

04

Корреляция выхода нейтронов из плазменного фокуса с изменением энергии магнитного поля разрядного контура

© В.Е. Аблесимов, Ю.Н. Долин, А.Е. Калинычев, З.С. Цибилов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская обл., Россия
e-mail: ablesimov.v@gmail.com

(Поступило в Редакцию 8 ноября 2016 г.)

Для разрядной плазмодиффузионной камеры мейзеровского типа исследована связь выхода нейтронов Y с величиной изменения энергии ΔW магнитного поля разрядного контура. Интегральный выход ДД-нейтронов источника измерялся активационной методикой (активация изотопов серебра). Временная зависимость выхода нейтронов регистрировалась сцинтилляционными детекторами. Для исследованной установки обнаружена линейная связь выхода нейтронов с величиной изменения энергии ΔW магнитного поля разрядного контура в момент генерации нейтронов, а также влияние на указанную связь величины начального давления дейтерия в разрядной камере.

DOI: 10.21883/JTF.2017.10.44993.2090

Введение

Для установок плазмодиффузионного (ПФ) типа существует известная зависимость выхода нейтронов Y от тока разряда в момент пинчевания I_p : $Y \sim I_p^4$. Это соотношение позволяет сравнивать и прогнозировать характеристики различных вариантов устройств подобного типа.

Практически во всех исследованиях процессов, происходящих в разряде типа ПФ, отмечается, что выход нейтронов увеличивается с величиной скачка разрядного тока в момент пинчевания (так называемой особенности). Исследованию корреляции происходящих в плазмодиффузионной камере процессов с величиной выхода нейтронов посвящен ряд работ, выполненных в последние годы с целью более глубокого понимания механизма генерации нейтронов и поиска возможных путей увеличения их выхода [1,2]. В частности, в работе [1] показано, что существует сильная корреляция между интенсивностью пучка ионов, зарегистрированной камерой Фарадея, и скачком тока в радиальной фазе разряда.

Мы провели измерения выхода нейтронов для двух отличающихся конструкций камер при практически неизменной (с точностью 1–2%) величине тока разряда. Результаты этих измерений, изложенные в работах [3,4], обнаруживают корреляцию величины выхода нейтронов с величиной скачка разрядного тока, который в свою очередь связан с изменением магнитного поля разрядного контура.

В конечном счете, характеристики ПФ устройств (в том числе излучательные) должны определяться диссипацией магнитной энергии в процессе разряда.

Энергия магнитного поля разрядного контура связана с величиной тока соотношением

$$W(t) = 1/2 LI^2. \quad (1)$$

Напряжение между электродами камеры $U = d(LI)/dt + RI$, причем, как правило, резистивным членом можно пренебречь по сравнению с индуктивным слагаемым. Отсюда $d(LI) = U(t)dt$,

$$L(t)I(t) = \int_0^t U(t)dt.$$

Выражая отсюда $L(t)$ и подставляя в (1), получим

$$W(t) = 1/2 I(t) \int_0^t U(t)dt. \quad (2)$$

В выражение (2) входят зависимости электрических характеристик разряда от времени, измеряемые в процессе эксперимента.

Постановка измерений

В настоящей работе исследована связь выхода нейтронов Y с величиной изменения энергии ΔW магнитного поля разрядного контура. Интегральный выход ДД-нейтронов источника измерялся активационной методикой (активация изотопов серебра). Временная зависимость выхода нейтронов регистрировалась сцинтилляционными детекторами.

Камера размещалась на установке МОДУЛЬ [5]. Установка представляет собой импульсную конденсаторную батарею и состоит из двух одинаковых энергетических секций емкостью $18 \mu\text{F}$ каждая. Емкость конденсаторной батареи установки МОДУЛЬ равняется $36 \mu\text{F}$, напряжение, подаваемое на камеру, составляло 27 kV , энергозапас установки около 13 kJ .

Использовалась плазмодиффузионная разрядная камера с длинными ($l > d$) цилиндрическими коаксиальными

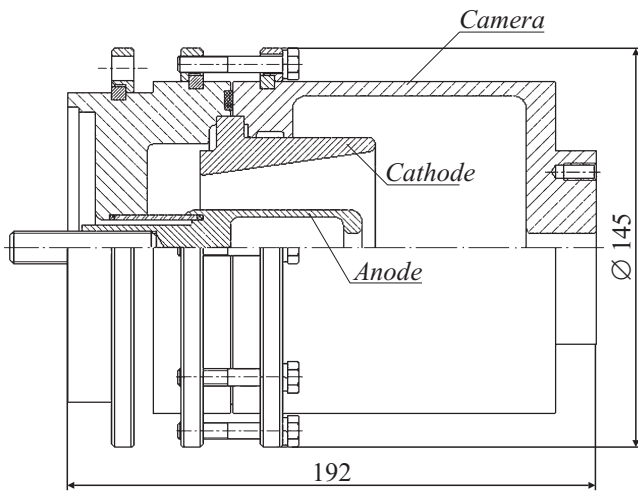


Рис. 1. Электродная система плазмодусовой камеры.

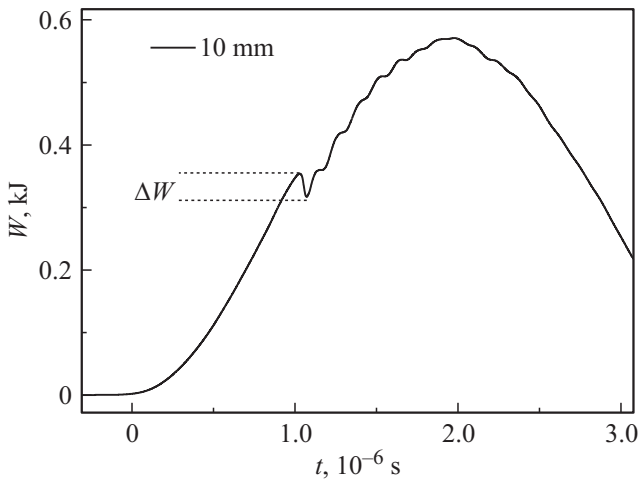


Рис. 2. Зависимость энергии магнитного поля разрядного контура от времени $P = 10^3$ Pa.

электродами, так называемая „мейзеровская“ камера [6]. Потенциальный электрод — анод, диаметром 27.5 mm. Заземленный электрод — катод состоит из двух секций: нижняя часть выполнена в виде трубы $\varnothing 75$ mm и высотой 19 mm; верхняя секция в виде расходящегося конуса с диаметром от 52 до 70 mm и высотой 63.5 mm. Торцевое окончание анода находится на расстоянии 77.5 mm от входного заземленного фланца. Анод и входной фланец разделены между собой керамическим изолятором. Диаметр изолятора 24 mm, высота 16 mm. Электродная система камеры располагается в герметичном корпусе. Конструкция камеры приведена на рис. 1. Используются неорганические вакуумные уплотнения, откачка осуществляется безмасляным турбомолекулярным насосом. С этой же камерой были проведены исследования, описанные в [3].

Напряжение на нагрузке. При помощи „пояса Роговского“ измерялся ток, проходящий через сопротивление

$R_s = 165 \Omega$, установленное параллельно нагрузке (ПФ) и индуктивности токосборника. Электрические характеристики системы измерения тока: $R_H = 2.27 \Omega$ — сопротивление нагрузки пояса; $L_H \approx 2$ nH — индуктивность нагрузки пояса; $R_B = 0.13 \Omega$ — активное сопротивление катушки; $L_B = 402 \mu$ H — индуктивность катушки. По данным с токового датчика вычисляется напряжение на нагрузке.

Измерение производной тока разряда. Измерительный „пояс“ представляет собой катушку с $N = 3$ витками из проводника диаметром 0.22 mm, намотанного на каркас из текстолита в виде тора со средним диаметром $\varnothing 124.4$ mm и квадратным сечением 3.4×3.4 mm. Электрические характеристики системы измерения тока: $R_H = 75 \Omega$ — сопротивление нагрузки пояса; $L_H \approx 2$ nH — индуктивность нагрузки пояса; $R_B = 0.2 \Omega$ — активное сопротивление катушки; $L_B = 10$ nH — индуктивность катушки. Ток разряда определялся интегрированием сигнала производной.

Результаты измерений

Нами проведено 4 серии измерений по 15–20 импульсов для 4 значений давления дейтерия, наполняющего камеру, $-(5, 10, 18, 27) \cdot 10^2$ Pa. Внутри каждой серии ток разряда остается практически неизменным.

Суммарные результаты проведенных измерений приведены в таблице.

Сводка результатов измерений

P , $\times 10^2$ Pa	Y , $\times 10^9$ n/imp	ΔY , $\times 10^9$ n/imp	I , kA	ΔI , %	ΔW , kJ
5	0.67	0.16	242	1.7	0.016
10	1.98	0.5	295	2	0.043
18	2.32	0.84	316	3	0.040
27	2.48	0.67	335	1	0.054

Примечание. Здесь P — давление дейтерия в камере, Y , ΔY — средний по серии выход нейтронов в импульсе (n/imp) и его погрешность, I , ΔI — максимальный ток в импульсе и его погрешность, ΔW — изменение энергии магнитного поля разрядного контура.

По результатам измерений были построены зависимости $W(t)$, пример обработки которых приведен на рис 2, определено значение изменения $\Delta W(t)$ для каждого импульса, которое затем поставлено в соответствии с величиной интегрального выхода нейтронов в соответствующем импульсе.

Зависимость величины интегрального выхода нейтронов Y в соответствующем импульсе от значения изменения энергии ΔW магнитного поля разрядного контура обнаруживает значимую корреляцию (рис. 3–6). С ростом давления эта корреляция несколько ослабляется.

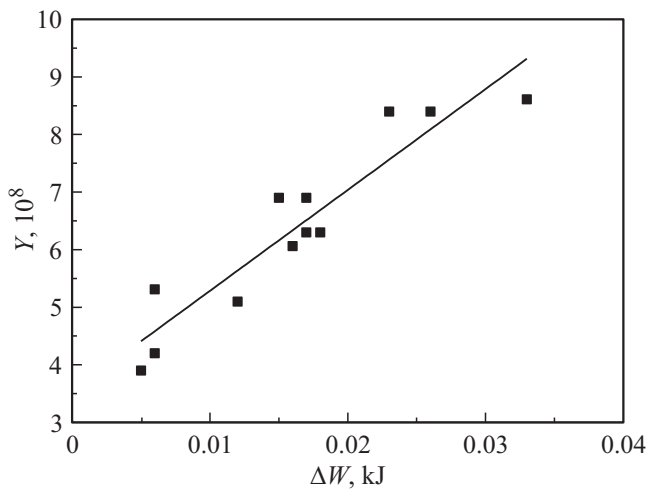


Рис. 3. Зависимость выхода нейтронов Y от изменения энергии ΔW магнитного поля, $P = 5 \cdot 10^2$ Pa, коэффициент корреляции 0.93.

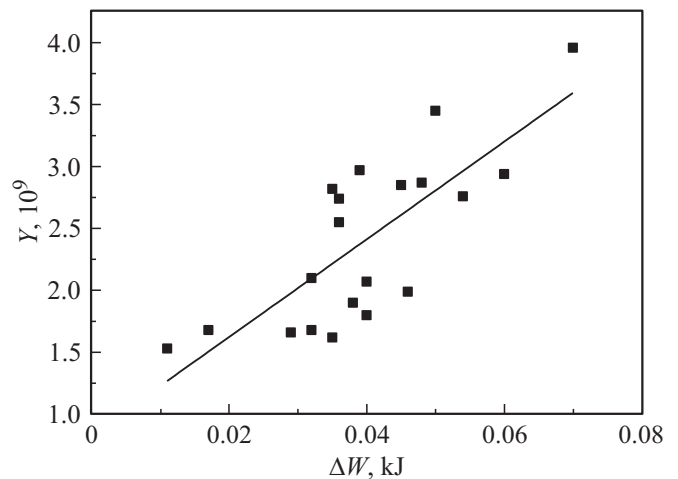


Рис. 5. Зависимость выхода нейтронов Y от изменения энергии ΔW магнитного поля, $P = 1.8 \cdot 10^3$ Pa, коэффициент корреляции 0.76.

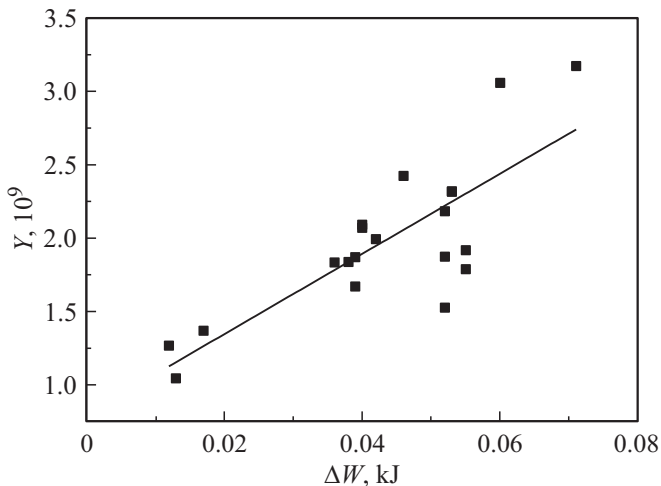


Рис. 4. Зависимость выхода нейтронов Y от изменения энергии ΔW магнитного поля, $P = 10^3$ Pa, коэффициент корреляции 0.79.

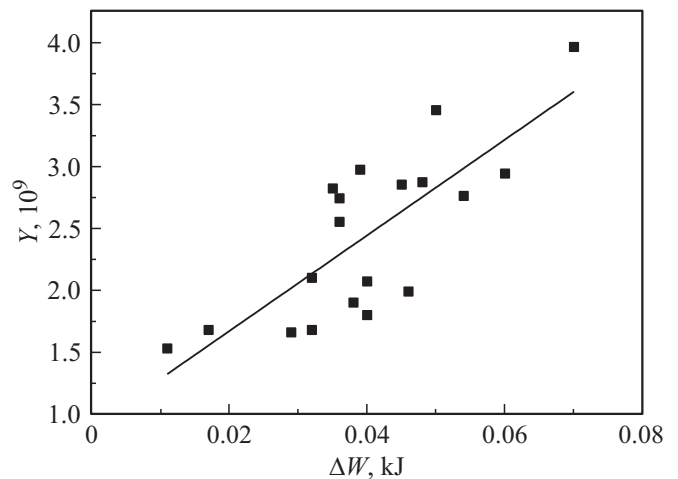


Рис. 6. Зависимость выхода нейтронов Y от изменения энергии ΔW магнитного поля, $P = 2.7 \cdot 10^3$ Pa, коэффициент корреляции 0.76.

Выводы

Результаты проведенной таким образом обработки экспериментальных данных обнаруживают значимую корреляцию выхода Y с величиной изменения магнитной энергии разрядного тока. Кроме того, обнаружено, что величина коэффициента корреляции зависит от начального давления наполняющего камеру дейтерия.

Следует отметить, что величина ΔW составляет малую часть $\sim 0.5\%$ от запасенной энергии КБ. Нейтронное излучение в приближении изотропного выхода $Y = 2.5 \cdot 10^9$ n/puls уносит энергию $\sim 10^{-3}$ J. Остальная часть переходит в энергию пучков заряженных частиц, ударной волны и в конечном счете в рассеивающуюся в пространстве тепловую энергию.

Для исследованной плазмофокусной камеры обнаружена линейная связь выхода нейтронов с величиной изменения энергии ΔW магнитного поля разрядного контура в момент генерации нейтронов, а также влияние на указанную связь величины начального давления дейтерия в разрядной камере.

Список литературы

- [1] Behbahani R.A., Aghamir F.M. // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111, P. 043304.
- [2] Veloso V., Pavez C., Moren J., Galaz V., Zambra M., Soto L. // J. Fusion Energy. 2012. Vol. 31. P. 30–37.
- [3] Аблесимов В.Е., Долин Ю.Н., Пашко О.В., Цибиков З.С. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. С. 436–439.

- [4] Аблесимов В.Е., Карпов Г.В., Цибиков З.С. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 10. С. 890–893.
- [5] Дудин В.И., Забиралов А.А., Курин С.А., Морозов И.В. // Проблемы физики высоких плотностей энергии. XII Харитоновские науч. чтения. Саров. Доклады. 2010. С. 505–510.
- [6] Mather J.W., Bottoms P.J. // Phys. Fluids. 1968. Vol. 11. N 3. P. 611–618.