

УДК 533.952.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.3.6

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕГААМПЕРНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ КАМЕР ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

© Ю. В. Михайлов, И. А. Прокуратов, Б. Д. Лемешко,
А. К. Дулатов*, Т. А. Григорьев

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова
Россия, 127030 г. Москва, ул. Суцевская, 22.*

**Email: akdulatov@vniia.ru*

В работе описывается высоковольтная установка на основе генератора импульсных токов (ГИТ) и нагрузки в виде камеры плазменного фокуса (ПФ), через которую протекает периодический разряд с амплитудой тока ~ 1 МА и периодом ~ 10 мкс. Установка используется как источник импульсного нейтронного излучения и обеспечивает для нейтронов с энергией 2.5 МэВ уровень выхода $(5\div 8)\cdot 10^9$ нейтр./имп., для нейтронов с энергией 14 МэВ уровень выхода $(5\div 8)\cdot 10^{11}$ нейтр./имп., длительность нейтронного импульса $(30\div 60)$ нс.

Камера ПФ состоит из двух коаксиальных электродов, разделенных у основания изолятором, и является герметичным газонаполненным прибором. Межэлектродное пространство камеры ПФ заполняется дейтерием или смесью дейтерия с тритием. При передаче энергии от ГИТ в камеру ПФ в ней развивается разряд вблизи поверхности изолятора и формируется токоплазменная оболочка, которая в дальнейшем ускоряется вдоль электродов и сжимается на оси камеры в пинч. Камеры ПФ являются точечным источником импульсного нейтронного излучения наносекундной длительности.

Рассмотрены особенности устройства и работа установки с камерой ПФ. Определены основные характеристики ГИТ для нескольких конфигураций, минимальная собственная индуктивность установки составила 18 нГн, а максимальная амплитуда разрядного тока 1250 кА. Приведены результаты исследований работы камер ПФ различной конфигурации в составе установки. Показаны зависимости уровня выхода нейтронного излучения и ресурса работы камер от емкости ГИТ, варьируемой в диапазоне от 108 до 144 мкФ.

Ключевые слова: импульсный нейтронный генератор, камера плазменного фокуса, плазменный фокус, источник нейтронов, генератор импульсных токов.

Введение

Данная работа посвящена описанию импульсной высоковольтной (ВВ) установки с мегаамперным значением разрядного тока, используемой в качестве нейтронного генератора. Такие установки представляют собой генератор импульсных токов (ГИТ) [1] на основе конденсаторно-коммутаторных сборок, систему передачи энергии на общую нагрузку, газонаполненную электровакуумную камеру в качестве нагрузки (камера плазменного фокуса – камера ПФ), блоки питания и управления. Подобные установки обеспечивают генерацию импульсного нейтронного излучения с длительностью порядка $10\div 60$ нс [2], с энергией нейтронов 2.5 МэВ или 14 МэВ за счет реализации реакций ядерного синтеза в камере ПФ. Уровень выхода нейтронов при разрядном токе в ~ 1 МА лежит в области от 10^9 до 10^{12} нейтр./имп. [3] и определяется типом реализуемой реакции синтеза, конструкцией установки и камеры ПФ, режимами работы установки [4]. Применение импульсного нейтронного излучения в данном диапазоне представляет интерес при калибровке импульсной измерительной аппаратуры с наносекундным временным разрешением, при решении задач нейтронографии и изучении взаимодействия быстрых нейтронов с веществом [5–6].

ГИТ генератора состоит из параллельно подключенных ВВ конденсаторов, ВВ коммутаторов и токопередающих линий. Конденсаторы выбираются исходя из их максимальной запасаемой энергии, электропрочности и массогабаритных характеристик. Распространенные параметры одного ВВ конденсатора – это емкость в диапазоне единиц мкФ, рабочее напряжение ~ 20 кВ, вес в несколько десятков кг и габаритные размеры в несколько сотен мм. Для коммутации используются ключи на основе замыкания электродного промежутка плазменным образованием, поскольку такие системы позволяют пропускать разрядные токи в сотни кА. Используются коммутаторы газонаполненного типа, вакуумные разрядники, псевдоискровые коммутаторы и др. [7–8]. ВВ коммутаторы должны быть управляемыми, иметь минимальный разброс между срабатываниями (джиттер) и минимальную задержку срабатываний друг относительно друга, пропускать разрядные токи в сотню кА и стабильно работать на протяжении тысяч срабатываний [9]. Токопередающие линии проводят разрядный ток при срабатывании коммутаторов к общей нагрузке и выполняются в виде низкоиндуктивных ВВ кабелей или сплошных токопередающих шин. Токопередающие линии подключаются напрямую к электродам камеры ПФ или в более распространенном случае к токовому коллектору, в который устанавливается камера [10].

Второй частью импульсного генератора нейтронов является камера ПФ, используемая в качестве нагрузки [11]. Камера состоит из двух коаксиальных электродов сферической или цилиндрической формы [12–14], разделенных у основания изолятором. Межэлектродное пространство камеры ПФ заполняется газом низкого давления (дейтерий или дейтерий-третиевая смесь давлением единицы и десятки Торр), в котором протекает газовый разряд. При передаче энергии от ГИТ в камеру ПФ в ней развивается разряд вблизи поверхности изолятора и формируется токоплазменная оболочка (ТПО). В дальнейшем разрядный ток протекает от одного электрода к другому по скин-слою ТПО [15]. За счет больших токов в сотни кА, магнитное давление от пондеромоторной силы достаточно для движения и ускорения ТПО вдоль электродов, сопровождающихся сгребанием рабочего газа в ТПО. В определенный момент времени ускоренная ТПО сжимается на оси камеры в области над внутренним электродом и формируется пинчевое образование. Плотность и температура пинча превышают значения в ТПО на несколько порядков, в результате чего в плазме пинча протекают комплексные процессы на этапе его сжатия, стабильного существования и распада, приводящие к генерации импульсного нейтронного излучения в ходе реакций ядерного синтеза $D(d, n)He^3$, $D(t, n)He^4$ и $T(t, 2n)He^4$ (в зависимости от наполнения камеры – дейтерий или дейтерий-третиевая смесь). Время жизни пинча составляет десятки нс, а размеры – несколько мм [16], что делает из камеры ПФ фактически точечный источник импульсного нейтронного излучения наносекундной длительности.

В мировой практике разработаны установки с камерами ПФ, обеспечивающие выход нейтронов $10^{12} \div 10^{13}$ нейтр./имп. при токах $1,5 \div 2$ МА и выше [17–19]. Они являются стационарными массивными устройствами, занимающими лабораторные залы. Разработанная установка с разрядным током около 1 МА обеспечивает почти такой же уровень выхода нейтронов, но является значительно более компактным устройством, позволяющим проводить ее транспортировку в собранном и практически готовом к эксплуатации виде. Этого удается достичь, в частности, за счет минимизации индуктивности разрядного контура, оптимизации конструкции камеры ПФ и использования ВВ элементной базы с большой надежностью работы. Описываемый генератор состоит из пульта управления, модуля питания и управления, а также разрядного модуля, выполненного в едином корпусе размером $1\ 700 \times 700 \times 1\ 800$ мм и являющегося источником импульсного излучения в телесном угле 2π . Целью создания такого устройства являлась разработка надежной конструкции генератора, обладающего большим ресурсом работы и способным обеспечивать длительную работу без сложной настройки, технического обслуживания и сложностей в эксплуатации.

Конструкция генератора

В основе генератора лежит ГИТ на базе независимых конденсаторно-коммутаторных сборок. В качестве накопителей используются низкоиндуктивные импульсные конденсаторы с емкостью 9 мкФ каждый, рассчитанные на работу при напряжении до 25 кВ при периодическом разряде. В качестве коммутаторов применяются тиратроны типа ТДИ1-50к/45СН ввиду их небольшой задержки срабатываний в 100–200 нс, малого джиттера и возможности настройки в процессе эксплуатации. Заряд конденсаторов до рабочего напряжения осуществляется в течение нескольких секунд от источника мощностью 6 кВт через блоки зарядных резисторов. Каждый блок может отдельно отключаться от источника напряжения, так что суммарная емкость генератора варьируется от 9 до 144 мкФ. В статье приведены результаты исследования зависимости параметров нейтронного излучения камеры ПФ от вкладываемой энергии, варьируемой изменением емкости накопителя от 108 мкФ (12 сборок) до 144 мкФ (16 сборок). Управление запуском коммутаторов осуществляется через блок запуска путем одновременной подачи высоковольтных импульсов на запускные электроды тиратронов. При этом одновременность срабатывания коммутаторов крайне важна для обеспечения максимального dI/dt и формирования равномерной ТПО вокруг изолятора. Поэтому перед установкой тиратронов в генератор проведена их настройка с целью минимизации разброса их времен задержки, которое определено путем экспериментального измерения задержек в стенде с одним конденсатором 9 мкФ и короткозамыкающей нагрузкой при трех значениях зарядного напряжения – табл. 1. Максимальный разброс срабатывания тиратронов варьировался от 160 до 180 нс для зарядного напряжения U от 10 до 20 кВ соответственно. В дальнейшем при эксплуатации генератора ИНГ-105 при каждом срабатывании с помощью сигналов с поясов Роговского осуществляется контроль одновременности срабатывания тиратронов на цифровых осциллографах. Критерием хорошего срабатывания считается максимальный разброс срабатывания коммутаторов менее 250 нс на фронте первой половины тока периодического разряда через каждый коммутатор.

Для передачи энергии от конденсаторно-коммутаторных сборок в нагрузку использованы низкоиндуктивные токопередающие кабели, по шесть штук к каждому конденсатору (максимальный ток через кабель 13 кА). Всего 96 кабелей сходятся на общий токовый коллектор, который представляет собой две прямоугольные пластины из латуни толщиной 10 мм, разделенные многослойной полиэтиленовой изоляцией. В центре коллектора располагается крепление для камеры ПФ, катод – к внешнему электроду, анод – к внутреннему электроду. Анод камеры подключается к коллектору через тонкостенную мембрану из латуни, толщиной 1 мм, что позволяет обеспечить надежный электрический контакт и нивелировать воздействие импульсных механических нагрузок на элементы конструкции при срабатывании генератора.

Таблица 1

Времена задержки срабатывания тиратронов ТДИ1-50к/45СН

Номер U, кВ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	175	140	140	170	230	280	130	120	180	120	120	160	240	120	170	150
15	220	140	140	170	160	290	185	120	180	180	140	220	240	120	195	170
20	300	210	250	260	260	290	200	120	190	190	180	215	240	120	210	245

Внешний вид генератора ИНГ-105 и камеры типа ПФ3 приведены на *рис. 1*. Вес генератора составляет ~ 1 000 кг. Управление генератором осуществляет от пульта, подключенного через управляющий кабель длиной 30 м. Для обеспечения работы генератора используется модуль питания и управления, выполненный в виде стойки с электронными блоками.

В первую очередь на вышеописанном генераторе проведены работы с токовой закороткой вместо камеры ПФ, подсоединенной к коллектору, для определения основных электротехнических параметров генератора. При работе с максимальной запасаемой емкостью (144 мкФ) и зарядном напряжении 10 кВ, период разряда составил $T = (10.1 \pm 0.1)$ мкс. Из значений периода и затухания синусоидального сигнала определены собственные электротехнические характеристики ГИТ: омическое сопротивление, индуктивность и амплитуда разрядного тока ГИТ генератора, которые составили: сопротивление $R_0 = 2$ мОм; индуктивность $L_0 = 18$ нГн; амплитуда разрядного тока (при 10 кВ) $I_{\max} = 785$ кА.

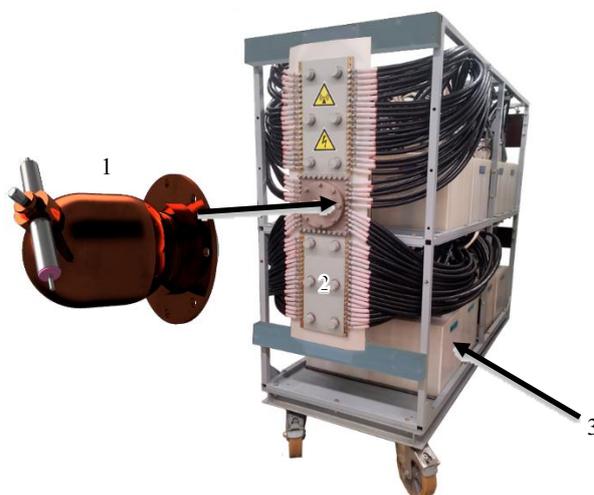


Рис. 1. Внешний вид разрядного модуля генератора ИНГ-105:
1 – камера типа ПФ3, 2 – токовый коллектор
(с установленной закороткой вместо камеры ПФ3), 3 – ГИТ.

В генераторе ИНГ-105 используется камера ПФ типа ПФ3, которая является комбинацией мейзеровской и сферической конструкций. Электроды камеры изготовлены из бескислородной меди. Катод у основания (вблизи изолятора) имеет форму полусферы, плавно переходящей в цилиндр диаметром 120 мм. Анод в стандартной конфигурации имеет сферическую форму с диаметром 60 мм и длиной 80 мм. При этом рабочее давление камер ПФ3 лежит в диапазоне от 20 до 40 Торр (D_2). Поскольку генератор ИНГ-105 позволяет варьировать запасаемую энергию за счет независимого отключения и подключения конденсаторно-коммутаторных сборок, то для согласования работы камеры ПФ3 с электротехническими параметрами генератора также использована модификация ПФ3 с увеличенным анодом диаметром 80 мм. Сравнение эффективности генерации нейтронов камерой ПФ3 с двумя модификациями анодов приведены далее в статье. Изолятор камеры ПФ3 имеет цилиндрическую форму и выполнен из керамики Al_2O_3 , толщиной рабочей области 6 мм. На катоде камеры расположен блок генератора газа на основе титанового газопоглотителя, который позволяет контролируемо выделять и поглощать рабочий газ (D_2 или DT) во внутренний объем камеры ПФ3 без ее разгерметизации [20]. На первых этапах работа с камерами ПФ3 проводится с использованием вакуумного вентиля, подключая камеру к вакуумному стенду для перезаполнения рабочим газом. В промышленных образцах камер ПФ3 после проведения первичных серий испытаний камера ПФ отпаивается и становится герметичной запаиваемой конструкцией. Управление давлением рабочего газа внутри камеры осуществляется с помощью блока генератора газа, который насыщается изотопами водорода.

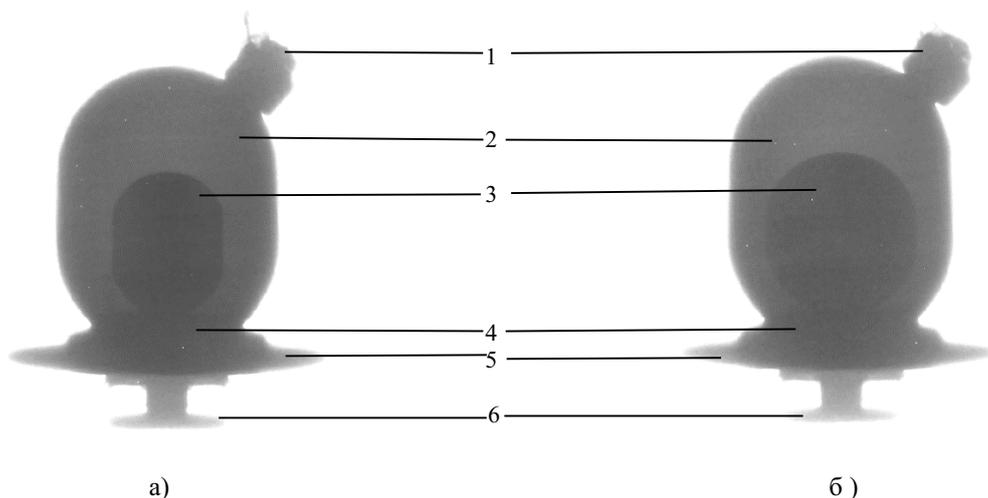


Рис. 2. Рентгеновские снимки камер типа ПФ3: а) анод 60 мм, б) анод 80 мм. 1 – блок генератора газа, 2 – катод, 3 – анод, 4 – область изолятора, 5 – контактная поверхность катода, 6 – контактная поверхность анода.

При переходе от закоротки к камере ПФ период разряда увеличивается за счет вклада индуктивности камеры – разрядный ток протекает по скин-слою ТПО, которая движется вдоль поверхности электродов, тем самым увеличивая индуктивность контура с протекающим током. Период разряда генератора с камерой ПФ3 составил $T = (13.5 \pm 0.2)$ мкс. Это приводит к увеличению суммарной индуктивности генератора с камерой до $L = 32$ нГн и уменьшению максимальной амплитуды разрядного тока до 600 кА (при 10 кВ). Таким образом, при увеличении зарядного напряжения генератора до предельно возможных значений 20–22 кВ (в основном напряжение ограничено электропрочностью емкостных накопителей) генератор позволяет обеспечивать разрядный ток через камеру ПФ до 1.2 МА. В следующем разделе приведены экспериментальные результаты работы камеры ПФ3 при мегаамперных токах с измерением выхода нейтронного излучения.

В дальнейших разделах статьи описаны экспериментальные исследования, проведенные с камерами типа ПФ3 в двух вариантах конструкции на генераторе ИНГ-105.

Экспериментальные результаты на камере ПФ3

На камере ПФ3 с анодом 80 мм и установленным вентилям для перезарядки камеры газом D_2 проведена серия из более чем 200 срабатываний на генераторе ИНГ-105. Каждое срабатывание сопровождалось регистрацией выхода нейтронного излучения и формы импульса нейтронов. Абсолютный выход нейтронов в 4π определялся по прибору ПИВН, работающему на основе активационного метода с использованием серебра природного состава. Форма импульса определялась по сигналу со сцинтилляционного детектора с временным разрешением не более 2.5 нс. Также с помощью высоковольтного делителя напряжения, подключенного к коллектору генератора, определялось время особенности t_{oc} (промежуток времени от начала протекания тока через камеру ПФ до сжатия ТПО в пинч). Характерные осциллограммы при срабатывании ИНГ-105 приведены на рис. 3.

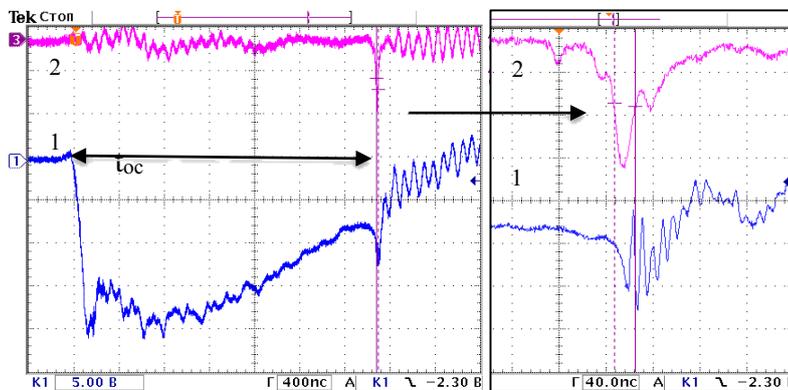


Рис. 3. Характерные осциллограммы при срабатывании генератора ИНГ-105 с камерой ПФ3: 1 – сигнал с высоковольтного делителя, 2 – сигнал со сцинтилляционного детектора.

Первые срабатывания камер ПФЗ в серии проводились с увеличением зарядного напряжения с 15 до 21 кВ и перезаполнением рабочим газом примерно каждые 10 срабатываний давлением 15, 19, 25 Торр. После выхода камеры ПФЗ на рабочий режим (~ 50 срабатываний) осуществлена серия из примерно 150 срабатываний в одном режиме (22 Торр, 21 кВ) с перезаполнением камеры D₂ каждые 15–30 срабатываний. Средний выход нейтронов в серии составил $Y_N = (0.61 \pm 0.02) \cdot 10^{10}$ нейтр./имп., а ОСКО – 21%. Результаты срабатываний приведены на рис. 4–5.

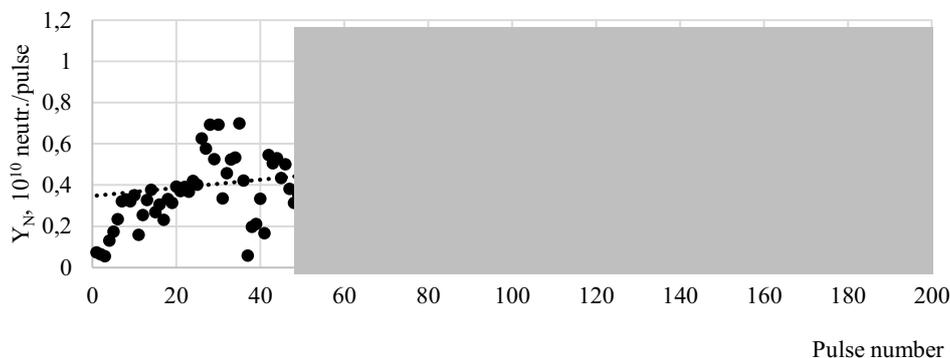


Рис. 4. Результаты срабатываний камеры ПФЗ с анодом 80 мм на генераторе ИНГ-105 (144 мкФ).

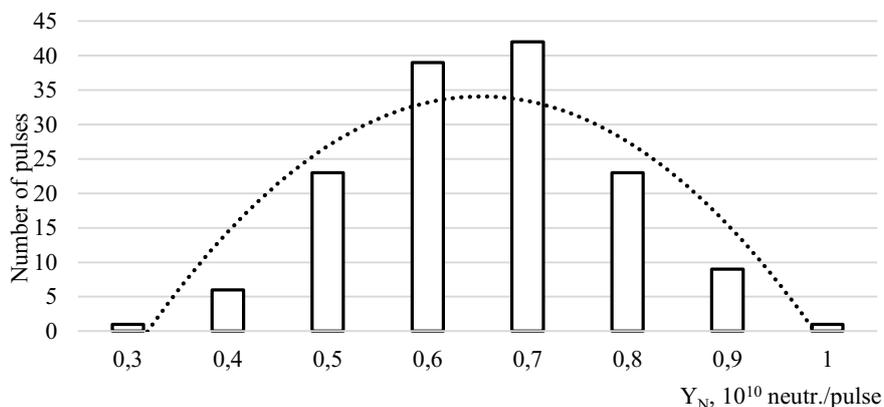


Рис. 5. Гистограмма распределения количества импульсов нейтронов по уровню выхода нейтронов камеры ПФЗ с анодом 80 мм на генераторе ИНГ-105 (144 мкФ).

После экспериментального достижения выхода нейтронов на генераторе ИНГ-105 и камере ПФЗ проведено изучение зависимости выхода нейтронов от вкладываемой энергии в камеру ПФ (т.е. запасаемой в ГИТ) путем варьирования числа подключенных конденсаторно-коммутаторных сборок. Для того, чтобы камера ПФЗ оставалась в согласованном режиме работы, число подключенных сборок варьировалось от 12 до 16 (емкость от 108 до 144 мкФ соответственно) с учетом варьирования уровня зарядного напряжения от 15 до 21 кВ. Это позволило получить зависимость выхода нейтронов от запасаемой энергии в накопителе в диапазоне от 16 до 32 кДж. При этом исследования проведены на камерах ПФЗ с двумя типами анодов. Результаты исследований приведены на рис. 6. Средний выход нейтронов увеличивается при росте энергии в ГИТ – при увеличении энергии примерно в два раза средний выход нейтронов увеличивается в 2.5 раза для камеры с анодом 80 мм и в 1.7 раз для камеры с анодом 60 мм. При этом для анода 60 мм средний выход нейтронов при относительно низком энергокладе (от 16 кДж) значительно больше, чем для анода 80 мм. При 32 кДж вкладываемой энергии от ГИТ средний выход для двух анодов практически выравнивается, однако также, ввиду наличия выбросов с выходом нейтронов, значительно превышающих средний, только для анода 60 мм, можно сделать вывод, что в целом использование анода 60 мм предпочтительнее с точки зрения получения максимального выхода нейтронов на генераторе. Максимальная эффективность генерации нейтронов для камеры ПФЗ с анодом 60 мм составила $\sim 7 \cdot 10^5$ нейтр./Дж, а для камеры с анодом 80 мм – $\cdot 10^5$ нейтр./Дж.

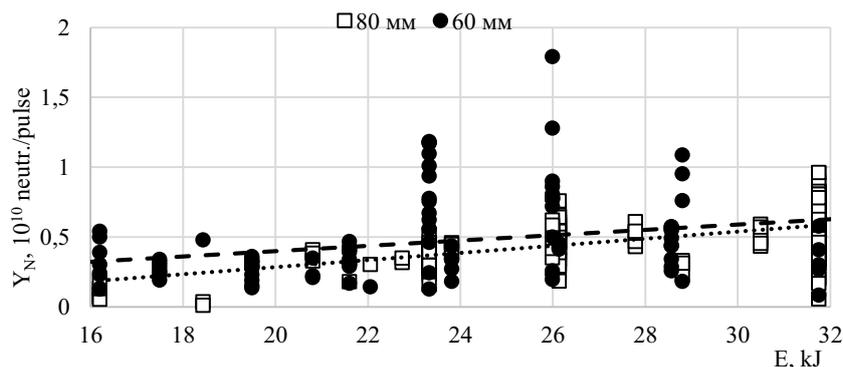


Рис. 6. Зависимость выхода нейтронов камеры ПФЗ с двумя типами анодов от энергии, запасаемой в ГИТ генератора ИНГ-105.

В заключительной части работы проведено исследование максимального достижимого уровня выхода нейтронов на камерах ПФЗ при работе с отпаянными конструкциями камер. В этом случае в качестве источника газа использован блок газогенератора, насыщенный изотопами водорода. Исследования проведены на камерах ПФЗ с блоком генератора газа, насыщенным D-T смесью. Это позволило экспериментально достигнуть уровня выхода нейтронов $5 \cdot 10^{11}$ нейтр./имп. и выше. Фактически температура газопоглотителя определяет количество выделяемого газа внутрь камеры, поэтому в работе проведено изучение зависимости выхода нейтронов камеры ПФЗ от мощности газогенератора (т.е. от тока, подаваемого на подогреватель в диапазоне от 2.75 А до 3.30 А) – рис. 7. Варьирование тока нагревателя в блоке генератора газа в диапазоне 2.75–3.30 А примерно соответствует варьированию давления D-T смеси в диапазоне от 7 до 25 Торр. После чего для оптимального режима работы проведена серия из 150 срабатываний в одном режиме (3.30 А / 21.5 кВ), в котором достигнут средний выход нейтронов с энергией 14 МэВ $Y_N = (0.50 \pm 0.01) \cdot 10^{12}$ нейтр./имп. и ОСКО 13%. Уровень накала 3.3 А соответствует давлению D-T смеси порядка 18 Торр. Все работы с D-T камерой ПФЗ проведены на ИНГ-105 с ГИТ 144 мкФ.

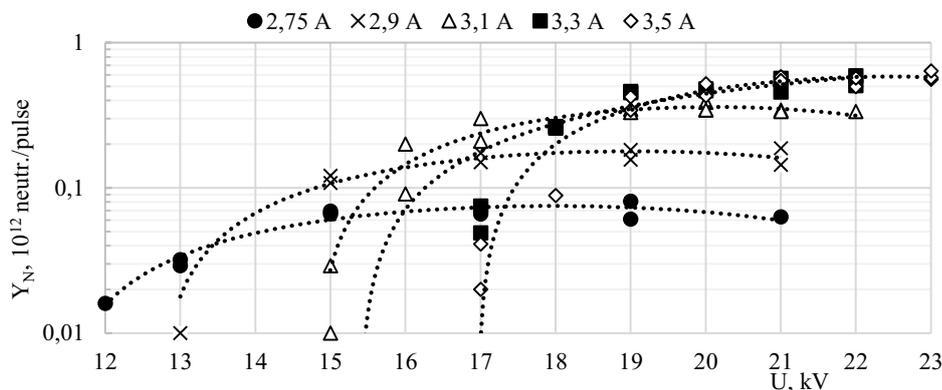


Рис. 7. Зависимость выхода нейтронов камеры ПФЗ (D-T) от зарядного напряжения генератора ИНГ-105 при емкости ГИТ 144 мкФ.

Хотелось бы отметить основной фактор, ограничивающий ресурс работы камеры ПФЗ. Как правило, выход данных камер из строя связан с частичным разрушением керамического изолятора, приводящим к электрическому пробое изолятора и его механическому разрушению. При движении ТПО и сжатии пинча протекает много разных физических процессов, влияющих на изоляторный узел камеры, в частности возникновение импульсных механических нагрузок в период жизни пинча и формирование направленных вдоль оси камеры плазменных струй [21], возникновение области с наведенным электрическим полем в пинче с напряженностью до сотен кВ/см [22], прямые и обратные ударные волны от сжатия ТПО [23] и др. Детальный анализ этих процессов требует глубокого теоретического осмысления и физического моделирования. Однако экспериментально это приводит к резкому выходу камеры типа ПФЗ из строя, сопровождающемуся разрушением изоляторного узла. Причем разгерметизации камеры не наблюдается, конструкция изоляторного узла сохраняет свою герметичность. Обычно камера выходит из строя после более чем 200 срабатываний в составе генератора. Такой вид разрушения характерен для камер ПФ, работающих при больших разрядных токах (ИНГ-105 – порядка 1 МА), в то время как камеры производства ВНИИА менее энергоемких генераторов с токами до 300 кА выходят из строя ввиду планового снижения уровня выхода нейтронов ниже допустимых значений, что можно связывать с загрязнением поверхностей и внутреннего объема камер.

Характерный вид разрушенного изолятора камеры ПФЗ приведен на *рис. 8*. Повышение надежности работы таких камер является одним из перспективных направлений теоретико-экспериментальных исследований.

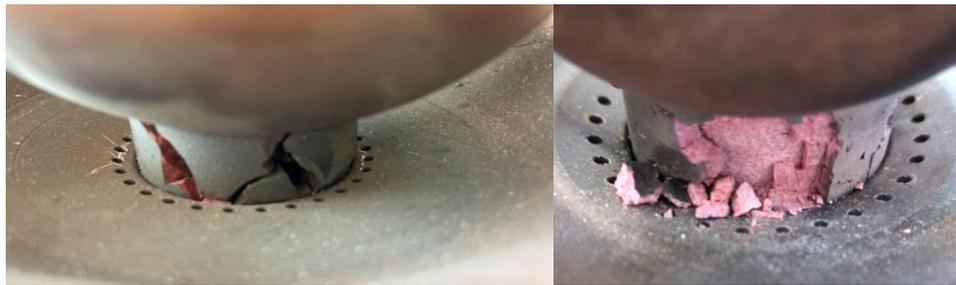


Рис. 8. Характерный вид разрушения изолятора камеры типа ПФЗ.

Выводы

В данной работе описаны основные составные части импульсного нейтронного генератора ИНГ-105, состоящего из шестнадцати конденсаторно-коммутаторных сборок на базе конденсаторов 9 мкФ и тиратронов типа ТДИ1-50к/45СН. Амплитуда разрядного тока генератора превышает 1 МА при разряде на нагрузку в виде камер ПФ типа ПФЗ.

Результаты экспериментальных исследований камеры ПФЗ в составе ИНГ-105 показали, что средний выход нейтронов (2.5 МэВ) составляет $(0.61 \pm 0.02) \cdot 10^{10}$ нейтр./имп. в серии из 150 последовательных срабатываний. Изучена зависимость выхода нейтронов от энергии, накапливаемой в ГИТ ИНГ-105 и передаваемой в камеру ПФ, а также зависимость выхода нейтронов от геометрических размеров анода камеры ПФЗ. На камере с анодом меньшего диаметра, 60 мм, средний выход нейтронов варьируется от $0.35 \cdot 10^{10}$ нейтр./имп. до $0.65 \cdot 10^{10}$ нейтр./имп. при запасаемой энергии ГИТ от 16 до 32 кДж. Максимальный выход нейтронов в отдельных срабатываниях составлял $1.8 \cdot 10^{10}$ нейтр./имп., что соответствует $7 \cdot 10^5$ нейтр./Дж.

Эксперименты с герметичной камерой ПФЗ с D-T наполнением и насыщенным блоком газогенератора показали возможность достижения среднего выхода нейтронов $(0.50 \pm 0.01) \cdot 10^{12}$ нейтр./имп. при запасаемой энергии в ГИТ 33 кДж.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mesyats G. A. Pulsed Power and Electronics / М.: Nauka. 2004. P. 704. ISBN 5-02-033049-3.
2. Lemesheko B. D., Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Dulatov A. K., Dadyrgulov A. A. Structure of neutron emission pulses in plasma focus chambers with deuterium-tritium filling // Plasma Physics Reports. Vol. 47. No. 7. Pp. 661–668. DOI: 10.1134/S1063780X21070114.
3. Mikhailov Yu. V., Lemesheko B. D., Prokuratov I. A. Experimental dependence of the neutron yield on the discharge current for plasma focus chambers filled with deuterium and deuterium-tritium // Plasma Physics Reports. 2019. Vol. 45. No. 4. Pp. 334–344. DOI: 10.1134/S1063780X19030073.
4. Saw S. H., Lee S. Scaling laws for plasma focus machines from numerical experiments // Energy and Power Engineering. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 65–72. DOI: 10.4236/epe.2010.21010.
5. Bogolubov Ye. P., Koltunov M., Lemesheko B., Mikerov V., Samosyuk V., Sidorov P. P., Yurkov D. Application of a plasma focus-based source for fast neutron and X-ray radiography // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A. 2009. Vol. 605. Pp. 62–64. DOI: 10.1016/j.nima.2009.01.128.
6. Gribkov V. A., Borovitskaya I. V., Demina E. V., Kazilin E. E., Latshev S. V., Maslayev S. A., Pimenov V. N., Laas T., Paduch M., Rogozhkin S. V. Application of dense plasma focus devices and lasers in the radiation material sciences for the goals of inertial fusion beyond ignition // Matter and Radiation at Extremes. 2020. Vol. 5. 045403. DOI: 10.1063/5.0005852.
7. Bykov Y. A., Feduschk V. F., Krastelev E. G., Sedin A. A. A compact high-current “field-distortion” gas switch with increased lifetime of sharp trigger electrode // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 1115. No. 2, 022016. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/2/022016.
8. Bochkov V. D., Bochkov D. V., Salynov I. A., Nikolaev V. N., Krestianinov A. S., Sokovnin S. Yu., Balezin M. E., Ponizovsky A. P. Study of the new generation of thyratrons with average switching power up to 0.5 MW: experience of application in electrophysical equipment // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. Vol. 15. No. 7. Pp. 894–897. DOI: 10.1134/S154757711807018X.
9. Dulatov A. K., Lemesheko B. D., Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Selifanov A. N. Features of application of PBY-47 controlled vacuum switches in high-current pulsed installations // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 57. No. 6. Pp. 692–696. DOI: 10.1134/S0020441214050133.
10. Scholz M., Miklaszewski R., Gribkov V. A., Mezzetti F. PF-1000 device // Nukleonika. 2000. Vol. 45. No. 3. Pp. 155–158.
11. Dulatov A. K., Lemesheko B. D., Mikhailov Yu. V., Prokuratov I. A., Selifanov A. N., Andreev D. A., Golikov A. V., Yurkov D. I. Pulsed neutron generators based on the sealed chambers of plasma focus design with D and DT fillings // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. P. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/653/1/012019.
12. Mather J. W. Dense plasma focus // Methods in Experimental Physics. 1971. Vol. 9. Pt. B. Pp. 187–249. DOI: 10.1016/S0076-695X(08)60862-5.
13. Filippov N. V., Filippova T. I., Vinogradov V. P. Dense high-temperature plasma in a non-cylindrical Z-pinch compression // Nucl. Fusion, Suppl. 1962. Vol. 2. Pp. 577–587.
14. Makeev N. G., Rummyantsev V. G. and Cheremukhin G. N. Physics and Technology of Pulsed Ionizing Radiation Sources for Studying Fast Processes / ed. by N. G. Makeev. VNIIEF, Sarov. 1996. P. 281.
15. Kwek K. H., Tou T. Y., Lee S. Current sheath structures of the plasma focus in the run-down phase // IEEE Transactions on Plasma Science, 1990. Vol. 18. No. 5. Pp. 826–830. DOI: 10.1109/27.62349.
16. Scholz M. Plasma-focus and Controlled Nuclear Fusion. The Henryk Neiwodniczanski Institute of Nuclear Physics, Poland. 2014.

17. Maslov V. V., Rumyantsev V. G., Basmanov V. F et al. A KPU-200 movable capacitor installation // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 57. Pp. 131–134. DOI: 10.1134/S0020441214010254.
18. Craciunescu T., Curuia M., Gherendi M. et al. Neutron attenuators prototype tests on the PF1000 plasma focus neutron generators // Romanian Reports in Physics. 2015. Vol. 67. No. 3. Pp. 1061–1073.
19. Scholz M., Karpinski L., Krauz V.I., Kubes P., Paduch M., Sadowski M. J. Progress in MJ plasma focus research at IPPLM // Nukleonika. 2012. Vol. 57. No. 2. Pp. 183–188.
20. Lemeshko B. D., Dulatov A. K., Mikhailov Yu. V. et al. Lifetime and shelf life of sealed tritium-filled plasma focus chambers with gas generator // Matter and Radiation at Extremes. 2017. Vol. 2. No. 6. P. 301. DOI: 10.1016/j.mre.2017.08.001.
21. Ananyev S. S., Dan'ko S. A., Myalton V. V., Zhuzhunashvili A. I., Kalinin Yu. G., Krauz V. I., Ladygina M. S., Marchenko A. K. Spectroscopic measurements of the parameters of the helium plasma jets generated in the plasma focus discharge at the PF-3 facility // Plasma Physics Reports. 2016. Vol. 42. No. 3. Pp. 269–277. DOI: 10.1134/S1063780X16030028.
22. Haines M. G. A review of the dense Z-pinch. Plasma Phys. Controlled Fusion. Vol. 53, 093001. 2011.
23. Rafique M. S. Compression dynamics and radiation emission from a deuterium plasma focus. PhD thesis. Nanyang: National Institute of Education Nanyang Technological University. 2000. Pp. 1–303.

Поступила в редакцию 17.09.2023 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.3.6

**PULSED MEGAMPERE NEUTRON GENERATOR
BASED ON PLASMA FOCUS CHAMBERS****© Yu. V. Mikhailov, I. A. Prokuratov, B. D. Lemeshko,
A. K. Dulatov*, T. A. Grigoriev***Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics
22 Sushevskaya Street, 127030 Moscow, Russia.***Email: akdulatov@vniia.ru*

The paper describes a high-voltage facility based on a pulsed current generator (PCG) and a load as a plasma focus chamber (PF) through which flows a periodic discharge with a current amplitude of ~ 1 MA and a period of ~ 10 μ s. The facility is used as a source of pulsed neutron radiation and provides for neutrons with an energy of 2.5 MeV an output level of $(5\div 8)\cdot 10^9$ neutrons per pulse, for neutrons with an energy of 14 MeV an output level of $(5\div 8)\cdot 10^{11}$ neutrons per pulse; neutron pulse duration is 30–60 ns.

The PF chamber consists of two coaxial electrodes separated by an insulator and it is a sealed gas-filled device. The inter electrode space of the PF chamber is filled with deuterium or a mixture of deuterium and tritium. When energy is transferred from the PCG to the PF chamber, a discharge develops in it near the insulator surface and a plasma-current sheath is formed, which further accelerates along the electrodes and contracts on the chamber axis into a pinch. PF chambers are a point sources of nanosecond pulsed neutron radiation.

The facility features and operation regimes with the PF chamber are considered. The main characteristics of the PCG for several configurations were determined, the inductance of the facility was 18 nH, and the maximum amplitude of the discharge current was 1250 kA. The results of the PF chambers various configurations operation are presented. The dependences of the neutron yield and the life-time of the chambers on the total capacitance of the PCG, which varies in the range from 108 to 144 μ F, are shown.

Keywords: pulsed neutron generator, plasma focus chamber, plasma focus, neutron source, pulsed current generator.

Received 17.09.2023 г.