

# РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТАБЕЛЬНОГО ПЛАЗМОФОКУСНОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА, ЗАПИТЫВАЕМОГО ОТ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА

*В. Е. Аблесимов, А. В. Андрианов, А. А. Базанов, А. М. Глыбин, Ю. Н. Долин, И. Ю. Дроздов, Ю. М. Дроздов, П. В. Дудай, А. А. Зименков, В. А. Иванов, А. В. Ивановский, А. Е. Калинычев, Г. В. Карпов, А. И. Краев, С. С. Ломтев, В. Н. Нудиков, С. В. Пак, Н. И. Поздов, С. М. Полюшко, А. Ф. Рыбаков, А. Н. Скобелев, А. Н. Туров, А. Ю. Февралев*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Описывается подготовка эксперимента с плазмофокусным нейтронным источником, запитываемым от взрывомагнитного генератора. На начальном этапе проводится лабораторная отработка устойчивой работы плазмофокусной разрядной камеры. Затем, используя экспериментально измеренную зависимость индуктивности камеры от времени, проводится отработка взрывомагнитного источника энергии, способного обеспечить во взрывном эксперименте тот же темп ввода энергии в камеру, что и в лабораторных условиях на конденсаторной батарее. И, наконец, на заключительном этапе осуществляются подготовка и проведение взрывного эксперимента. В статье приведены результаты лабораторных и взрывного экспериментов с плазмофокусной разрядной камерой мейзеровского типа при амплитуде разрядного тока на уровне 1,3... 1,4 МА. В лабораторных экспериментах выход ДД-нейтронов достигал 1011 нейтронов за импульс. Во взрывном эксперименте при наполнении камеры дейтерий-третиевой газовой смесью интегральный выход ДТ-нейтронов с энергией 14 МэВ превысил 1012 нейтронов.

## 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. Так, например, максимум тока в камере во взрывном эксперименте может достигаться за микросекунду, тогда как в лабораторных условиях такой же ток достигается за несколько микросекунд при соответственно меньшем напряжении на входе в камеру. Сравнительно высокое напряжение во взрывных экспериментах может быть причиной вторичных пробоев внутри камеры, приводящих к срыву генерации нейтронов. В связи с этим, для плазмофокусных экспериментов был разработан ВМГ с регулируемой амплитудой и длительностью

импульса генерируемого выходного напряжения. Амплитуду и длительность 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 одновременности срабатывания секций ВРТ. Плазмофокусная разрядная камера представляет собой нагрузку с переменной индуктивностью  $L(t)$ , причем закон изменения индуктивности от времени зависит от тока в камере. Выбор оптимальной одновременности срабатывания секций ВРТ представляет собой самосогласованную задачу. Решать её предполагается экспериментально несколькими итерациями, последовательно приближаясь к оптимальному варианту. В качестве исходных используются данные, полученные при запитке плазмофокусной камеры от конденсаторной батареи. По этим данным определяется зависимость  $L(t)$ , которая затем используется в расчетах по выбору одновременности срабатывания секций ВРТ. Амплитуда тока от конденсаторной батареи обеспечивается

примерно равной предполагаемому максимальному току в камере в предстоящем взрывном эксперименте. В статье представлены основные результаты, полученные в лабораторных условиях, а также результаты взрывного эксперимента при запитке плазмофокусной разрядной камеры от ВМГ.

### 1. Лабораторная техника эксперимента

Использовалась «мейзеровская» камера [1] с длинными ( $l > d$ ) цилиндрическими коаксиальными электродами. Потенциальный электрод – анод, диаметром 70 мм. Заземленный электрод – катод выполнен в виде трубы с перфорационными отверстиями по всей длине. Внутренний диаметр

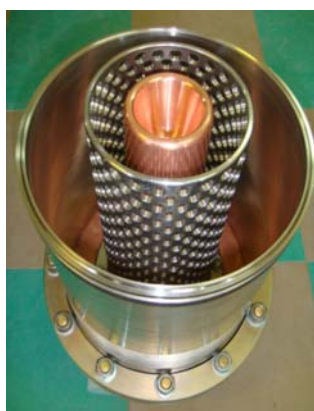


Рис. 1 Фотография электродной системы камеры

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. Фо-

тография электродной системы приведена на рис. 1.

Используются неорганические вакуумные уплотнения, откачка осуществляется безмасляным турбомолекулярным насосом. Эксперименты проводились на установке КАСКАД представляющей собой мощную 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 отдельным твердотельным разрядником. Коммутация осуществляется путем электрического пробоя сменного изолятора мощным электрическим разрядом, создаваемым для каждой секции своим блоком поджига, синхронизованным с блоками поджига остальных секций. В качестве сменной изоляции используется набор из несколько 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:

$C_{KB}$  – емкость конденсаторной батареи,  $C_{KB} = n \cdot C_S$ , где  $n$  – количество используемых секций,  $C_S = 41$  мкФ – емкость одной секции;

$U_0$  – зарядное напряжение, P – коммутирующие разрядники;

$R_{KB}$  – омическое сопротивление конденсаторной батареи,  $R_{KB} = R_S/n$ , где  $R_S = 30$  мОм –

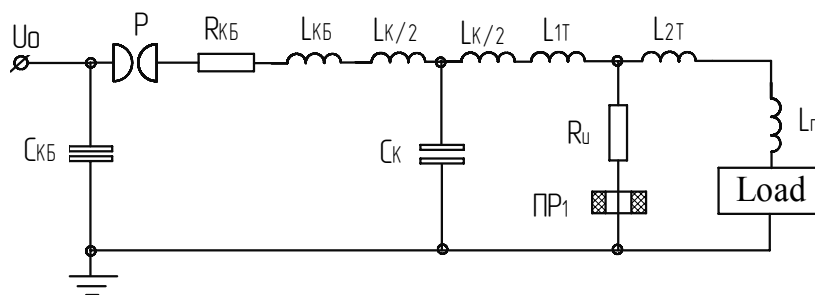


Рис. 2. Электрическая схема установки КАСКАД.

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  $L_{IT} = 5,2$  нГн и  $L_{2T} = 4$  нГн. Деление индуктивности коллектора на две части необходимо для вычисления напряжения на входе в нагрузку. Данные по напряжению определяются по показаниям датчика напряжения, состоящего из активного сопротивления  $R_U = 330$  Ом и пояса Роговского ПР<sub>1</sub>, измеряющего ток в активном сопротивлении. На рис. 3 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.

## 2. Результаты лабораторных экспериментов

Целью экспериментов на конденсаторной батарее, помимо прогрева и обезгаживания рабочих поверхностей электродной системы электрическими разрядами, было выявление режима стабильной работы разрядной камеры с достаточно высоким нейтронным выходом и определение закона изменения  $L(t)$  в этом режиме. В качестве рабочего газа использовался дейтерий. При переходе к дейтерий-тритиевой газовой смеси выход нейтронов при тех же разрядных токах обычно возрастает примерно на два порядка. Также как и во взрывном эксперименте, в опытах на конденсаторной батарее для измерения тока в камере используются индукционные датчики. Напряжение на входе в камеру определялось по показаниям датчика напряжения, приведенного на рис. 2. Параметры генерируемого излучения измерялись с использованием сцинтилляторов [2], интегральный выход нейтронов определялся с помощью активационных методик. Использовалась методика активации серебра и методика активации индия. Результаты по второй активационной методике представляются более достоверными, поскольку полученные по ней данные в меньшей степени подвержены влиянию рассеянных нейтронов. На рис. 3 представлены кривая тока  $I(t)$  и осциллограмма

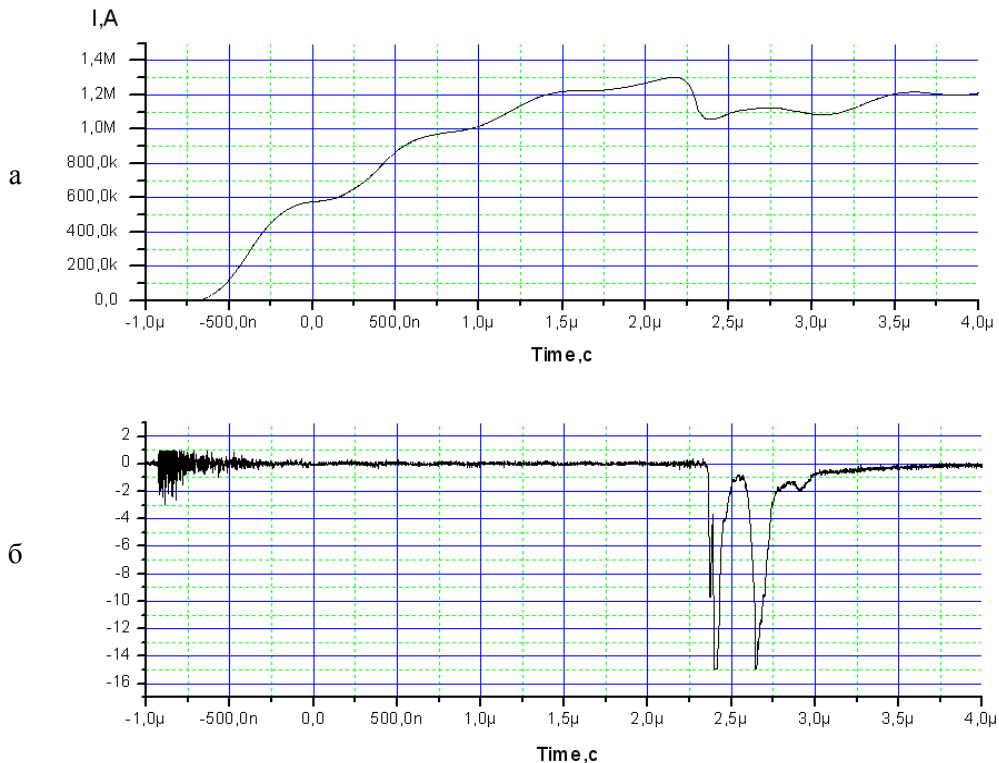


Рис. 3. Кривая тока (а) и осциллограмма сигнала сцинтилляционного детектора (б)

грамма сигнала сцинтилляционного детектора, полученные в одном из электрических разрядов.

Сцинтилляционный детектор находится на расстоянии 5,5 метров от предполагаемого места генерирования нейтронов. Кривая тока  $I(t)$  получена путем интегрирования сигнала одного из индукционных датчиков. Исходное давление дейтерия в разрядной камере 10 Тор. Задействованы пять секций конденсаторной батареи, заряжаемых до напряжения 44 кВ. Разрядный ток достигает максимальной величины 1,3 МА примерно через три микросекунды после срабатывания разрядников. На кривой тока наблюдается особенность - характерный излом в виде резкого уменьшения тока. В момент токовой особенности наблюдается нейтронное и рентгеновское излучения, регистрируемые сцинтилляционным детектором. За счет пролетной базы 5,5 метров нейтронный и рентгеновский импульсы на осциллограмме сдвинуты относительно друг друга на 236 нс. Данные по выходу нейтронов, полученные по методике активации индия и по нейтронному импульсу сцинтилляционного детектора, между собою примерно совпадают. Выход нейтронов, соответствующий приведенным осциллограммам, составляет  $1,1 \cdot 10^{11}$  н/имп. Погрешность измерения нейтрон-

ного выхода не превышает 20 %. Стабильность нейтронного выхода, оцениваемая по активационным методикам, в этом режиме работы устройства оказалась не хуже 10 %. Добиваться лучшей стабильности вряд ли имеет смысл, поэтому принято решение вести подготовку взрывного эксперимента исходя из данных, полученных в этом режиме работы плазмфокусной камеры. На рис. 4 приведены кривая напряжения  $U(t)$  на входе в камеру и кривая индуктивности камеры  $L(t)$ , вычисляемая по формуле  $L(t) = I^{-1} \cdot \int U dt$ .

Волнообразная форма входного напряжения объясняется возникновением токовых колебаний в передающей кабельной линии, емкость которой довольно велика, поскольку при переключении секций неиспользуемые кабели от токового коллектора не отсоединяются. Максимальное напряжение на входе в плазмфокусную камеру составляет 30 кВ и эта величина является определяющей при определении параметров ВРТ для взрывного эксперимента. Кроме того, существенным также является закон изменения индуктивности плазмфокусной камеры во времени. Из рис. 4, кривая (б), видно, что при расчете параметров ВРТ закон изменения  $L(t)$  с довольно хорошей степенью

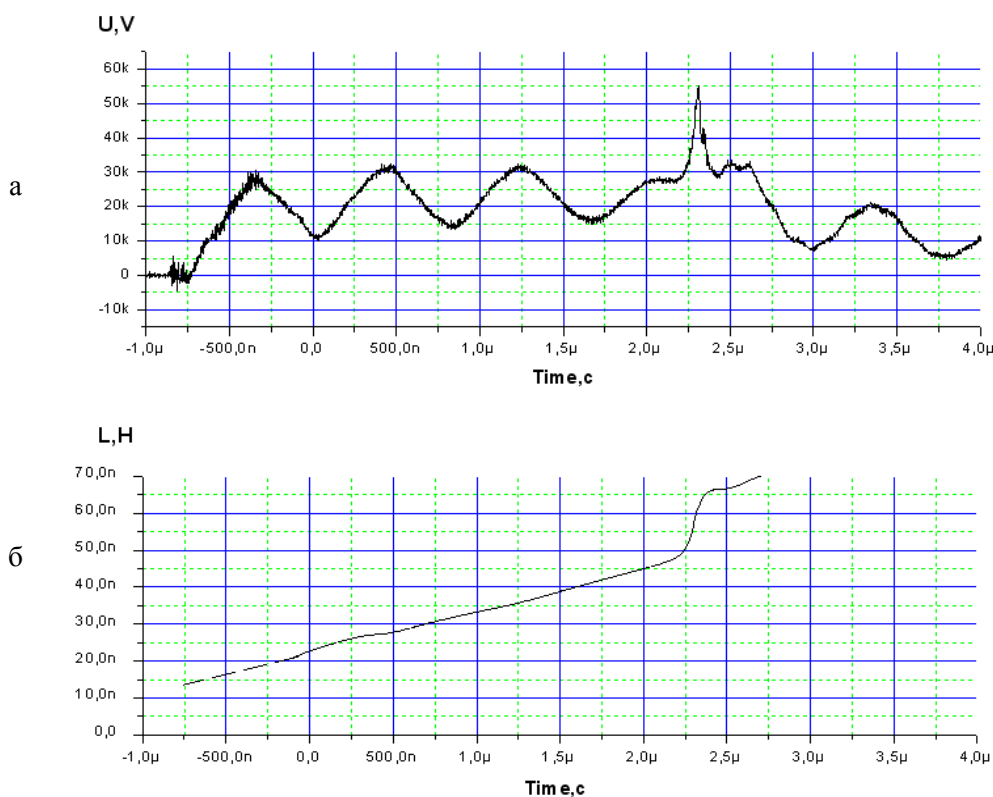


Рис. 4. Напряжение на входе в камеру (а) и индуктивность камеры (б).

точности можно аппроксимировать линейной зависимостью от времени.

### 3. Разработка взрывного генератора тока.

При разработке взрывного генератора тока ставилась задача обеспечить ту же амплитуду разрядного тока, что и в экспериментах на конденсаторной батарее. При этом максимум напряжения на входе в камеру не должен превысить соответствующего максимума, достигаемого в лабораторных условиях. Идеальным вариантом выполнения поставленных требований было бы формирование на входе в камеру импульса напряжения прямоугольной формы. Желательно чтобы напряжение оставалось на одном уровне вплоть до момента выхода плазменной оболочки на торец анода. Согласно данным лабораторных экспериментов, длительность процесса до схлопывания оболочки составляет около 3 мкс. Такие времена формирования тока в нагрузке характерны для источников на базе спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ) с взрывными размыкателями тока (ВРТ), однако форма, генерируемых ими импульсов на-

пряжений, далека от прямоугольника. В связи с этим был разработан на базе существующего ВРТ [2], так называемый, секционированный размыкатель тока. По существу, он представляет собой набор последовательно соединенных размыкателей, – секций с программируемыми моментами срабатываний. За счет варьирования моментов срабатывания секций можно менять форму импульса напряжения на нагрузке во временном интервале длительностей импульса от 1 до 5 мкс. Эквивалентная электрическая схема секционированного размыкателя приведена на рис. 5. Конструктивное исполнение секционированного ВРТ показано на рис. 6.

Варьирование моментов срабатывания секций ВРТ достигается за счет одновременности удара центрального токопровода 1, разлетающегося под действием заряда ВВ 2, по струеформирователю 3, внутренний диаметр которого выбирается для разных секций разным. Если обозначить через  $h$  различие внутренних радиусов струеформирователей соседних секций, разновременность  $\Delta t$  срабатывания соседних секций можно оценить по формуле,

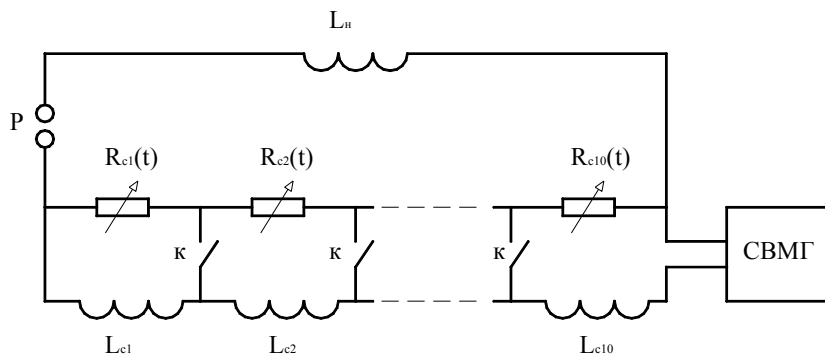


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема секционированного ВРТ.

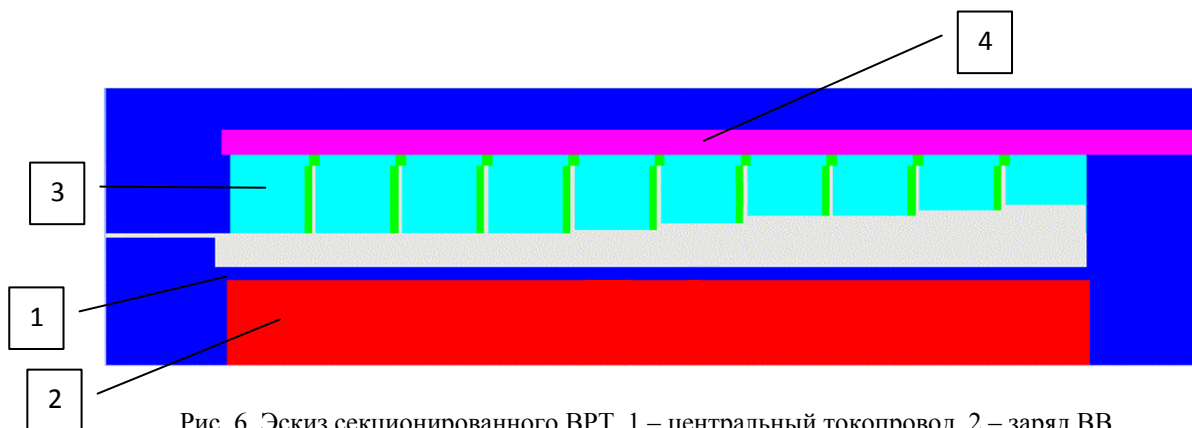


Рис. 6. Эскиз секционированного ВРТ. 1 – центральный токопровод, 2 – заряд ВВ, 3 – струеформирователь, 4 – разрываемая фольга

$$\Delta t = h \cdot (V_{у.в.} - V_{тр.}) \cdot (V_{у.в.} \cdot V_{тр.})^{-1} = K \cdot h .$$

Здесь  $V_{тр.}$  – скорость движения внутреннего цилиндрического токопровода, ускоряемого продуктами ВВ,  $V_{у.в.}$  – скорость ударной волны (УВ) в материале струеформирователя. Подставляя значения обычно получаемой скорости внутреннего токопровода  $V_{тр.} \approx 2,4$  мм/мкс. и скорости ударной волны в полиэтилене  $V_{у.в.} \approx 6$  мм/мкс., находим  $K = 0,25$  мкс/мм. Отсюда следует, что, например, для обеспечения разновременности срабатывания соседних секций  $\Delta t = 0,25$  мкс необходимо выбрать величину ступеньки  $h = 1$  мм. Для более точного расчета выхода ударной волны на внешнюю поверхность струеформирователя (начала разрыва фольги) в каждой секции проводились двумерные газодинамические расчеты. Постановка газодинамической задачи, динамика внутреннего токопровода и движение ударной волны в некоторый момент времени проиллюстрированы на рис. 7.

Расчеты показывают, что фронт ударной волны движется по струеформирователю в каждой секции с некоторой задержкой по времени. Для предотвращения взаимного влияния соседних сек-

ций в конструкции между ними предусмотрен воздушный зазор. В результате газодинамических расчетов получена, представленная на рис. 8, зависимость от аксиальной координаты момента выхода ударной волны на внешнюю поверхность струеформирователя. В районе торцевых фланцев наблюдается более ранний выход ударной волны на внешнюю поверхность струеформирователя, что связано с более быстрым распространением ударной волны по торцевым фланцам. Если не принимать во внимание эти участки, запаздывание выхода ударной волны на правом крае ВРТ относительно левого составляет около 2 микросекунд. Используя расчетную зависимость  $t_{у.в.}(z)$ , усреднив её по участкам длиной 33 мм (аксиальный размер одной секции), можно определить задержку срабатывания секций относительно друг друга, а также зависимость  $t_{у.в.}$  от внутреннего радиуса струеформирователя. Найденные зависимости использовались в последующих электротехнических расчетах. При расчетах секционированного ВРТ для эксперимента с плазмодиффузионной камерой использовалась представленная на рис. 5(б) зависимость её индуктивности от времени, полученная на конденсаторной батарее. Перед взрывным плазменным экспериментом было проведено не-

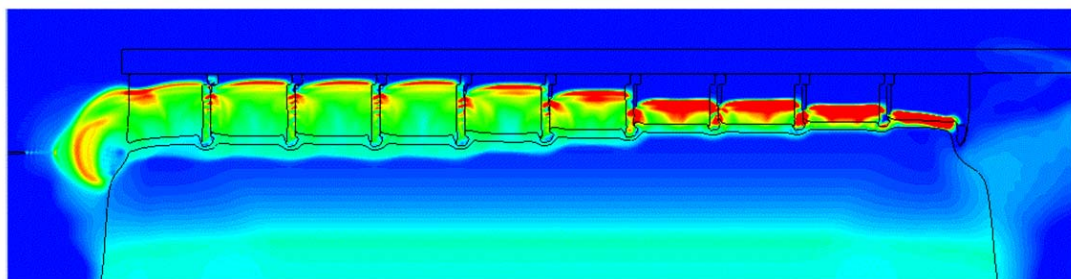


Рис. 7. Результат расчета динамики внутреннего токопровода и движения ударной волны

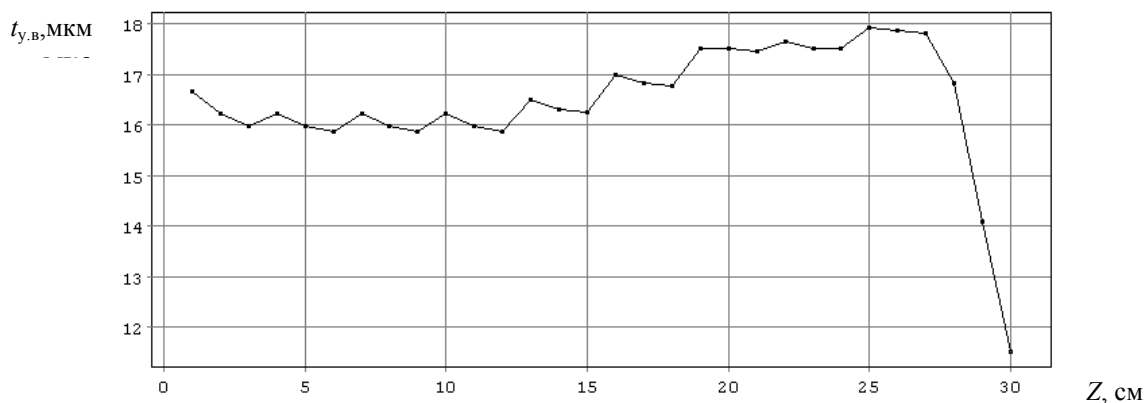


Рис. 8 Зависимость от координаты z момента выхода ударной волны на внешнюю поверхность струеформирователя

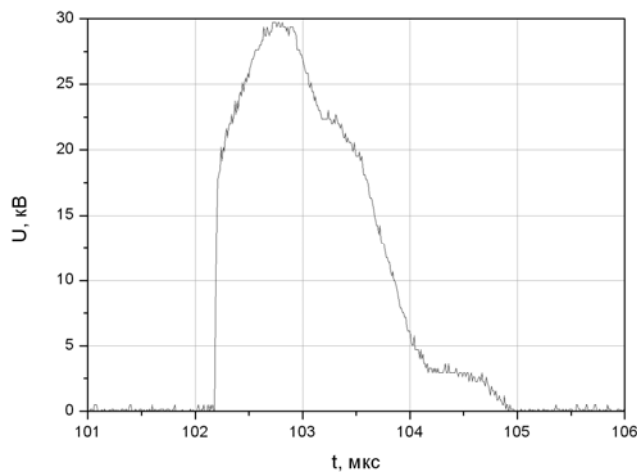


Рис. 9. Напряжение на входе в нагрузку

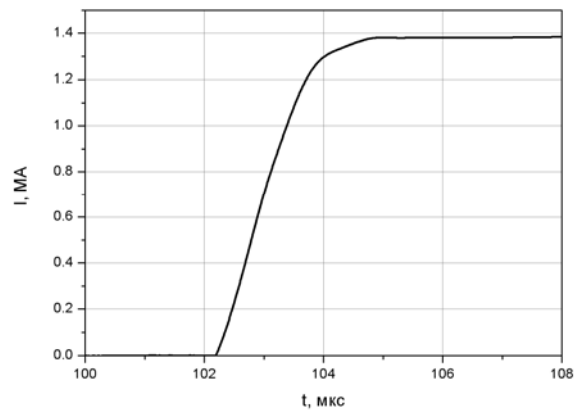


Рис. 10. Ток нагрузки

сколько предварительных взрывных экспериментов с жесткой нагрузкой. На рис. 9 и 10 представлены результаты одного из таких экспериментов.

В качестве жесткой нагрузки использовалась индуктивность 30 нГн. Основной целью предварительных экспериментов являлось тестирование расчетов в условиях близких к тем, которые должны реализоваться во взрывном эксперименте с плазмофокусной разрядной камерой: максимальный ток  $\sim 1,4$  МА, достигаемый за  $2\div 3$  мкс, максимальное напряжение на нагрузке не превышает 30 кВ.

#### 4. Результаты взрывного эксперимента

Во взрывном эксперименте рабочим газом в плазмофокусной разрядной камере была равнокомпонентная дейтерий-третиевая смесь при суммарном давлении около 8 Тор. В качестве генератора тока использовался спиральный ВМГ диаметром 200 мм с секционированным ВРТ. Общее количество секций ВРТ равно 10. Подключение анода камеры к потенциальному электроду ВРТ в момент его срабатывания осуществлялось через неуправляемый твердотельный разрядник, выполненный в виде лавсановой пленки толщиной 50 мкм. В эксперименте измерялись все электрические характеристики, необходимые для получения полной картины срабатывания спирального генератора и секционированного ВРТ. Для измерения тока в плазмофокусной камере использовались индукционные датчики, располагаемые азимутально симметрично на входе в камеру. Измерения параметров проникающих излучений проводились с помощью трех сцинтилляционных детекторов типа ССДИ-8 [3], интегральный выход нейтронов измерялся также с использованием на-

бора активационных детекторов из алюминия, меди, молибдена, индия, тефлона и цинка. Активационные детекторы, выполненные в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 1 мм, размещались внутри кадмиевого чехла и крепились в торцевой части на корпусе плазмофокусной камеры. После опыта активационные детекторы извлекались из кадмиевого чехла, после чего для каждой рабочей реакции определялись активационные интегралы. Вычисление выхода нейтронов из источника основывалось на расчете значений активационного интеграла для каждой рабочей реакции с нормировкой на 1 нейтрон источника. Расчет проводился по методу Монте-Карло, причем в расчетной модели учитывались влияния конструктивных элементов взрывомагнитного генератора, плазмофокусной камеры, самих активационных детекторов в кадмиевом чехле и грунтовой площадки под камерой. Источник нейтронов в расчетах задавался точечным и изотропным. Энергетический спектр нейтронов в расчете принимался в соответствии с данными работ [4], [5]. Сцинтилляционные детекторы ССДИ-8 располагались под углом  $20^\circ$  к оси экспериментальной сборки на расстоянии 58,33 м от источника. Детекторы имели три разных порога чувствительности для измерений до  $10^{11}$ , до  $10^{12}$  и до  $10^{13}$  н/имп. На рис. 11 представлены осциллограммы сцинтилляционных детекторов D2 и D3 с чувствительностью соответственно до  $10^{12}$  и до  $10^{13}$  н/имп. Согласно зарегистрированным сигналам, времяпролетный интервал между рентгеновским и нейтронным импульсами составил  $939\pm 6$  нс, что соответствует энергии нейтронов  $14,16\pm 0,15$  МэВ.

Длительность нейтронного импульса на полувысоте  $\sim 185$  нс. Для сравнения, длительность импульса ДД – нейтронов в лабораторных экс-

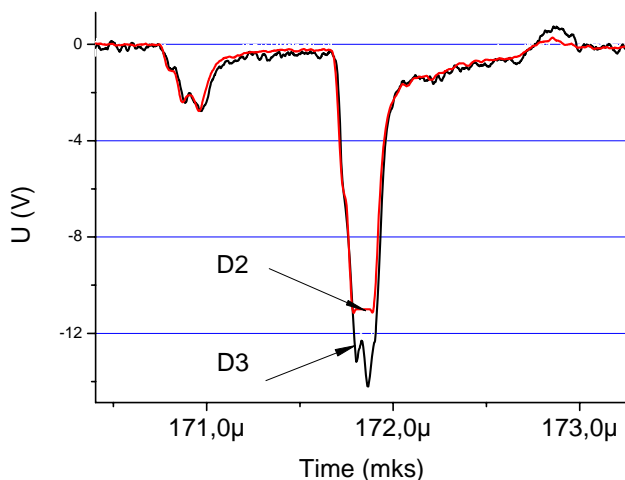


Рис. 11. Оциллограммы сцинтилляционных детекторов

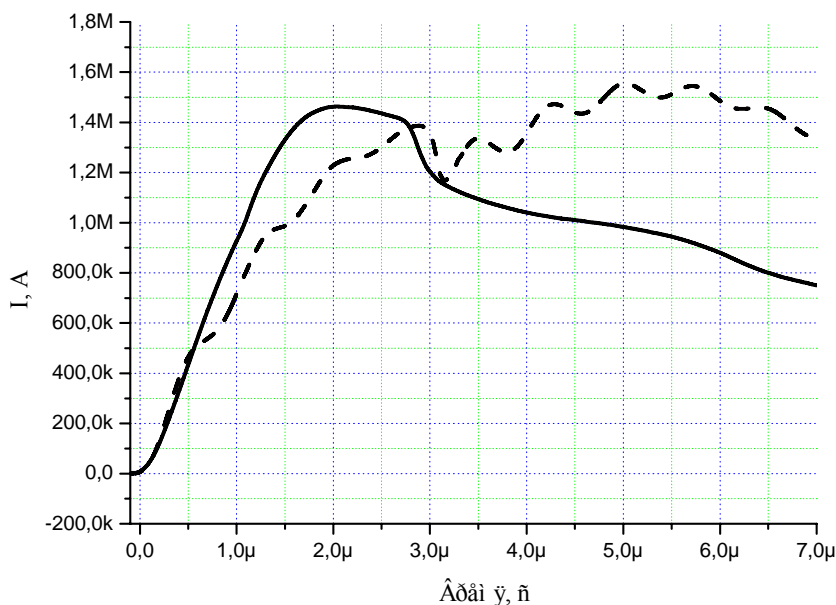


Рис. 12. Кривые тока во взрывном (сплошная линия) и в лабораторном (пунктирная линия) опытах

периментах была около  $110 \div 130$  нс. Рассчитанный по сигналам сцинтилляционных датчиков интегральный выход нейтронов составил  $1,42 \cdot 10^{12}$  н/имп. Погрешность измерения нейтронного выхода по времяпролетной методике составляет около 13%. По данным активационных измерений интегральный выход нейтронов несколько выше и оценивается в  $1,79 \cdot 10^{12}$  н/имп. Среднее квадратическое отклонение по выборке активационных детекторов равно 2,8%. Согласно этим же измерениям, флюенс нейтронов с энергиями в интервале  $0,3 \div 15$  МэВ в области расположения датчиков со-

ставляет  $3,74 \cdot 10^8$  н/см<sup>2</sup>. Средняя энергия нейтронов в указанном диапазоне спектра равна 9,7 МэВ. Выход нейтронов, полученный во взрывном эксперименте, примерно на порядок меньше ожидаемого. Наиболее вероятной причиной этого могут быть шунтирующие пробой в плазмодиффузионной камере. Это могло произойти вследствие того, что напряжение на входе в камеру во взрывном опыте оказалось несколько выше, чем в лабораторных экспериментах на конденсаторной батарее. О превышении напряжения можно судить по приведенным на рис. 12 токовым кривым, полученным во



взрывном и лабораторном опытах. Скорости нарастания токов совпадают только на начальных участках токовых кривых. Далее, токовая кривая соответствующая лабораторному опыту имеет заметно меньший наклон, чем токовая кривая взрывного опыта.

Ток во взрывном опыте достиг максимума 1,46 МА через 2,04 мкс после начала разряда. Судя по осциллограмме, схлопывание оболочки на торце анода начинается спустя 2,74 мкс после начала разряда. К этому моменту ток снизился до 1,4 МА. В аналогичных условиях в лабораторных экспериментах с дейтериевым наполнением ток достигает максимума 1,38 МА к моменту 2,88 мкс после начала разряда.

Полученные результаты указывают на необходимость корректировки условий следующего взрывного эксперимента, планируемого с подобной плазмофокусной камерой. Во-первых, необходимо изменить секционированный ВРТ для уменьшения напряжения на входе в плазмофокусную камеру. Во-вторых, следует внести изменения в конструкцию камеры с целью увеличения электропрочности ее внутренних областей. Для этого предполагается опробовать несколько вариантов катодов типа «беличье колесо». Возможно, за счет этого удастся несколько снизить влияние шунтирующих пробоев.

### Заключение

Отработан метод подготовки и проведения экспериментов по запитке плазмофокусной каме-

ры от взрывомагнитного генератора. Проведен взрывной эксперимент с дейтерий-третиевым наполнением плазмофокусной камеры. Получен нейтронный выход, превышающий  $10^{12}$  нейтронов. На основании результатов эксперимента определены направления дальнейшей работы по доведению нейтронного выхода до  $10^{13}$  нейтронов.

### Список литературы

1. Mather J. W., Bottoms P. J. Characteristics of the Dense Plasma Focus Discharge. // *Phys. Fluids*. 1968. Vol. 11, № 3. P. 611–618.
2. Веретенников А. И., Даниленко К. Н. Средства диагностики однократного импульса излучения / А. И. Веретенников, К. Н. Даниленко. М.: АТ, 1999. С. 45.
3. Chernyshev V. K., Volkov G. I., Ivanov V. A. et al. Explosives Opening Switches for Fast-Operating Helical EMG // In: Proc. Ninth IEEE Pulsed Power Conference, 1993, Albuquerque, New Mexico, USA.
4. Брагин В. В., Глушихин В. В., Голубев В. И., Горбачев В. М., и др. Исследование анизотропии и временной зависимости спектра ДТ-нейтронов плазменного фокуса // ВАНТ, серия: «Физика ядерных реакторов» ТИЯС-ХІ. Специальный выпуск, 1997. С. 153–157.
5. Голубев В. И., Макеев Н. Г., Пащенко Е. С., и др. Исследование спектрального состава ДТ-нейтронов плазменного фокуса // Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, № 1, с. 18–21.