k_2$, $\zeta(\theta_0) = k_3$, $k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = 1$, $\eta(\theta_0) = 1$, $\nu(\theta_0) \in [0, 1]$, $\theta_0 \in [0, \pi/2]$, $k_{1,2,3}$ – компоненты единичного вектора, определяющие направление вылета дейтрона из области, прилегающей к катоду.

Компьютерный расчет установил существование в полости катода областей с дефокусирующим электрическим полем при любом расположении стержней, однако при выполнении условий: $h < 4r_K$, $r_c < 0,75r_K$, $r_k < 0,75r_A$ и $h < 0,75H$ их доля в объемном отношении меньше 10% и расположены они в области $r > 0,9r_K$, что приемлемо для поддержания условий существования разряда.

Контрольные расчеты, проведенные с использованием современных компьютерных кодов для расчета электромагнитных полей и динамики частиц, показал, что для рассматриваемых диодных структур погрешность разработанного автором приближенного метода составляет менее 10%, что вполне приемлемо для оценок коэффициента прозрачности катода. При этом метод имеет большие преимущества в виду его экспрессности и наглядности получаемых результатов.

Параметр прозрачности оценивался путем перебора начальных данных с фиксацией числа фактов попадания N_{II} , или непопадания N_H дейтрона на один из проводников или катодных дисков по формуле: $t = \frac{N_H}{N_{II} + N_H}$.

По результаты компьютерного эксперимента для него была получена следующая эмпирическая формула:

$$t = \left(1 - \frac{2\rho}{r_A}\right) \left[1 - \beta \left(\frac{r_K - r_C}{r_K}\right) \frac{eU}{T}\right] \frac{15\sqrt{h}}{15\sqrt{h} + \sqrt{r_K}}, \quad (4)$$

Для катода с регулируемым зазором между дисками, при отсутствии стержней, выражения для потенциала получены в более точном аналитическом виде: а именно в виде суперпозиции потенциалов элементарных кольцевых зарядов, наведенных на поверхностях катода $-q_K(i)$ и анода $-q_A(j)$, где i, j – номера кольцевых зарядов:

$$\varphi(r, z) = \sum_{i=0}^{N_A-1} \frac{K \left\{ \frac{2\sqrt{rr_A}}{\sqrt{(r+r_A)^2 + (z-z(i))^2}} \right\}}{\sqrt{(r+r_A)^2 + (z-z(i))^2}} q_A(i) + \sum_{j=0}^{N_K-1} \frac{K \left\{ \frac{2\sqrt{rr(j)}}{\sqrt{(r+r(j))^2 + (z-h/2)^2}} \right\}}{\sqrt{(r+r(j))^2 + (z-h/2)^2}} q_K(j),$$

где $r(j) = (j+5)r_K/N_K$, $z(j) = (j+0,5)H/N_A$ – координаты кольцевых зарядов. N_A, N_K – соответственно, число разбиений поверхности анода и катода на элементарные

кольца, $g=2\pi^2\epsilon_0$ – калибровочный коэффициент.

С учетом граничных условий была получена система из $N_A + N_K$ линейных уравнений относительно неизвестных элементарных эквивалентных зарядов (n пробегает значения от 0 до $N_A - 1$, а m от 0 до $N_K - 1$):

$$gU = \sum_{i=0}^{N_A-1} \frac{\kappa \left\{ \frac{2r_A}{\sqrt{4r_A^2 + (\bar{z}(n) - z(i))^2}} \right\}}{\sqrt{4r_A^2 + (\bar{z}(n) - z(i))^2}} q_A(i) + \sum_{j=0}^{N_K-1} \frac{\kappa \left\{ \frac{2\sqrt{r_A r(j)}}{\sqrt{(r_A + r(j))^2 + (\bar{z}(n) - h/2)^2}} \right\}}{\sqrt{(r_A + r(j))^2 + (\bar{z}(n) - h/2)^2}} q_K(j)$$

$$0 = \sum_{i=0}^{N_A-1} \frac{\kappa \left\{ \frac{2\sqrt{r(m)r_A}}{\sqrt{(r(m) + r_A)^2 + (z(i) - h/2)^2}} \right\}}{\sqrt{(r(m) + r_A)^2 + (z(i) - h/2)^2}} q_A(i) + \sum_{j=0}^{N_K-1} \frac{\kappa \left\{ \frac{2\sqrt{r(m)r(j)}}{|r(m) + r(j)|} \right\}}{|r(m) + r(j)|} q_K(j)$$

Система решалась численно с использованием среды Mathcad. Точки источников и наблюдения смещались относительно друг друга для регуляризации уравнений, устраняющей логарифмическую сингулярность при совпадении точек источников и наблюдения в диагональных элементах системы уравнений.

Результаты расчетов потенциала представлены на рис. 3.

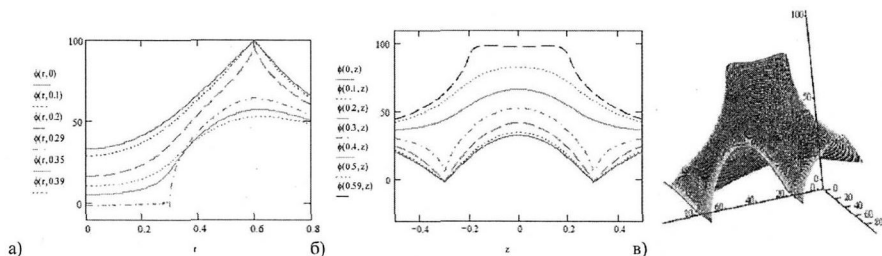


Рис. 3. Расчетное семейство зависимостей потенциала в ИЭУ от радиуса и продольной координаты. а) зависимость от радиуса, б) зависимость от продольной координаты, в) общая картина

Расчет динамики дейтронов показал, что для оценки прозрачности катода и в данном случае можно использовать формулу (4).

В главе 4 описаны результаты экспериментального исследования ИЭУ, поперечный разрез и общий вид которого представлены на рис.4.

Импульсный разряд в ИЭУ возбуждался на фоне стационарного с напряжением 500 В и вкладом энергии порядка несколько Дж путем подачи на катод напряжения $U=30-120$ кВ с длительностью импульса 2 мкс, оцениваемой

по ширине сигнала в первом полупериоде. При пробое напряжение на ГИТ уменьшалось в 1,5 раза в сравнении с режимом холостого хода (при пробое $U=60$ кВ, $I=15$ А, $\tau=2$ мкс), в диапазоне 40-100 Па отмечены осцилляции тока с частотой 30–50 МГц. Диаметр катода и зазор между его дисками менялись в пределах 3–8 см, а диаметр анода – в пределах 5–11 см. С ростом размеров анода и катода ток рос до 50 А, напряжение падало с 100 кВ до 50 кВ. Найлены оптимальные диаметры катода и анода, составившие 3 и 6 см.

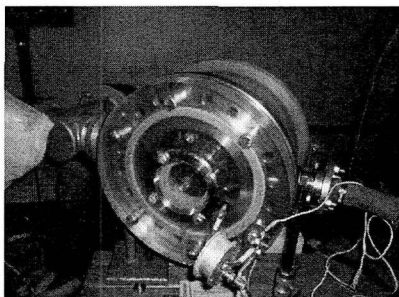
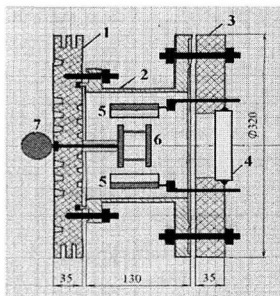


Рис. 4. Схема размещения электродов и внешний вид рабочей камеры: 1- катодный фланец; 2- вакуумная камера; 3- анод; 4- диагностическое окно; 5- секции анода; 6- катод; 7- высоковольтный ввод

Также были исследованы модификации катода, показанные на рис. 5 и 6.

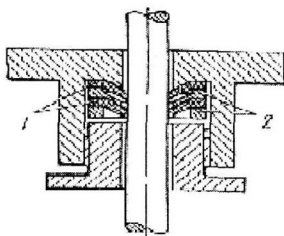
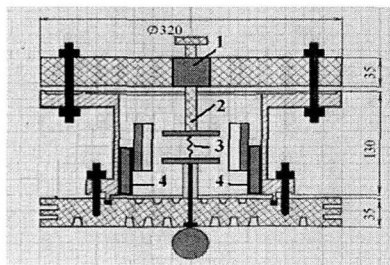


Рис.5. Катод с регулируемым зазором:
1-уплотнение Вильсона;
2-стержень из оргстекла;
3- пружина;
4- крепежная стойка

Для ИЭУ на рис.5 зазор между катодными дисками мог плавно механически регулироваться в ходе стационарного разряда. На основе изменения интенсивности свечения плазменных образований внутри камеры сделан вывод, что для обеспечения эффективной эмиссии нейтронов оптимален зазор между дисками катода $1/2-2/3$ его диаметра.

Для ИЭУ на рис.6 катод выполнен в форме спирали, что позволило изучить

оптическую картину разряда, а также подавление электронной проводимости с использованием магнитной изоляции.

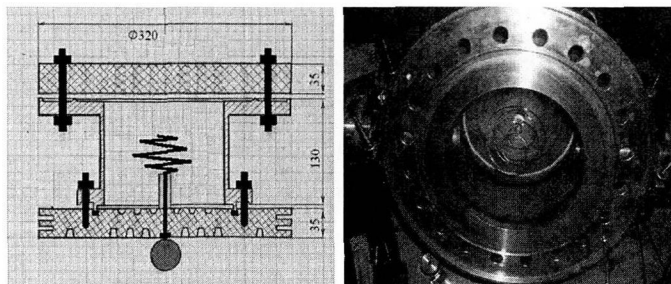


Рис.6. Спиральный катод (геометрия разрядного промежутка и общий вид

Магнитное поле спиральной линии заставляет электроны в ИЭУ двигаться по циклоидальным траекториям и при определенном (критическом) значении они перестают замыкать ускоряющий промежуток. Для ИЭУ с диаметром катода 3 см и напряжением $U=100-200$ кВ, нужно критическое магнитное поле 0,2–0,6 Тл. Эксперименты с размещением токопроводящей спирали вместо катода, показали снижение потока нейтронов, связанное с подавлением электронов, ионизирующих плазму в области анода. Стационарные магнитные поля на уровне критического значения, получаемые с помощью внешнего соленоида, влекли большое потребление энергии, а использование постоянных магнитов требовало неизбежного увеличения габаритов ИНГ.

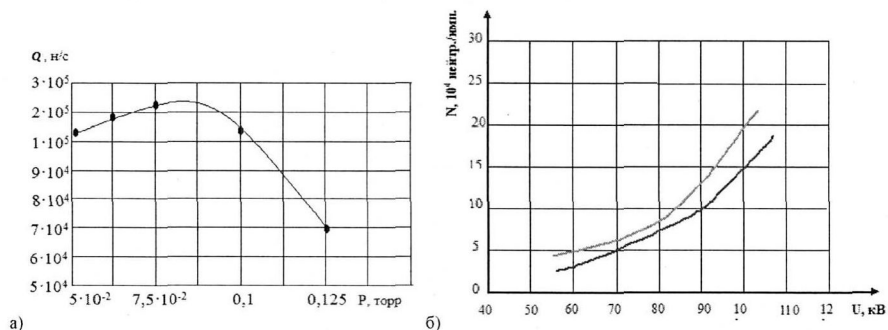


Рис.7. а) зависимость потока нейтронов от давления, б) экспериментальная (верхняя кривая, погрешность 20%) и расчетная (нижняя кривая) зависимости нейтронного выхода за импульс от амплитуды напряжения.

При анализе нейтронной эмиссии использовались осциллограммы

сигналов сцинтилляционного детектора, а также детектра Хансена- Мак Киббена. Поток нейтронов достигал $2 \cdot 10^5$ н/имп. при длительности импульсов 2 мкс с частотой 1 Гц.

На рис. 7 представлены результаты измерений зависимости нейтронного потока от давления дейтерия, полученные методом наименьших квадратов по 5 экспериментальным точкам. При давлении 0,1 торр обнаружен максимум нейтронного потока, что объясняется наличием у кривой Пашена минимума на плоскости (U, P). При возбуждении импульса напряжение, и ток, непрерывно растут, но если давление отклоняется от точки минимума на кривой Пашена, разряд запаздывает, так как для достижения пробойного напряжения нужно время. Задержка пробоя для точек кривой Пашена справа и слева от точки минимума, будет дольше, чем для точки минимума, а нейтронный поток, соответственно, – меньше, чем для точки минимума кривой Пашена.

На рис. 7-б представлены экспериментальная и расчетная зависимости потока нейтронов от напряжения. Экстраполяция экспериментальных кривых предсказывает возможность получения $3 \cdot 10^6$ н/имп. при $U=300$ кВ.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты:

1. На основе анализа литературных источников и патентной информации по эволюции и современному состоянию исследований в области ИЭУ сделан вывод о возможности генерации нейтронов в малогабаритных коаксиальных диодных системах с осциллирующими дейтронами на уровне современных ИНГ, имеющих по сравнению с ними большие резервы для повышения ресурса.
2. Предложены теоретические модели процессов формирования и ускорения потоков осциллирующих дейтронов в плазменных аксиальных и коаксиальных диодных системах с прозрачным катодом, на базе которых были разработаны соответствующие расчетные алгоритмы и компьютерные программы. При разработке учитывались эффекты пространственного и энергетического расплывания потока дейтронов.
3. Предложены теоретические модели процессов генерации нейтронов по каналам «пучок-плазма» и «пучок-пучок», на базе которых были разработаны

соответствующие расчетные алгоритмы и компьютерные программы. При разработке учитывался эффект влияния прозрачности полого катода на генерацию нейтронов, для расчета которого был разработан соответствующий алгоритм.

4. Проведены компьютерные эксперименты, моделирующие динамику дейтронов, прозрачность полого катода и генерацию нейтронов в ИЭУ, с использованием алгоритмов и программ, разработанных автором. По их результатам установлено существенное влияние коэффициента прозрачности катода, объемного заряда дейтронов и эффектов пространственного и энергетического расплывания потока дейтронов на процесс генерации нейтронов. Получены зависимости нейтронного выхода от геометрических параметров диодов.

5. Разработано техническое решение ИЭУ с коаксиальной геометрией на базе полого катода из двух дисков в режиме с предварительной ионизацией дейтерия, на которое получен патент РФ.

6. Предложены три технических решения малогабаритных ИЭУ с регулируемой геометрией полого катода, спиральным полым катодом и магнитной изоляцией электронного компонента.

7. Проведено экспериментальное исследование макетов генераторов нейтронных импульсов на базе ИЭУ с использованием различных катодов. В проведенных экспериментах нейтронный выход достигал $5 \cdot 10^5$ н/имп.

Список литературы

1. Быковский Ю.А., Цыбин А.С., Шиканов А.Е., Кузнецов А.Ю. Эмиссия нейтронов в низкоэнергетических системах // Вестник МАН ВШ. № 1(7). 1999. С.149-176.
2. Ильинский А.В., Кузнецов А.Ю., Плешакова Р.П., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. Исследование процесса извлечения водородных ионов из импульсных плазменных образований для генерации нейтронов // V Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике. Москва. НИЦ «Инженер». 2000. С.187-188.

3. Tsybin A.S., Kuznetsov A.Yu., Kozlovsky K.I., Shikanov A.E. New Approaches in Plasma Neutron Sources // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2002. Т. 74. № S1. С. 36-39.
4. Kuznetsov A.Yu., Shikanov A.E., Tsybin A.S. A method for accurate measuring of yield parameters for neutron generators having complex targets // *Radiation Physics and Chemistry*. 2002. Т. 64. № 4. С. 257-260.
5. Цыбин А.С., Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Шиканов А.Е. Ускоритель лазерной плазмы для радиационно-физических исследований и технологий // XII-th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials. 23-27 September. Томск. 2003. С.511-514.
6. Кузнецов А.Ю., Цыбин А.С., Козловский К.И. Генерация нейтронов в компактных системах с инерционно-электростатическим удержанием дейтронов // Международная научно-техническая конференция «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». ВНИИА. М. 2004. С.87-88.
7. Ищенко О.В., Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Цыбин А.С., Громов Е.В., Ильинский А.В., Шиканов А.Е., Михайлов Л.В. Генерация нейтронов в малогабаритных нестационарных плазменных системах: новые подходы и возможности // Сб. Современная ядерная геофизика при поисках, разведке и разработке нефтегазовых месторождений. М. ВНИИГеосистем. 2004. С.365-376.
8. Кузнецов А.Ю., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. Модель формирования дейтронных потоков и генерации нейтронов в плазменном аксиальном диоде с инерциальным удержанием ионов // *Известия Вузов. Физика*. 2010. Т. 53. № 4. С. 50–56.
9. Кузнецов А.Ю., Козловский К.И., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. Исследование азимутально-симметричного плазменного ионного диода с осциллирующими дейтронами для генерации нейтронов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации, 2011. № 1(16). С. 105-116.
10. Е.Д.Вовченко, А.С.Цыбин, В.Л.Шатохин, А.Е.Шиканов, А.Ю.Кузнецов. Генерация нейтронов в малогабаритном плазменном диоде с осциллирующими

дейтронами // Международная научно-техническая конференция «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе». ВНИИА. М. 22-26 октября. 2012. С. 106-111.

11. Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Пономарев Д.Д., Цыбин А.С., Хасая Д.Р. Экспериментальное исследование коаксиального диода с осциллирующими дейтронами для генерации нейтронов // Атомная энергия. 2012. Т. 112. №. 4. С. 243-245.

12. Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Кузнецов А.Ю., Пономарев Д.Д., Шведова Т.А., Шиканов А.Е. Импульсный генератор нейтронов // Патент РФ № 132240. Опубликовано 10.09.2013, Бюл. № 25, 3с.

Подписано в печать 04.10.2016 г.

Формат А5

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Тираж 100 Экз. Заказ № 58000-16-КЦ

Типография ООО “МДМпринт”

(Печатный салон МДМ)

119146, г. Москва, Комсомольский пр-кт, д.28

Тел. 8-495-256-10-00