

ПОДГОТОВКА ПЛАЗМОФОКУСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ К ВЗРЫВНОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ

З. С. Цибиков, В. Е. Аблесимов, А. А. Базанов, Г. В. Карнов, А. И. Краев, А. Т. Шахалкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

При запитке плазмофокусных источников нейтронов от взрывомагнитных генераторов (ВМГ) токами более одного мегаампера существует проблема обеспечения во взрывном эксперименте гарантированной величины нейтронного выхода. Часто происходит так, что плазменная камера, нормально работающая в лабораторных условиях, при той же амплитуде разрядного тока во взрывном эксперименте дает нулевой, или практически нулевой, выход нейтронов.

Это может быть связано с тем, что один и тот же разрядный ток во взрывном и лабораторном экспериментах достигается при существенно различающихся максимальных напряжениях на входе в камеру. Например, ток в камере $\sim 1,5$ МА во взрывных экспериментах обычно достигается при амплитуде входного напряжения ~ 80 кВ, тогда как в лабораторных условиях такой же ток может быть получен при напряжении зарядки конденсаторной батареи не выше 40 кВ. Повышенное напряжение во взрывных экспериментах может являться причиной вторичных пробоев внутри камеры, приводящих к срыву генерации нейтронов.

В связи с этим, для плазмофокусных экспериментов был разработан ВМГ с пониженной амплитудой и затянутой длительностью импульса выходного напряжения. Изменения амплитуды и длительности импульса напряжения можно выбирать так, чтобы при снижении амплитуды напряжения перебрасываемый в нагрузку максимальный ток оставался бы неизменным за счет соответствующего увеличения длительности. В ВМГ, состоящем из спирального генератора и секционированного взрывного размыкателя тока (ВРТ), изменение формы импульса напряжения достигается за счет разновременности срабатывания секций ВРТ.

В докладе излагаются результаты лабораторных опытов по подготовке разрядной камеры к взрывному эксперименту и получению данных, необходимых для определения параметров ВРТ.

Плазмофокусная разрядная камера

Использовалась плазмофокусная разрядная камера с длинными ($l > d$) цилиндрическими коаксиальными электродами, так называемая «мейзеров-

ская» камера [1]. Потенциальный электрод – анод, диаметром 70 мм. Заземленный электрод – катод выполнен в виде трубы с перфорационными отверстиями по всей поверхности. Внутренний диаметр катода 120 мм, длина 280 мм. Торцевые окончания анода и катода находятся в одной плоскости на расстоянии 280 мм от входного заземленного фланца. Анод и входной фланец разделены между собой керамическим изолятором. Диаметр изолятора 70 мм, высота 70 мм. Электродная система камеры располагается в герметичном корпусе. Конструкция камеры приведена на рис. 1. Используются неорганические вакуумные уплотнения, откачка осуществляется безмасляным турбомолекулярным насосом.

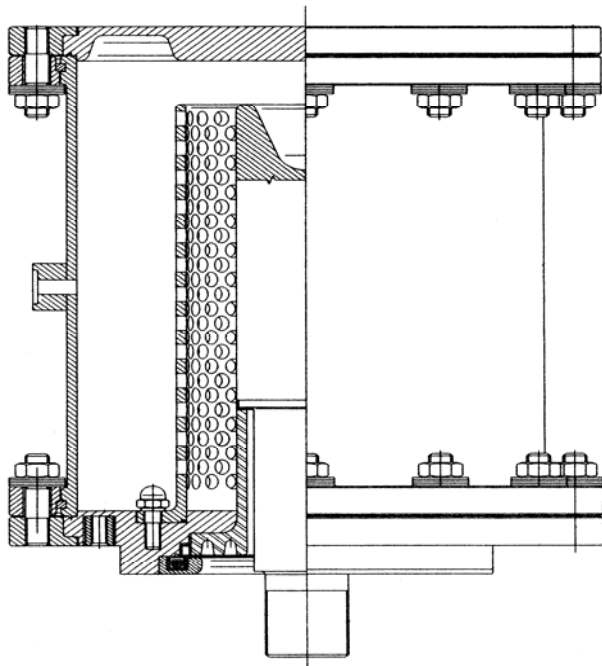


Рис. 1. Плазмофокусная разрядная камера

Целью лабораторных опытов являлось следующее: прогрев и обезгаживание рабочих поверхностей электродной системы электрическими разрядами, выявление режима стабильной работы разрядной камеры с достаточно высоким нейтронным выходом и определение закона изменения индуктивности на конденсаторной батарее при запасаемой энергии, близкой к той, которая будет во взрывном эксперименте. Лабораторные опыты проводились на установке КАСКАД, обладающей наиболее подходящими для этого параметрами.

Конденсаторная батарея – установка КАСКАД

Установка КАСКАД представляет собой импульсную конденсаторную батарею. Установка состоит из 16 одинаковых энергетических секций емкостью 41 мкФ каждая. Максимальное зарядное напряжение батареи составляет 50 кВ. Количество используемых энергетических секций может варьироваться. Соединение секций с токовым коллектором осуществляется с помощью низкоиндуктивной кабельной линии, причем подключение кабелей к коллектору выполнено так, что переключение секций не влияет на азимутальное распределение подводимого к нагрузке тока. Максимальная энергоемкость установки 820 кДж. Каждая секция коммутируется своим твердотельным разрядником. Коммутация осуществляется путем электрического пробоя сменной изоляции мощным электрическим разрядом, создаваемым для каждой секции своим блоком поджига, синхронизованным с блоками поджига остальных секций. В качестве сменной изоляции используется набор из нескольких слоев полиэтиленовой пленки. Суммарная толщина изоляции варьируется в зависимости от зарядного напряжения батареи. Для зарядного напряжения 46–50 кВ толщина сменной изоляции составляет 750–900 мкм.

На рис. 2 представлена эквивалентная электрическая схема установки КАСКАД. Используются следующие обозначения параметров и их номинальные значения.

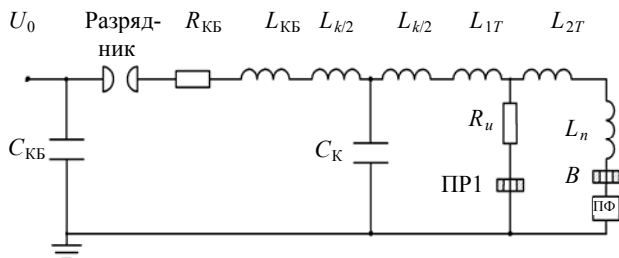


Рис. 2. Электрическая схема установки КАСКАД

Где C_{KB} – емкость конденсаторной батареи, $C_{KB} = nC_S$, где n – количество используемых секций, $C_S = 41$ мкФ – емкость одной секции; U_0 – зарядное напряжение, разрядник – коммутирующие разрядники; R_{KB} – омическое сопротивление конденсаторной батареи, $R_{KB} = R_S / n$, где $R_S = 30$ МОм – омическое сопротивление разрядной цепи одной секции; $L_{KB} = 32/n$, нГн, – индуктивность конденсаторной батареи, состоящая из индуктивностей конденсаторов, разрядников и соединительных шин между конденсаторами и разрядниками; $L_K = 30/n$, нГн, – индуктивность кабельной передающей линии между разрядниками и токовым коллектором; $C_K = 1,7$ мкФ – емкость кабельной передающей линии. C_K является постоянной величиной, независимо от числа n используемых секций, поскольку при переключении секций неиспользуемые кабели от токового коллектора не отсоединяются.

Индуктивность токового коллектора составляет 9,2 нГн и складывается из $L_{1T} = 5,2$ нГн и $L_{2T} = 4$ нГн. Деление индуктивности коллектора на две части необходимо для вычисления напряжения на входе в нагрузку. На рис. 2 показана также индуктивность L_n , обозначающая индуктивность узла соединения нагрузки с токовым коллектором. Для различных нагрузок эта индуктивность может быть разной, в условиях данного эксперимента $L_n = 13$ нГн.

Измерения

Плазмодиффузионную разрядную камеру можно рассматривать как элемент электротехнического контура, обладающий некоторой индуктивностью и нулевым омическим сопротивлением. Индуктивность камеры $L(t) = \Phi(t) / I(t)$ изменяется во времени из-за того, что токовая плазменная оболочка в процессе разряда движется под действием пондеромоторных сил, создаваемых разрядным током. В результате электротехнический расчет работы токового генератора на плазмодиффузионную нагрузку должен быть самосогласованным, поскольку изменяющаяся в процессе разряда индуктивность $L(t)$ зависит от протекающего тока и сама, в свою очередь, влияет на ток. Это затрудняет возможность точного расчета работы ВРТ на плазмодиффузионную камеру для взрывного эксперимента. Приближенный расчет можно провести, используя результаты экспериментов на конденсаторной батарее при условии, что амплитуда и временные параметры токового импульса в лабораторных условиях будут примерно теми же, что и во взрывном эксперименте.

Для этого в лабораторных условиях измерялись ток $I(t)$ и напряжение $U(t)$ на разрядной камере, определялась зависимость от времени индуктивности $L(t) = I^{-1} \int U dt$, которая закладывалась затем в расчеты ВРТ для предстоящих взрывных экспериментов. Ток в камере измерялся с помощью 6 одинаковых индукционных датчиков – катушек из нескольких витков, расположенных равномерно по азимуту на расстоянии 65 мм от оси камеры. Площадь витка – 30,25 мм²; количество витков в катушке – 2. Расчетная чувствительность датчика – $5,28 \cdot 10^{10}$ (А/с)/В. Регистрируемые сигналы пропорциональны производной тока в камере, поэтому вычисления тока проводились путем интегрирования сигналов индукционных датчиков. На рис. 3 представлены полученные таким образом зависимости разрядного тока и его производной от времени.

Напряжение на входе в камеру определялось по сигналу с пояса Роговского ПР₁, измеряющего ток в активном сопротивлении $R_U = 330$ Ом, рис. 2. При этом учитывалось падение напряжения на индуктивности L_{2T} токового коллектора установки КАСКАД. Осциллограмма напряжения на входе в разрядную камеру представлена на рис. 4. Напряжение имеет колебательный характер, что связано с электриче-

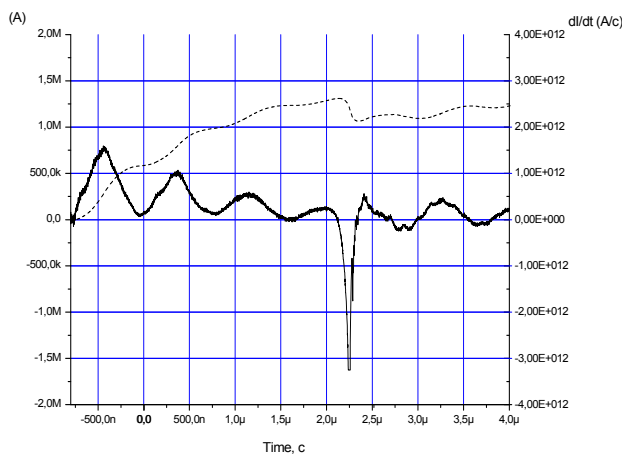


Рис. 3. Осциллограмма тока (пунктирная линия) и ее производной

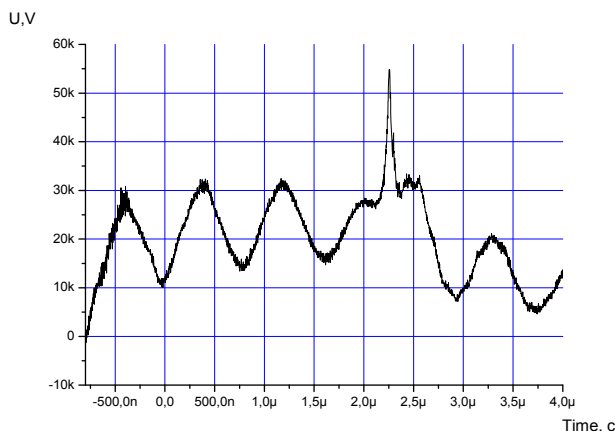


Рис. 4. Напряжение на входе в камеру

скими колебаниями передающей кабельной линии. При нормальной работе камеры, когда происходит схлопывание плазменной оболочки вблизи торца анода, на кривой напряжения происходит резкий всплеск, на осциллограммах индукционных датчиков наблюдается резкий провал, совпадающий по времени с всплеском напряжения. Этому моменту времени соответствует начало генерирования в камере нейтронного и рентгеновского излучений.

Для регистрации импульса проникающих излучений использовались сцинтилляционные детекторы типа ССДИ-8 [2], состоящие из пластмассовых сцинтилляторов и фотоэлектронных умножителей типа СНФТ. Располагая сцинтилляционный детектор на достаточном удалении от разрядной камеры, можно получить разделение по времени рентгеновского и нейтронного импульсов. В описываемых экспериментах пролетная база составляла 5,5 метра, в результате рентгеновский сигнал опережал нейтронный на ~ 236 нс. Характерная осциллограмма двойного импульса сцинтилляционного детектора приведена на рис. 5. Зная чувствительность детектора, по кривой нейтронного импульса можно вычислить интегральный нейтронный выход, предполагая изотропность генерируемого излучения.

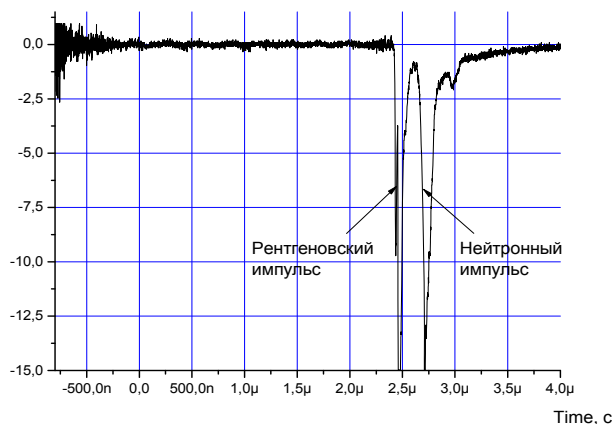


Рис. 5. Сигнал сцинтилляционного детектора

Для измерения интегрального нейтронного выхода использовались также и активационные методики [3] – методика активации серебра и методика активации индия. Данные по нейтронному выходу, полученные всеми тремя способами, удовлетворительно согласуются друг с другом. Максимальная погрешность измерения нейтронного выхода оценивается в 20 %.

Результаты

В результате экспериментов на установке КАСКАД были отработаны режимы «тренировки» разрядной камеры и вывода на предельные выходные параметры. В первых импульсах после монтажа камеры на токовом коллекторе начальное давление дейтерия в камере составляло 1–2 торр, зарядное напряжение 40 кВ при емкости конденсаторной батареи 82 мкФ. При этих условиях достаточно было 2–3 импульсов до появления устойчивого нейтронного выхода. Далее начальная энергетика наращивалась до 270 кДж за счет увеличения числа используемых секций батареи. Зарядное напряжение варьировалось от 40 до 45 кВ при давлении рабочего газа в камере от 5 до 12 торр.

Наиболее стабильный режим работы устройства наблюдался в серии импульсов при давлении дейтерия 7 торр, суммарной емкости секций конденсаторной батареи 164 мкФ; зарядном напряжении 40 кВ. Разброс по величине нейтронного выхода в серии не превысил 10 %. Максимальный зарегистрированный нейтронный выход составил $1,12 \cdot 10^{11}$ н/имп при амплитуде разрядного тока 1,3 МА. Стабильность нейтронного выхода, оцениваемая по всем результатам опытов на конденсаторной батарее, оказалась не хуже 30 %.

По сигналам датчиков тока и напряжения определялись не только режимы нормальной работы камеры, но и вычислялось изменение индуктивности в камере $L(t)$, рис. 6. Показано, что зависимость индуктивности от времени близка к линейной, причем скорость увеличения индуктивности во времени в различных разрядах остается практически неизменной, рис. 7. Полученная таким образом зависимость $L(t)$ использовалась при расчете параметров ВРТ для взрывного эксперимента.

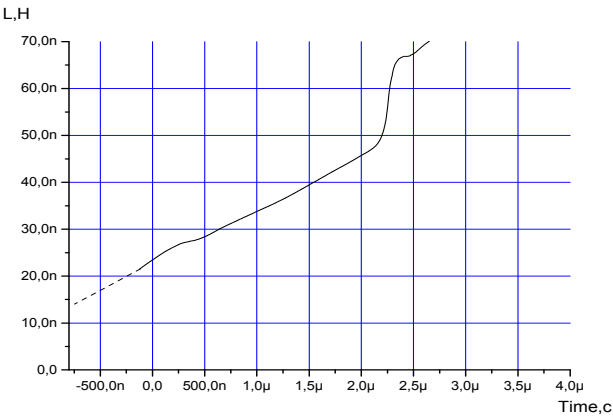


Рис. 6. Изменяющаяся в процессе разряда индуктивность камеры $L(t)$

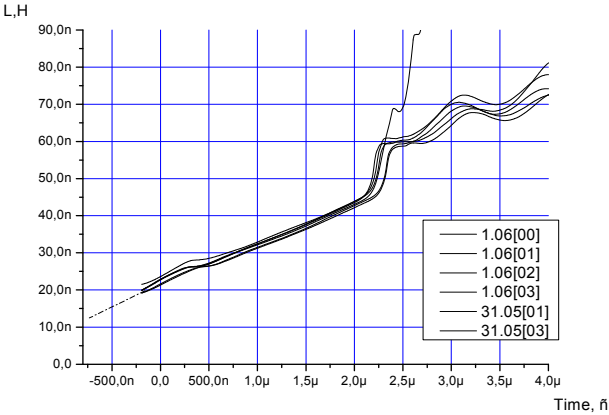


Рис. 7. Индуктивность камеры $L(t)$ в 6 экспериментах

Закключение

1. Используя мощную конденсаторную батарею – установку КАСКАД, отработан режим «тренировки» разрядной камеры и вывод ее на предельные выходные параметры при тех же уровнях энергетики и разрядного тока, что и в предстоящем взрывном эксперименте.
2. В камере с дейтериевым наполнением получен устойчивый выход ДД-нейтронов $\sim 5 \cdot 10^{10}$ н/имп при максимальных разрядных токах около 1,15 МА. Максимальный зарегистрированный нейтронный выход составил $1,12 \cdot 10^{11}$ н/имп при амплитуде разрядного тока 1,3 МА.
3. На установке КАСКАД определена зависимость индуктивности разрядной камеры от времени, которая использовалась для расчета конструкции взрывного размыкателя тока, способного обеспечить в предстоящем взрывном эксперименте заданную форму импульса напряжения на входе плазмфокус-ной камеры.

Литература

1. Mather J. W., Bottoms P. J. // Phys. Fluids. 1968. Vol. 11, N 3. P. 611–618.
2. Веретенников А. И., Даниленко К. Н. Средства диагностики однократного импульсного излучения. М.: 1999.
3. Власов Н. А. Нейтроны. М.: 1955.